

Entwicklung und Herstellung
von photonenzählenden
(Cd,Zn)Te-Pixel-Röntgendetektoren
für die medizinische Bildgebung

Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der

Fakultät für Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften

der

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

vorgelegt von

HEIKO MICHAEL BRAML

aus Ebermannstadt

2006

Vorsitzender des Promotionsausschusses: Prof. Dr. G. E. Schulz

Referent: PD Dr. M. Fiederle

Korreferent: Prof. Dr. A. Cröll

Tag der Beschlussfassung des Promotionsausschusses: 08. Februar 2007

Teile dieser Arbeit sind veröffentlicht in:

M. Fiederle, H. Braml, A. Fauler, J. Giersch, J. Ludwig, K. Jakobs: *Development of flip-chip bonding technology for (Cd,Zn)Te*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 51, No. 4, 2004, p. 1799-1802.

J. Ludwig, A. Zwerger, K.-W. Benz, M. Fiederle, A. Fauler, J.-P. Konrath: *X-ray energy selected imaging with Medipix II*, NIM A, Vol. 531, No. 1-2, 2004, p. 209-214.

M. Fiederle, H. Braml, A. Fauler, J. Giersch, J. Ludwig, G. Anton, K. Jakobs: *Development of flip-chip bonding technology for (Cd,Zn)Te*, IEEE 2003 Nuclear Science Symposium Conference Record, Vol. 1, 2004, p. 232-236.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Detektorsysteme in der medizinischen Bildgebung	5
2.1	Detektoren in der Röntgendiagnostik	5
2.1.1	Detektoren mit indirekter Konversion	6
2.1.2	Detektoren mit direkter Konvertierung	7
2.2	Detektoren in der Computer-Tomographie (CT)	8
2.3	Anforderungen an Halbleiterdetektoren für die Radiographie	11
3	Photonenzählende Ausleseelektronik	13
3.1	Medipix-1- und Medipix-2-Ausleseelektronikchips	13
3.1.1	Medipix 1	13
3.1.2	Medipix 2	15
3.2	Energiegewichtung	19
3.3	Zukünftige Entwicklungen	20
3.3.1	Analog-Digitalkonverter auf Pixelebene	20
3.3.2	Summierung	21
4	Anforderungen an das Detektormaterial und Eigenschaften von CdTe und CZT	23
4.1	Anforderungen an den Halbleiter	23
4.1.1	Geometrischer Aufbau und Funktionsprinzip	23
4.1.2	Wechselwirkung von Röntgenstrahlung im Halbleiter	25
4.1.3	Absorptionsvermögen	26
4.1.4	Energie zur Elektron-Lochpaarerzeugung	27
4.1.5	Bandlücke und spezifischer Widerstand	27
4.1.6	Ladungsträgertransporteigenschaften und Ladungssammlung	29
4.1.7	Homogenität, Zusammensetzung des Materials und strukturelle Defekte	31
4.1.8	Elektrische Kontakte	31
4.2	Mögliche Halbleitermaterialien	32
4.3	Materialeigenschaften von $CdTe$ und $Cd_{1-x}Zn_xTe$	33

4.4	Kristallstruktur	33
4.5	Thermodynamische Eigenschaften	35
4.6	Züchtungsverfahren	35
4.7	Detektoreigenschaften von CdTe und CZT	36
4.7.1	CdTe	36
4.7.2	(Cd,Zn)Te	37
4.8	Ausgangsmaterial für Detektorherstellung	38
5	Grundlagen zur Prozesstechnologie	43
5.1	Einführung	43
5.2	Anforderungen an den Flip-Chip-Prozess	44
5.3	Prozessauswahl	44
5.3.1	Übersicht	44
5.3.2	Eignung der Verfahren	48
5.3.3	Auswahl des metallurgischen Systems	49
5.3.4	Ergebnis der Prozessauswahl	51
5.4	Prozessgrundlagen	51
5.4.1	Oberflächenpräparation und Oberflächenbehandlung	52
5.4.2	Grundlagen zur Photolithographie	53
5.4.3	Dünnschichtlithographie	54
5.4.4	Dickschichtlithographie	55
5.4.5	Verfahren zur Schichtherstellung	58
5.4.6	Mikrogalvanik	60
5.5	UBM	62
6	Experimentelle Arbeiten	65
6.1	Prozessierung von CdTe-Pixel-Detektoren	65
6.2	Pixelmetallisierung	65
6.2.1	Photolithographie	67
6.2.2	Metalldeposition	69
6.2.3	<i>lift off</i>	69
6.2.4	Ergebnisse zur Herstellung der Pixelmetallisierung	70
6.3	Herstellung der Passivierungsschicht	70
6.3.1	Lithographieprozess mit Cyclotene 4024-40	71
6.3.2	Ergebnisse zur Passivierungsherstellung auf (Cd,Zn)Te	72
6.4	Aufbringen der UBM	73
6.5	Deposition des Lotmaterials	74
6.5.1	Ergebnisse zur Dickschichtlithographie auf (Cd,Zn)Te	76
6.5.2	Elektrolytische Abscheidung	77
6.5.3	Abscheidung durch Bedampfung	82

6.6	Rückseitenpräparation und Vereinzelung	82
6.7	Reflow der Lotabscheidungen	83
6.8	Hybridisierung durch Flip-Chip-Montage	84
6.9	Montage auf Chipboard	86
7	Das prozessierte Detektorsystem	89
7.1	Detektorgeometrie und Detektoraufbau	89
7.2	Inbetriebnahme und Kalibrierung des Auslesechips	91
7.3	Dunkelstrom	93
7.4	Detektorspannung	94
7.5	Linearität	95
7.6	Bildkorrektur	96
7.7	Objekte	98
7.8	Vergleich mit anderen CdTe- und (Cd,Zn)Te-Pixeldetektoren	102
8	Diskussion	105
9	Zusammenfassung	107
A	Pixelmetallisierung	117
B	Passivierung	119
C	Dickschichtlithographie mit AZ 4562	121
D	Mikrostrukturalvanik	127
E	Die Medipix1-Kollaboration	129
F	Die Medipix2-Kollaboration	131

1 Einleitung

In der nun über 100 Jahre andauernden Entwicklung von Röntgenapparaten wurden die Abbildungssysteme ständig verbessert, um die diagnostisch wichtige Bildinformation in der erforderlichen Bildqualität bei möglichst niedriger Strahlendosis für den Patienten darzustellen [Ewn98].

Vor etwa 30 Jahren wurden als weitere Verbesserung die ersten digitalen Detektoren in Form von CCD¹-Bildaufnehmern eingeführt. Jedoch konnten erst mit der in den letzten Jahren aufkommenen digitalen Radiographie die Nachteile von konventionellen Film-Folien-Systemen aufgehoben [Cho99] und ein beschleunigter Arbeitsablauf innerhalb des klinischen Routinebetriebes erreicht werden [Str02].

Das gemeinsame Ziel der interdisziplinären Zusammenarbeit von Physik, Ingenieur-, Materialwissenschaft und Medizin ist aus diesen Gründen die Reduzierung der Dosisbelastung, ohne die medizinische Qualität und den klinisch gerechtfertigten Einsatz der Untersuchungsmethoden einzuschränken. Ein Weg zur Dosisreduzierung besteht in der Verwendung eines direkt konvertierenden Halbleiters mit hoher Wechselwirkungswahrscheinlichkeit wie CdTe oder (Cd,Zn)Te².

CdTe und (Cd,Zn)Te bieten gegenüber den Detektormaterialien Silizium und Galliumarsenid den Vorteil, im Bereich der Energien für die medizinische Bildgebung (25 kV bis 150 kV) einen höheren Wirkungsquerschnitt und eine höhere Absorptionswahrscheinlichkeit zu besitzen. Gegenüber Germanium ist ein Betrieb ohne aufwendige Stickstoffkühlung bei Raumtemperatur möglich. Den Szintillationszählern sind CdTe und (Cd,Zn)Te aufgrund einer besseren Energieauflösung in einem breiten Energiebereich überlegen.

Untersuchungen von CdTe und (Cd,Zn)Te als Detektormaterialien für Röntgenstrahlung wurden u. a. von [Jam95], [Fie96], [Ricq00], [Ricq01], [Sch01] und [Mav02] durchgeführt. Der mögliche Einsatz von CdTe und (Cd,Zn)Te in der medizinischen Bildgebung wird in [Eis96], [Sbr00], [Sbr01] und [Cla02] dargestellt.

Neben der genannten Verwendung eines Detektormaterials mit hoher Wechselwirkungswahrscheinlichkeit kann die Qualität eines bildgebenden Systems auch durch die Verwendung einer

¹charge couple device

²im Folgenden auch als CZT bezeichnet

photonenzählenden Ausleseelektronik verbessert werden. Untersuchungen von [Gie02] führten bei Bewertung von möglichen Konzepten für die Umsetzung eines photonenzählenden Röntgendetektors zum Ergebnis, dass ein photonenzählender Hybrid-Detektor die Anforderungen der projektiven Röntgendiagnostik am wahrscheinlichsten erfüllen kann. Es konnte darüber hinaus von [Ber02] und [Nie02] gezeigt werden, dass Computertomographie mit einem photonenzählenden Pixel-Röntgendetektor möglich ist und durch die Energiediskriminierung bisher unzugängliche Information über die Absorption der Röntgenstrahlung im Körper des Patienten gewonnen werden kann, jedoch Bedarf an ein für die CT-Energien von 150 KV angepasstes Halbleitermaterial wie CdTe oder (Cd,Zn)Te besteht.

Die bisherigen Untersuchungen [Bar97] [Lin01] [Kri01] [Mai02] zu hybriden Pixel-Röntgendetektoren aus dem Halbleitermaterial CdTe und (Cd,Zn)Te zeigen, daß aufgrund des kritischen Verbindungsprozesses zwischen dem Detektor und dem Auslesechip häufig Pixel fehlerhaft arbeiten oder größere Bereiche bzw. mehrere Spalten der Pixelmatrix nach der Hybridisierung nicht mehr funktionsfähig sind.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es deshalb, die Frage der Herstellbarkeit von photonenzählenden Pixeldetektoren für die medizinische Röntgenbildgebung mit (Cd,Zn)Te als Detektormaterial zu untersuchen und eine an den Halbleiter (Cd,Zn)Te angepasste Technologie zur Herstellung und Hybridisierung der Pixeldetektoren zu verwirklichen.

Die Arbeit gliedert sich hierzu wie folgt:

In Kapitel 2 wird der heutige Einsatz von Flachbilddetektoren in der medizinischen Bildgebung vorgestellt. Es werden die unterschiedlichen Anwendungen im Rahmen der Röntgendiagnostik und der Computertomographie aufgezeigt und die daraus resultierenden Anforderungen an die Detektoren betrachtet.

Das Kapitel 3 beschreibt den Aufbau und die Funktion der Ausleseelektronik-Chips der Medipix-1- und Medipix-2-Kollaboration und legt die Möglichkeiten der Energiegewichtung dar. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung zukünftiger Entwicklungen im Bereich der photonenzählenden Ausleseelektroniken ab.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit den Forderungen an Detektormaterialien. Als Grundlage werden hierfür zunächst die Wechselwirkungen von Röntgenstrahlung im Halbleiter beschrieben und daraus die Anforderungen an die Halbleitermaterialien entwickelt. Im Anschluss daran erfolgt die Vorstellung der Eigenschaften von CdTe und (Cd,Zn)Te.

In Kapitel 5 werden die Grundlagen zur Prozesstechnologie erklärt und die Anforderungen an den Flip-Chip-Prozess formuliert. Das Kapitel befasst sich weiter mit der Prozessauswahl und der Betrachtung der dem Gesamtprozess zugrunde liegenden Einzelprozesse.

Kapitel 6 beschreibt die zur Herstellung der (Cd,Zn)Te-Pixel-Röntgendetektoren durchgeführten experimentellen Arbeiten.

Das Kapitel 7 präsentiert die bei der Detektorherstellung erzielten Ergebnisse und stellt die gemessenen Eigenschaften der (Cd,Zn)Te-Detektoren vor.

In Kapitel 8 werden die innerhalb der Arbeit erreichten Ziele diskutiert.

Den vorgestellten Kapiteln folgt die Zusammenfassung der Arbeit und der Anhang mit zusätzlichen Informationen und Prozessdaten.

2 Detektorsysteme in der medizinischen Bildgebung

2.1 Detektoren in der Röntgendiagnostik

Flachbilddetektoren ersetzen zunehmend die analogen und digitalen Film-Folien-Systeme in der Radiographie, Mammographie und der kardiologischen Angiographie. Die Flachbilddetektoren für die allgemeine Angiographie und der Fluoroskopie standen zu Beginn der vorliegenden Arbeit kurz vor der Markteinführung [Spa03].

Mit der Anwendung der digitalen Detektorsysteme soll eine große Anzahl von Zielen erreicht werden. Ein Wunsch besteht darin, alle klinisch wichtigen radiographischen Techniken bei reduzierter Patientendosis zu ermöglichen. Hierfür ist die möglichst vollständige Absorption der einfallenden Röntgenstrahlung im Detektor notwendig, um eine Umwandlung aller einfallenden Röntgenquanten in ein nutzbares Signal zu erreichen. Darüber hinaus soll eine abbildungsgetreue Aufnahme unmittelbar nach oder während der Belichtung in hoher Qualität auf einem Videomonitor vorliegen, um das Detektorsystem für die Echtzeitbildgebung z.B. in der Fluoroskopie einsetzen zu können und eine Analyse mit Bildbearbeitungsprogrammen zu ermöglichen. Für eine hohe Bildqualität muss das Detektorsystem elektrisches Rauschen vermeiden und eine hohe Orts- und Kontrastauflösung aufweisen.

Zur Bewertung der Effizienz bei der Umwandlung von Röntgenstrahlung in ein Bildsignal kann die physikalische Messgröße der *detective quantum efficiency* (DQE) benutzt werden. Sie ist als Signal-Rausch-Verhältnis am Detektorausgang zu Signal-Rausch-Verhältnis am Detektoreingang in Abhängigkeit von der Ortsfrequenz definiert:

$$DQE(f) = \frac{SNR^2(f)_{aus}}{SNR^2(f)_{ein}} \quad (2.1)$$

Die DQE beschreibt die Effizienz eines Detektorsystems bei der Detektion der in den Detektor einfallenden Röntgenquanten und hängt vom Detektor selbst, der Qualität der Röntgenstrahlung, der verwendeten Dosis und der zu detektierenden Ortsfrequenz ab [Kot02]. Die DQE liegt aufgrund von unvollständiger Ladungssammlung immer niedriger als eins.

Untersuchungen zu Bestimmungsmethoden des Quantenwirkungsgrades DQE zeigten jedoch, dass die bestimmten Werte je nach Methode um $\pm 15\%$ vom Mittelwert abweichen können (vgl. [Nei04]).

Weitere Kriterien für die Leistungsfähigkeit eines Detektorsystems sind der Dynamikumfang, der verwendbare Dosisbereich, die erzielbare Bildfrequenz, die Pixelgröße, das Verhältnis von aktiver zu passiver Fläche und die geometrischen Abmessungen des Detektors.

Die in den Detektor einfallenden Röntgenquanten werden in elektrische Signale konvertiert. Anhand der Art der Konvertierung der Röntgenstrahlung (direkt oder indirekt) können die Detektorsysteme in zwei verschiedene Technologien unterteilt werden.

Die indirekte Konvertierung ist ein zweistufiger Prozess. Im ersten Schritt werden die in den Detektor einfallenden Röntgenquanten in einem Szintillator genannten Leuchtstoff in Licht und in einem zweiten Schritt mittels Photodioden in elektrische Ladung umgewandelt.

Bei der direkten Konvertierung erfolgt die Umwandlung von Röntgenquanten in elektrische Ladung direkt mit Hilfe eines Halbleitermaterials.

Bei beiden Technologien wird das Bild durch die Ladungsverteilung über die einzelnen Bildelemente (Pixel) gewonnen. Die Auslesematrix besteht aus Schalttransistoren und Photodioden oder Kondensatoren. Das Ausmaß und die Anzahl der Pixel bestimmt die maximale Ortsauflösung und die Bildgröße des Detektors.

2.1.1 Detektoren mit indirekter Konversion

Die Detektorsysteme mit indirekter Konversion basieren überwiegend auf Szintillatoren wie Gadoliniumoxisulfid (Gd_2O_2S) oder Cäsiumjodid (CsJ). Diese Szintillatoren sind auf eine Photodiodenmatrix aus amorphem Silizium aufgebracht.

Das als Szintillator eingesetzte CsJ hat aufgrund seiner hohen Ordnungszahl Z von 55 und 53 eine hohe Absorption im gängigen Röntgenbereich von 45 kV bis 150 kV und wird für die Anwendung in der Radiographie mit einer typischen Dicke von $500\text{ }\mu\text{m}$ eingesetzt [Spa03]. Für das in der Mammographie verwendete Röhrenspektrum ist eine Dicke von typisch $100\text{ }\mu\text{m}$ bis $200\text{ }\mu\text{m}$ ausreichend.

Die Grundlage für die Auslesematrix kommerzieller Flachbilddetektoren ist das amorphe Silizium ($a-Si$). Die Schlüsseltechnologie zur großflächigen Herstellung und Dotierung von $a-Si$ wurde in den frühen 1990ern für die Produktion von Displays entwickelt. Das gegenüber Röntgenstrahlung unempfindliche $a-Si$ weist Halbleitereigenschaften auf und kann auf großen Flächen (> 40

cm x 40 cm) abgeschieden werden. Das ermöglicht die Herstellung von großen Matrizen aus Dünnschichttransistoren (TFT) und Dünnschichtdioden (TFD). Die Auslese der Matrix geschieht durch die Adressierung der TFT und der daraus folgenden Entladung der Kapazitäten der jeweils angesteuerten Pixel.

Die Größe und Distanz der Bildelemente bestimmt nur die maximale Auflösung von indirekt konvertierenden Detektorsystemen. Die effektive räumliche Auflösung wird aber gewöhnlich durch Lichtbeugungseffekte des Szintillators verschlechtert [Kot02].

Der TFT und die weitere Elektronik eines Pixels nimmt einen Teil der gesamten Pixelfläche ein. Dieser Anteil steht nicht mehr für die Photodiode zur Verfügung und bestimmt den geometrischen Füllfaktor (der das Verhältnis der Fläche der Auslesekapazität zur gesamten Pixelfläche angibt). Wird die Pixelgröße verkleinert, so verschlechtert sich der Füllfaktor und die Effizienz des Flachbilddetektors wird erniedrigt [Hem02].

Für die $CsJ/a - Si$ -Flachbilddetektorsysteme werden in der Literatur DQE-Werte von typisch $> 60\%$ angegeben. Nach [Her04] reicht der Quantenwirkungsgrad DQE bei a-Si-Flachdetektoren im Röhrenspannungsbereich von 45 bis 150 kV bis nahezu 80 %.

2.1.2 Detektoren mit direkter Konvertierung

Der Einsatz von Flachbilddetektoren mit direkter Konversion stellt hohe Anforderungen an das Konvertermaterial. Dieses muss über eine gute Röntgenabsorption wie z.B. Bleijodid, CdTe und (Cd,Zn)Te oder Quecksilberjodid verfügen und eine hohe Anzahl von Ladungsträgern bei der Konversion der Röntgenquanten erzeugen. Diese Ladungsträger sollten möglichst vollständig von der Ausleseelektronik erfasst werden können. Hierfür muss das Material über eine hohe Sammeleffizienz verfügen und nur einen geringen Dunkelstrom aufweisen.

Detektorsysteme mit direkter Konvertierung haben gegenüber der indirekten Konvertierung den Vorteil, dass die räumliche Auflösung nicht durch die Diffusion von sekundärem Licht beeinträchtigt wird. Darüber hinaus kann bei direkter Konvertierung ein Füllfaktor von nahezu 100 % erreicht und sehr kleine Pixelgrößen verwirklicht werden [Hem02].

In der medizinischen Bildgebung ist der Direktkonverter aus amorphem Selen ($a - Se$) am besten verstanden und in Flachbilddetektoren verbreitet [Spa03]. Das $a - Se$ lässt sich großflächig abscheiden und kann dadurch direkt auf $a - Si$ -Matrix aufgebracht werden.

Für die Anwendung in der allgemeinen Radiographie werden wegen der niedrigen Ordnungszahl des Selen ($Z = 34$) Schichten bis 1 mm Dicke benötigt [Spa03]. Ein von $a - Se$ absorbiertes Röntgenquant erzeugt einige 100 bis über 1000 Ladungsträger. Für eine hohe Sammeleffizienz

werden jedoch Feldstärken von mindestens $10 \frac{V}{\mu m}$ benötigt. D. h. für eine 1 mm dicke $a - Se$ -Schicht ist eine Hochspannung von 10 kV notwendig [Spa03]. Wegen der Höhe der benötigten Spannungen ist ein spezielles Pixeldesign zum Schutz der Schalttransistoren der Auslesematrix erforderlich.

In der Tab. 2.1 sind unterschiedliche Detektor-Technologien am Beispiel der Anwendung in der aktuellen digitalen Mammographie aufgezeigt.

	Senographie 200D	Senoscan	Giotto/ NUANCE	Selenia Novation DM 1000	MDM	FCR 5000MA	Embrace CR75/25
Hersteller	GE Medical Systems	Fischer Imaging (ab Nov. 2004: Philips)	IMS/Analogic; Planmed	Hologic/ Lorad; Hologic/ Siemens; AGFA/Lorad	Sectra	Fuji Vertrieb auch durch Siemens und Philips unter eigenem Label	AGFA
Detektor- material	Szintillator CsI:Tl	Szintillator CsI:Tl	Halbleiter aSe	Halbleiter aSe	Halbleiter Si	Speicherfolie	Speicherfolie
Signal- erzeugung	aSi	4 CCDs (Schlitz- detektor)	direkt im Detektor	direkt im Detektor	direkt im Detektor; Photonen- zähler		
Pixelgröße	100 μm	50 μm	85 μm	70 μm	50 μm	50 μm (Laserdurch- messer)	50 μm (Laserdurch- messer)
Orts- auflösung: Nyquist- frequenz	5 Lp/mm	10 Lp/mm	5,9 Lp/mm	7,1 Lp/mm	10 Lp/mm	10 Lp/mm	10 Lp/mm
Detektor- größe	19 x 23 cm^2	21 x 29 cm^2 (Scansystem)	24 x 30 cm^2 oder 18 x 24 cm^2	24 x 29 cm^2	24 x 26 cm^2 (Scansystem)	18 x 24 cm^2 24 x 30 cm^2	18 x 24 cm^2 24 x 30 cm^2
DQE [%] (bei 0 Lp/mm)	42	50	65	65	80	45	Keine Angabe
Speichertiefe	14 Bit	12 Bit	12 Bit	12 Bit 14 Bit		12 Bit intern 10 Bit extern	12 Bit
FDA	Januar 2000	Sept. 2001	nein	Okt. 2002	nein	Dez. 2003	nein

Tabelle 2.1: Digitale Mammographie-Systeme nach [SSK04] (Auswahl ohne Anspruch auf Vollständigkeit, Stand 4/2004).

2.2 Detektoren in der Computer-Tomographie (CT)

Zur Detektion von Röntgenstrahlung bestehen auch in der CT verschiedene Detektorkonzepte. In den CT-Anlagen bis zur dritten Generation wurden vor allem Gasdetektoren verwendet. Aufgrund der niedrigen Quanteneffizienz des Ionisationsprozesses ist eine große Höhe der Ionisationskammern notwendig, dadurch arbeiten die Detektoren richtungsselektiv [Buz04]. Diese nicht kompakte Detektorform erschwert jedoch den Aufbau von Mehrzeilensystemen. Mehrzeilensysteme werden deshalb aus kompakteren Detektoren aufgebaut.

Im heutigen klinischen CT-Einsatz sind Geräte Standard, die eine simultane Erfassung von bis zu 16 Objektschichten ermöglichen und damit zu einer Steigerung der Volumenaufnahmegeschwin-

digkeit führen. Hierzu werden speziell für die CT entwickelte, gekrümmte Detektoren mit einer immer höheren Zeilen- und Schichtzahl eingesetzt. Diese Geräte verfügen über Röntgenstrahl-Fächerwinkel von 52° und einen mit der Detektor-Zeilenanzahl ansteigenden Kegelwinkel [Kal03]. Durch den ansteigenden Kegelwinkel wird von der Fächerstrahlgeometrie in die Kegelstrahlgeometrie übergegangen. Für die Bildrekonstruktion müssen deshalb neue Rekonstruktionsalgorithmen verwendet werden.

Die meisten dieser heute eingesetzten Detektoren in CT-Anlagen basieren auf Szintillationskristallen, die Licht in Röntgenstrahlung umwandeln und über Photodioden detektieren. Die verwendeten Szintillatoren bestehen überwiegend aus Sinterkeramiken wie z.B. Gadoliniumoxysulfid (Gd_2O_2S) und wurden auf schnelle Abklingzeiten optimiert. Sie benötigen Streustrahlkollimatoren, um den Einfall von Störstrahlung zu reduzieren. Die Streustrahlraster reduzieren jedoch aufgrund der notwendigen Lamellendicke die hohe Absorptionseffizienz der Detektorelemente auf eine Gesamteffizienz von 50 % bis 80 % [Kal03] und setzen das Auflösungsvermögen durch die Toträume herab.

Die Multizeilendetektoren werden als Segment eines Zylindermantels angeordnet. Bei einer hohen Anzahl von Detektorzeilen muss die Neigung der zu rekonstruierenden Schicht in den Rekonstruktionsalgorithmen berücksichtigt werden, um daraus resultierende Bildfehler zu vermeiden. Die Implementierung einer echten Kegelstrahlrekonstruktion kann diese Artefakte vermeiden, ermöglicht jedoch auch den direkten Übergang zu Flächendetektoren [Buz04].

Ein Beispiel eines digitalen Flächendetektors für die Humanmedizin ist in [Buz04] gegeben. Die Pixelmatrix besteht aus 2048×2048 Sensoren mit je $200 \mu m$ Pixelgröße. Sie ist aus einer Szintillationsschicht (CsJ) auf amorphem Silizium mit einer Matrix aus Dünnfilmtransistoren (TFT) aufgebaut und deckt eine Fläche von $41 \text{ cm} \times 41 \text{ cm}$ ab. Die Niedrigkontrastauflösung der Flachbilddetektoren und das Ausmaß des Messfeldes bleiben zur Zeit jedoch noch hinter denen der diagnostischen CT zurück [Kal03].

Vorteile der Flächendetektoren sind jedoch die über weite Belichtungsbereiche lineare Dynamik und ein hoher Dynamikumfang sowie die exzellente Ortsauflösung [Buz04]. Der Dynamikbereich liegt aber bei den für die radiographischen Anwendungen entwickelten Flachbilddetektoren mit 12-14 Bit hinter denen der heutigen klinischen CT-Scannern mit 24 Bit zurück [Kal03].

Digitale Flachbilddetektoren werden momentan in experimentellen C-Bogensystemen und in Prototypen von echten Kegelstrahltomographen verwendet. Die Verwendung der Kegelstrahlgeometrie in Verbindung mit Flächendetektoren erfordert jedoch die Übertragung einer enorm großen Rohdatenmenge mit Schnittstellen hoher Bandbreite aus dem sich drehenden Abtastsystem in die Bildrekonstruktionsrechner für die Lösung des eigentlichen Rekonstruktionsproblems mit einer aufwendigen Rekonstruktionsmathematik [Buz04].

Die Prototypen der modernen Kegelstrahl-Computertomographen mit Flächendetektoren ermöglichen bisher unerreichbare isotrope Auflösungen von $140 \mu\text{m}^1$ und stoßen zusammen mit der fortschreitenden Röhrentechnologie in die Auflösungsbereiche der Micro-CT vor [Buz04].

Die für die Differenzierung von Weichgeweben notwendige Niedrigkontrastaufklärung kann jedoch ohne erheblichen Dosisanstieg nicht in gleicher Weise gesteigert werden wie die Ortsauflösung, da die Varianz des Bildpunktrauschens umgekehrt proportional zur 4. Potenz der Ortsauflösung ansteigt [Kal03].

Mit Absorberdicken von $400 \mu\text{m}$ bis $1000 \mu\text{m}$ erreichen die *CsJ/aSi*-Flächendetektoren zwar ähnliche Absorptionseffizienzen wie frühere CT-Scanner mit Xenondetektoren, sie weisen jedoch ein relativ langsames Abklingverhalten auf [Kal03]. Eine Verbesserung des zeitlichen Verhaltens durch den Übergang von *CsJ*- zu *Gd₂O₂S*-Szintillatoren würde wieder zu Auflösungsverlusten führen.

Der breite klinische Einsatz von CT-Scannern mit Flachbilddetektoren setzt deshalb eine Steigerung bei der Darstellung von Niedrigkontraststrukturen und die Erfüllung der durch die etablierten klinischen CT-Scanner gesetzten Standards voraus. Die in Tab. 2.2 aufgeführten Anforderungen müssen von solchen Detektorsystemen erfüllt werden.

Anforderung an das CT-Detektorsystem	Akzeptabler Wert
Linearität im gesamten Dynamikbereich	10^5 bis 10^6
Quantenabsorptionseffizienz	$> 90\%$
Geometrische Effizienz	80% bis 90%
Ansprech- und Abklingverhalten	Abklingkonstante $< 10\mu\text{s}$
Nachleuchten (100 ms nach Bestrahlungsende)	$< 0,01\%$
Strahlungsdrift (für die längstmögliche Scanzeit)	$\leq 0,5\%$
Elektronikrauschen im Vergleich zum Quantenrauschen	$\sigma_E \leq 0,5 \sigma_Q$
Materialhomogenität innerhalb Detektorelement	$> 99,99\%$
Ansprechverhalten aller Detektorelemente (nach optionaler Korrektur)	$< 0,1\%$ Differenz
Bearbeitbarkeit des Detektormaterials	$\pm 10\mu\text{m}$ Toleranz

Tabelle 2.2: Anforderungen an CT-Detektorsysteme (verändert nach [Kal03]).

¹Derzeitige klinische CTs erreichen Werte von $0,5 \text{ mm}$ isotroper Ortsauflösung, häufiger kommen jedoch Auflösungen im Bereich von $0,6 \text{ mm}$ bis $0,8 \text{ mm}$ zum Einsatz [Kal03].

2.3 Anforderungen an Halbleiterdetektoren für die Radiographie

Nach [Hoh01] werden die Eckdaten der Halbleiterdetektoren durch die unterschiedlichen Anforderungen in der medizinischen Diagnose bestimmt. Die wichtigsten Parameter für die Röntgendetektorsysteme sind hierbei die Größe des bildgebenden Sensors, die räumliche Auflösung, die Bildfrequenz, das Signal-Rausch-Verhältnis und die Langzeitstabilität.

Aufgrund der momentan noch unzureichenden Möglichkeiten zum Fokussieren von Röntgenstrahlung, müssen die bildgebenden Detektoren mindestens die Größe der zu untersuchenden Organe haben.

Auch die benötigte räumliche Auflösung hängt von der Art des zu untersuchenden Objekts ab. Sie wird in Linienpaaren pro Millimeter angegeben (lp/mm). Typische Größen sind nach [Hoh01] für Gewebestrukturen 1–2 lp/mm, für Knochenstrukturen > 3 lp/mm sowie > 5 lp/mm für Dentalmedizin und Mammographie. Die von einem Detektor erzielbare Auflösung wird im Wesentlichen von der Wechselwirkung der Röntgenquanten mit dem Halbleitermaterial, dem anschließenden Transport der erzeugten Ladungsträger und der Signalverarbeitung bestimmt. Prinzipiell können mit Halbleiterdetektoren hohe Auflösungen erreicht werden.

Neben der Detektorgröße und Ortsauflösung ist auch die zu erreichende Bildrate für die Echtzeitröntgenbildgebung von der Art der Untersuchung abhängig. Geläufige Werte für die Bildrate sind für die kardiologische Angiographie $30Hz$ ($60Hz$)², für die Fluoroskopie $15 - 30Hz$ ($6 - 12Hz$)³ und für die digitale Subtraktionsangiographie $2 - 8Hz$.

Für die Darstellung von kleinen Details mit niedrigem Kontrast werden in medizinischen Anwendungen hohe Signal-Rausch-Verhältnisse (signal-to-noise ratio (SNR)) benötigt, die von verschiedenen Faktoren und Einflüssen abhängen. Das Signal ist dabei proportional zur Strahlungs dosis, zur Größe des absorbierten Anteils der einfallenden Röntgenstrahlung und zur Empfindlichkeit. Deshalb soll ein Röntgendetektor die einfallende Röntgenstrahlung möglichst vollständig absorbieren und in ein nutzbares Bildsignal umwandeln [Spa03].

²Pediatristik

³um die Dosis der Röntgenstrahlung zu reduzieren

3 Photonenzählende Ausleseelektronik

3.1 Medipix-1- und Medipix-2-Ausleseelektronikchips

Innerhalb dieses Kapitels werden die in dieser Arbeit verwendeten Ausleseelektronikchips Medipix 1 und Medipix 2 kurz anhand ihres Aufbaus und ihrer Funktion vorgestellt und ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen gegeben. Eine umfassende Beschreibung des Medipix-1-Photon-Counting-Chips (PCC) findet sich in [Cam98] und [Bis98]. Für eine ausführliche Darstellung des Medipix-2-Auslesechips und dessen Betrieb sei auf [Llo01], [Con03] und [Zwe03] verwiesen. Die technischen Daten der beiden Auslesechips sind in Tab. 3.1 gegenübergestellt.

3.1.1 Medipix 1

Der photonenzählende Medipix-1-Auslesechip leitet sich aus den vorangegangenen Arbeiten der R&D-19-Kollaboration der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN) zu Hybrid-Detektoren für die Hochenergie-Teilchenphysik ab und kann mit unterschiedlichen Konversionsmaterialien hybridisiert werden. Der Chip wurde im Rahmen des Medipix-Projektes am CERN mit den Kollaborationspartnern Universität Freiburg, Universität Glasgow und dem INFN Pisa in SACMOS-1-Technologie¹ entworfen und hergestellt.

Die Gesamtfläche des 1.2 cm x 1.4 cm großen PCC beträgt 1.7 cm² bei einer aktiven Detektorfläche von 1.18 cm². Die aktive Fläche des Chips besteht aus einer Matrix von 64 x 64 quadratischen Pixeln mit einer Größe von 170 μm x 170 μm. Die Matrix verfügt darüber hinaus über eine zusätzliche Zeile von Dummy-Zellen, die den Leck- oder Dunkelstrom des Detektors misst und diesen von den Eingängen der anderen Auslesezellen subtrahiert.

¹1 μm Self-Aligned Contact Complementary Metal Oxide Semiconductor

Aufbau der Pixelzellen

Jede der in Abb. 3.1 schematisch dargestellten Auslesezellen der Matrix beinhaltet einen ladungsempfindlichen Vorverstärker mit Leckstromkompensation, einen Komparator mit einer extern einstellbaren globalen Schwelle und einen 15-Bit-Zähler. Darüber hinaus besitzt jede der Zellen ebenso ein fünf Bit großes Register, das die Schaltung einer Maskierung, eines Test-Eingangs und einer individuellen Schwelleneinstellung (über drei Bit) ermöglicht. Die Spanne der drei Bit zur lokalen Angleichung der Threshold wird durch einen extern gelieferten Strom bestimmt. Das Eingangsruschen der Pixelzellen beträgt $170 e^-$ rms. Bei dem kleinsten nominalen Threshold von $1400 e^-$ weisen die Zellen vor der Angleichung eine Verteilung der Thresholds von $350 e^-$ auf. Durch Angleichung kann die Abweichung bis hinab zu $80 e^-$ rms reduziert werden [Cam98].

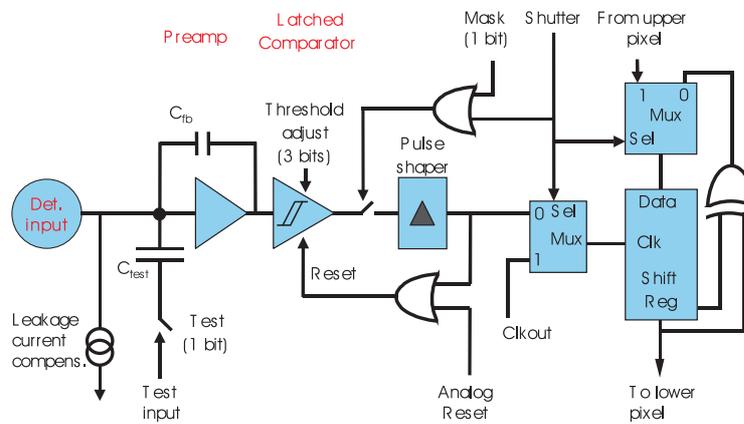


Abbildung 3.1: Blockdiagramm der Bildzelle (Pixel) des Medipix-1-Ausleseelektronikchips nach [Swz01] mit seinen Hauptbestandteilen: Ladungsempfindlicher Vorverstärker, Komparator und 15-Bit-Zähler mit der Umschaltmöglichkeit in den Betriebsmodus eines Schieberegisters.

Funktion der Pixelzellen

Die im Volumen des Konversionsmaterials über dem Pixelkontakt erzeugten positiven Ladungsträger werden über den Lotbump und den Pixelkontakt auf den ladungsempfindlichen Vorverstärker geleitet und das verstärkte Signal mit der am Komparator eingestellten Schwelle verglichen. Bei Überschreiten des eingestellten Schwellwertes sendet der Komparator bei *low*-Signal des *Shutters* dann einen Puls zum Takt des Zählers (counter). Bei *high*-Signal am *Shutter* wird die *feedback loop* des Zählers unterbrochen und durch einen externen Takt auf serieller Weise das Verschieben des Inhalts der Zähler möglich.

Jeder Vorverstärker einer Pixelzelle kann über den jeweiligen Bump-Bond seiner Pixelzelle die positiven Ladungsträger des verbundenen Detektorpixels oder durch das gesetzte Testbit Signale

eines externen Pulsers über eine Testkapazität aufnehmen. Bei Messungen zur maximalen Zählrate der Pixel konnten die Pixel ohne einen Verlust an zu registrierenden Ereignissen mit bis zu 2 MHz gepulst werden [Cam98].

Datenübertragung

Durch die in den Zählern verwendeten statischen Flip-Flops besteht keine Notwendigkeit für ein Refresh-Signal. Somit können die Daten langsam über große Zeiträume gesammelt werden oder vor der Auslese lange Zeit gespeichert bleiben.

Die Auslese der Daten geschieht in einem speziellen Modus des Medipix-1-Chips. Über das Shutter-Bit wird dieser zwischen dem Zählmodus und Datentransfermodus umgeschaltet. Der Betrieb der Datenleitungen kann lesend und schreibend erfolgen. Während dieser Zeit können jedoch keine Photonen gezählt werden.

Für das Auslesen der Zählstände werden die 15 Bit-Zähler jedes der 64 Pixel einer Spalte zu einem 64×15 Bit großen Schieberegister verbunden. Die Übertragung der Zählstände von jeweils 16 Spalten erfolgt, indem die Zählstände bitweise aus den sechzehn 64×15 -Bit-Schieberegistern auf einen 16-Bit-Bus verschoben werden. Durch die Verwendung eines 4fach-Multiplexers werden nacheinander alle vier 16-Spaltenblöcke ausgelesen. Für die Übertragung der Zählerstände aller 4064 Pixel, d.h. eines Bildes, werden damit $64 \times 15 \times 4$ Taktzyklen und bei einer maximalen Taktrate von 10 MHz entsprechend $384 \mu s$ benötigt.

Das Schreiben und Lesen der Konfigurationsregister, d.h. des Maskenbits, des Testbits und der drei Bits für die lokale Schwellenangleichung, erfolgt ebenfalls durch die Bildung eines gemeinsamen 64×5 Bit großen Schieberegisters innerhalb einer jeden Spalte. Auch die Übertragung wird über die 16 Datentransferleitungen und dem 4fach-Multiplexers in $64 \times 5 \times 4$ Taktzyklen in minimal $128 \mu s$ durchgeführt.

3.1.2 Medipix 2

Die Fortschritte in der CMOS-Technologie und die Erfahrungen mit der Anwendung des Medipix-1-Chips ermöglichten die Entwicklung und Herstellung eines Nachfolgechips. Dieser im Rahmen der Medipix-2-Kollaboration am CERN entstandene photonenzählende Auslesechip ist in $0.25 \mu m$ CMOS-Technologie gefertigt und hatte unter anderem die Verbesserung des Verhältnisses von aktiver zu nicht sensitiver Fläche als Voraussetzung für die Reihung von bis zu acht Detektorassemblies zum Ziel. Jedes Pixel auf dem Medipix-2-Chip ist $55 \mu m \times 55 \mu m$ groß und beinhaltet auf dieser Fläche rund 500 Transistoren.

Eigenschaften	Medipix 1	Medipix 2
Pixelgröße	170 μm x 170 μm	55 μm 55 μm
Matrixgröße	64 x 64 (66)	256 x 256 (258)
Pixelanzahl	4096	65536 > 90%
Abmessungen	12,25 mm x 13,91 mm	16,12 mm x 14,11 mm
Sensitive Fläche	1,183 cm^2	1,982 cm^2
Gesamtfläche	1,7 cm^2	2,3 cm^2
Si-Technologie	1 μm -SACMOS	0,25 μm
Leckstromkompensation	spaltenweise bis zu 10 nA pro Pixel	pixelweise bis +10 nA und -4 nA pro Pixel
Sensitivität	Löcher	Löcher und Elektronen
Anstiegszeit	150 ns	150 ns
Diskriminator	Energieschwelle	Energiefenster
Schwellencharakteristik	linear von 1400 - 7000 e^-	bis ca. $\pm 80000 e^-$
Zähler	15 Bit ohne Überlaufbit	13 Bit mit Überlaufbit
Maximale Zählrate pro Pixel	2 MHz	1 MHz
Auslese	seriell	seriell und (parallel)
Datenbus	16 Bit	32 Bit
Maximale Busfrequenz	10 MHz	100 MHz
Minimale Bildauslesezeit	384 μs	8,5 ms (266 μs)

Tabelle 3.1: Technische Daten der Medipix-1- und Medipix-2-Auslesechips nach [Con03], [Llo01], [Cam98] und [Bis98].

Durch die höhere Integrationsdichte konnten zusätzlich für jedes Pixel eine individuelle Leckstromkompensation und die Sensitivität gegenüber positiven und negativen Ladungsträgern sowie ein Diskriminator mit Energiefenster verwirklicht werden.

Die Pixel sind in einer Matrix aus 256 Spalten mit je 256 Zeilen angeordnet und erzeugen eine detektierende Fläche von 1.98 cm^2 , die 87% der Gesamtfläche des Medipix-2-Chips entspricht. Unterhalb der aktiven Matrix befinden sich dreizehn 8-Bit-DAC und die Ein-/Ausgabe-Logik des Chips. Über fünf seitlich angeordnete Wirebond-Pads können mehrere Medipix-2-Chips miteinander verbunden werden.

Die Elektronik auf einem einzelnen Medipix-2-Chip wird aus ca. 33 Millionen Transistoren aufgebaut. Die analogen und digitalen Schaltkreise des Chips arbeiten mit voneinander unabhängigen 2,2 V Spannungsversorgungen, die eine gesamte analoge Leistung von 500 mW erbringen müssen.

Aufbau einer Pixelzelle

Jeder Pixel des photonenzählenden Medipix-2-Chips hat eine maximale Zählrate von 1 Millionen Ereignissen in der Sekunde und besteht im wesentlichen aus den in den Abbildungen 3.2 und 3.4 dargestellten Komponenten:

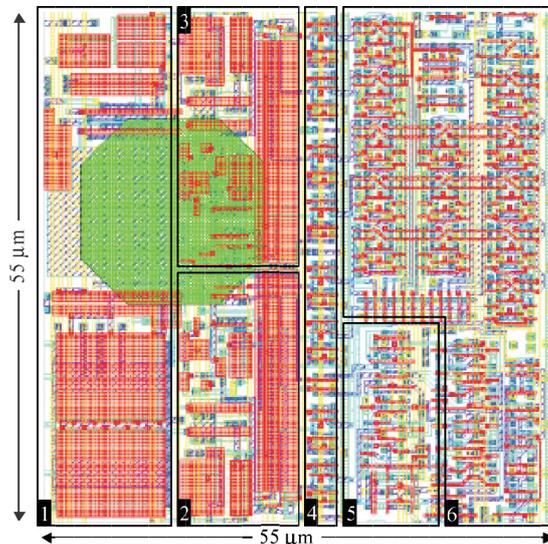


Abbildung 3.2: Medipix-2-Pixelzellen-Layout nach [Llo01]. 1: Vorverstärker. 2: Oberer Schwellendiskriminator. 3: Unterer Schwellendiskriminator. 4: 8-Bit-Konfigurationsregister. 5: Doppelte Diskriminatorlogik. 6: Schieberegister und Kontroll-Logik.

- Vorverstärker mit Leckstromkompensation
- zwei identischen Diskriminatoren
- doppelter Diskriminatorlogik (DDL)
- 8-Bit-Konfigurationsregister
- 13-Bit-Schieberegister mit Überlaufbit

Für den Vorverstärker der Medipix-2-Pixelzellen wurde aufgrund der besseren Unterdrückung von Substrat- und Spannungsversorgungsrauschen eine Verstärkerschaltung mit differenzierendem Eingang ausgewählt. Dieser ist gleichstromgekoppelt mit dem Halbleiterdetektor verbunden. Die globale Abklingzeit und der Arbeitspunkt für alle Vorverstärker kann innerhalb eines großen dynamischen Eingangsbereiches konfiguriert werden. Durch Setzen eines Test-Bits ist es möglich, ein externes Testsignal über eine pixelinterne 8fF-Kapazität wechsellspannungsggekoppelt an den Vorverstärker zu schalten.

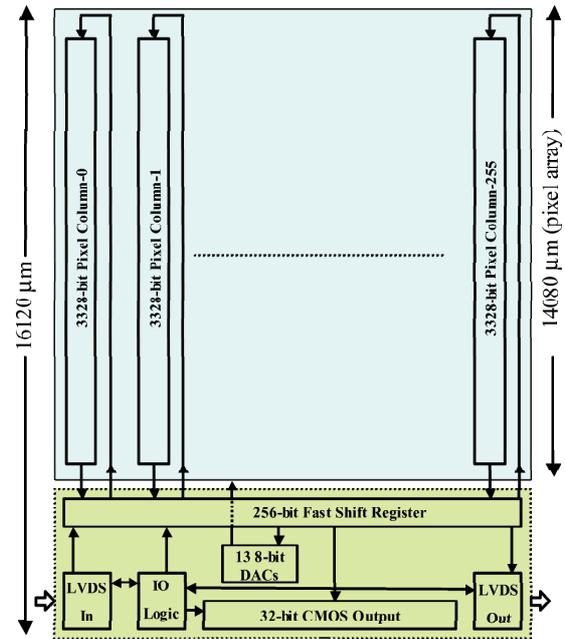


Abbildung 3.3: Schema des Datentransfers im Medipix-2-Chip nach [Llo01] mit Darstellung der 256 Spalten mit ihren 256 x 13-Bit-Schieberegistern (oben) und der Peripherie aus 13 8-Bit-DACs und dem 256-Bit-FSR (Fast Shift Register) zur Ein- oder Auslese von Matrixdaten.

Das Ausgangssignal des Vorverstärkers wird in zwei identische und unabhängige Diskriminatoren geführt. Das Energiefenster des Pixels wird durch die Differenz der zwei Schwellenwerte V_{thHigh} und V_{thLow} gebildet und bei einer dem Energiefenster entsprechenden Energie eines wechselwirkenden Photons zusammen mit der Diskriminatorlogik ausgewertet und der Zähler inkrementiert. Die globalen Schwellenspannungen können mit den DACs THL (untere Schwelle) und THH (obere Schwelle) eingestellt werden. Ein Feinangleich der intrinsisch leicht differierenden lokalen Schwellenwerte an den globalen Sollwert ist möglich.

Jede Pixelzelle kann über ein Shutter-Signal zwischen zwei Betriebsarten umgeschaltet werden. Im Zählbetrieb dient der Ausgang der Logik des Fenster-Diskriminators als Takt zur Inkrementierung des 13-Bit-Zählers, dessen dynamischer Bereich bis zu 8001 Ereignisse registrieren kann. Im Datenübertragungsmodus werden entweder die 8 Konfigurationsbits beschrieben oder die Daten der Zählerstände unter Verwendung der Zähler als 13-Bit-Schieberegister von Pixel zu Pixel verschoben. In Abb. 3.3 ist das Schema des Datentransfers aufgezeigt.

Die Auslese der 256 Spalten des Medipix-2-Chips mit ihren 256 x 13-Bit-Schieberegistern erfolgt entweder in einem seriellen Modus innerhalb von weniger als 9 ms (bei Verwendung eines maximalen Taktes von 100 MHz) oder parallel über einen 32-bit single-ended CMOS Bus innerhalb von 266 μs . Das Setzen der Konfigurationsregister in den Pixeln und das der Digital-Analog-Konverter der Peripherie wird immer seriell durchgeführt.

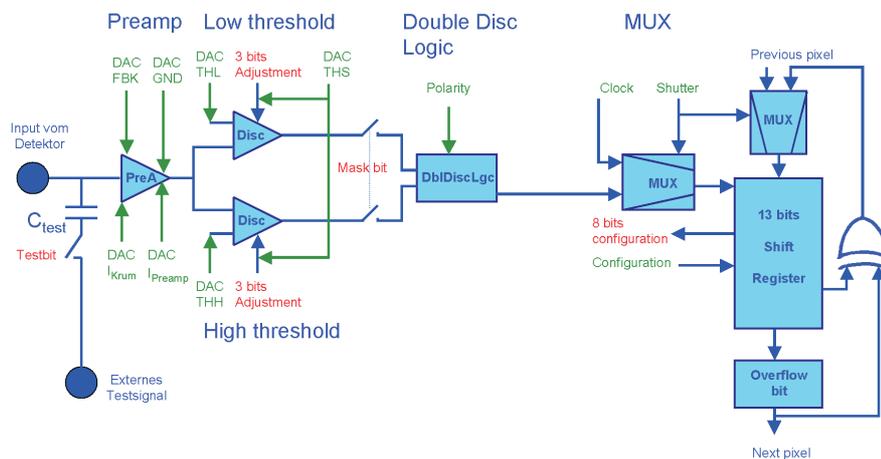


Abbildung 3.4: Blockdiagramm der Bildzelle (Pixel) des Medipix-2-Ausleseelektronikchips nach [Llo03]. Über die in allen Pixeln gültigen globalen Steuerparameter (grün) und die für jeden Pixel einzeln einstellbaren lokalen Steuerparametern (rot) kann der Auslesechip konfiguriert werden.

Die Kommunikation des Medipix-2-Chips mit dem MUROS-2-interface erfolgt im seriellen Modus mit 160 MHz und liefert somit einen Datentransfer von bis zu 160 Mbit/s. Mit einem parallelen Auslesesystem können Datentransferraten von 640 MBit/s über einen mit 20 MHz getakteten 32 Bit-Bus erreicht werden.

3.2 Energiegewichtung

Für eine Energiegewichtung muss das Detektorsystem die folgenden Anforderungen erfüllen: Bestimmung der Position und Energie jedes Röntgenphotons, Einordnung der Photonenergie in den entsprechenden Kanal innerhalb jeden Pixels, Erhöhung des Zählers, welcher der Energie des einfallenden Röntgenphotons im Pixel entspricht.

Aufgrund der Energiefensterung mit zwei Schwellen muss die Energiegewichtung durch aufeinanderfolgende Messungen unter konstanten Bedingungen emuliert werden [Kar04]. Zum Ausgleich des inhomogenen Ansprechverhaltens der Pixelschwellen ist für beide Schwellen ein Angleich durch Schwellenmasken notwendig. In Abhängigkeit von der Qualität der Korrekturmaske wurde eine kleinste Kanalbreite von 2 bis 3 keV erreicht [Kar04]. Einschränkungen der Energiegewichtung ergeben sich vor allem durch Verlust an Energieinformation aufgrund von Detektoreffekten. Vor allem das *charge sharing* führt zur falschen Gewichtung von gezählten Röntgenphotonen.

Bereits bei der Pixelgröße von $55\ \mu\text{m}$ des Medipix-2-Chips ist die mittlere Ladungsausdehnung bei einem $300\ \mu\text{m}$ dicken Si-Detektor im Verhältnis zum Pixelausmaß so groß, dass die Ladungsausbreitung in der Mehrzahl der Fälle eine Rolle spielt [Kar04]. Dennoch kann am Beispiel eines Objektes aus Wasser und PMMA² (s. Abb. 3.5) mit der Energiegewichtung eine erfolgreiche Steigerung des Signal-Rauschverhältnisses um den Faktor 2.2 erzielt werden [Kar04].

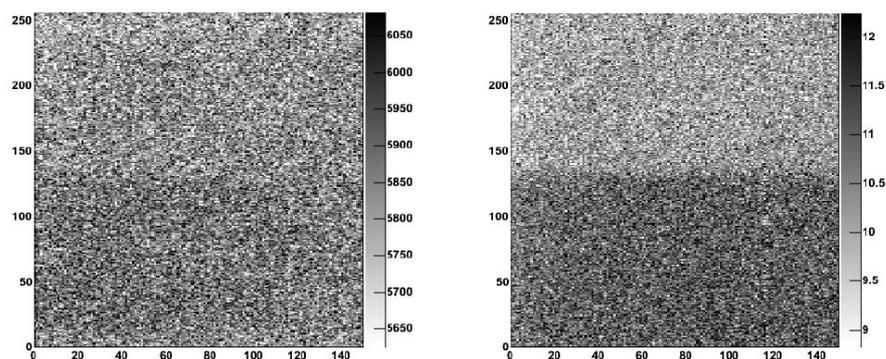


Abbildung 3.5: In der linken Abbildung ohne Energiegewichtung zeigt das Messobjekt aus Wasser und PMMA einen schlechteren Kontrast als in der rechten Darstellung mit Energiegewichtung. Das Signal-Rauschverhältnis konnte mit der Energiegewichtung um einen Faktor 2.2 verbessert werden [Kar04].

²PMMA und Wasser weisen in Abhängigkeit von der Photonenergie überschneidende Absorptionskoeffizienten auf

3.3 Zukünftige Entwicklungen

3.3.1 Analog-Digitalkonverter auf Pixelebene

Die separate Herstellung von Detektor und Ausleseelektronikchip bei den hybriden Pixel-Detektoren erlaubt die Nutzung aktueller CMOS-Prozesstechnologie für die Si-Ausleseelektroniken. Dadurch ist es nach Simulationen von [Bel00] möglich, über die Zählung der einzelnen Photonen hinauszugehen und auch ihre Energie mittels Analog-Digital-Konvertern (ADC) auf Pixelebene zu erfassen. Dazu wird die durch ein Photon in einem Pixel deponierte Energie verstärkt und integriert, um in einer für den ADC auswertbaren Spannung oder verarbeitbaren Strom vorzuliegen.

Liegt ein vom Vorverstärker geliefertes Signal über dem Rauschniveau, löst es einen Puls aus, der die Analog/Digital-Konvertierung des Vorverstärkersignals triggert. Schnelle digitale Ausleseschaltkreise sind die Voraussetzung dafür, dass das nächste auf den Pixel treffende Photon verarbeitet werden kann. Die digitale Auslese muss gleichzeitig zur Aufnahme eines Bildes durchgeführt werden. Deshalb ist eine Elektronik notwendig, die Ereignis für Ereignis ausliest. An die untersuchten ADC-Elektroniken wurden die folgenden Anforderungen bei einer Herstellung in einem $0,25\ \mu\text{m}$ CMOS-Digital-Prozess mit sechs Metallisierungen gestellt [Bel00]:

- 4-Bit-ADC im Pixel (Pixelausmaße maximal $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$)
- aktive Matrixfläche von $1\ \text{cm} \times 1\ \text{cm}$ mit ca. 10000 Pixel
- typ. angenommene Konversionsrate von 10^6 Photonen pro s pro mm^2
- Photonenrate von 10^4 pro Pixel pro s bei Konversionszeit von ca. $1\ \mu\text{s}$
- maximale Leistungsaufnahme von $10\ \mu\text{W}$ pro Pixel-ADC

Für die Realisierung der Pixel-ADC wurden von [Bel00] drei verschiedene Architekturen untersucht, die die oben beschriebenen Anforderungen erfüllen. Sie unterscheiden sich jedoch hauptsächlich in ihren für die Konvertierung benötigten digitalen Schaltkreisen und in der resultierenden Geschwindigkeit und Linearität beim Konvertieren.

Die Weiterentwicklung solcher Schaltkreis-Architekturen in Bezug auf die Konversionsgeschwindigkeit, Leistungsaufnahme und den Flächenverbrauch werden in kurzer Zeit zur Realisierung des Analog-Digital-Konverters auf Pixelebene und dadurch zu energieaufgelösten photonenzählenden Röntgen-Pixel-Detektoren führen.

3.3.2 Summierung

Beim Entwurf und Betrieb von Pixel-Röntgendetektoren muss das Verhältnis von Detektordicke zur Pixelgröße berücksichtigt werden. Die durch Wechselwirkung eines Röntgenquantens mit dem Halbleiter erzeugte Wolke aus Elektronen-Lochpaaren, kann sich während der Ladungsträgerdrift zu den Pixelelektroden so weit ausdehnen, dass sie sich auf mehrere benachbarte Pixel aufteilt. Das Ausmaß der Ausdehnung steht dabei im direkten Zusammenhang mit der Driftzeit, die von der Ladungsträgermobilität und der zurückgelegten Strecke der Ladungsträger abhängt.

Bereits bei einer CdTe-Detektordicke von 1 mm wurde von [Chm04] bei niedrigen Biasspannungen eine schlechte Ladungssammlung mit einem Medipix-2-Chip aufgrund von *charge sharing* zwischen den $55\ \mu\text{m} \times 55\ \mu\text{m}$ großen benachbarten Pixeln beobachtet.

Um die in einem Halbleiterdetektor deponierte Energie bei lateraler Ausdehnung der Ladungsträgerwolken im Bereich der Pixeldurchmesser korrekt auswerten zu können, muss die Auswirkung des *charge sharing* reduziert oder aufgehoben werden.

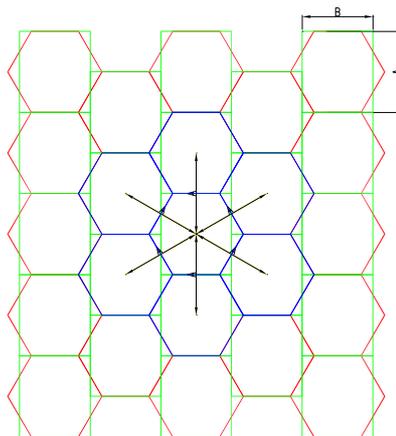


Abbildung 3.6: Vorgeschlagenes Detektorlayout nach [Llo01] zur Erzeugung einer homogenen Umgebung durch Nutzung von hexagonalen Pixeln mit gleichen Abständen zu allen Nachbarn.

Dafür werden von [Llo01] ein im Layout veränderter Detektor und eine erweiterte Ausleseelektronik vorgeschlagen. Das Detektorlayout soll dabei - wie in Abb. 3.6 dargestellt - hexagonale Pixel aufweisen und die Pixelelektronik einen Austausch des Diskriminator-Ausgangspulses mit den Nachbarn ermöglichen. Dadurch bestünde die Möglichkeit, die in den Nachbarn verarbeiteten Anteile der Ladungsträger dem Pixel mit dem größten Anteil der vom Röntgenquant erzeugten Ladungen zuzuordnen und somit die Summe der Signale aller gesammelten Ladungsträger korrekt mit der globalen Schwelle zu vergleichen.

4 Anforderungen an das Detektormaterial und Eigenschaften von CdTe und CZT

4.1 Anforderungen an den Halbleiter

Durch ihre gesteigerte Leistungsfähigkeit und ihre Verfügbarkeit ist in den letzten Jahren das Interesse an der Nutzung von Halbleiterdetektoren mit großer Bandlücke stark angewachsen. Sie ermöglichen aufgrund ihrer großen Bandlücke eine hohe Auflösung, kleine Bauart, niedrigen Stromkonsum, Einsatz innerhalb einer großen Betriebstemperaturspanne, Unempfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern und materialabhängig eine gute Strahlungsfestigkeit [Ger95].

Für die Detektion von Röntgenstrahlung müssen jedoch die eingesetzten Halbleitermaterialien bestimmten Anforderungen genügen. Sie sollen z.B. eine hohe Detektionseffizienz ermöglichen, einen niedrigen Leck- oder Dunkelstrom aufweisen, über eine gute Ladungssammlung und hohe Ladungsträgerbeweglichkeiten verfügen und ein stabiles Verhalten zeigen [Ger95]. Diese Forderungen erwachsen aus dem Prinzip der Strahlungsdetektion und sollen hier, beginnend mit dem zu Grunde liegenden Aufbau und Funktionsprinzip von planaren Halbleiterdetektoren, näher betrachtet werden.

4.1.1 Geometrischer Aufbau und Funktionsprinzip

Ein planarer hybrider Halbleiter-Pixeldetektor besteht im allgemeinen aus einem dünnen Einkristall. Dieser ist auf einer Seite mit einer flächigen Metallisierung bedeckt, die den elektrischen Rückseitenkontakt bildet.

Die gegenüberliegende Fläche (Vorderseite) des Halbleiters ist mit einer strukturierten Metallisierung versehen, deren einzelne Teilflächen als Pixelkontakte bezeichnet werden und in ihrer Gesamtheit die Pixelmatrix bilden. Die Größe und die Abstände der Pixelkontakte bestimmen zusammen mit weiteren Materialparametern des Halbleiters das maximale Ortsauflösungsvermögen des Detektors und liegen häufig in der Größenordnung von einigen Zehner- μm bis wenigen Hundert- μm . Aufgrund der Verwendung von separaten Ausleseelektronikchips steht bei diesen

direktkonvertierenden Halbleiter-Pixeldetektoren - im Gegensatz zu den Flachbilddetektoren auf Basis von a-Si - die gesamte Pixelfläche mit Ausnahme eines schmalen Zwischenraumes zu den benachbarten Pixeln für den Pixelkontakt zur Verfügung. Dadurch wird ein sehr hoher geometrischer Füllfaktor erreicht und nahezu die gesamte Pixelfläche kann zur Ladungssammlung beitragen. Die Abb. 4.1 zeigt den Querschnitt eines Halbleiter-Pixel-Röntgendetektors in einer Skizze.

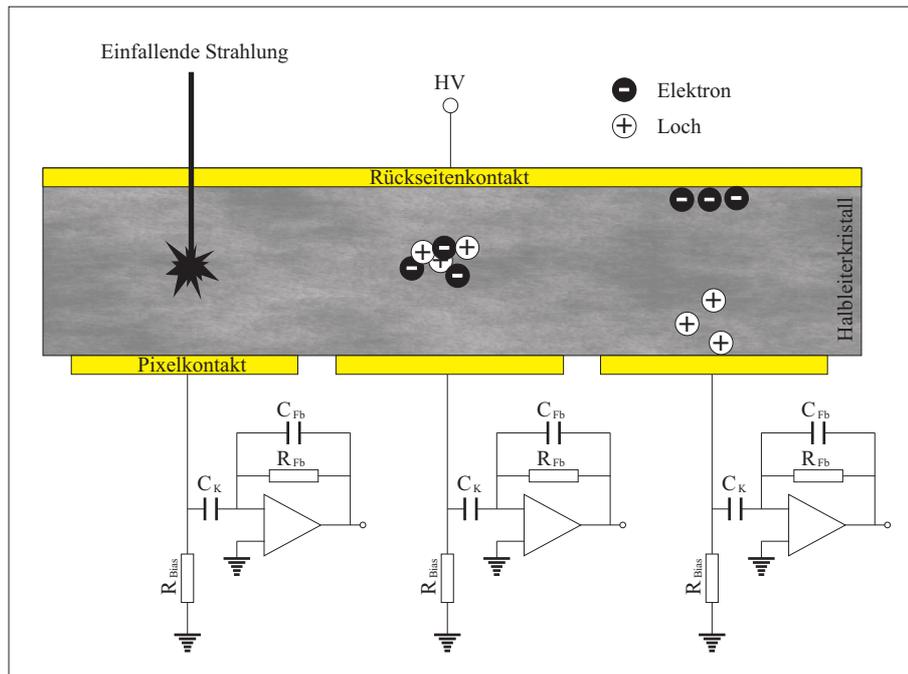


Abbildung 4.1: Prinzip eines Halbleiter-Pixel-Röntgendetektors und Blockschaltbild für die Auslese mit ladungsempfindlichen Vorverstärkern.

Auf den Pixeldetektor einfallende Röntgenstrahlung (siehe linkes Pixel in Abb. 4.1) führt über Wechselwirkungen von Röntgenquanten mit dem Festkörper des Halbleiters zur Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren (siehe mittleres Pixel in Abb. 4.1). Eine an die Kontakte des Detektors angelegte Spannung erzeugt ein elektrisches Feld, welches die erzeugten Ladungsträger zu den elektrischen Kontakten transportiert (siehe rechtes Pixel in Abb. 4.1). Die Bewegung der Elektronen und Löcher im Halbleiter induziert in den Elektroden des Detektors einen elektrischen Ladungspuls, der proportional zur absorbierten Energie ist und von einer nachgeschalteten Ausleseelektronik verarbeitet werden kann.

Für einen geeigneten Ablauf dieser Vorgänge sind bei den Halbleitern die nachfolgenden physikalischen Prinzipien, Eigenschaften und Prozesse besonders relevant.

4.1.2 Wechselwirkung von Röntgenstrahlung im Halbleiter

Die Photonen der Röntgenstrahlung wechselwirken über magnetische und elektrische Felder mit den geladenen Bausteinen der Atome eines Halbleiter-Detektormaterials. Bei den in der medizinischen Röntgen-Bildgebung auftretenden Photonenenergien (< 200 KeV) überwiegen hierbei die Wechselwirkungen mit der Elektronenhülle der Absorberatome und es finden hauptsächlich die folgenden vier Arten von Wechselwirkung statt: Photoelektrische Absorption (Photoeffekt), kohärente (Rayleigh-) Streuung, inkohärente (Compton-) Streuung, Paarbildungseffekt.

Bei der **photoelektrischen Absorption**¹ (Photoeffekt) wird die gesamte Energie eines einfallenden Röntgenphotons auf ein Hüllenelektron (Photoelektron) des Detektormaterials übertragen und das Röntgenphoton dann vollständig absorbiert, wenn die Energie des Röntgenphotons E_γ die Bindungsenergie E_b des potentiellen Photoelektrons übersteigt. Das aus dem Prozess resultierende Photoelektron besitzt nach Absorption die um die Bindungsenergie des Elektrons verminderte Energie des absorbierten Röntgenquants. Diese kinetische Energie wird durch mehrfache Wechselwirkungen mit dem umgebenden Halbleiter-Gitter unter Erzeugung von vielen Elektronen-Lochpaaren wieder abgegeben.

Da die gesamte Energie des eingefallenen Röntgenphotons durch den photoelektrischen Effekt im Detektor deponiert wird, kann die ursprüngliche Energie des Röntgenphotons festgestellt werden. Dadurch ist die photoelektrische Absorption der ideale Prozess für die Messung der Energie eines Röntgenphotons und die dominierende Wechselwirkung bei Energien unterhalb einiger hundert keV.

Die **Rayleigh-Streuung**² (kohärente Streuung) tritt auf, wenn Materieteilchen eine zur Wellenlänge der Strahlung kleine Abmessung haben. Die Streuung von Röntgenphotonen findet an allen Elektronen eines Atoms durch Anregung von Dipolschwingungen ohne Energieübertragung an das Atom statt (elastischer Stoß). Die Schwächung der Röntgenstrahlung erfolgt durch die Richtungsänderung eines Teiles der Strahlung.

Der **Compton-Effekt**³ (inelastische Röntgenstreuung) beschreibt die Streuung von vor allem höherenergetischen Röntgenphotonen an freien oder schwach gebundenen (quasifreien) Elektronen der Atomhülle. Das Röntgenquant stößt dabei mit einem Elektron der Atomhülle zusammen und übergibt einen Teil seiner Energie an das anschließend emittierte Compton-Elektron. Das Röntgenquant wird gestreut und fliegt in veränderter Richtung (Streuwinkel Θ) weiter. Da das Compton-Elektron das Atom verläßt, handelt es sich beim Compton-Effekt um einen ionisierenden Prozess. Bei den in der medizinischen Röntgenbildgebung verwendeten Energien spielt

¹von Heinrich Hertz 1887 entdeckt und 1905 von Albert Einstein quantitativ erklärt

²nach John Rayleigh benannte Streuung elektromagnetischer Strahlung

³von Arthur Compton 1922 entdeckte Frequenzänderung bei der Streuung von elektromagnetischer Strahlung

der Compton-Effekt vor allem für die Streuung der Röntgenstrahlung am menschlichen Körper eine dominierende Rolle. Da durch den Compton-Effekt nur ein Teil der Energie von Compton-gestreuten Röntgenphotonen deponiert wird, können diese über weitere Comptonstreuungen oder über photoelektrische Absorption mehrfach wechselwirken. Vor allem bei Energien über 100 keV besteht eine größere Wahrscheinlichkeit dieser Mehrfachwechselwirkungen über den Compton-Effekt (vgl. [Ger95]).

Beim **Paarbildungseffekt**⁴ erfolgt eine vollständige Umwandlung der Energie eines Röntgenquants im Coulombfeld eines Atomkerns in ein Elektron-Positron-Paar, d.h. die Energie des Röntgenquants wird in Masse umgewandelt und dominiert die Absorption von hochenergetischer Röntgenstrahlung. Nach Abgabe der kinetischen Energie des während der Paarbildung erzeugten Positrons rekombiniert dieses unter Aussendung der Annihilationsstrahlung⁵ mit einem Elektron.

Die Paarbildung ist für den durch Röntgenröhren abgestrahlten Energiebereich innerhalb der Röntgenbildgebung nicht relevant, sie ist jedoch für die Detektoren der Positron-Emissions-Tomographie (PET) wichtig. Dies ist vor allem für Detektoren in PET-CT-Kombinationsgeräten, die eine simultane Messung von PET- und CT-Bildern in gleicher Patientenlage ermöglichen, ein interessanter Aspekt.

4.1.3 Absorptionsvermögen

Eine der wichtigsten Voraussetzungen für den Betrieb eines Halbleiterdetektors ist eine effiziente Wechselwirkung von Atomen mit der einwirkenden Röntgenstrahlung. Hierzu ist eine hohe Kernladungszahl (Z) notwendig. Diese geht in den Wirkungsquerschnitt der beschriebenen Wechselwirkungsprozesse mit den in der Tab. 4.1 aufgezeigten Zusammenhängen ein.

Wechselwirkungsart	Zusammenhang
photoelektrische Absorption	$\sigma_{PE} \propto Z^n E_\gamma^{-\frac{7}{2}} \quad (4 < n < 5)$
kohärente Streuung	$\sigma_R \propto \frac{Z^2}{E_\gamma^{1,9}}$
inelastische Streuung	$\sigma_{CE} \propto \frac{Z}{E_\gamma}$
Paarbildung	$\sigma_P \propto Z^2 \ln E_\gamma$

Tabelle 4.1: Einfluss der Kernladungszahl Z auf den Wirkungsquerschnitt der Wechselwirkungsprozesse für Röntgenstrahlung im Halbleiter.

Mit steigendem Z erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung zwischen den einfallenden Photonen und dem Detektormaterial und damit die Absorptionswahrscheinlichkeit. Wie

⁴1932 von Carl Anderson entdeckt

⁵bei der Paarvernichtung auftretende Strahlung

in der Tabelle 4.1 ersichtlich, geht Z in den Wirkungsquerschnitt der photoelektrischen Absorption als Z^n mit n zwischen 4 und 5 ein. Ihr Wirkungsquerschnitt wächst deshalb mit steigender Kernladungszahl Z sehr viel schneller an als der Compton-Wirkungsquerschnitt oder der Paarbildung-Wechselwirkungsquerschnitt.

Dadurch sind Halbleiter mit einer hohen Kernladungszahl als Absorptionsmaterialien besonders begünstigt. Mit ihnen können im Vergleich zu schwach absorbierenden Materialien kleinere Detektordicken bei gleich hoher Wechselwirkungswahrscheinlichkeit verwirklicht werden.

4.1.4 Energie zur Elektron-Lochpaarerzeugung

Durch die Wechselwirkung der Röntgenstrahlung werden die für die Strahlungsdetektion benötigten Elektronen-Lochpaare erzeugt und über die externen Schaltungen ausgewertet.

$$N_0 = \frac{E}{\epsilon} \quad (4.1)$$

Für Röntgenstrahlung wurde anhand von Experimenten eine Proportionalität der Anzahl der erzeugten eh -Paare N_0 zur Energie der wechselwirkenden Röntgenstrahlung festgestellt (siehe obige Gleichung). Die Proportionalitätskonstante ist vom verwendeten Halbleitermaterial abhängig und gibt die Energie ϵ zur Erzeugung eines eh -Paares⁶ an, die in der Größenordnung von einigen eV liegt. Durch die Anzahl der erzeugten Elektronen-Lochpaare ist die statistische Grenze der Energieauflösung festgelegt [Ger95]. Sie wird jedoch durch weitere limitierende Faktoren beeinflusst, die im Zusammenhang mit der Bandlücke, dem elektrischen Widerstand und den Ladungsträgertransporteigenschaften des Halbleitermaterials stehen und in den folgenden Abschnitten dargelegt werden.

4.1.5 Bandlücke und spezifischer Widerstand

Der Aufbau von Halbleitern hat die Gemeinsamkeit, dass die Entfernung der Atome zueinander zu einem Abstand des Valenzbandes vom Leitungsband von etwa 1 bis 2 eV führt und die Fermi-Energie E_F innerhalb der Bandlücke, d.h. in der verbotenen Zone liegt. Halbleiter zeigen deshalb bei einer Temperatur von 0 Kelvin keine Eigenleitung der Elektronen, das Leitungsband ist leer. Jedoch können bei Raumtemperatur durch thermische Anregung Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband gelangen und zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen. Das angeregte Elektron hinterlässt dabei im vollen Valenzband ein Loch. Zusammen mit dem Elektron bildet es ein eh -Paar.

⁶electron-hole

Die Wahrscheinlichkeit p der thermischen Generation eines eh -Paares innerhalb einer bestimmten Zeit kann nach [Kno99] über die folgende Beziehung mit der materialcharakteristischen Proportionalitätskonstante C , der Boltzmannkonstante k und T als absolute Temperatur bestimmt werden:

$$p(T) = CT^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (4.2)$$

Die Wahrscheinlichkeit der thermischen Anregung ist nach der oben stehenden Beziehung stark vom Verhältnis der Bandlückengröße zur absoluten Temperatur abhängig. Für die Detektoranwendung bei Raumtemperatur werden deshalb ausreichend große Bandlücken benötigt, um niedrige Leckströme bei Anlegen der zur Felderzeugung notwendigen Spannung zu erzielen und damit ein möglichst geringes Rauschen im Detektorbetrieb zu erreichen. Für das Anlegen eines hohen elektrischen Feldes muss ein elektrischer Widerstand von $> 10^9 \Omega \text{ cm}$ durch das Detektormaterial erbracht werden. Hierfür wird neben der großen Bandlücke auch eine niedrige intrinsische Ladungsträger-Konzentration benötigt.

Ein intrinsischer Halbleiter enthält im Vergleich zur Anzahl der thermisch erzeugten Ladungsträger wenige Verunreinigungen. Theoretisch werden alle Elektronen in seinem Leitungsband durch thermische Anregung verursacht und ihre Anzahl ist gleich der Anzahl der Löcher im Valenzband. Die minimale intrinsische Ladungsträgerkonzentration n_i ist über die effektiven Zustandsdichten N_C, N_V und den Energieniveaus E_C, E_V an der Leitungs- und Valenzbandkante nach der folgenden Gleichung berechenbar [Fie96]:

$$n_i = \sqrt{n \cdot p} = \sqrt{N_C \cdot N_V} \exp\left(-\frac{E_C - E_V}{2kT}\right) \quad (4.3)$$

Der spezifische Widerstand ρ des Halbleiters kann über die Anzahl der Elektronen n und Löcher p , den Beweglichkeiten der Elektronen μ_n und der Löcher μ_p und der Elementarladung q mit nachfolgender Gleichung (links) bestimmt werden.

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_h)} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (4.4) \quad (4.5)$$

Die Proportionalität der Konzentration der Ladungsträger wird mit der oben stehenden Gleichung (rechts) mit dem Bandabstand E_g , der Boltzmannkonstante k und der Temperatur T beschrieben. Um die thermisch verursachten Ströme und die daraus resultierende Beeinträchtigung der Energieauflösung durch Rauschen zu vermeiden, werden für Detektoranwendungen Halbleiter benötigt, deren Bandlücke größer als $1,4 \text{ eV}$ ist [Schb95]. Zur Erzeugung einer ausreichend hohen Anzahl von Elektronen-Lochpaaren ist jedoch eine niedrige Bandlücke von $< 5 \text{ eV}$ notwendig, da sich bei einem Anwachsen der Bandlücke die Anzahl der erzeugten Elektronen-Lochpaare verringert.

Ein als Detektormaterial geeigneter Halbleiter benötigt aus den genannten Gründen eine Bandlücke zwischen den angeführten Werten, um eine genügend große Anzahl von eh -Paaren zu erzeugen und damit eine niedrige statistische Variation und ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis zu erreichen [Ger95].

Eine weitere wichtige Voraussetzung für ein Detektormaterial liegt in guten Transporteigenschaften für die durch die Wechselwirkung erzeugten eh -Paare.

4.1.6 Ladungsträgertransporteigenschaften und Ladungssammlung

Der **Ladungstransport** erfolgt im Halbleiter (überlagert von zufälligen Bewegungen aufgrund thermischer Einflüsse) durch die Drift innerhalb eines elektrischen Feldes und durch Diffusion zum Ausgleich unterschiedlicher Ladungsträgerdichten.

Werden die e^- im Leitungsband und die Löcher im Valenzband als freie Partikel betrachtet, so haben sie eine mittlere kinetische Energie von $E = \frac{3}{2}kT$. Demnach beträgt ihre thermische Geschwindigkeit $\approx 10^7 \frac{cm}{s}$. Da jedoch die freien Teilchen durch Donatoren, Akzeptoren oder Phononen im nicht perfekten Kristallgitter gestreut werden, reduziert sich bei einer typischen mittleren Stoßzeit (Relaxionszeit) τ_c von $\approx 10^{-12}$ s die freie Weglänge auf $\approx 10^{-5}$ cm.

Herrscht in einem Halbleiter ein elektrisches Feld, so wirkt auf die Elektronen eine Kraft $F = -qE$. Setzt man die Beschleunigung, die ein Elektron in einem niedrigen bis moderaten elektrischen Feld zwischen zwei Kollisionen erhält, mit dem Impuls gleich, so ergibt sich die links stehende Gleichung:

$$-qE\tau_c = m_n v_n \quad (4.6) \quad v_n = - \left(\frac{q\tau_c}{m_n} \right) E = -\mu_n E \quad (4.7)$$

Durch Umstellung nach der Driftgeschwindigkeit v_n wird die rechts stehende Gleichung erhalten, aus der die direkte Proportionalität der Driftgeschwindigkeit eines Elektrons zur Magnitude des vorhandenen elektrischen Feldes ersichtlich wird. Der in Klammern stehende Ausdruck ist die Mobilität der Elektronen und wird mit μ_n bezeichnet. Die Mobilität besitzt die Einheit $\frac{cm^2}{Vs}$ und ist von der effektiven Masse der Ladungsträger sowie der mittleren Zeitspanne τ_c zwischen zwei Kollisionen abhängig.

Die direkte Proportionalität aus der Gleichung 4.7 zwischen der Driftgeschwindigkeit v und der Stärke des elektrischen Feldes ist für starke E-Felder nicht mehr gegeben. Bei hohen Intensitäten des elektrischen Feldes bewirkt eine Zunahme des Feldes keine Erhöhung der Driftgeschwindigkeit im gleichen Maße.

Die Ladungsträgerlebensdauer wird im idealen Halbleiter durch die freie Bewegung von Ladungsträgern ohne den Einfluss von Störstellen beeinträchtigt, die zur Rekombination mit entgegengesetzten Ladungsträgern führen kann. Im realen Halbleiter wirken Einfang- und Emissionsprozesse an Störstellen auf die Lebensdauer der Ladungsträger ein und verkürzen diese.

Für die Ladungssammlung sind die photogenerierten Ladungsträger maßgebend, die während der Ladungssammelzeit den Detektor passieren. Die Ladungsträgerdriftweite wird durch die Ladungsträgerbeweglichkeit μ , der Ladungsträgerlebensdauer τ und dem einwirkenden elektrischen Feld E bestimmt und durch die Funktion $\mu\tau E$ beschrieben.

Die **Ladungsträgermobilität** μ und die **Ladungsträgerlebensdauer** τ sollten deshalb im Halbleitermaterial möglichst hoch sein, um ein hohes intrinsisches $\mu\tau$ -Produkt und einen Ladungsträgertransport durch den gesamten Detektor zu erreichen. Idealerweise sollte die Ladungsträgerdriftweite für die Sammlung aller erzeugten Ladungsträger ein Vielfaches der Detektordicke betragen.

Ein wichtiges Kriterium zur Beschreibung eines als Detektormaterial geeigneten Halbleiters ist das Verhältnis der mit dem Detektor nachgewiesenen Ladungen Q zu den im Detektor erzeugten Ladungen, welches als **Sammelgüte** (CCE⁷) bezeichnet wird.

$$\text{Sammelgüte} = \frac{\text{nachgewiesene Ladung}}{\text{erzeugte Ladung}} = \frac{Q}{\frac{qE_{\text{Photon}}}{E_c}} \cdot 100 [\%] \quad (4.8)$$

Läuft die Ladungssammlung vollständig und ohne störende Einflüsse ab, so beträgt die CCE 100%. Häufig ist jedoch die Ladungssammlung durch den kurzen Einfang von Ladungsträgern an Haftstellen, der teilweisen Rekombination in Rekombinationszentren und den langzeitigen Einfang von Ladungsträgern an Haftzentren unvollständig.

Die Höhe der bei der Ladungssammlung in den Kontakten induzierten Ladung Q ist proportional zu der im Halbleiter vom Ladungsträger zurückgelegten Strecke. Die in Abhängigkeit vom zurückgelegten Weg dx durch die Bewegung der Ladungsträger an den Kontakten induzierte Ladung kann nach [Kno99] mit dem Shockley-Ramo-Theorem bestimmt werden:

$$dQ^* = \frac{-qN_0}{D}(dx|_e + dx|_n) \quad (4.9)$$

Dabei ist N_0 die Anzahl der Elektronen-Lochpaare zu Beginn des Transportprozesses, D die Dicke des Halbleiterdetektors und q die Ladung eines Elektrons. Für reine und defektfreie Halbleiterdetektoren ist $Q^* = qN_0$. Bei Auftreten signifikanten Einfangs von Ladungsträgern ist die induzierte Ladung eine Funktion vom zurückzulegenden Weg der Ladungsträger. Die Amplitude

⁷Charge Collection Efficiency

des Signals ist dann abhängig vom Ort der Wechselwirkung und kann mit der nachfolgenden Hecht-Relation beschrieben werden:

$$Q^* = qN_0 \left\{ \frac{v_h \tau_h^*}{D} \left(1 - \exp \left[\frac{-x_i}{v_h \tau_h^*} \right] \right) + \frac{v_e \tau_e^*}{D} \exp \left[\frac{-x_i}{v_e \tau_e^*} \right] \right\} \quad (4.10)$$

Es gilt v als Ladungsträgergeschwindigkeit, τ^* Ladungsträgerlebensdauer, x_i Entfernung des Ortes der Wechselwirkung von der Kathode und D als Detektordicke. Die induzierte Ladung der photoelektrischen Absorption ist demnach eine Funktion des Wechselwirkungsortes und des Verhältnisses von $v\tau^*$ zur Detektordicke D .

4.1.7 Homogenität, Zusammensetzung des Materials und strukturelle Defekte

Für eine hohe Detektorempfindlichkeit und Detektoreffizienz werden große Detektordicken benötigt, damit ein möglichst hoher Anteil der einfallenden Röntgenphotonen innerhalb des Detektorvolumens wechselwirken können.

Das Vorhandensein von aktiven Verunreinigungen führt zum sogenannten Ladungsträgereinfang (*trapping*) von Ladungsträgern und zur Verringerung der Ladungsträgerlebensdauer von den durch Wechselwirkung generierten Elektronen und Löchern.

Eine ausreichende Homogenität und niedrige Defektdichten sind deshalb weitere Voraussetzungen dafür, gute Ladungsträgertransporteigenschaften und einen niedrigen Leckstrom zu gewährleisten sowie Kurzschlüsse zwischen den Detektorkontakten zu vermeiden [Ger95]. Um Einflüsse aus Korngrenzen auszuschließen, werden darüber hinaus Einkristalle der Halbleitermaterialien benötigt.

Neben dem Ladungstransport sind vor allem geeignete elektrische Kontakte für die korrekte Funktion von Halbleitermaterialien unabdingbar.

4.1.8 Elektrische Kontakte

Die elektrischen Kontakte stellen die Verbindung des Halbleiterdetektors zu den äußeren Schaltungen her. Hierzu müssen geeignete elektrische Kontakte hergestellt werden, die keine Defekte und Verunreinigungen im Kristall erzeugen, keine Barriere für den Ladungssammlungsprozess darstellen oder Polarisierungseffekte hervorrufen.

Die Auswahl geeigneter Kontaktmaterialien ist zum einen eine der Voraussetzungen, um ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis zu erlangen, zum anderen beeinflussen die Arten der verwirklichten Kontakte den Verlauf des elektrischen Feldes im Detektor. Nach der Ausbildung der Kontakte

werden zwei Arten von Halbleiterdetektoren unterschieden: Detektoren mit ohmschen Kontakten (Photowiderstände) oder Detektoren mit Schottky-Kontakten (Schottkydioden).

Treten Halbleiter und Metall miteinander in Kontakt, so wird infolge des Kontaktes das Fermi-niveau beider Materialien ausgeglichen. Aufgrund der gegenüber dem Halbleiter sehr viel größeren Anzahl von Ladungsträgern des Metalls, bleibt das Fermi-niveau des Metalls im Energiebändermodell nahezu unverändert, während sich das Energieniveau des Halbleiters im Bereich des Metall-Halbleiter-Kontakts verbiegt und verschiebt. Die Lage des Fermi-niveaus im Metall und im Halbleiter bestimmt dabei die Art und das Ausmaß der Verformung der Energieniveaus. Nach Ausbildung und Verhalten der Kontakte können ohmsche Kontakte und Schottkykontakte unterschieden werden.

Ohmsche Kontakte zeichnen sich durch einen im Vergleich zum Halbleiter sehr niedrigen und von der Stromrichtung unabhängigen Kontaktwiderstand aus, dessen Strom-Spannungscharakteristik linear verläuft. Für ihre Herstellung werden Metalle mit niedriger Barrierehöhe oder dünne Barrieren benötigt, die ein Durchtunneln von Ladungsträgern ermöglichen. Mit ohmschen Kontakten kann ein homogener Feldverlauf innerhalb eines Detektors erreicht werden, der eine Ladungssammlung unabhängig vom Wechselwirkungsort erlaubt. Jedoch werden hierfür Halbleiterdetektoren mit spezifischen Widerständen von $> 10^8 \Omega cm$ [Fie96] benötigt.

Bei **Schottkykontakten** kann die Barrierehöhe nicht vernachlässigt werden. Der Stromfluss ist bei diesen Kontakten richtungsabhängig und zu ihrer Herstellung werden Metalle mit hoher Austrittsarbeit oder geeigneten Oberflächenzuständen des Halbleiters benötigt. Aufgrund der nur in der Verarmungsschicht stattfindenden Ladungsträgerseparation kann die Detektion von Strahlung nur innerhalb dieser Schicht erfolgen.

4.2 Mögliche Halbleitermaterialien

Als Halbleitermaterialien für Detektoranwendungen werden z.B. *Si*, *Ge*, *GaAs*, *CdTe*, *CZT*, *HgI₂*, *PbI₂* und *TlBr* eingesetzt. Die Forderung nach einem Betrieb bei Raumtemperatur schränkt die Zahl der genannten Halbleiter ein, da Ge nur mit aufwendiger Kühlung betrieben werden kann. Wird zusätzlich noch die Forderung nach einer hohen Wechselwirkungs-Wahrscheinlichkeit gestellt, so verbleiben unter den möglichen Materialien nur noch die mit hoher Kernladungszahl wie *HgI₂*, *PbI₂* und *CdTe* (vergleiche Abb. 4.2). Nur mit diesen Materialien kann eine gute Absorption der einfallenden Röntgenquanten auch bei den für eine gute Ortsauflösung notwendigen geringen Detektordicken von wenigen Millimetern gelingen. Unter den Halbleitern mit hohem *Z* haben für Raumtemperaturanwendungen die zwei Materialien *HgI₂* und *CdTe* die größte Aufmerksamkeit erfahren ([Ger95]).

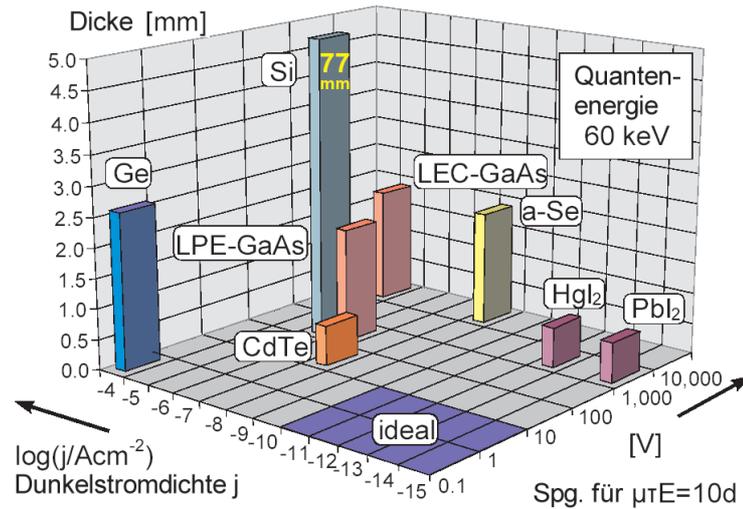


Abbildung 4.2: Gemeinsame Darstellung der notwendigen Dicke verschiedener Halbleitermaterialien für eine 90%ige Absorption von Röntgenquanten (60 keV) und der auftretenden Dunkelströme, sowie der für eine gute Ladungssammlung notwendigen Detektorspannungen (verändert nach [Hoh01]).

Bedeutende Fortschritte wurden vor allem in der Züchtungstechnologie von semiisolierenden CdTe und CZT mit niedriger Defektdichte innerhalb der letzten Jahre erreicht. Die zunehmende Ausbeute in der Kristallzucht und in der Instrumenten- und Apparateherstellung ermöglichten nach [Szl04] die Kommerzialisierung der Technologie für eine zunehmende Anwendung innerhalb der Röntgen- und Gammadetektion und Bildgebung bei Raumtemperatur.

Die für die Detektion von Röntgenstrahlung hervorragend geeigneten Halbleiter CdTe und (Cd,Zn)Te erfüllen besonders aufgrund ihrer hohen durchschnittlichen Kernladungszahl Z (Cd=48, Zn=30, Te=52) und ihren hohen Dichten die beschriebenen Anforderungen und ermöglichen im Vergleich zu anderen Detektorhalbleitern kompaktere Detektoren. Innerhalb der folgenden Abschnitte werden die Materialeigenschaften des binären CdTe und des ternären $Cd_{1-x}Zn_xTe$ aus den II-VI Verbindungshalbleitern dargestellt.

4.3 Materialeigenschaften von $CdTe$ und $Cd_{1-x}Zn_xTe$

4.4 Kristallstruktur

CdTe und ZnTe kristallisieren beide nach der *Grimm-Sommerfeldschen Regel* in der kubischen Zinksulfid- oder Zinkblendestruktur (Sphaleritstruktur) in der Raumgruppe $F\bar{4}3m$ (siehe Abb. 4.3). Daraus resultieren vier kovalente tetraedrisch angeordnete chemischen Bindungen mit überwiegendem ionischen Bindungsanteil.

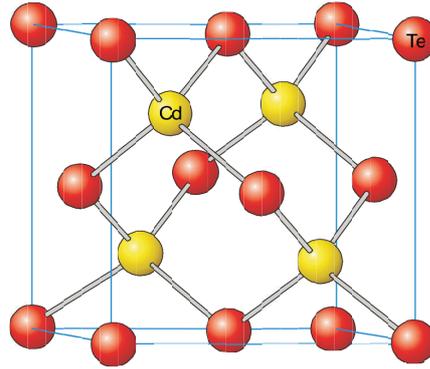


Abbildung 4.3: Struktur einer CdTe-Elementarzelle aus [Joe04]. Die Plätze der Cd-Atome sind gelb, die der Te-Atome rot dargestellt. Bei einem $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -Kristall ist ein Anteil x der Te-Atome in zufälliger Verteilung durch Zn-Atome substituiert.

$Cd_{1-x}Zn_xTe$ -Kristalle sind Mischkristalle zwischen den Endgliedern CdTe und ZnTe und können als CdTe-Kristall mit teilweiser Substitution von Cd durch Zn betrachtet werden.

Durch die Substitution von Cd durch Zn kommt es zu einer Veränderung der Gitterkonstante. Über die Zink-Konzentration kann dadurch die Gitterkonstante eingestellt werden. Diese Möglichkeit der Anpassung des Gitters wird in der Substratherstellung ausgenutzt. Je nach Gehalt an Zn verändern sich dabei verschiedene Materialparameter und nehmen Werte zwischen den in Tabelle 4.2 angegebenen Größen für die Endglieder CdTe und ZnTe ein.

Der hohe ionische Bindungsanteil der II-VI-Halbleiter führt zu den mechanischen Eigenschaften von CdTe, z.B. einer guten Spaltbarkeit und einer geringen Vickers-Härte. Durch Zugabe von Zn nimmt der ionische Bindungsanteil ab, die Bindungsenergie steigt an und die Bindungslänge gegenüber CdTe verkürzt sich (vgl. Tab. 4.2). Dadurch verbessern sich die mechanischen Eigenschaften des Mischkristalls, es kommt zu einer Härtung des Gitters.

	CdTe	ZnTe
Ionischer Bindungsanteil	72%	61%
Bindungsenergie	-4,3 eV	- 4,7 eV
Bindungslänge	2,794 Å	2,634 Å
Gitterkonstante	$a_0 = 6,481 \dots 6,482$ Å	$a_0 = 6,104$ Å
Bandlücke	1,5 eV	2,3 eV

Tabelle 4.2: Materialparameter der Endglieder CdTe und ZnTe des Mischkristallsystems $Cd_{1-x}Zn_xTe$ nach [Ave67], [Brc87], [Rud98] und [Ste70].

4.5 Thermodynamische Eigenschaften

CdTe und (Cd,Zn)Te können aus der Schmelze gezüchtet werden, dadurch ist es möglich, viel größere Wachstumsraten zu erzielen als bei einer Gasphasenzüchtung. Ein Problem ist jedoch das thermische Verdampfen von Cd, das zu einer Anreicherung von Te in der Schmelze führt. Ursache hierfür ist der wesentlich höhere Dampfdruck von Cd. Er beträgt bei der Schmelztemperatur von CdTe (1092°C) $0,65 \text{ atm}$ gegenüber $5,0 \times 10^{-3} \text{ atm}$ für Te [Schb95]. Mischkristalle zwischen CdTe und ZnTe haben gegenüber CdTe einen erhöhten Schmelzpunkt, da die Schmelztemperatur von ZnTe bei 1290°C liegt [Schb95]. Der Dampfdruck ist aufgrund von thermischer Dissoziation für (Cd,Zn)Te niedriger als für reines CdTe und führt nach [Schb95] zu weniger (Cd,Zn)-Vakanzen als in reinem CdTe.

Durch den Übergang vom binären System CdTe zum ternären System (Cd,Zn)Te können durch die positiven Auswirkungen des Zn-Einbaus gegenüber CdTe verbesserte Detektoreigenschaften, z.B. ein vergrößerter Bandabstand, niedrigere Dunkelströme, größere Kristallausmaße und geringere Spalt- und Brüchigkeit erreicht werden. Zinkzugaben von 4% bis 15% brachten Kristalle mit spezifischen Widerständen bis $10^{11} \Omega \text{cm}$ hervor, jedoch besteht die Neigung zur Segregation von Zink [Cap97] [Rud93].

4.6 Züchtungsverfahren

Bei der Züchtung von $CdTe$ und $Cd_{1-x}Zn_xTe$ strebt man zu einer Kristalle an, die einer engen Spezifikation für Detektoranwendungen genügen, zum anderen aber auch die Steigerung der Wirtschaftlichkeit durch Züchtung größerer Volumina mit weniger Kristallbaufehlern und Ungleichmäßigkeiten. Die eigentliche Zielsetzung liegt damit in der Verbesserung der mikroskopischen und makroskopischen Homogenität der Kristalle.

Die elektrischen Eigenschaften, z.B. der spezifische Widerstand oder die Sammelgüte der Kristalle, werden im allgemeinen durch die Konzentration von Fremdatomen (z.B. Dotierstoffe oder Restverunreinigungen) und durch die Kristallbaufehler (Eigendefekte) bestimmt. Eine Anforderung an die Kristallzucht ist deshalb, eine homogene Verteilung von Dotierstoffen und Kristalldefekten zu erreichen. Des Weiteren müssen die Entstehungsursachen für die Inhomogenitäten untersucht und Modelle für die Züchtungsprozesse entwickelt werden, um dadurch einen Zusammenhang zwischen den Züchtungsbedingungen und den Fremdstoff- und Eigendefektverteilungen herstellen zu können.

Aufgrund der oben genannten Bedingungen und des komplexen Phasendiagramms ist die reproduzierbare Einkristallzüchtung von $CdTe$ oder $Cd_{1-x}Zn_xTe$ eine große Herausforderung. Die

erhöhten Anforderungen der $CdTe$ - und $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -Zucht werden am Beispiel des ionischen Bindungsanteils und der Stapelfehlerenergie deutlich. In Tab. 4.3 sind die Werte für diese Parameter für die Halbleiter $CdTe$ - oder $Cd_{1-x}Zn_xTe$, $GaAs$ und Si aufgezeigt. Die gegenüber $GaAs$ und Si sehr viel niedrigere Stapelfehlerenergie erschwert z.B. das einkristalline und reproduzierbare Wachstum von $CdTe$ - und $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -Kristallen.

Halbleiter	Ionischer Bindungsanteil	Stapelfehlerenergie
$CdTe$ oder $Cd_{1-x}Zn_xTe$	61...72%	$1 * 10^{-3} mJcm$
$GaAs$	25...30%	$5 * 10^{-3} mJcm$
Si	0 %	$1 * 10^{-2} mJcm$

Tabelle 4.3: Ionischer Bindungsanteil und Stapelfehlerenergie für die wichtigsten Detektorhalbleitermaterialien [Joe04].

Für die Züchtung von $Cd_{1-x}Zn_xTe$ -Substraten wurden Variationen von *traveling wave heater*-, *Bridgman*-, *physical vapor growth*- und *vapor phase epitaxy*-Verfahren erfolgreich zur Gitteranpassung durchgeführt. Für Raumtemperatur-Detektoranwendungen eignen sich aufgrund der hohen Anforderungen an die elektrischen Eigenschaften der Kristalle und der hohen notwendigen Kristallgüte im Wesentlichen die drei Züchtungsverfahren:

- Hochdruck-Bridgman-Verfahren (HPB) ⁸
- Niederdruck-Bridgman-Verfahren (LPB) ⁹
- Physikalisches Gasphasentransport-Verfahren (PVT) ¹⁰

Die Schmelzzüchtungsverfahren HPB und LPB stellen momentan die führenden kommerziellen Züchtungstechniken dar.

4.7 Detektoreigenschaften von CdTe und CZT

4.7.1 CdTe

CdTe verfügt aufgrund seiner hohen Kernladungszahlen¹¹ von $Z=48$ für Cd und $Z=52$ für Te und seiner hohen Dichte von $5,85 \frac{g}{cm^3}$ über ausgezeichnete Absorptionseigenschaften und die Bandlücke von 1,52 eV erlaubt den Betrieb bei Raumtemperatur. Durch die niedrige Ionisationsenergie

⁸high pressure bridgman

⁹low pressure bridgman

¹⁰physical vapor phase

¹¹zum Vergleich Z für Si = 14

von 4,43 eV zur Erzeugung eines Elektron-Lochpaares ist CdTe für den spektroskopischen Betrieb mit sehr hoher Energieauflösung gut einsetzbar. Es ist kommerziell als Detektormaterial für die Detektion von Röntgenstrahlung, γ -Strahlung, β -Strahlung und thermische Neutronen erhältlich und wird im Zählbetrieb und spektroskopischen Betrieb eingesetzt.

In Abhängigkeit von der Materialgüte, den Geometrien des Detektors und seiner Kontaktstrukturen kann damit Strahlung im Energiebereich von wenigen keV bis maximal 1MeV detektiert werden. CdTe eignet sich durch diese Eigenschaften sowie seinem stabilen Verhalten und dem möglichen Raumtemperaturbetrieb gut für die Pixel-Bildgebung.

Metall-Halbleiter Kontakte auf CdTe

Die Notwendigkeit eines guten Signal-Rausch-Verhältnisses setzt die Wahl eines geeigneten Materials zur Kontaktherstellung voraus. Darüber hinaus wirkt sich die Art der erzeugten Metall-Halbleiterkontakte auf den Verlauf des elektrischen Feldes im Detektor aus. Auf CdTe können prinzipiell zwei Arten von Metall-Halbleiter-Kontakten verwirklicht werden, die zu einem Detektorbetrieb mit ohmschen Kontakten (Photowiderstände) oder mit Schottky-Kontakten (Schottkydioden) führen.

Ohmsche Metall-Halbleiter-Kontakte auf CdTe zeichnen sich durch richtungsunabhängiges Passieren von Ladungsträgern und einen ungestörten elektrischen Feldverlauf aus. Für CdTe können Kontakte, die ohmsches Verhalten zeigen und die Nutzung des gesamten Kristallvolumens zur Detektion ermöglichen, mit den Metallen Au und Pt erreicht werden. Voraussetzung für den Detektorbetrieb ist hierbei jedoch ein ausreichend hoher spezifischer Widerstand des eingesetzten CdTe.

Als Schottky-Kontakt wird ein Metall-Halbleiter-Kontakt mit Potentialbarriere und gleichrichtender Wirkung bezeichnet. Schottky-kontaktierte CdTe-Detektoren werden ausschließlich in Sperr-Richtung betrieben. Durch den hohen möglichen Widerstand von etwa $10^{10}\Omega\text{cm}$ eines Schottky-kontaktierten CdTe-Detektors können sehr geringe Leckströme in Verbindung mit nicht sehr hochohmigen CdTe-Kristallen erzielt werden. Nachteilig wirkt sich jedoch dann die Beschränkung des Ladungsnachweises auf den verarmten Bereich des Detektors aus.

4.7.2 (Cd,Zn)Te

Aufgrund des Einbaus von Zn liegt die Bandlücke von (Cd,Zn)Te höher als bei CdTe. Bei 10% Zn-Anteil beträgt die Bandlücke z.B. 1,57 eV. Hierdurch können aufgrund der höheren spezifischen Widerstände von CZT im Detektorbetrieb geringere Leckströme und eine verbesserte mechanische Stabilität erzielt werden. Durch die niedrigere Kernladungszahl von Zn ($Z=30$) ist der Wirkungsquerschnitt für Absorption gegenüber CdTe-Kristallen herabgesetzt.

Metall-Halbleiter-Kontakte auf CZT

Durch die typische schwache n-Dotierung von CZT werden bei Verwendung von Pt-Elektroden auf CZT Schottky-Kontakte ausgebildet. Durch die geringere Austrittsarbeit von Au können mit diesem Metall Kontakte mit ohmschem Verhalten verwirklicht werden.

4.8 Ausgangsmaterial für Detektorherstellung

Die für die Detektorherstellung verwendeten (Cd,Zn)Te-Kristalle wurden innerhalb der Servicegruppe Materialcharakterisierung und Detektortechnologie des Freiburger Materialforschungszentrums (FMF) und des Kristallographischen Instituts (KI) hergestellt.

Bei der am FMF/KI verwendeten Züchtungsmethode handelt es sich um eine Kristallzucht aus der Schmelze nach dem vertikalen Bridgman-Verfahren unter Verwendung der Dotierstoffe Ge, Sn, Cl oder In (vgl. [Fie04]).

Die innerhalb der Arbeitsgruppe durchführbare Züchtung von bis zu 75 mm durchmessenden (Cd,Zn)Te-Kristallen ermöglichte erst die Prozessierung von drei Zoll großen (Cd,Zn)Te-Wafern in den nachfolgenden Technologieschritten. Die zur Verbesserung der Kristallqualität untersuchten Modifikationen der Ampullenanordnung, der Kühlung und des Keimprozesses führten zu der in [Fie04] beschriebenen Reduzierung der Körner und Zwillinge und zu großen einkristallinen Bereichen von bis zu $40 \times 40 \times 60 \text{ mm}^3$ (siehe Abb. 4.4).

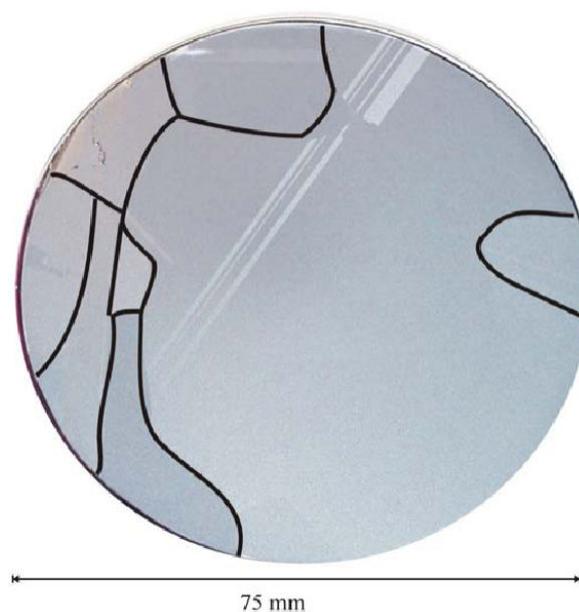


Abbildung 4.4: Querschnitt durch einen 75 mm (Cd,Zn)Te-Kristallkörper [Fie05].

Das gezüchtete Ausgangsmaterial wurde besonders im Hinblick auf seinen Widerstand, die Transporteigenschaften, Defekte und die Homogenität von der Arbeitsgruppe untersucht. Für diese Charakterisierung des Materials wurden mechanisch geläppte und mit Brom-Methanol-Lösung chemisch-mechanisch polierte Proben mit den folgenden Verfahren charakterisiert:

- Kontaktlose Widerstandsmessung CoReMa (TDCM)
- Kontaktlose Photoleitfähigkeitsmessung
- Photolumineszenz
- Detektormessungen mit α - und γ -Quellen

Die aus dieser kontaktlosen Widerstandsvermessung gewonnenen Daten sind am Beispiel eines Indium dotierten (Cd,Zn)Te-Wafers in Abb. 4.5 aufgezeigt. Eine ausführliche Darstellung der Charakterisierungsergebnisse und die Diskussion der Materialeigenschaften ist in [Fie04] zu finden.

Die für einen Detektoreinsatz von (Cd,Zn)Te-Kristallen wichtigen Größen Widerstand und Mobilitäts-Lebensdauer-Produkt $\mu\tau$ sind in Tabelle 4.4 für eine Auswahl von am FMF gezüchteten Kristallen mit unterschiedlicher Dotierung aufgelistet.

Kristall	CdTe:Ge	CdTe:Sn	(Cd,Zn)Te	CdTe:Cl	(Cd,Zn)Te:In
Widerstand in Ωcm	$2.0 \cdot 10^{10}$	$2.0 \cdot 10^{10}$	$5.0 \cdot 10^9$	$3.0 \cdot 10^9$	$3.0 \cdot 10^9$
$\mu_{e^-} \tau_{e^-}$ in $[\frac{cm^2}{V}]$	10^{-5}	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 4.4: Widerstand und $\mu\tau$ -Produkt unterschiedlich dotierter CdTe bzw. (Cd,Zn)Te-Kristallen [Fie05].

Die Einsatzfähigkeit der gezüchteten (Cd,Zn)Te-Kristalle zur energieaufgelösten Strahlungsdetektion ist aus den in Abb. 4.6 und 4.7 dargestellten gemessenen Spektren von ^{241}Am und ^{137}Cs Strahlungsquellen ersichtlich.

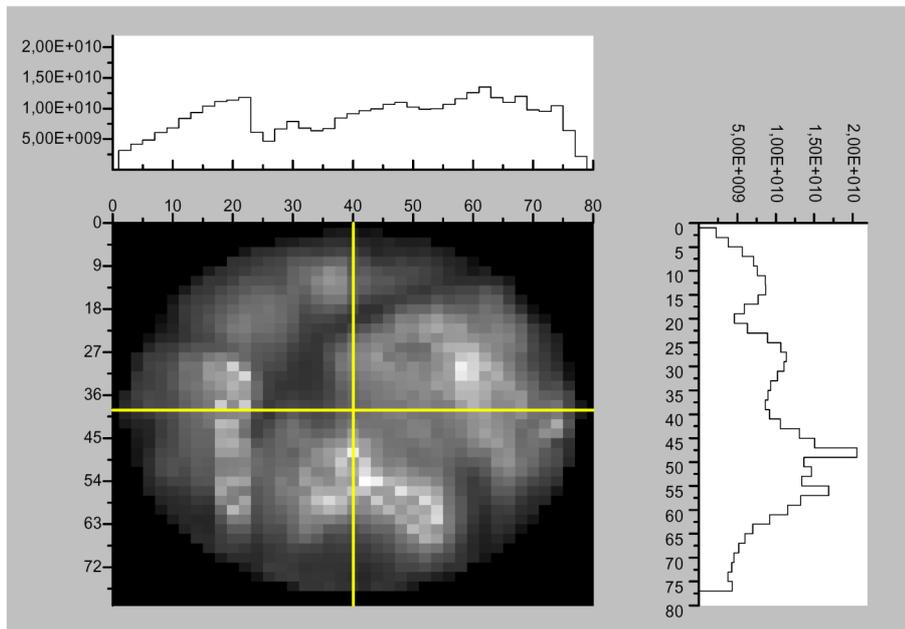


Abbildung 4.5: Verteilung des Widerstandes aus kontaktloser Widerstandsmessung an einem indiumdotierten (Cd,Zn)Te-Wafer [Fie05].

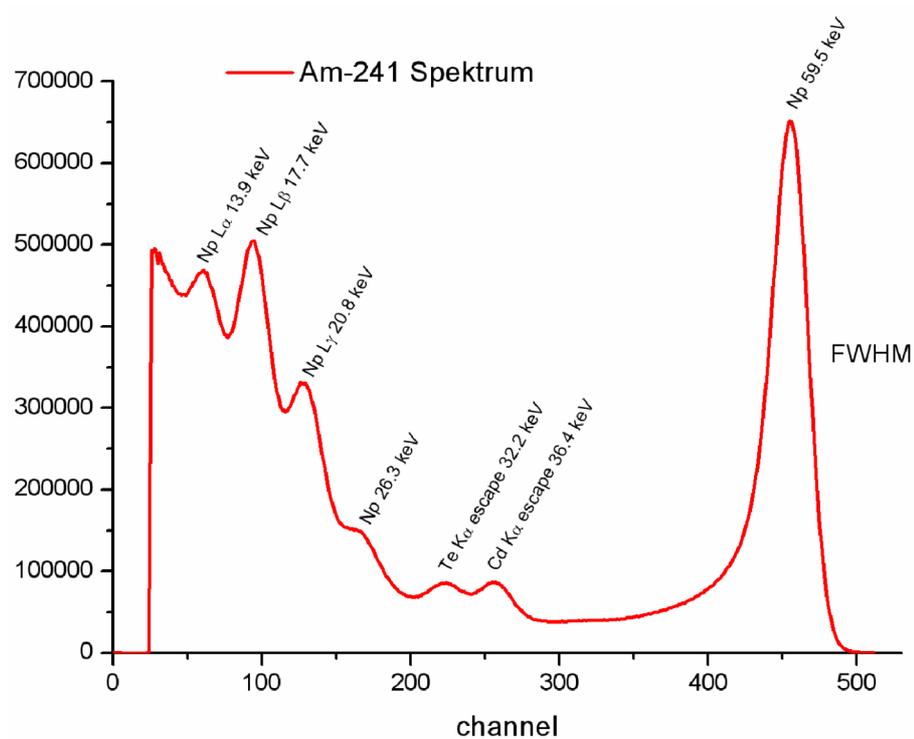


Abbildung 4.6: Mit einem 1 mm dicken (Cd,Zn)Te-Einzeldetektor gemessenes ^{241}Am Spektrum [Fie05].

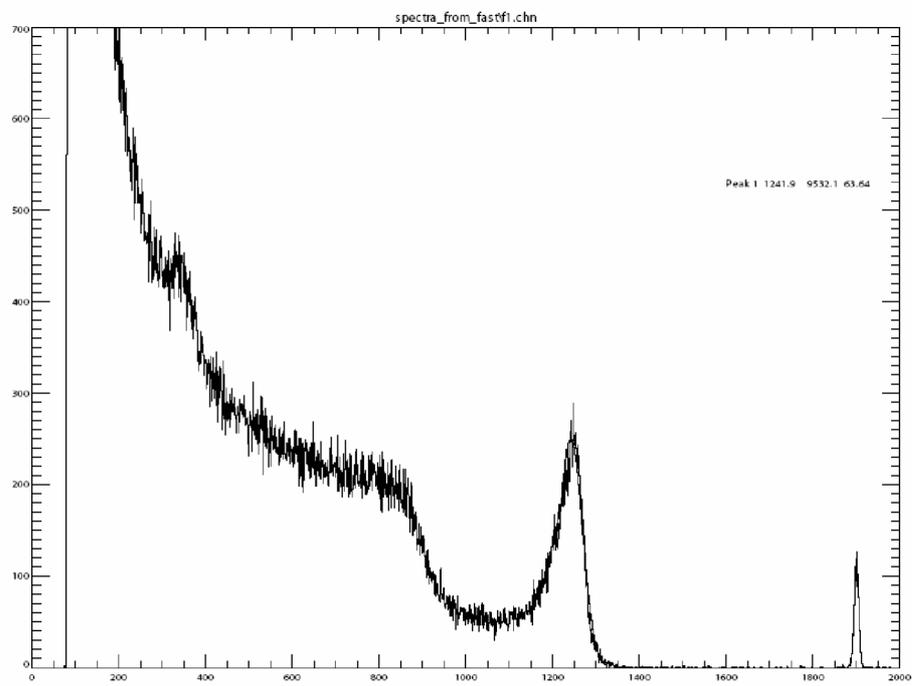


Abbildung 4.7: Mit einem $5 \times 5 \times 12 \text{ mm}^3$ großen indiumdotierten (Cd,Zn)Te *bar*-Detektor gemessenes ^{137}Cs 662 keV -Spektrum [Fie05].

5 Grundlagen zur Prozesstechnologie

Die Nutzung von hybriden Pixel-Röntgendetektoren setzt eine mechanische und elektrische Verbindung des Halbleiterdetektors mit dem Ausleseelektronikchip voraus. Hierzu wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Prozess zur Herstellung von hybriden CdTe- u. (Cd,Zn)Te-Detektoren entwickelt. Innerhalb dieses Kapitels werden die dazu notwendigen Grundlagen der Prozesstechnik und der Flip-Chip-Technologie dargestellt und die Entwicklung des Prozesses aufgezeigt.

5.1 Einführung

Für bildgebende Anwendungen werden zur elektrischen Verbindung von Bildelementen¹ eines Detektors mit den Elektronikzellen eines Auslesechips zweidimensionale Kontaktanordnungen benötigt. Diese können mit der bisher benutzten Wire-Bonding-Technologie nicht hergestellt werden.

Das Prinzip der Kontaktanordnung unter Nutzung der gesamten Kontaktfläche ist jedoch in der Flip-Chip-Montagetechnik verwirklicht. Hierunter ist die Montage von ungehäusten Halbleitern mit der strukturierten Seite nach unten auf die Kontakte eines Substrates zu verstehen. Einer der Fügepartner muss hierfür über Kontakterhebungen (Bumps) verfügen, die spiegelbildlich zu den Kontakten des anderen Partners angeordnet sind. Durch diese Anordnung der Bumps auf der strukturierten Unterseite des montierten Chips wird ein minimaler Flächenverbrauch erreicht und die Kontaktierung von Kontakt-Matrizen ermöglicht.

Diese Eigenschaften und die simultane Herstellung einer hohen Anzahl von Kontakten während des Flip-Chip-Prozesses sowie die hohe Reproduzierbarkeit der Verbindungsherstellung haben zu zahlreichen und sehr verschiedenen Anwendungen und Ausführungen der Flip-Chip-Montagetechnik mit einem hohen Innovationspotential geführt.

¹auch als picture element (pixel) bezeichnet

5.2 Anforderungen an den Flip-Chip-Prozess

Die Unterschiede in den verschiedenen Flip-Chip-Verfahren sind vor allem durch die Erfordernisse der jeweiligen Anwendung in Bezug auf die anzufertigenden Strukturgrößen, den verwendeten Materialien und den prozesstechnischen Aufwand bedingt. Auch die Hybridisierung von Röntgen-Pixeldetektoren stellt spezifische Anforderungen an den Flip-Chip-Prozess, die darüber hinaus durch die Eigenschaften von (Cd,Zn)Te erhöht werden. Das eigentliche Ziel des Hybridisierungsvorganges ist die Herstellung guter elektrischer Kontakte zwischen dem Halbleiterdetektor und dem Ausleseelektronikchip. Um dies zu erreichen, wurden primär ein möglichst niedriger und gleichbleibender Kontaktwiderstand sowie eine gute mechanische Stabilität der Verbindungen angestrebt. Darüber hinaus dominierten die nachstehenden Anforderungen die Auswahl des Flip-Chip-Verfahrens in der vorliegenden Arbeit:

- Strukturgrößen und minimaler Pitch von $170\ \mu\text{m}$ oder $55\ \mu\text{m}$
- Größenverhältnisse der Pads und Passivierungsöffnungen von $24\ \mu\text{m}$ bzw. $20\ \mu\text{m}$
- große Anzahl von über 4000 oder 65000 Pixeln in einer 64×64 oder 256×256 Matrix
- mechanische und thermische Belastbarkeit von CdTe und (Cd,Zn)Te
- Herstellung und Hybridisierung einzelner Detektoren und Auslesechips
- Geräteaufwand
- Zeitbedarf für Prozesseinführung und Prozessoptimierung

5.3 Prozessauswahl

Die verschiedenen Variationen der Flip-Chip-Montagetechnologie sind unterschiedlich gut für die Hybridisierung von CdTe- u. (Cd,Zn)Te-Pixel-Röntgendetektoren mit den Ausleseelektronik-Chips geeignet.

5.3.1 Übersicht

Die verschiedenen Flip-Chip-Varianten lassen sich nach den verwendeten Materialien, Methoden, Prozessen und Verbindungsarten einteilen. Im Wesentlichen kann zwischen den Klebverfahren, Thermokompressionsverfahren und den Lötverfahren unterschieden werden (s. Abb. 5.1).

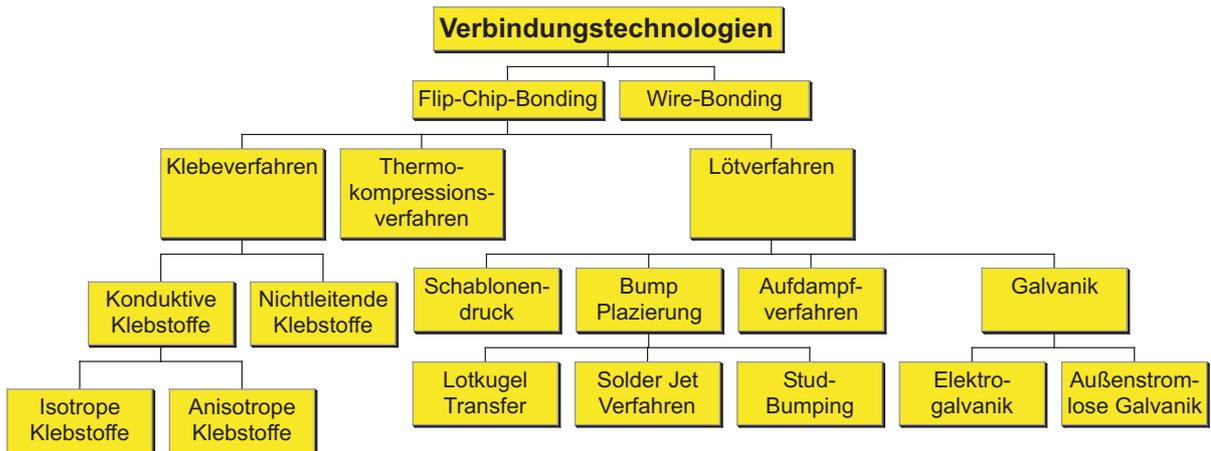


Abbildung 5.1: Die wichtigsten Variationen der Verbindungstechnologien und Arten der Kontaktherstellung.

Klebeverfahren:

Die Montage ungehäuster IC's mittels Klebetechnik kann durch die Eigenschaften der Klebemittel differenziert werden. Es finden isotrope und anisotrope konduktive Klebstoffe und nichtleitende Klebstoffe Verwendung. Isotrop leitende Klebstoffe² können dort eingesetzt werden, wo die Verwendung von Lot aufgrund von niedrigen maximalen Prozesstemperaturen nicht möglich ist. Der leitende Klebstoff wird strukturiert durch Siebdruck auf die Kontaktflächen aufgebracht und bildet die eigentliche elektrische Verbindung der Bumps (s. Abb. 5.2). Anisotrop

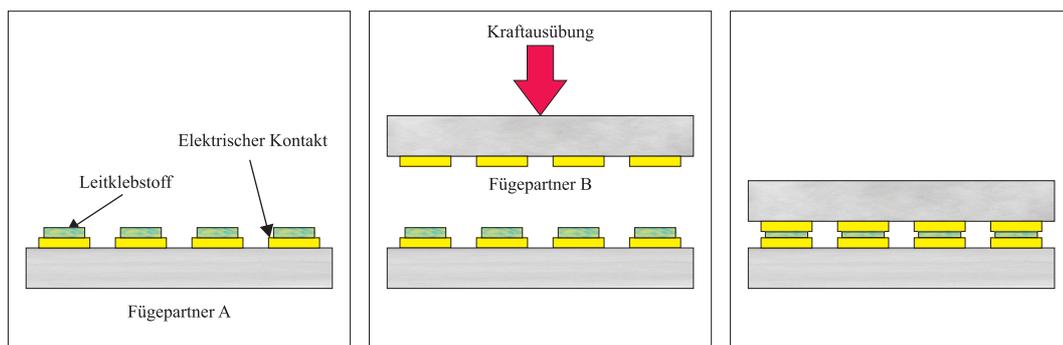


Abbildung 5.2: Der isotrop leitende Klebstoff wird strukturiert auf die Kontakte mindestens eines Fügepartners aufgebracht (linkes Bild) und anschließend unter Einwirkung von Kraft mit dem Fügepartner verbunden (Mitte). Häufig ist im Anschluß an die Fügung ein Curing-Prozess zur Aushärtung des Klebstoffes notwendig.

leitender Klebstoff³ wird ohne Schablone strukturlos auf einen der Fügepartner aufgebracht. Der anisotrope kontaktive Film besteht aus Polymerkugeln mit einem Durchmesser von $3 - 5\mu\text{m}$

²isotropic conductive adhesive, ICA

³anisotropic conductive film, ACF

(www.flipchips.com). Die Kugeln sind mit einer Ni/Au-Schicht galvanisiert, dieser leitende Film ist durch einen weiteren Film aus isolierendem Polymer überzogen (s. Abb. 5.3).

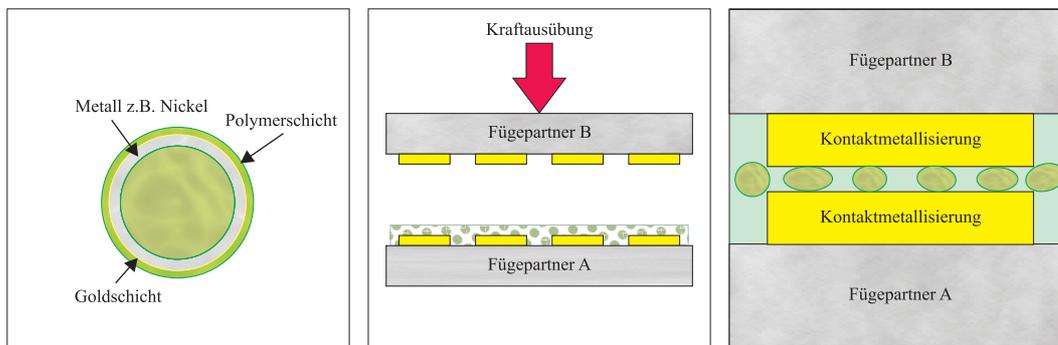


Abbildung 5.3: Das linke Bild zeigt den internen Aufbau eines ACF-Partikels. Der Film wird unstrukturiert über die Kontakte eines Bauteils gebracht (mittleres Bild) und unter Druck mit dem Fügepartner verbunden. Die elektrische Kontaktierung erfolgt durch die unter der mechanischen Einwirkung leitend gewordenen ACF-Partikel zwischen den Kontakten (rechtes Bild).

Die während der Plazierung zwischen den Kontakten befindlichen Polymerkugeln werden durch die Annäherung der Fügepartner zwischen den Kontakten eingeklemmt. Durch den auf sie einwirkenden Druck kommt es zum partiellen Verlust der äußeren Isolierschicht und zur Bildung eines elektrischen Kontaktes in Z-Richtung zwischen den Kontaktflächen des Chips und des Substrates.

Die Verwendung von nicht leitenden Klebstoffen findet in Kombination mit Stud-Bumping statt. Bei dieser Flip-Chip-Variante werden die Bumps mittels eines modifizierten Wirebonders aus Gold-Draht auf die Aluminiumkontakte der Fügepartner aufgebracht. Anschließend erfolgt der Auftrag des nicht leitenden Klebstoffes bei einer für die Verflüssigung des Klebers notwendigen Temperatur. Durch Druck auf die Fügepartner wird der zwischen den Kontakten befindliche Klebstoff verdrängt und eine elektrische Kontaktierung ermöglicht (s. Abb. 5.4).

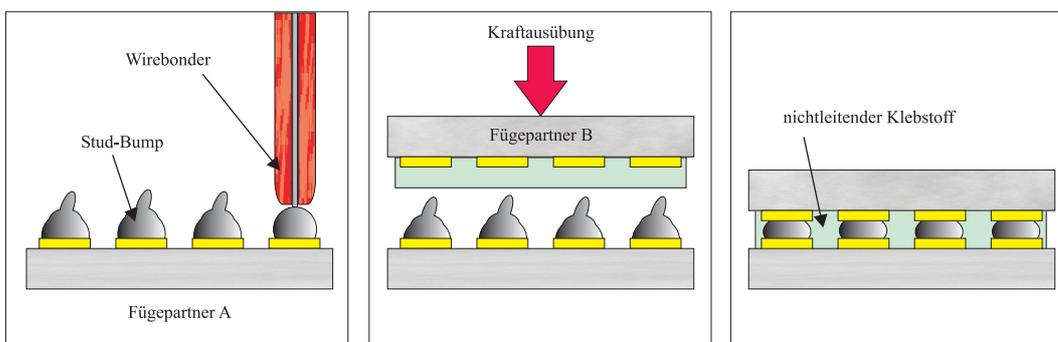


Abbildung 5.4: Im linken Bild ist die Herstellung der Bumps auf dem Bauteil durch einen modifizierten Wirebender dargestellt. In der Bildmitte erfolgt die Ausrichtung des mit nichtleitenden Klebstoff beschichteten Fügepartners für die Herstellung der Verbindung unter Druck- und Temperatureinwirkung. Das rechte Bild zeigt die Fügepartner nach der Hybridisierung.

Thermokompressionsverfahren

Eine weitere Möglichkeit der Flip-Chip-Montage ist das Au/Au-Thermokompressions-Verfahren, bei dem beide Fügepartner mit Au-Kontakten versehen sind. Die reinen Au-Bumps werden hierfür aus Golddraht mit einem modifizierten Ball-Wedge-Bonder⁴ unter Verwendung von Ultraschall und Temperatur erzeugt oder durch Elektrogalvanik auf einen der Fügepartner abgeschieden.

Die eigentliche Herstellung der elektrischen Verbindungen zwischen den Fügepartnern erfolgt durch die Einwirkung von Druck und Temperatur während der Plazierung.

Reflow-Lötverfahren

Die Lötverfahren stellen die älteste Flip-Chip-Technologie dar. Das ihnen zugrunde liegende Prinzip ist in der Abb. 5.5 dargestellt. Erste Varianten wurden bereits 1964 von IBM in Form des sogenannten C4-Prozesses⁵ entwickelt [Lau95]. Grund für die damalige Anwendung des Prozesses war die noch nicht ausreichende Zuverlässigkeit und Produktivität der Wire-Bonding-Verfahren in den 60er Jahren.

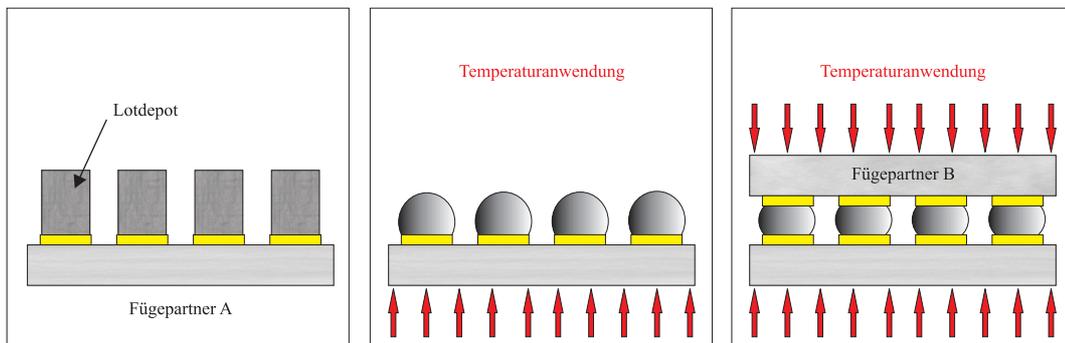


Abbildung 5.5: Das linke Bild zeigt die abgeschiedenen Lotdepots auf einem der Fügepartner. Diese werden durch Wärmeeinwirkung zu Lotkugeln umgeschmolzen (mittleres Bild). Für den Fügeprozess (rechtes Bild) werden die Lotkugeln nochmals über den Schmelzpunkt erhitzt (reflow).

Der Stellenwert des Weichlötens zur elektrischen Kontaktherstellung gewann durch die Flip-Chip-Verfahren in der gesamten Elektronikindustrie weiter an Bedeutung. Beim Lötverfahren bestehen die Bumps aus Materialien oder Legierungen mit einem Schmelzpunkt, der unterhalb einer für die Fügepartner kritischen Temperatur liegt.

Zum Schutz der Fügepartner vor Verunreinigungen und zur Gewährleistung einer guten Haftung sowie einer guten elektrischen Verbindung, ist zwischen den eigentlichen Kontaktflächen und dem

⁴diese Methode wird auch als stud bumping bezeichnet

⁵controlled collapse chip connection

Lotvolumen der Bumps eine komplexe UBM⁶ erforderlich. Der oben genannte ursprüngliche C4-Prozess nutzt eine hochschmelzende PnSn-Legierung als Bump-Material, die auf Ni/Au-Kontakte aufgebracht wird.

Die eigentliche Verbindung wird beim Lötverfahren durch den Aufschmelzprozess hergestellt, bei dem durch Benetzung der Kontakte mit dem Lot Adhensionskräfte zu einer mechanischen Verbindung der Fügepartner führen. Wird bei der Ausrichtung der Kontaktflächen der Fügepartner keine vollständige Deckung erreicht, entstehen während des Aufschmelzprozesses asymmetrische Lotkörper. Die aus der Oberflächenspannung resultierenden Kräfte führen zur Selbstausrichtung der Fügepartner, bis eine vollständige Deckung der Kontakte erreicht ist. Dieser Selbstjustage-Effekt⁷ tritt nur bei den Lötverfahren auf und ermöglicht im Vergleich zu anderen Verfahren geringere Anforderungen an die Positioniergenauigkeit der Flip-Chip-Bonder.

Unterschiede in den Lötverfahren ergeben sich aus der Methode, die Lotbumps herzustellen. Grundsätzlich sind hier die in Abb. 5.1 genannten Möglichkeiten für die Abscheidung oder Bereitstellung der Lotbumps zu unterscheiden.

5.3.2 Eignung der Verfahren

Für die Flip-Chip-Montage von CdTe und (Cd,Zn)Te eignen sich am besten Reflow-Lötverfahren. Durch die Benetzung der gesamten Kontaktfläche mit geeignetem Lot können prinzipiell niedrige Kontaktwiderstände bei gleichzeitig moderaten Prozesstemperaturen erreicht werden.

Die verschiedenen Methoden der Lotbumpsherstellung sind jedoch unterschiedlich gut für die Hybridisierung von Halbleiter-Pixel-Röntgendetektoren geeignet.

Die Bumpgenerierung durch Siebdruck und Lotkugel-Transfer ist durch den minimalen Pitch und die kleine Kontaktgröße bzw. die hohe Pixelanzahl zur Zeit noch nicht gut durchführbar. Der mittels Siebdruck zum Zeitpunkt der Niederschrift kleinste mögliche Bump-Abstand von $150\ \mu\text{m}$ erreicht nicht den notwendigen Pitch von $55\ \mu\text{m}$ des Medipix II Ausleseelektronik-Chips. Auch die Herstellung von Lotbumps mittels Lotdraht im Stud-Bumping-Verfahren ist aufgrund der mechanischen Belastung und der seriellen Erzeugung weniger gut geeignet. Die Verwendung der Solder-Jet-Technologie setzt eine aufwendige Anlage voraus, die außenstromlose Abscheidung ist durch einen hohen chemischen Prozessaufwand und großen Abscheidezeiten mit hoher Belastung der strukturierten Photolackbeschichtung gekennzeichnet, beides ungünstige Bedingungen.

⁶Unterkontaktmetallisierung (under bump metal, UBM)

⁷auch als self-alignment bezeichnet

Die Herstellung der Lotbumps durch Elektrogalvanik mit niedrigen Abscheidezeiten oder durch Bedampfung, kann in Kombination mit Photolithographie dicker Schichten die geeigneten Strukturgrößen erzeugen. Die elektrogalvanische Bump-Abscheidung ermöglicht geringe Bump-Abstände bis hinab zu $35\mu\text{m}$. Sie ist aufgrund der möglichen Strukturgrößen und der hohen Maßgenauigkeit eine der am häufigsten für hohe Bumpzahlen verwendete Bump-Erzeugungsmethode. Auch Aufdampfverfahren werden für die Herstellung von Bumpverbindungen mit niedrig schmelzenden Loten z.B. im Bereich der Infrarotdetektorfertigung bei hohen Pixelanzahlen erfolgreich eingesetzt.

5.3.3 Auswahl des metallurgischen Systems

Um die thermische Belastung des detektorfähigen CZT möglichst gering zu halten, sollte ein Weichlötverfahren mit niedrigen maximalen Temperaturen angewandt werden, d.h. die Schmelztemperatur des Lotes weniger als 190 Grad Celcius betragen. Weiterhin sollte nach Möglichkeit das abzuschneidende Lot ein gut bekanntes Legierungssystem mit geeigneten elektrischen und mechanischen Eigenschaften sein und darüber hinaus die Verwendung verschiedener Technologien zur Deposition ermöglichen. Gute Benetzungs- und Fließeigenschaften müssten als weitere Voraussetzungen vom gesuchten metallurgischen System erfüllt werden.

Alle an das Lotmaterial gestellten Anforderungen wurden durch das bekannte und in der Elektroindustrie erfolgreiche Legierungssystem PbSn erfüllt. In der eutektischen Zusammensetzung von 63 % Sn und 37 % Pb liegt der Schmelzpunkt mit 183° Celsius unterhalb der geforderten maximalen Temperatur für Weichlote. Darüber hinaus haben Pb und Sn im PbSn-Legierungssystem folgende Eigenschaften:

- Pb erhöht den Widerstand gegenüber Korrosion
- Pb setzt den Schmelzpunkt gegenüber reinem Zinn von 232° C auf 183° C für 37:63 PbSn herab
- Pb erniedrigt die Oberflächenspannung für 37:63 PbSn gegenüber von reinem Zinn
- Pb verringert die Whiskerbildung bei der elektrogalvanischen Abscheidung gegenüber reinem Zinn
- Sn besitzt hohe Affinität zu vielen Metallen
- die Oxidschicht von PbSn ist leicht zu entfernen
- eutektisches PbSn besitzt eine gute Benetzbarkeit und Kontaktierfähigkeit

Aufgrund der oben betrachteten Eigenschaften wurde trotz der Bemühungen, Pb radikal zu substituieren, für die Prozessentwicklung auch auf ein bleihaltiges Lot zurückgegriffen, da zum Zeitpunkt der Auswahl des metallurgischen Systems kein alternatives Lotmaterial alle spezifischen Anforderungen zur Herstellung einer Weichlötverbindung auf CdTe oder CZT im notwendigen Temperaturbereich gleichzeitig erfüllt und eine relativ schnelle Prozesseinführung ermöglicht.

Aufgrund der Bestrebungen, das Anwenden von bleihaltigen Lotlegierungen wegen gesundheitlicher Risiken in der Elektronik ab 2007 zu verbieten, rückte jedoch während des Bearbeitungszeitraumes zunehmend auch eine bleifreie Alternative zu den bleihaltigen Loten in den Fokus. Die potentiellen bleifreien Lote sollten einen maximal gleich hohen oder besser einen niedrigeren Schmelzpunkt als das eutektische PbSn-Lot (183°C) aufweisen. Einige Lotlegierungen, die diese Anforderungen erfüllen, sind in Tab. 5.1 zusammen mit ihren mechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur verzeichnet.

System	Zusammens. [Gew.%]	Schmelztemp. [°C]	E-Modul [GPa]	Scherfestigk. [MPa]	Dehnungsrate [mm/min]
In-Bi	In66-Bi34	72,4			
In-Sn	In52-Sn48	117	23,6	10,4	0,13
Bi-Sn	Bi58-Sn42	138	42	25,3	0,05
In-Ag	In96,5-Ag3,5	144			
Pb-Sn	Sn63-Pb37	183	39	18	50

Tabelle 5.1: Materialeigenschaften von bleifreien Loten mit Schmelztemperaturen kleiner als 183° C im Vergleich zu eutektischem Blei-Zinn-Lot [Lam02].

Aus den bleifreien Loten mit einer Schmelztemperatur von weniger als 180°C werden vor allem Bismut-Zinn-Lote bereits in der Elektronik eingesetzt. Das System bildet nach [Lam02] in der Zusammensetzung von Bi58-Sn42 ein Eutektikum bei 139°C und kann bei Abkühlung zu Bi-reichen Ausscheidungen aber auch rein lamellaren Mikrostrukturen führen. Durch die Ausdehnung von Bi während des Abkühlens kann Rissbildung an Lotverbindungen beobachtet werden. Die mechanischen Eigenschaften von eutektischen Bi-Sn sind in Bezug auf das Elastizitätsmodul und der Scherfestigkeit mit eutektischem PbSn-Lot vergleichbar, die Benetzungseigenschaften schlechter aber ausreichend.

Auch Indium-Zinn-Legierungen können, durch ihren hohen Preis begrenzt, als bleifreies Lot eingesetzt werden. Das System bildet bei einer Zusammensetzung von In50,9%-Sn49,1% ein Eutektikum bei 117°C [Lam02]. Die mechanischen Eigenschaften der InSn-Legierung weichen jedoch von denen des eutektischen PbSn-Systems ab. InSn Legierungen haben ein niedriges Elastizitätsmodul, eine niedrige Streckgrenze und eine geringe Scherfestigkeit. Für eine Benetzung zwischen

metallischen Substraten und den InSn-Legierungen müssen aktive Flussmittel eingesetzt werden. Im Vergleich zu PbSn-Loten lösen InSn-Legierungen Gold und Silber weniger schnell und werden deshalb häufig zum Fügen von Oberflächen mit dünnen Edelmetallbeschichtungen eingesetzt [Lam02].

Da aufgrund einer nur eingeschränkten Anzahl von durchführbaren Experimenten und einem komplexen Anforderungsprofil an die Lotlegierungen die alternativen Legierungssysteme nur unzureichend untersucht hätten werden können, wurden nur die in der Herstellung von Infrarotdetektoren bereits bewährten In-Lote für die Entwicklung des Flip-Chip-Bonding von CdTe u. (Cd,Zn)Te in Betracht gezogen. In-Lote haben den Vorteil einer hohen Duktilität und können somit zur Verminderung von Stress zwischen den Fügepartnern aufgrund unterschiedlicher linearer Temperaturkoeffizienten beitragen. Zusätzlich kann die Verwendung von In-Loten durch den niedrigeren Schmelzpunkt von Indium bei 157°C die notwendige Prozesstemperatur herabsetzen.

5.3.4 Ergebnis der Prozessauswahl

Ein Lötprozess mit Herstellung der Lotbumps⁸ durch Photolithographie und elektrogalvanischer Abscheidung bzw. Aufdampfverfahren kann die von den Strukturgrößen gestellten Forderungen erfüllen und die mechanischen und thermischen Belastungen von CdTe oder CZT niedrig halten. Gleichzeitig werden aufgrund des Selbstjustage-Effekts relativ niedrige Anforderungen an die Positioniergenauigkeit des Flip-Chip-Bonders gestellt. Aufgrund dieser Eigenschaften wurde im Rahmen dieser Arbeit für die Hybridisierung der CdTe und CZT-Pixelsensoren die Entwicklung und Optimierung eines entsprechenden Flip-Chip-Lötprozesses durchgeführt.

Die zur Durchführung von Photolithographieprozessen notwendigen Einrichtungen waren bereits im Reinraum des Technologielabors am FMF⁹ vorhanden. Die darüber hinaus zur Mikrostrukturalgalvanik benötigten Geräte wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit konstruiert oder erworben.

5.4 Prozessgrundlagen

Für die Herstellung von CdTe- oder (Cd,Zn)Te-Pixel-Röntgendetektoren und für ihre Hybridisierung mit den Ausleselektronikchips der Medipix-1- und Medipix-2-Kollaboration durch die ausgewählte Flip-Chip-Bonding-Technologie mussten die folgenden Teilprozesse im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und optimiert werden:

⁸auch als bump-bonding-Prozess bezeichnet

⁹Freiburger Materialforschungszentrum der Universität Freiburg

- ❶ Herstellung einer Pixelmetallisierung auf CdTe und CZT
- ❷ Aufbringen einer *Under Bump Metallization* (UBM)
- ❸ Herstellung einer Passivierungsschicht auf CdTe oder CZT
- ❹ Deposition der Lotdepots
- ❺ Reflow der Lotdepots zu Lotkugeln bzw. Hemisphären
- ❻ Hybridisierung durch Flip-Chip-Bonding

Die Realisierung dieser Teilprozesse setzt die Kenntnis wichtiger Grundlagen zur Halbleiterprozessierung voraus. Den Ausgang hierfür bildet die sogenannte Planartechnik. Darunter ist eine Reihe von aufeinanderfolgenden technologischen Einzelprozessen zu verstehen, die mit einem Substrat, in der Regel einkristalline Halbleiterscheiben (Wafer), durchgeführt werden. Die zugrunde liegenden Einzelprozesse können nach [Wid88] in die vier Gruppen: (Dünn-)Schichttechnik, Lithographie, Ätz- und Dotiertechnik eingeteilt werden. Diese Grundlagen für die Einzelprozesse werden in den nächsten Abschnitten behandelt und betreffen, ausgehend von der Photolithographie als zentrale Technologie für die Strukturierung von Substraten im μm -Bereich, auch die notwendige Präparation zur Vorbereitung der CdTe- oder CZT-Oberflächen und die Verfahren der Schichterzeugung zur Herstellung der Mikrostrukturen auf den Detektoren.

5.4.1 Oberflächenpräparation und Oberflächenbehandlung

Die Prozesse zur Herstellung von Pixel-Röntgendetektoren mit lateralen Strukturgrößen von nur wenigen Mikrometern und Metallschichten in Dicken bis hinab zu wenigen Nanometern werden von Stoffen in ihrer Umgebung beeinflusst. Vor allem Verunreinigungen haben negative Auswirkungen auf die angestrebten Prozessergebnisse und müssen ganz vermieden oder wieder beseitigt werden. Sie treten vor allem in Form von Partikeln - z.B. Anlagerungen aus der Raumluft oder Prozessgasen - , atomare Verunreinigungen - z.B. Anlagerungen von Metallen aus Gasen oder Festkörpern - , molekulare Verunreinigungen - z.B. durch Bakterien - und als ionischen Verunreinigungen - z.B. Anlagerung von Alkaliverbindungen aus Entwicklerlösungen - , auf [Wid88]. Diese Verunreinigungen verursachen Schwachstellen oder abweichende Strukturgeometrien in Schichten und degradieren die angestrebten elektrischen Eigenschaften. Für den Detektor-Herstellungsprozess sind deshalb Reinigungsverfahren des Halbleiterwafers notwendig, die den Grad der vorhandenen Verunreinigungen reduzieren.

Eines der wichtigsten Reinigungsverfahren ist die nasschemische Reinigung der Substratoberfläche. Die chemischen Reinigungsprozesse erfolgen in der Regel unmittelbar vor dem Aufbringen

einer Schicht auf das Halbleitermaterial z.B. durch Eintauchen des Substrates in ein geeignetes Reinigungsmedium. Das Medium wird anhand des Halbleitermaterials und nach Art der Verunreinigungen ausgewählt. Nach dem nasschemischen Reinigungsschritt erfolgt in der Regel ein intensives Spülen der Substrate mit deionisiertem Wasser.

Für die Reinhaltung der gereinigten Substratoberfläche ist es notwendig, alle mit dem Halbleitermaterial in Kontakt kommenden Medien, z.B. Gase, Flüssigkeiten und Feststoffe, in hoher Reinheit vorliegen zu haben. Daher ist es unumgänglich, die Partikelverunreinigung der Luft durch geeignete Maßnahmen, z.B. hocheffiziente Partikelfilter, herabzusetzen. Die gegen Verunreinigungen kritischen Herstellungsprozesse werden deshalb in Reinräumen mit niedriger Partikeldichte und Partikelgröße und weitgehend laminaren Luftströmungen bei temperatur- und feuchtestabilisierter Luft durchgeführt.

5.4.2 Grundlagen zur Photolithographie

Die Photolithographie innerhalb dieser Arbeit in voller Breite darzustellen ist nicht möglich, jedoch sollen die für das Verständnis der experimentellen Untersuchungen notwendigen Grundlagen behandelt und einzelne Punkte vertieft dargestellt werden. Die Strukturen auf Substraten, z.B. Wafern, werden durch Depositions- oder Ätzprozesse hergestellt. Dazu ist eine laterale Strukturierung der Waferoberfläche notwendig.

Die Grundlage hierfür bildet die optische Lithographie, d.h. die strukturierte Veränderung eines auf den Wafer mittels Schleudervorgang aufgetragenen Photoresists durch auf ihn einfallende Photonen geeigneter Energie. Die Information der Maske wird dabei durch die Bestrahlung bestimmter Bereiche einer strahlungsempfindlichen Resistschicht erzeugt, deren Löslichkeit sich durch die Bestrahlung verändert. Die Entfernung der bestrahlten (bzw. der unbestrahlten) Bereiche durch geeignete Entwickler hinterläßt auf dem Substrat ein Resistmuster, welches als Maske für nachfolgende Technologie-Prozesse dient.

Nachstehend werden die notwendigen Arbeitsmittel, die Prozess-Schritte und die chemischen und physikalischen Vorgänge zur Erzeugung einer strukturierten Photoresistschicht in ihren Grundzügen beschrieben. Die einzelnen Prozess-Schritte werden anschließend ausführlich behandelt, da deren Kenntnis die Grundlage für die Durchführung und Optimierung des Herstellungsprozesses bildet.

Jede optische Photolithographie zur Herstellung von strukturierten Photoresistschichten basiert auf der nachstehenden Abfolge von Prozess-Schritten und muss aufgrund der Resistempfindlichkeit in speziellen Gelblichträumen¹⁰ durchgeführt werden.

¹⁰mit Beleuchtung ohne kurzwelligem Lichtanteil

- ❶ Schleuderbeschichtung mit Photoresist (spin-coating)
- ❷ Trocknung der Resistschicht (prebake)
- ❸ UV-Belichtung mit Maskaligner
- ❹ Entwicklung

5.4.3 Dünnschichtlithographie

Die gebräuchlichsten Resists zur Erzeugung von strukturierten Resistmasken bestehen im Wesentlichen aus drei Bestandteilen: einem Novolakharz zur Schichtbildung, einer photoaktiven Verbindung und einem Lösemittel. Die für den Aufschleuderschnitt verwendeten Photoresists können sich neben der Viskosität vor allem auch in ihrem Resist-Verhalten unterscheiden. Dabei sind zwei Verhaltensweisen von Photolacken möglich.

Bei Positiv-Resists verbleiben nach der Entwicklung die nicht belichteten Bereiche der Schicht. Der durch die Maske hindurch belichtete Photolack wird während der Entwicklung herausgelöst und die Maske dadurch positiv abgebildet. Aufgrund der Belichtungs- und Entwicklungseigenschaften der Positiv-Resists tritt mit zunehmender Tiefe des Photolackes eine Verengung des Profils der Resist-Struktur auf. Bei den sogenannten Negativ-Resists werden die in den Maskenöffnungen mit Licht wechselwirkenden Bereiche des Resists für den Entwickler unlöslich. Die Maskenstrukturen dieser Resists werden deshalb negativ durch die Photolackschicht abgebildet und die Profile der bei der Entwicklung aus der Resist-Schicht herausgelösten Strukturen im Gegensatz zum Positivresist mit zunehmender Tiefe breiter.

Die eigentliche Resistbeschichtung wird auf einer zentrischen Schleuder (Resist-Spinner) bei einer dem Resist angepassten Drehzahl und Drehdauer durchgeführt. Die angestrebten Schichtdicken liegen in der Regel im Bereich von $0,5 \mu\text{m}$ bis $2 \mu\text{m}$ [Wid88].

Nach dem Aufbringen einer homogenen Photoresistschicht auf dem Substrat erfolgt die möglichst vollständige Trocknung der Schicht durch das Austreiben des im Resist verbliebenen Lösungsmittels durch Zufuhr von Wärme auf einer Heizplatte. Dieser Trocknungsschritt wird auch als *prebake* bezeichnet.

Im Anschluß an den Trocknungsprozess wird in der Regel die Belichtung auf einem Scheibenbelichtungsgerät (Mask-Aligner) nach dem Justieren des Wafers und der Maske durchgeführt. Das aus der Lampe austretende Licht fällt durch eine strukturierte Chrommaske hindurch auf den Photoresist und erzeugt dort ein Abbild der auf der Maske befindlichen Struktur.

Die nach der Belichtung durchgeführte Entwicklung basiert auf Differenzen in der Löslichkeit von unbelichteten und belichteten Photoresists. In Abhängigkeit vom Resist-Verhalten liegt nach der Entwicklung eine positive oder negative Abbildung der ursprünglichen Struktur der Maske vor. Der Entwickler wird durch Düsen auf die Waferoberfläche gesprüht (spray development) oder bis zur vollständigen Bedeckung auf die Oberfläche getropft (puddle development) [Wid88], die Entwicklung schreitet dabei bis zum Ablauf der Entwicklungszeit fort und wird durch einen Spülvorgang mit DI-Wasser beendet.

Nach der Entwicklung kann je nach Aufgabenstellung ein sogenannter Postbake durchgeführt werden. Er hat die Verbesserung der Haftung und der chemischen Widerstandsfähigkeit des Photoresists gegenüber den Prozessmedien in den nachfolgenden Prozess-Schritten zum Ziel.

Die strukturierte Resistschicht steht nun für den anschließenden Beschichtungs- oder Ätzprozess zur Verfügung.

5.4.4 Dickschichtlithographie

Anforderungen an den Photoresist für Dickschicht-Photolithographie

Die Dickschichtphotolithographie grenzt sich in ihren Zielen, Anforderungen und Problemstellungen von der Dünnschichtlithographie ab. Während in der Photolithographie für die Mikroelektronik durch wenige μm -dicke Resistschichten hochaufgelöste Strukturen im sub- μm -Bereich erzeugt werden, dient die Dickschicht-Photolithographie mit Resist-Mächtigkeiten von 20 bis 100 μm zur Erzeugung von metallischen Strukturen mit lateralen Ausdehnungen gleicher Größenordnung. Die größeren Schichtdicken der aufzuschleudernden Photolacke stellen hierbei besondere Anforderungen an die verwendeten Photoresists. Für die in dieser Arbeit hergestellten Mikrostrukturen galten folgende Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Photoresists:

- Erreichbarkeit großer defektfreier Schichtdicken ($> 40\mu\text{m}$)
- Haftung auf CdTe und (Cd,Zn)Te
- Erzeugung geeigneter Aspektverhältnisse und Resistflanken
- Beständigkeit gegenüber stark sauren Elektrolyten in galvanischen Bädern

Diese Anforderungen werden von den weit verbreiteten DNQ-Novolaksystemen mit ihrer photoaktiven Komponente DNQ¹¹ und dem Grundharz Novolak erfüllt. Aus diesem Photolack-System wurde der für Dickschicht-Photolithographie optimierte Positiv-Resist AZ 4562 der Firma Clariant ausgewählt.

¹¹Diazonapthoquion

Der Prozessablauf

Spincoating (Schleuderbelackung): Während des Beschichtungsprozesses eines Wafers mit Photolack können vier aufeinanderfolgende Vorgänge unterschieden werden:



Der Photolack wird zur Deposition wie im linken Bild der Abb. 5.6 auf den stehenden oder sich langsam drehenden Wafer mittig im Überschuss aufgebracht. Ausgehend vom aufgebrauchten Photolackvolumen verbleiben nach dem Spin-Prozess weniger als 5 % des Lackes auf dem Wafer [Luu97]. Die Deposition kann automatisch durch eine Auslassdüse am Spinner-Arm oder manuell z.B. mittels Pipette erfolgen. Der hohe Überschuss an Photolack ist notwendig, um Diskontinuitäten in der Verteilung des Resists zu verhindern.

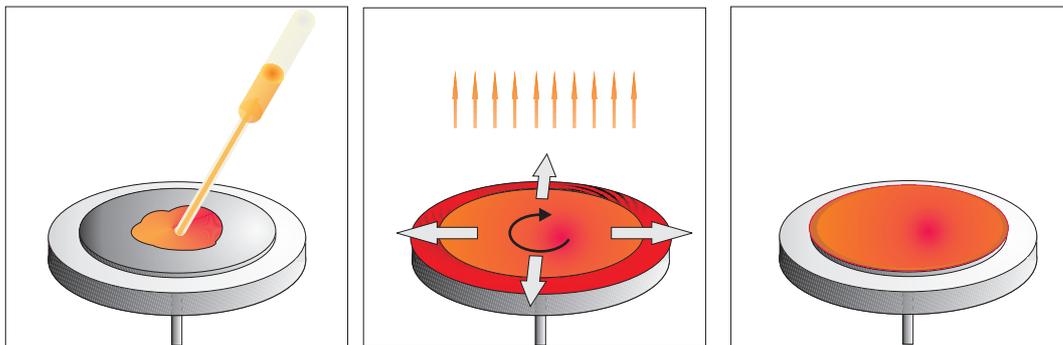


Abbildung 5.6: Aufbringen des Photoresists auf Wafermitte (linkes Bild). Mittleres Bild: Verteilung des Resists bei niedriger Drehzahl (*spin up*) und Ausdünnung bei Enddrehzahl (*spin off*) unter Verlust des Lösungsmittels (Evaporation). Nach diesen Schritten liegt die fertig ausgebildete Resistschicht auf dem Wafer vor (rechtes Bild).

Während des *spin up* wird das Substrat auf die finale Drehzahl beschleunigt, die durch die Rotation verursachten Kräfte bilden eine Photolack-Frontwelle aus, die nach dem Erreichen des Substratrandes über diesen hinausfließt. Die Phase des Ausdünnens und Abschleuderns des überschüssigen Photolacks über den Waferrand wird als *spin off* bezeichnet und ist im mittleren Bild der Abb. 5.6 dargestellt.

Während der Deposition, des *spin up* und *spin off* verarmt der auf das Substrat aufgebrauchte Photoresist fortlaufend an Lösungsmittel durch Evaporation. Das Abdampfen von oberflächennahen Lösungsmittel führt zur Entstehung einer festen, lösungsmittelarmen Haut auf dem Photolack, welche das darunter befindliche Lösungsmittel einschließt und dessen Evaporation einschränkt. Die Schleuderbeschichtung von Wafern zur Mikrostrukturierung führt zu einer Überhöhung der Schichtdicke am Waferrand.

Diese Randüberhöhung, auch *Edge Bead* (siehe Abb. 5.7) genannt, wird nach Literaturangaben durch den an der Grenze von Festkörper, Flüssigkeit und Gas auftretenden Kontaktwinkel verursacht, dessen Größe primär von der Viskosität und Oberflächenspannung des Photolacks bestimmt wird.

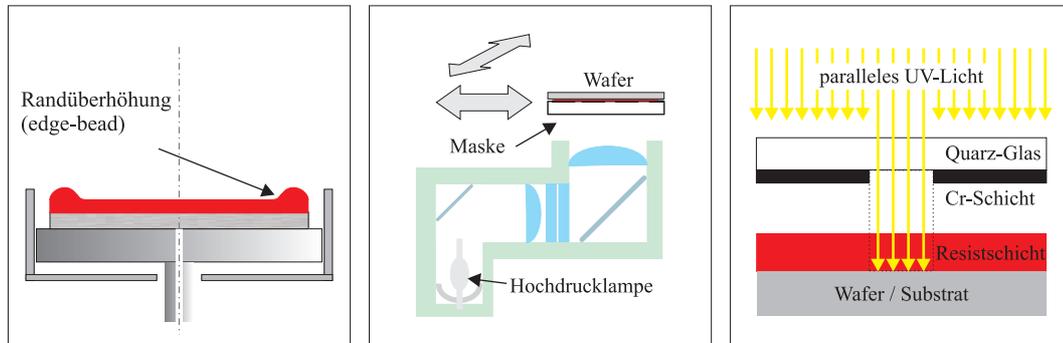


Abbildung 5.7: Bei Herstellung dicker Photoresistschichten entstehen Randüberhöhungen (linkes Bild). Schemazeichnung der Ausrichtung und Belichtung der Resistschichten mit einem Mask-Aligner (mittleres Bild). Abbildung der Maskenstrukturen in Photoresistschicht durch UV-Belichtung (rechtes Bild).

Ein vorhandener *Edge Bead* wirkt sich nachteilig auf die Photolithographie aus. Er verringert die für die Strukturierung zu Verfügung stehende Nutzfläche und erhöht den Abstand (Proximity-Abstand) zwischen der Photoresistschicht und der Kontaktlithographiemaske.

Trocknung (Prebake): Die Trocknung der erzeugten Photoresistschicht auf dem Wafer dient zum möglichst vollständigen Austreiben des Lösungsmittels, da das nach der Trocknung zurückbleibende Lösungsmittel die Löslichkeit des Resists bei der Entwicklung erhöht und dadurch das Strukturprofil beeinflusst.

Aufgrund der durch die Anwendung vorgegebenen Schichtdicke des Resist, ist der einzige einstellbare Parameter für den Trockenprozess die Temperatur. Sie bestimmt den Verlauf der Trocknung und die zum Erreichen eines geeigneten Restlösungsmittelgehaltes nötige Trockenzeit.

Der abnehmende Lösungsmittelgehalt bei der Trocknung bedingt die Schrumpfung des Polymerfilms und führt zu Spannungen innerhalb der Photoresistschicht. Höhere Trocknungstemperaturen erhöhen die auftretenden Scherspannungen innerhalb der Polymerschicht und können zu Rissbildung führen. Durch die Kenntnis des Trocknungsverhaltens des Photoresists kann die Prozesstemperatur mit Versuchsdurchläufen so gewählt werden, dass eine ausreichende aber schonende Trocknung der dicken Photoresistschicht erzielt wird.

Belichtung: Nach erfolgter Trocknung muss die auf einer Photolithographiemaske vorhandene Struktur durch Belichtung auf die durch das *spin-coating* erzeugte Photoresistschicht übertragen

werden (siehe Abb. 5.7). Die wesentlichen Größen der Belichtung sind der erreichbare Kontrast, die Absorption der Resistbestandteile und die bei der Belichtung auftretenden Beugungserscheinungen. Für den Belichtungsprozess werden überwiegend Quecksilberdampflampen mit starken Emissionslinien bei 435, 405 und 365 nm eingesetzt [Chu98]. Beim Belichtungsverfahren kann die Schattenprojektion durch eine auf dem Resist aufliegende Maske (Kontaktbelichtung, siehe Abb. 5.7) oder durch eine auf Abstand zum Substrat gehaltene Maske (Proximity-Belichtung) durchgeführt werden. Dem Ziel einer homogenen Belichtung über die gesamte Schichtdicke des Photoresists steht in der Realität eine exponentiell abfallende Intensitätsverteilung gegenüber.

Entwicklung: Die Entwicklung des AZ 4562 wird durch eine wässrige basische Lösung durchgeführt. Die Entwicklungszeit, die Temperatur und die Konzentration der Entwicklerlösung stellen dabei die wichtigsten einstellbaren Parameter für den Verlauf der Entwicklung der Photoresistschicht dar.

5.4.5 Verfahren zur Schichtherstellung

Für den Herstellungsprozess von Halbleiterdetektoren ist es notwendig, dünne Materialschichten strukturiert auf den Halbleiterwafer aufzubringen.

Dünne Schichten¹² unterscheiden sich in ihren physikalischen Eigenschaften vom Bulk-Material (Volumenmaterial). Wachstumsprozesse von dünnen Schichten werden vor allem von der temperaturabhängigen Oberflächendiffusion beeinflusst.

Vor allem die Haftfestigkeit von dünnen Schichten spielt bei der Halbleiterprozessierung eine zentrale Rolle. Grundsätzlich hängt die Haftfestigkeit von der Art der Adhäsionswechselwirkung mit der Substratoberfläche ab. Sie wird jedoch auch stark von inneren Spannungen, Schichtdefekten und Fremdeinlagerungen beeinträchtigt.

Innerhalb der Detektorherstellung wurde die Dünnschichttechnik für die Erzeugung von elektrischen Kontakten, Leiterbahnen und Oberflächen-Passivierung eingesetzt. Dünne Schichten sollen nach ihrer Herstellung vor allem eine gute Homogenität der Schichtdicke und gleichbleibend gute elektrische Eigenschaften und Adhesion über die gesamte zu strukturierende Substratfläche aufweisen.

Die Strukturierung bei der Dünnschichtherstellung erfolgt in der Regel mit Hilfe der beschriebenen Herstellung von Photoresistmasken. Als Verfahren zur Schichtherzeugung dienen in der Halbleiterindustrie vor allem:

¹²typische Schichtdicken von wenigen Atomlagen bis zu etwa $20\mu\text{m}$

-
- Gasphasenabscheidung¹³ und thermische Oxidation
 - Aufdampf- und Sputterverfahren
 - Schleuderbeschichtung
 - Ionenimplantation und Tempverfahren

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Aufdampf-, Sputter- und Schleuderverfahren eingesetzt, die im Folgenden einzeln betrachtet werden.

Schichterzeugung durch Physical Vapor Deposition (Aufdampfverfahren)

Das dem Aufdampfen (Evaporation) zugrunde liegende Prinzip ist das thermische Verdampfen von Material in einer evakuierten Kammer (Rezipient). Für ein nennenswertes Abdampfen des Quellenmaterials muss der Druck im Rezipienten unterhalb des Materialdampfdruckes liegen.

Der niedrige Druck in der Prozesskammer ist auch notwendig, damit abgedampfte Atome ohne Zusammenstoß mit Restgasmolekülen geradlinig zu den Substraten fliegen können und um die Oxidation des abzuscheidenden Materials während des Prozesses zu vermeiden. Die von der beheizten Quelle abdampfenden Teilchen bewegen sich dabei zum kühleren Substrat und schlagen sich dort und an den Wänden des Rezipienten nieder.

Zur Erhitzung des abzuscheidenden Materials können sowohl widerstandsbeheizte als auch induktiv beheizte Verdampfungsquellen oder für höherschmelzende Materialien Elektronenstrahlverdampfer verwendet werden. Ein Elektronenstrahlverdampfer besteht aus einer Elektronenkanone und einer in der Regel wassergekühlten Halterung, in der sich die Tiegel mit dem Aufdampfgut befinden. Der von einer Glühkathode erzeugte Elektronenstrahl wird durch Ablenkmagnete auf das Verdampfungsgut gelenkt und fokussiert. Dabei erhitzt sich das Verdampfungsgut lokal stark bis über den Schmelzpunkt hinaus.

Die Messung der abgeschiedenen Schichtdicke erfolgt in der Regel mit Hilfe von Schwingquarzschichtdickenmessgeräte. Sie sitzen in unmittelbarer Umgebung der drehbaren Substrathalter und werden beim Beschichtungsvorgang ebenfalls mit Material belegt. Die Materialzufuhr über die Dampfphase kann durch eine schwenkbare Blende (Shutter) gesperrt werden.

¹³chemical vapor deposition (CVD)

Sputterdeposition (Kathodenzerstäuben)

Das Prinzip des Sputterverfahrens liegt in der Nutzung von durch Plasma erzeugte Inertgas-Ionen, die in einem elektrischen Feld beschleunigt werden. Das Plasma wird bei einem geeigneten Gasdruck zwischen zwei Elektroden gezündet. Vor der Kathode bildet sich ein Spannungsabfall aus, die positiv geladenen Inertgasionen werden längs dieser Kathodenfallstrecke auf eine hohe Energie beschleunigt und prallen anschließend gegen das abzuscheidende Schichtmaterial (Target). Einzelne Atome oder Moleküle werden während des Bombardements durch das Auftreffen der hochenergetischen Ionen aus dem Target herausgeschlagen und verlassen mit geringer Energie das Target nach allen Richtungen (Kathodenzerstäubung).

Diese Atome werden vom Target zum Substrat (Anode) bewegt und schlagen sich dort auf der Oberfläche nieder. Dadurch werden die auf der Anode liegenden Substrate mit einer der Targetzusammensetzung entsprechenden Schicht belegt. Während des Weges von der Kathode zur Anode kommt es durch Stoßprozesse der Targetatome mit den Prozessgas-Atomen zur Streuung und Verlust an kinetischer Energie der Targetatome. Dadurch treffen die Targetatome mit verschiedenen Einfallswinkeln auf das Substrat und verbessern dadurch die Homogenität und Kantenabdeckung während des Schichtwachstums.

Aufgrund der höheren kinetischen Energie der auf das Substrat treffenden Teilchen, weisen die Sputterschichten gegenüber aufgedampften Schichten eine höhere Dichte auf.

5.4.6 Mikrogalvanik

Die Anwendung von mikrogalvanischer Abscheidung hat innerhalb der Aufbau- und Verbindungstechnik, der Mikrosystemtechnik und der Fertigung von Integrierten Halbleitern (z.B. für den Ersatz von Al-Leiterbahnen durch Cu) eine bedeutende Rolle erlangt. Die galvanische Abscheidung kann dabei chemisch, d. h. ohne äußere Stromquelle (electroless plating) oder elektrochemisch, d.h. mit äußerer Stromquelle (electroplating) erfolgen. Die Durchführung von elektrochemischer Abscheidung von Mikrostrukturen kann durch die in Abb. 5.8 dargestellten Schritte erfolgen.

In der Mikrogalvanik wird die Abscheidung der Metalle zur Auffüllung von Formen mit Größen im Mikrometerbereich verwendet. Die dadurch erzeugten Metallmikrostrukturen weisen in der Regel ein großes Verhältnis von Strukturhöhe zu Strukturbreite (Aspektverhältnis) auf. Die Abscheidungen werden in lithographisch erzeugte komplementäre Strukturen einer Resistschicht deponiert, die auf einer leitfähigen Galvanikstartschicht¹⁴ aufgebracht wird. Grundlegende Untersuchungen zu der elektrochemischen Abscheidung in lithographisch strukturierte Schichten wurden von [Meh92] durchgeführt.

¹⁴auch *seedlayer* oder *platingbase* genannt

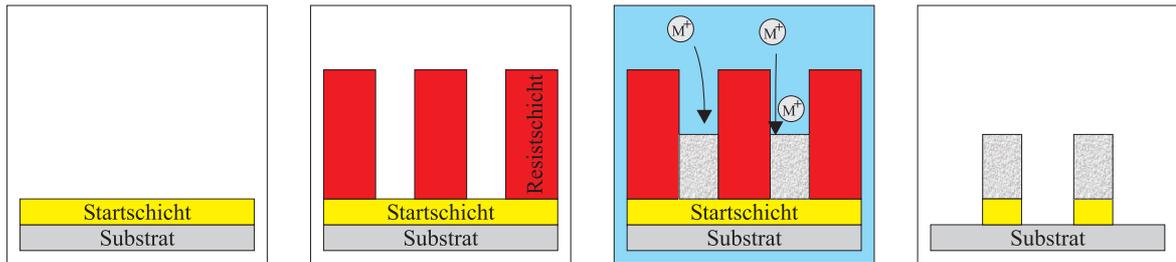


Abbildung 5.8: Die elektrogalvanische Abscheidung beginnt mit der Herstellung einer Galvanostartschicht auf dem Substrat (Bild links außen). Diesem Schritt folgt Belackung, Belichtung und Entwicklung des Substrates (Bild Mitte links). Die erzeugten Sacklöcher dienen als Formen für die Metallabscheidung (Mikrogalvanoformung) aus dem Elektrolyten (Bild Mitte rechts). Im Anschluß an die Abscheidung erfolgt das Strippen des Photoresists und das Entfernen der Startschicht (Bild rechts außen).

Eine Einführung in die Grundlagen der elektrochemischen Abscheidung von Metallen und Legierungen ist in [Cah91] gegeben, eine ausführliche Darstellung der Elektrogalvanik in [Schl00].

Die Elektroden befinden sich bei der Mikrogalvanik zurückgesetzt am Boden der Sacklöcher in der Resistschicht und sind von deren nicht elektrisch leitenden Wänden umgeben. An diesen am Boden der Sacklöcher befindlichen Elektroden werden im Verlauf der Abscheidung die Metallionen aus dem Elektrolyt zu Metall reduziert und für das Schichtwachstum verbraucht. Hierzu müssen sie an den Boden der Öffnungen in der Resistschicht transportiert werden. Die Abscheidungsgeschwindigkeit ist deshalb vom Verhältnis der innerhalb eines bestimmten Zeitraumes abgeschiedenen Metallionen zu den nachgelieferten Metallionen abhängig. Die innerhalb der Resiststrukturen herrschenden Abscheidebedingungen bestimmen die Verteilung des abgeschiedenen Metalls sowie seine Kristallstruktur und wirken sich auf seine mechanischen und elektrischen Eigenschaften aus. Bei der Abscheidung von Legierungen wird darüber hinaus auch deren Zusammensetzung beeinflusst. Im Vergleich zur normaler Oberflächenabscheidung ist der durch Migration verursachte Transport von Metallionen bei der Mikrostruktur galvanik aufgrund der mangelnden Strömung in den Strukturen zu vernachlässigen. Stattdessen wird der Stofftransport während der Abscheidung von Diffusions- und Konvektionsprozessen dominiert und findet bei entsprechend kleinen Abmessungen ausschließlich durch Diffusion statt [Khs00]. Die Ionentransferreaktion und Elektrokristallisation beginnt mit der Diffusion der Teilchen aus der Lösung in eine elektrochemische Doppelschicht. Dort werden die Teilchen an der Elektrodenoberfläche adsorbiert und der Elektronen- bzw. Ionentransfer findet statt (siehe Abb. 5.9). Die Solvat- oder Ligandenhülle des Adatoms geht teilweise oder komplett verloren und das Adatom kann an der Elektrodenoberfläche entlang diffundieren. Bei der Bildung eines Clusters aus mehreren Adatomen kommt es zur Entstehung eines kritischen Keims und der Einbau von weiteren Adatomen in das entstehende Kristallgitter kann erfolgen. Durch die fortlaufende Elektrokristallisation werden die kristallographischen und morphologischen Merkmale der Abscheidung entwickelt, die über die in Tabelle 5.2 aufgelisteten Parameter beeinflusst werden können.

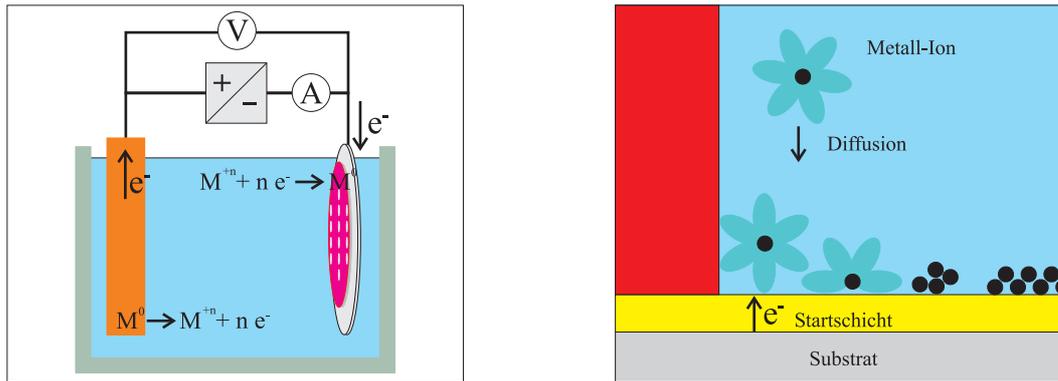


Abbildung 5.9: Die linke Skizze stellt das Prinzip der elektrogalvanischen Abscheidung dar. Dabei gehen Metallionen an der Anode in Lösung und scheiden sich auf der Kathode (Substrat z.B. Wafer) ab. Die rechte Skizze zeigt einen stark vergrößerten Ausschnitt aus dem Bodenbereich einer Photoresistöffnung. Die Ionen diffundieren aus dem Elektrolyten in eine Doppelschicht ein und werden unter Elektronentransfer und Abstreifen der Ligandenhülle an der Elektrodenoberfläche adsorbiert. Dort wandern sie durch Oberflächendiffusion, bis sie durch Vereinigung einen kritischen Keim bilden oder an bereits vorhandenen Wachstumszentren eingebaut werden (vgl. [Khs00]).

<u>Physikalische Parameter:</u>	<u>Chemische Parameter:</u>
Stromdichte	Metallgehalt
Spannungsform	Säuregehalt
Abscheidezeit	Additive
Elektrolyttemperatur	Störstoffe
Substratanströmung	<u>Geometrische Parameter:</u>
Elektrolytbewegung	Anordnung der Elektroden
Umwälzung/Filterung	Anoden- zu Kathodenfläche

Tabelle 5.2: Für die mikrogalvanische Abscheidung relevanten physikalischen, chemischen und geometrischen Parameter.

5.5 UBM

Für die Durchführung des solder bump bonding war es notwendig, den Halbleiter auf die hierfür notwendigen Prozess-Schritte vorzubereiten.

Hierfür diente die Anfertigung einer Metallisierung unterhalb der Lotpunkte¹⁵. Eine geeignete UBM gewährleistet, dass die auf dem Wafer abgeschiedenen Lotdepots auf eine für sie während des Umschmelzens benetzbare Metallisierung aufgebracht werden oder auf eine benetzbare Kontaktfläche auf ihrem Fügepartner treffen. Diese gut von Lot benetzbare Metallisierungen sind Teil der Under Bump Metallization (UBM) und definieren die vom aufschmelzenden Lotbump

¹⁵under bump metallization UBM)

einnehmbare Oberfläche auf dem Substrat. Darüber hinaus muss die UBM eine gute elektrische und mechanische Verbindung der Fügepartner ermöglichen und sie gleichzeitig von Einflüssen durch die Kontaktwerkstoffe schützen. Die UBM wird hierzu in der Regel durch eine Abfolge von Schichten mit den folgenden Funktionen gebildet, die je nach Lotzusammensetzung aus unterschiedlichen Metallen bestehen:

- Haftschrift
- Barrierschicht
- Benetzungsschicht
- Oxidationsschutzschicht

Die **Haftschrift** stellt eine Verbindung zu der darunterliegenden Metallisierung - z.B. Bondpad - oder der Kontaktmetallisierung her und muss sowohl auf diesen als auch auf der Passivierung des Substrates gut haften. Die Haftschrift soll eine mechanisch belastbare und gute elektrische Verbindung zu den darunterliegenden und den darüber abgeschiedenen Schichten ermöglichen.

Eine **Barrierschicht** begrenzt die Diffusion von Atomen des Lotmaterials in den Halbleiterkontaktbereich. Für PbSn-Lote werden hierfür häufig Cr-Schichten mit etwa 150 nm Schichtdicke eingesetzt [Lau95]. Um das Eindringen von z.B. Kupfer in den Halbleiter zu verhindern, muss die Barrierschicht mit homogener Schichtdicke und homogenem Schichtgefüge abgeschieden werden. Vor allem die Auswahl des Barrierewerkstoffes muss nach dem Gesichtspunkt eines geringen Komponentendiffusionskoeffizienten für die betreffenden Metalle in der Barriere erfolgen. Für die Verwendung von Indiumloten bei der Hybridisierung von HgCdTe-Detektoren wird häufig eine etwa 30 nm dicke Cr-Schicht als Barriere- und Benetzungsschicht zwischen dem Goldkontakt und dem Indiumlot verwendet.

Die **Benetzungsschicht** muss leicht für das eingesetzte Lot benetz- und legierbar sein, darf aber bei den Umschmelzprozessen nicht vollständig aufgelöst werden. Gängige Benetzungsschichten für PbSn-Lote bestehen z.B. aus Cu mit Schichtdicken im μm -Bereich [Lau95]. Aufgrund der geringeren Einlegierungsrate von Ni in Lote mit hohem Zinn-Gehalt, wird für bleifreie Lote statt Cu als konsumierbares UBM-Material bevorzugt Nickel benutzt.

Eine **Oxidationsschutzschicht** ist notwendig, wenn die darunter liegende Metallisierung vor Oxidation geschützt werden muss, sie besteht in der Regel aus einer dünnen Schicht Au.

Bei der Verwendung von Sputterprozessen für die Herstellung der UBM-Schichten, z.B. bei der Abscheidung von Ni-Schichten, ist auf eine möglichst geringe Schichtspannung zu achten. Die

mechanischen Spannungen innerhalb der Schichten rühren vor allem durch die mit großer kinetischer Energie (bei kleinen Sputterdrücken) auf die wachsende Schicht auftreffenden Ionen her. Der kompressive Anteil der Verspannung kann durch eine Reduzierung der kinetischen Energie (höhere Sputterdrücke) verringert werden.

6 Experimentelle Arbeiten

6.1 Prozessierung von CdTe-Pixel-Detektoren

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit entworfenen Prozesse und die Technologieschritte für die Herstellung eines (Cd,Zn)Te-Pixel-Detektors sowie dessen Hybridisierung mit dem entwickelten Flip-Chip-Bonding-Verfahren dargestellt.

Vor der Prozessierung der (Cd,Zn)Te-Wafer mussten diese durch Kristallzüchtung und dem darauf folgenden Sägen mittels Fadensäge hergestellt werden. Im Anschluß daran wurden die rohen Oberflächen der (Cd,Zn)Te-Wafer durch Schleifen, Läppen und Polieren (chemisch-mechanischen) zu kratzerfreien, optisch glänzenden Flächen weiterverarbeitet (vgl. [Sto99]). Diese den Reinraumprozessen vorgelagerten Schritte wurden ebenfalls innerhalb der Arbeitsgruppe durchgeführt, waren jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Die für die Detektorherstellung und Hybridisierung entwickelte Prozessabfolge mit den dazugehörigen Einzelprozessen ist in der Abb. 6.1 aufgezeigt.

6.2 Pixelmetallisierung

Die Herstellung der Pixel-Elektroden auf dem Detektor erforderte die Erzeugung von planaren Mikrostrukturen auf den (Cd,Zn)Te-Wafern oder den Einzeldetektoren. Hierfür musste zunächst eine dünne Resistschicht auf dem Substrat deponiert und die erforderlichen Strukturen erzeugt werden. Anschließend erfolgte die Abscheidung von Metallisierungen mit unterschiedlichen Eigenschaften und Dicken. Im darauf folgenden Lift-off-Prozess wurden die auf den Photoresist abgeschiedenen Metallflächen entfernt und auf der Waferoberfläche blieben die erzeugten Pixel-elektroden zurück.

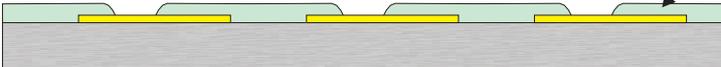
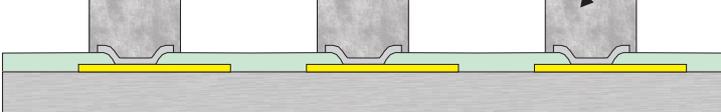
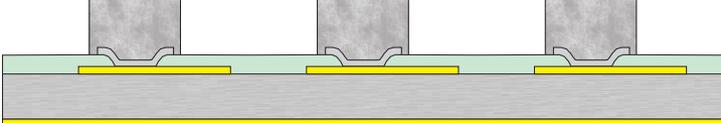
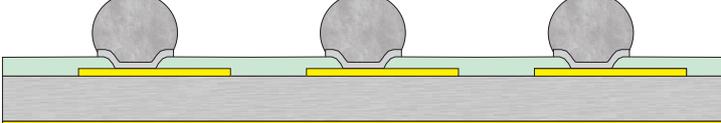
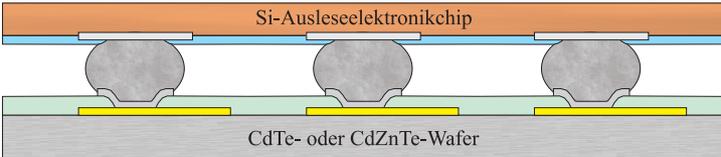
Prozessabfolge	Einzelprozesse
<p>Pixelkontaktmetallisierung</p>  <p style="text-align: center;">CdTe- oder CdZnTe-Wafer</p> <p style="text-align: right;">Au</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reinigung - Photolithographie mit Maske 1 - Beschichtung (Aufdampfen/Sputtern) - Liftoff
<p>Passivierung (Dielektrikum)</p>  <p style="text-align: right;">BCB</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Beschichtung (Schleuderbelackung) - Photolithographie mit Maske 2 - Descum der Kontaktfenster mit RIE
<p>UBM (Platingbase)</p> <p>flächige Au-Platingbase nur für Mikrogalvanik notwendig</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Photolithographie mit Maske 3 - Beschichtung (Aufdampfen/Sputtern) - Liftoff
<p>Lotdeposition</p>  <p style="text-align: right;">PbSn oder In-Lote</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Photolithographie mit Maske 4 - Beschichtung (Galvanik/Aufdampfen) - Resist strippen, Platingbase ätzen oder - Liftoff
<p>Rückseitenflächenkontakt</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Oberflächenpräparation - Beschichtung (Chemische Deposition)
<p>Umschmelzen der Lotdepots</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - 1. Reflow - Reinigung
<p>Hybridisierung</p>  <p style="text-align: center;">Si-Ausleseelektronikchip</p> <p style="text-align: center;">CdTe- oder CdZnTe-Wafer</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ausrichtung - Kontaktierung - 2. Reflow - Montage auf Chipboard - Wirebonding

Abbildung 6.1: Darstellung der gesamten Prozessabfolge für die Herstellung der (Cd,Zn)Te-Pixeldetektoren.

6.2.1 Photolithographie

Für die notwendige *lift off*-Strukturierung wurde der Image-Reversal-Photoresist Ti-35 ES der Firma MicroChemicals¹ (Prozessparameter siehe Tab. A.1) ausgewählt. Er wird wegen seiner hohen thermischen und chemischen Stabilität für Anwendung wie *lift off*-Prozesse, Plasma-Ätzprozesse und nasschemische HF-Ätzprozesse verwendet. Ein Image-Reversal-Resist wurde vor allem wegen der prinzipiell guten *lift off*-Eigenschaften für dünne und dicke gesputterte oder aufgedampfte Schichten bevorzugt.

Die ersten experimentellen Arbeiten zur Photolithographie hatten zur Aufgabe, ausgehend von den Prozessempfehlungen der Hersteller die genauen Prozessparameter des Resists im Zusammenwirken mit dem programmierbaren Spinner (siehe Abb. 6.2), den Heizplatten und dem Mask-Aligner zu ermitteln.

Für die Applikation des Umkehrlacks zur Schleuderbeschichtung erwies sich die Verwendung von Pipetten als die einfachste Möglichkeit einer geeigneten Dosierung. Bei den Ausbackschritten wurde vor allem eine starke Abhängigkeit der Prozess-Ergebnisse vom guten thermischen Kontakt und von einer homogenen Temperatureinkopplung zwischen dem Wafer und den Heizplatten festgestellt. Für das Erreichen von geeigneten Resistflanken wurden bei den Versuchen mit dem Resist die Softbaketemperatur variiert und optimale Bedingungen bei 95°C erreicht.

Die softgebackenen Wafer wurden mit der in Abb. 6.2 dargestellten Karl Süss MJB 21 Maskenjustieranlage² belichtet. Für die erste Belichtung (mit Maske), die den negativen Flankenwinkel bestimmt, wird vom Hersteller ein Dosisfenster von 100 bis 350 mJ/cm² bei typisch 200 mJ/cm²

¹MicroChemicals GmbH Ulm

²mask aligner



Abbildung 6.2: Im linken Bild sind der für die Schleuderbelackung benutzte Spinner sowie die Hotplates für die Ausbackschritte dargestellt. Das Bild in der Mitte zeigt den für die UV-Belichtungen verwendeten Karl Süss MJB 21-Mask-Aligner. Mit dem rechts dargestellten Profiler wurden die Schichtdicken und Strukturhöhen überprüft.

für die i-Linie (365nm) angegeben³, die Temperatur der Hotplate für den nachfolgenden Umkehrbackschritt mit 120°C bis 130°C bei 2 Minuten Ausbackzeit. Innerhalb dieses Fensters wurden die besten Ergebnisse in den Versuchen bei 125°C erzielt. Die empfohlenen Zeiten für die zweite Belichtung (*flood exposure*) konnten unverändert übernommen werden.

Das Entwickeln der dünnen TI 35 ES-Resistschicht auf den (Cd,Zn)Te-Wafern erfolgte in den Versuchen manuell durch Lösen der belichteten Bereiche im metallionenfrenen AZ 826 MIF Entwickler. Dabei wurden die Wafer im Entwicklerbad unter leichter Bewegung entwickelt und anschließend die freigestellten Strukturen sorgfältig mit DI-Wasser abgespült, gefolgt vom Trocknen im Stickstoffstrom.

Für die Liftoff-Prozesse konnte auf die Durchführung eines Postbake verzichtet werden. Die Kontrolle der entwickelten Strukturen auf Abbildungsfehler oder Defekte erfolgte mit einem LEITZ DMRM Stereo-Lichtmikroskop.

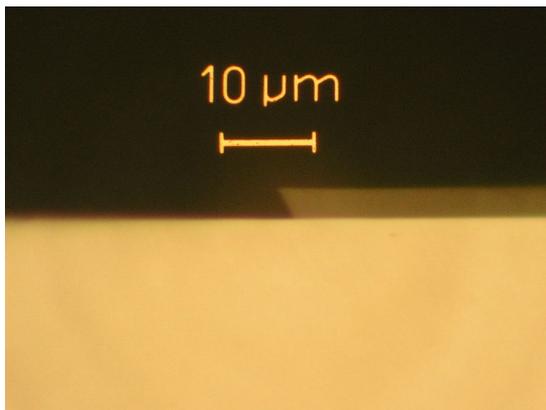


Abbildung 6.3: Ausschnitt einer Photoresistmaske im Querschnitt. Deutlich ist der starke Unterschnitt der Photoresistkante zu erkennen, der einen negativen Flankenwinkel hervorruft.

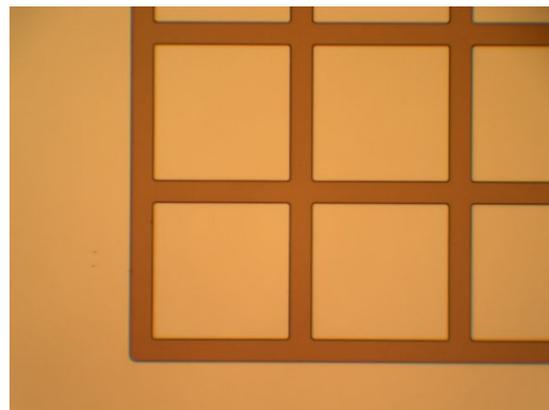


Abbildung 6.4: Ausschnitt aus Photoresistmaske für Pixelmetallisierung im Medipix-1-Layout mit 170 μm Pitch.

Durch die gezielte Variation der Belichtungszeit und der damit verbundenen tiefenabhängigen Dosisablagerung während der 1. Belichtung wurden optimierte Parameter für die Prozess-Schritte auf (Cd,Zn)-Wafer ermittelt und so die in Abb. 6.3 dargestellten Flankenwinkel mit Unterschnitt des Resistprofils und guter Eignung als Maske für den Liftoff-Prozess (siehe Abb.6.4) der Pixelmetallisierung erzielt.

³Niedrigere Werte der Belichtungs-dosis verstärken den Unterschnitt des Resists. Ein Standard-Mask-Aligner mit einer 350 W Hg-Lampe hat der Regel eine i-Linien-Leistung von etwa 6-15 mW/cm^2 . Dies entspricht nach den Angaben des Resist-Datenblattes in den meisten Fällen einer gesamten Leistung von 20-30 mW über das Breitband (g-, h- und i-Linie). Messungen der Lampenleistung am verwendeten Maskaligner ergaben Werte von 20 bis 21 mW/cm^2 (i-Linie) über die Fläche mit einem 25 mW/cm^2 Spot in der Mitte des Ausleuchtungsfeldes.

6.2.2 Metalldeposition

Die zu deponierenden Metall-Schichten für die Pixelmetallisierungen wurden über zwei verschiedene Verfahren erzeugt. Dafür standen eine Aufdampfanlage mit Elektronenstrahlkanone und eine Sputteranlage mit zwei Magnetron-Sputterquellen zur Verfügung. Ziel der Versuche war die Erhöhung der Haftfestigkeit der abgeschiedenen Schichten auf (Cd,Zn)Te und das Erreichen einer guten Strukturübertragung bei geringer thermischer Substrat- und Photoresistbelastung.

Die Dicke der erzeugten Metallisierung und die Aufdampfraten wurde mit einem Schwingquarz-Schichtdickenmesser kontrolliert. Als Kontaktmaterial für die Pixelmetallisierung der CdTe-Pixeldetektoren wurde Gold mit Schichtdicken von min. 50 nm bis max. 750 nm, typisch jedoch 200 nm aufgedampft. Das Aufdampfen erfolgte in der Regel innerhalb eines laufenden Beschichtungsprozesses mit einer konstanten Aufdampfrate von 0,1 nm/s und 0,6 nm/s. Für die Herstellung der Kontakte wurde dabei besonders auf ein gutes Vakuum und eine hohe Reinheit der Ausgangsmaterialien geachtet.

Als Alternative zu den Aufdampfverfahren wurden für die Detektorherstellung auch Versuche zur Deposition der Pixelelektrodenmetallisierung durch Aufputtern durchgeführt, bei dem das abzuscheidende Metall mechanisch aus dem Kathodenmaterial (Target) herausgelöst wird. Die durchgeführten Versuche galten einer ersten Annäherung der Prozessparameter für die Herstellung von gut zu *lift*enden Abscheidungen.

6.2.3 *lift off*

Zur Entfernung der nicht erwünschten Metallisierungsanteile auf der Waferoberfläche nach der Metalldeposition wurde der *lift off* mittels Acetonbad ohne Unterstützung von Ultraschall durchgeführt. Der für den *lift off* notwendige Unterschnitt der Resistflanken trennt die auf der (Cd,Zn)Te-Oberfläche abgeschiedenen Metallschicht vertikal von dem auf der Resistoberfläche deponierten Anteil. Ein unzureichender Unterschnitt kann zum Verbleib von Metallisierungsrückständen führen (siehe Abb. 6.5). Aufgrund der unterschiedlich langen Lösungszeiten bis zum vollständigen *lift off* aller Strukturen wurde die Freilegung aller Strukturen als Kriterium für das Ende des *lift off*-Prozesses verwendet und lange *lift off*-Zeiten für die sichere Freilegung aller Strukturen ermöglicht. Der *lift off*-Schritt wurde durch eine abschließende Spülung mit Isopropanol, gefolgt von einem DI-Wasserbad, beendet. Die Trocknung der Wafer erfolgte im Anschluß wieder mittels Abblasen durch Stickstoff.

6.2.4 Ergebnisse zur Herstellung der Pixelmetallisierung

Mit den optimierten Parametern für die Pixelkontaktherstellung konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Vor allem wurde eine gute Haftung der erzeugten Strukturen über die gesamte Fläche der Pixeldetektoren ohne Verluste einzelner Pixel erreicht. In der Abb. 6.6 ist ein Ausschnitt aus einer auf (Cd,Zn)Te erzeugten Pixelmatrix dargestellt.

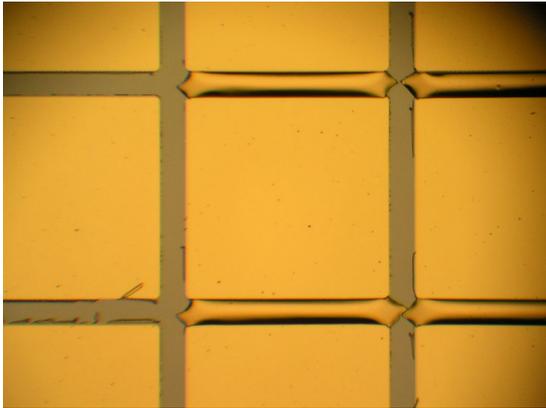


Abbildung 6.5: Liftoff-Schritt ohne optimierte Lithographie führt zu nicht entfernbaren Metallbrücken zwischen den Pixeln (Medipix-1-Layout mit $170\ \mu\text{m}$ Pitch).

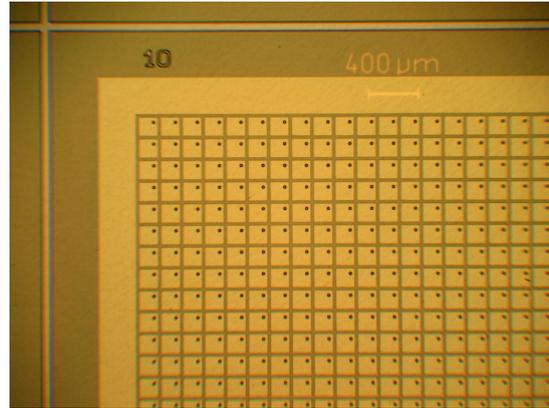


Abbildung 6.6: Ausschnitt aus Pixelmatrix auf (Cd,Zn)Te nach Liftoff-Prozess mit angepassten Spin-, Belichtungs- und Ausbackparametern (Medipix-1-Layout mit $170\ \mu\text{m}$ Pitch).

6.3 Herstellung der Passivierungsschicht

Eine fehlerfreie Passivierung auf (Cd,Zn)Te und auf der verwendeten Pixelmetallisierung war Voraussetzung dafür, dass kein Unterfließen des Lotes auf die Pixelkontakte während der Re-flowprozesse stattfinden konnte. Die Öffnungen der Passivierung mussten für eine gute Bumpbildung eine präzise Position der Bumps ermöglichen und gleichzeitig gute Eigenschaften als Lötstoplack aufweisen, d.h. sie durften für das verwendete Lot nicht benetzbar sein.

Als wichtigster Parameter für die Auswahl einer geeigneten Passivierung auf (Cd,Zn)Te galt deshalb die Haftung der Passivierung auf dessen Oberfläche. Aufgrund der nur eingeschränkten Haftung von SiN oder SiO₂-Passivierungen auf (Cd,Zn)Te wurde von der Verwendung dieser Materialien abgesehen und die Herstellung einer Polymerpassivierung mit guten Hafteigenschaften auf der (Cd,Zn)Te-Oberfläche durchgeführt. Der Wunsch, diese Passivierung auch photolithographisch strukturieren zu können, wurde durch das kommerzielle Produkt Cyclotene von DOW Chemicals erfüllt. Erste Prozessversuche mit dieser BCB⁴-Passivierung konnten aufgrund einer geeigneten Haftung auf (Cd,Zn)Te und auf der Metallisierungsoberfläche überzeugen. Das

⁴Bisbenzocyclobentene

BCB wurde ausgewählt, da es aufgrund seiner Eigenschaften und seiner Prozessierbarkeit den Anforderungen des ausgewählten Detektor-Herstellungsprozess gerecht wurde und es häufig in der Aufbau- und Verbindungstechnik von Multi-Chip-Modulen und Integrierten Schaltungen als Dielektrikum Verwendung findet.

6.3.1 Lithographieprozess mit Cyclotene 4024-40

Für die Herstellung der Pixeldetektoren wurde das Cyclotene 4024-40 ausgewählt, das Schichtdicken von $3,5 \mu\text{m}$ bis $7,5 \mu\text{m}$ ermöglicht und gute elektrische, thermische und mechanische Eigenschaften aufweist (siehe Tab. B.1). Die vom Hersteller empfohlenen Prozessparameter dienten als Ausgangspunkt für die Versuchsreihen zur Bestimmung der Photolithographieparameter des Cyclotene 4024-40 auf (Cd,Zn)Te (Prozess-Schritte siehe Anhang).

Vor der Applikation des BCB wurde die Waferoberfläche durch Ausbacken dehydriert und nach dem Abkühlen ca. 3 ml Cyclotene pro Belackung dynamisch bei geringer Drehzahl (ca. 50 bis 100 rpm) aufgebracht. Im Anschluss daran wurde ohne Wartezeit die Rotationsgeschwindigkeit auf die endgültige Drehzahl von 3000 rpm oder 4000 rpm gesteigert und einen geeigneten Zeitraum gehalten. Laut Herstellerangaben werden für das verwendete Cyclotene 4024-40 bei 3000 rpm $6,7 \mu\text{m}$ und für 4000 rpm etwa $5,8 \mu\text{m}$ Schichtdicke (nach dem Softbake) erreicht⁵.

Nach dem Spinnen und der Reinigung der Waferrückseite von BCB-Verunreinigungen wurde sofort der Softbake (*post application bake*) auf einer Heizplatte durchgeführt. Die hierfür notwendige Zeit und Temperatur ist vom Substrat und der BCB-Schichtdicke abhängig und mit der Erhöhung der Softbake-Temperatur stieg die für den Entwicklungsprozess der BCB-Schicht benötigte Zeit und die nach der Entwicklung verbleibende Schicht- und Scumdicke verringerte sich. Vom Hersteller wurden für den Softbake-Prozess in Verbindung mit einem späteren Pre-Develop-Bake Hotplate-Temperaturen von 65°C bis 70°C bei 90 s Ausbackdauer angegeben.

Die für eine vollständige Belichtung der aufgetragenen BCB-Schicht notwendige Dosis ist von der verwendeten Schichtdicke abhängig (Herstellerempfehlungen für das verwendete Cyclonten $25 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ je μm Schichtdicke). Für die in den Versuchen theoretisch nach dem Softbake vorliegenden Schichtdicken von $5,8 \mu\text{m}$ und $6,7 \mu\text{m}$ betragen die empfohlenen Dosen demnach $145 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ und $167,5 \text{ J}/\text{cm}^2$.

Im Anschluss an die Belichtung erfolgte unmittelbar vor der Entwicklung ein Pre-Develop Bake (Reset-Bake) zur Stabilisierung des zeitlichen Ablaufs der Entwicklung. Entgegen der Prozessempfehlung wurde der Reset-Bake nicht bei 55° bis 65°C für 5 min Dauer in einem Ofen sondern analog zum Softbake mit um 10°C verminderten Backtemperaturen durchgeführt.

⁵Die Höhe ist jedoch auch vom Ausmaß des Lösungsmittelverlustes während der Belackung abhängig, die stark von der Bauart des verwendeten Spinners beeinflusst wird.

Für die Entwicklung wurde in den hier durchgeführten Versuchen der Entwickler DS 3000 zur Immersionsentwicklung verwendet. Für eine Entwicklertemperatur von 35°C konnten die vom Hersteller angegebenen kurzen Entwicklungszeiten von wenigen Minuten erreicht werden.

Aufnahmen der durch die Entwicklung über jeden einzelnen Pixelkontakt erzeugten Öffnungen⁶ in der BCB-Schicht sind in den Abb. 6.7 und 6.8 dargestellt.

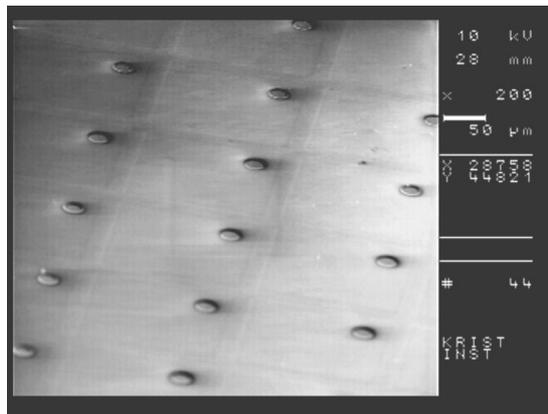


Abbildung 6.7: REM-Aufnahme eines Ausschnittes aus der erzeugten Matrix von Öffnungen in der Polymer-Passivierungsschicht.

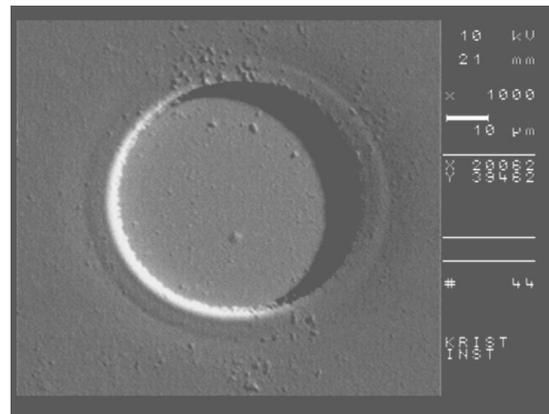


Abbildung 6.8: REM-Aufnahme einer einzelnen Öffnung in der durch Photolithographie strukturierten BCB-Schicht. Deutlich ist auch die vertikale Ausdehnung der Struktur zu erkennen.

Zur Beseitigung der dünnen Filme (typischerweise < 100 nm) aus Polymerrückständen des Entwicklungsprozesses (siehe Abb. 6.9 und 6.10) wurde nach den Empfehlungen des Herstellers ein Descum-Prozess in einem Reaktiven-Ionen-Ätzer (RIE) (siehe Abb. 6.11 und 6.12) mit einer Zusammensetzung von 80:20 der Gase O_2 und CF_4 durchgeführt.

6.3.2 Ergebnisse zur Passivierungsherstellung auf (Cd,Zn)Te

Das Ziel von positiven, abgeschrägten Flanken wurde erreicht. Sie sind notwendig, da negative Flanken (Flankenunterschnitt) keine nachfolgende Abscheidung von zusammenhängenden Metallschichten z.B. für eine Platingbase ohne Unterbrechungen erlauben. In Abb. 6.14 sind die erzeugten Öffnungen in der Passivierungsschicht dargestellt. Der Pixelkontakt bildet den hellen, metallischen Hintergrund. Die Form der Öffnung zeichnet sich durch den Verlauf der dunklen Linie ab. Die von der Öffnung gebildete Fläche begrenzt während des Reflow-Prozesses und der Flip-Chip-Montage den vom Lot benetzbaren Anteil der Oberfläche und verhindert ein Ausfließen des flüssigen Lotes auf die Pixelmetallisierung. Die erzielten Schichtdicken wurden nach dem Herstellungsprozess der Passivierung mittels Profiler gemessen. In Abb. 6.13 ist ein Querschnitt

⁶auch Kontaktfenster genannt

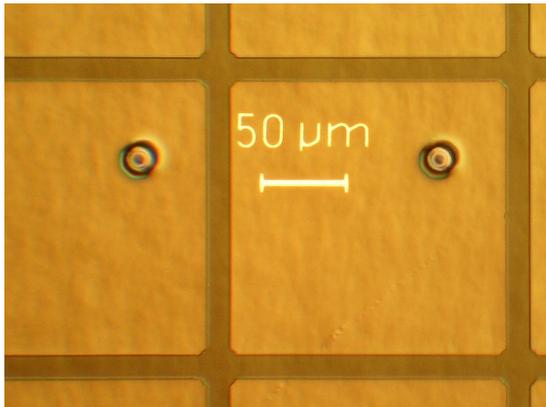


Abbildung 6.9: Ausschnitt aus einer Pixelmatrix auf (Cd,Zn)Te mit aufgebrachtener BCB-Schicht in Interferenzkontrastdarstellung. In den Öffnungen zu den Pixelkontakten befinden sich Rückstände (Scum) des Entwicklungsprozesses.

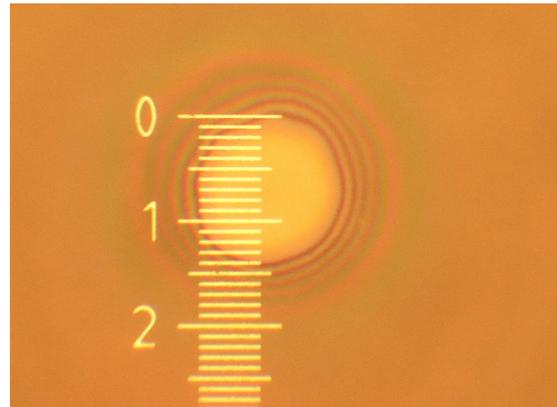


Abbildung 6.10: Vergrößerung einer Öffnung in der Polymer-Passivierungsschicht. Die Interferenzfarben deuten auf ein Ausdünnen der BCB-Schicht vom Strukturrand in Richtung Zentrum hin. Die Strecke zwischen zwei Teilstrichen der Skala des Maßstabs beträgt je einen μm .



Abbildung 6.11: Plasma-Ionen-Ätzanlage (Fabrikat 4-TEC) für das Trockenätzen mit reaktiven Gasen. In dieser Anlage wurden alle Descum-Prozesse durchgeführt.



Abbildung 6.12: Mit Polymerpassivierung beschichteter Wafer im Rezipienten während des Descum-Prozesses mit einem O_2/CF_4 -Plasma.

durch eine Passivierungsöffnung aufgezeigt. Deutlich sind die flachen Flanken der Öffnung zu erkennen. Sie wirken sich günstig auf die Herstellung der Lotbumps aus.

6.4 Aufbringen der UBM

Die Herstellung der untersuchten UBM erfolgte durch vollflächige PVD-Abscheidung oder mittels Sputter-Deposition auf photolithographisch strukturierten Resistschichten (siehe Abb. 6.15) und einem nachfolgenden Lift-off-Prozess (6.16).

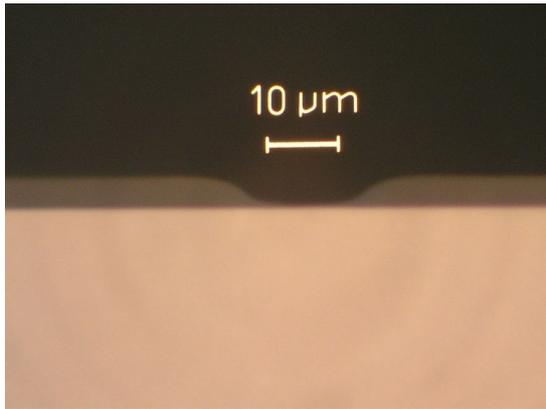


Abbildung 6.13: Querschnitt einer Öffnung in der BCB-Passivierungsschicht. Die flach ansteigenden Flanken sind für die Abscheidung von unterbrechungsfreien Metallisierungsschichten z.B. für die Herstellung einer Platingbase notwendig.

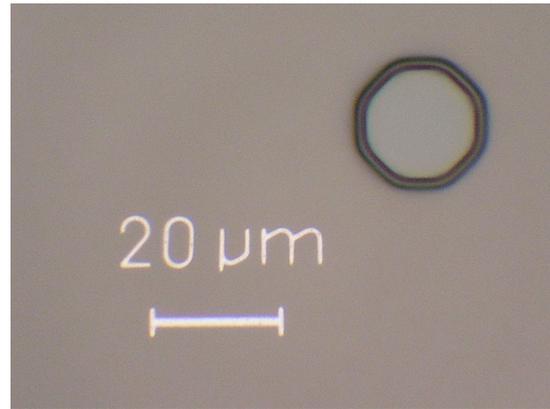


Abbildung 6.14: Achteckige Öffnung zum Pixelkontakt in der Passivierungsschicht nach abgeschlossenem Descum-Prozess. Der dünne Rückstandsfilm des Polymers in der Öffnung wurde vollständig entfernt.

Für die elektrogalvanisch abgeschiedenen eutektischen Bleizinn-Lotdepots wurde zusätzlich zur Nickelsperrschicht eine elektrisch leitende (Start-)Schicht ganzflächig auf das Substrat und auf die Passivierungsöffnungen aufgebracht. Darauf erfolgte die strukturierte Deposition eines $5 \mu\text{m}$ dicken Cu-Sockel als UBM. Dessen Anfertigung wird in der nachfolgenden mikrogalvanischen Herstellung der Lotdepots beschrieben.

6.5 Deposition des Lotmaterials

Indium-Lot wird gewöhnlich durch Aufdampfen auf die entsprechend ausgebildete UBM des Detektors und des Auslesechips aufgebracht, eutektisches PbSn-Lot durch elektrogalvanische Abscheidung. Für die Strukturierung des Indium-Lotes sind Metallmasken oder photolithographische Masken am gebräuchlichsten, die Abscheidung des PbSn-Lotes erfolgt überwiegend durch eine Photoresistmaske. Lithographiemasken sind jedoch in Bezug auf die erzeugbare Schichtdicke begrenzt, Metallmasken im Hinblick auf die erzielbare Alignmentgenauigkeit und Reproduzierbarkeit. Die Höhe der Lotkugeln oder Halbkugeln sollte für den Flip-Chip-Prozess von Pixeldetektoren mindestens $10 \mu\text{m}$ nach dem Umschmelzen betragen, um das Risiko von Schäden bei der nachfolgenden Hybridisierung zu minimieren.

Die Durchführung der Versuche der zur Lotabscheidung notwendigen Dickschichtlithographie erfolgte wieder mit Hilfe des programmierbaren Substratspinners, der Kontakthotplates, des Konvektionsofens und des Maskaligners. Das Ziel der Versuche lag in der Entwicklung eines Dickschicht-Photolithographieprozesses zur Erzeugung einer dicken Photoresistschicht mittels

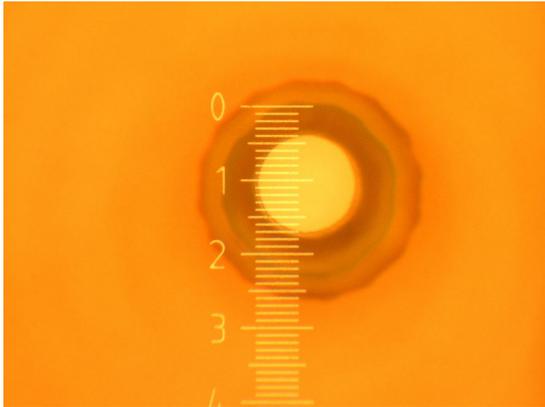


Abbildung 6.15: Photoresistmaske für Abscheidung der UBM zentriert auf Öffnung der Passivierungsschicht (ein Teilstrich der Skalierung umfasst $1 \mu\text{m}$.)

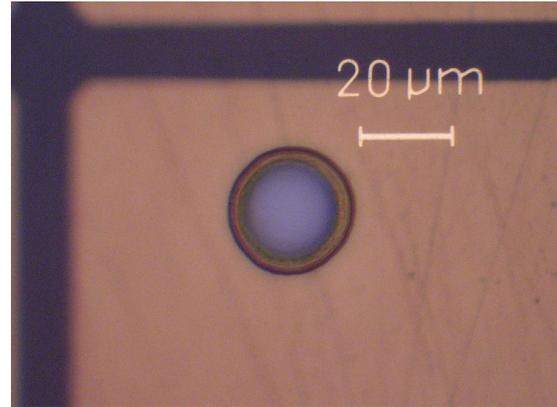


Abbildung 6.16: Einzelne Öffnung in Passivierung des (Cd,Zn)Te-Pixeldetektors mit darauf abgeschiedener UBM nach dem *lift off*-Schritt.

Mehrfachbelackung. Die strukturierte dicke Photoresistschicht sollte zur Herstellung von Mikrostrukturen verwendbar sein.

Als erste Voraussetzung hierfür galt es, eine fehlerfreie Applikation des Photoresists auf die Wafer zu erreichen. Bei der Deposition von Photoresist für das Spincoating können Gasblaseneinschlüsse Defekte in der Resistschicht hervorrufen. Dieses Problem wird durch die notwendige mehrfache Applikation des Resists zum Erreichen der notwendigen Gesamtschichtdicke verstärkt.

Es wurden deshalb Versuche durchgeführt, um die Anzahl der in der Photoresistschicht eingebrachten Gaseinschlüsse zu reduzieren. Hierbei wurden zur manuellen Deposition verschiedene Pipetten eingesetzt (Glaspipetten, Kunststoffpipetten) und mit der direkten manuellen Deposition durch Ausgießen aus einer Weithalsflasche verglichen. Die Beschichtungen mit dem geringsten Anteil an Fehlern durch Gasblaseneinschlüsse wurden durch die direkte manuelle Deposition aus dem Photolackbehälter erzielt. Eine bessere Dosierung der für den Schleuderprozess notwendigen Resistmenge konnte jedoch mit vorbehandelten Kunststoffpipetten erreicht werden.

Die zweite zu erfüllende Anforderung lag im Erreichen einer geeigneten Schichthomogenität der aufgetragenen Photoresistschicht. Die erzielbare Schichthomogenität des AZ 4562 Photoresists wurde in den Versuchen vor allem durch statische Aufladung beeinträchtigt. Zum Teil erreichte der applizierte Photolack vermutlich durch Wechselwirkung mit erzeugten elektrischen Feldern nicht das Substrat, sondern wurde horizontal abgelenkt und über den Waferrand geführt. Eine Verminderung dieser statischen Einflüsse konnte durch Auskleidung des Spinnergehäuses mit Aluminiumfolie und Abdeckung der Spinneröffnung mit leitendem Material erreicht werden.

Nach dem Optimieren der Applikation des Photoresist auf dem Wafer und der erfolgreichen Herstellung einzelner Resistschichten (AZ 4562) galt es, die nach Herstellerangaben mögliche

Mehrfachbelackung durchzuführen, um dicke homogene Schichten zu erzeugen. Hierfür musste jedoch jede vorher aufgebrauchte Resistschicht einen geeigneten Trocknungsgrad aufweisen, damit sie als Substratoberfläche für die nachfolgende Schicht dienen konnte. Mit den durchgeführten Versuchen wurden die notwendigen Trocknungsprofile, d.h. die Trocknungstemperaturen und die Zeiträume, in denen die Resistschichten dieser Temperatur ausgesetzt sind, bestimmt.

Nach der Herstellung der letzten Resistlage konnte eine schonende Trocknung der Resistschicht erreicht und Rissbildung und Deformation der dicken Resistschicht vermieden werden. Die durch Schrumpfung beim Austreiben des Lösungsmittelgehaltes auftretenden Verspannungen wurden durch Variieren der Prozessparameter Trocknungszeit, Trocknungstemperatur und Temperaturverlauf vermindert.

Für die strukturierte Deposition von metallischen Schichten sind die Herstellung steiler Profilflanken und die fehlerfreie Abbildung der Maskenstruktur auf die dicke Resistschicht notwendig. Durch die Anpassung der Belichtungszeit an die Resistdicke und des durch den Backprozess bestimmten Restlösungsmittelgehaltes konnte die Belichtungszeit optimiert werden.

Zur fehlerfreien elektrochemischen Abscheidung und zur Vermeidung von Unterätzungen bei der Entfernung der Platingbase war es notwendig, dass keine Resistrückstände am Boden der Sacklöcher nach der Entwicklung zurückblieben. Die Entwicklung des AZ 4562 wurde manuell in einem geeigneten Glasgefäß durchgeführt. Der Wafer wurde dabei vollständig von der Entwicklerlösung umgeben, welche zum Erreichen einer homogenen Entwicklung ständig bewegt werden musste.

Für die vollständige Lösung des Grundharzes aus den Sacklöchern der zu erzeugenden Strukturen in der Resistschicht, wurde eine leichte Überentwicklung angestrebt. Die Entwicklungszeit konnte bei den Belackungsversuchen durch Verwendung von Monitorwafern bei konstanter Entwicklertemperatur und Entwicklerkonzentration experimentell bestimmt werden. Durch optische Kontrolle mittels Lichtmikroskopie und Vermessen mit Hilfe eines Profilometers gelang es, die bei unterschiedlichen Entwicklungszeiten erzeugten Profile zu untersuchen und eine optimale Entwicklungszeit für die angestrebte Gesamtschichtdicke zu bestimmen.

6.5.1 Ergebnisse zur Dickschichtlithographie auf (Cd,Zn)Te

Durch Experimente mit dem Photoresist AZ 4562 konnten die Teilschritte Schleuderbeschichtung, Trocknung, Belichtung und Entwicklung des Herstellungsprozesses optimiert und mit Mehrfachbeschichtung Photolackdicken mit Strukturhöhen von $> 40 \mu m$ erzielt werden. Die Resistprofile wurden dabei mit ausreichend steilen Flankenwinkeln hergestellt und die vollständige Freistellung der tiefen Resiststrukturen erreicht. Durch geeignet langsames Austreiben der Lösemittel

aus den dicken Resistschichten konnten die Verspannungen innerhalb des Resists so niedrig gehalten werden, dass keine erkennbare Rissbildung auftrat. Damit lag ein Dickschicht-Resistprozess für den AZ 4562 vor, der alle durch die Mikrogalvanik an die strukturierte Photoresistschicht gestellten Anforderungen erfüllte.

6.5.2 Elektrogalvanische Abscheidung

Für die Herstellung der für die Flip-Chip-Montage benötigten Lotbumps mussten die Mikrostrukturgalvanikprozesse für die Cu-UBM-Abscheidung und die eutektische PbSn-Lotabscheidung entwickelt werden. Die Erzeugung der Bumps durch Mikrogalvanik ermöglicht die simultane Abscheidung beider Legierungskomponenten des PbSn-Lotes in den erforderlichen Strukturgrößen. Sie stellte jedoch hohe Anforderungen an die Auswahl des Elektrolyten, die Prozessführung und die Badüberwachung. Das Kupfer und das im Anschluß abzuschneidende Lot wurde zur Herstellung der Lotbumps in die photolithographisch hergestellten Formen einer Resistschicht abgeschieden (Maskenverfahren).

Dem Prozessablauf lagen dabei die folgenden Prozess-Schritte zu Grunde:

- ❶ Aufbringen einer Au- oder Ni-Metallisierung auf den gesamten Wafer als elektrische Leitschicht (Funktion der Platingbase oder Seedlayer)
- ❷ Photolithographie für Herstellung der strukturierten Resistmaske
- ❸ Behandlung der Startschichtoberfläche zur Entfernung einer vorhandenen Oxidschicht
- ❹ Elektrogalvanische Abscheidung
- ❺ Strippen der Photoresistmaske
- ❻ Entfernung der Startschicht (Platingbase)

Die Durchführung der Mikroabscheidung hochreiner Kupferschichten erforderte zu Beginn der vorliegenden Arbeit den Aufbau eines geeigneten Galvanikbades. Dieses besteht aus zwei Becken mit Abdeckungen und Halterungen für die Anodenmaterialien und die Substrate (siehe Abb. 6.17 u. 6.18).

Die zu beschichtenden Halbleiterwafer bildeten während des Mikrogalvanikprozesses die Kathode und mussten den Prozessanforderungen entsprechend gehalten werden. Für die Abscheidungen

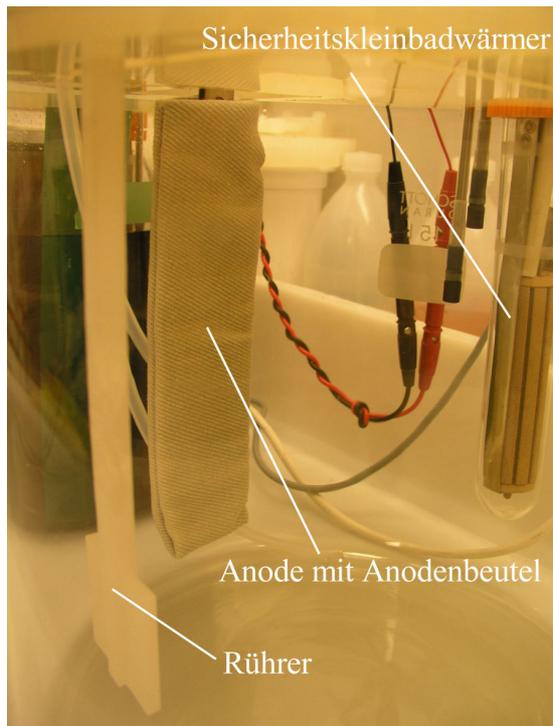


Abbildung 6.17: Prozessbecken mit Anodenmaterial (von Anodenbeutel umgeben), Rührer zur Erzeugung einer Anströmung der Waferhalterung (nicht dargestellt). Der Kleinbadwärmer dient zur Einstellung der optimalen Arbeitstemperatur des Elektrolyten.

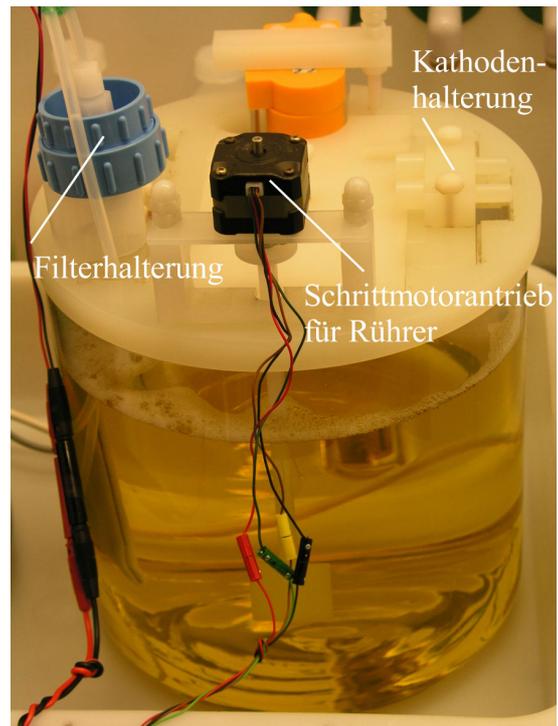


Abbildung 6.18: Gesamtansicht einer Prozesszelle (für PbSn-Abscheidung). Die Filteranlage entfernt Partikel aus dem Elektrolyten und wälzt diesen um. Die Kathodenhalterung dient zur Aufnahme der konstruierten Waferhalterung.

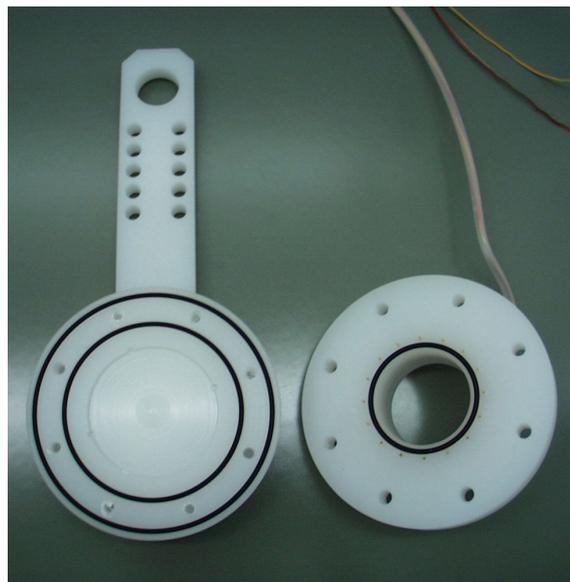


Abbildung 6.19: Konstruierte Waferhalterung zur elektrischen Kontaktierung der Startschicht (Kathode) mit Abdichtung der Waferrückseite und der Kontaktbereiche.

auf den 3 Zoll großen Substraten wurde deshalb ein isolierender, säurebeständiger Substrathalter (siehe Abb. 6.19) mit Abdichtung der Waferrückseite und der Kontaktbereiche entwickelt.

Die Abscheidungen der Mikrostrukturen stellt hohe Anforderungen an die Elektrolyte. Sie sollten die Herstellung von Schichten mit engen spezifischen Eigenschaften ermöglichen und gleichzeitig wenige organische Verbindungen aus den Badzusätzen in die Abscheidungen einbauen. Weiterhin mussten die in der Mikrogalvanik eingesetzten Elektrolyten kompatibel zum chemischen Aufbau der eingesetzten Photoresists sein und reproduzierbare Schichteigenschaften und Schichthöhen ermöglichen.

Für die Abscheidung der Kupfer-UBM wurde in dieser Arbeit wegen seiner guten Metallverteilung, ausgezeichneten Deckfähigkeit und der feinkörnigen und duktilen Abscheidungen ein kommerzieller Elektrolyt mit optimierten Eigenschaften eingesetzt (Daten des Cu-Elektrolyten im Anhang in Tab. D.1). Die Abscheidung der Lotdepots erfolgte durch einen stark sauren, fluidfreien Elektrolyten, der speziell für die Abscheidung dicker Lotdepots entwickelt wurde (Daten des PbSn-Elektrolyten: siehe Anhang Tab. D.2).

Zum Erreichen der benötigten funktionellen Eigenschaften der abgeschiedenen metallischen Schichten wurden Versuchsreihen für die Optimierung der elektrogalvanischen Abscheidung von Kupfer und PbSn auf lithographisch strukturierten Substraten durchgeführt. Als Kriterien wurden die Oberflächeneigenschaften unter dem Mikroskop und die Oberflächenstruktur unter dem REM beurteilt. Mittels Höhenmessungen am Profilometer konnte die Schichtdicke und deren Verteilung über einen Detektor oder Wafer gemessen und beurteilt werden.

Ergebnisse der galvanischen Lotabscheidung

Die konstruierte Waferhalterung ermöglichte eine einwandfreie Kontaktierung der Platingbase auch durch die dicken Randwülste (*edge beat*) hindurch. Vorteilhaft für eine gleichmäßige Kontaktierung erwies sich die hohe Anzahl an Federkontaktstiften, die trotz des Ausfalls zweier Nadeln zuverlässig weiter funktionierten. Mit einer geeignet langen, stromlosen Wartezeit gelang ein gleichmäßiger Start des Abscheideprozesses über alle Detektoren auf einem Wafer hinweg.

Durch die Optimierung der Parameter zur galvanischen Abscheidung konnten die in den Abbildungen 6.20 und 6.21 dargestellten kupfernen Mikrostrukturen mit einer Sollhöhe von $5\ \mu\text{m}$ als Teil der UBM hergestellt werden.

Auf diese Cu-Sockel erfolgte im nachfolgenden Prozess-Schritt die Abscheidung des Lotdepots aus einem für die Abscheidung von eutektischen PbSn-Lot eingestellten Elektrolyten (siehe Abb. 6.22 bis 6.27).

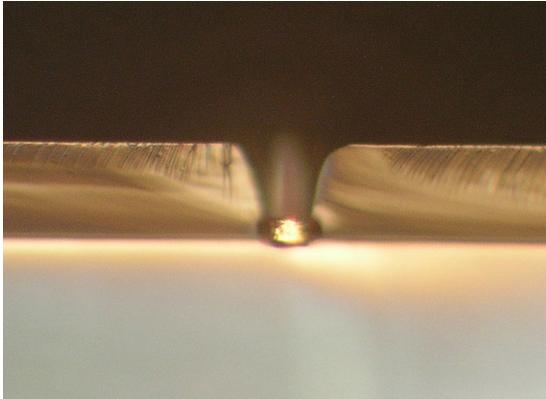


Abbildung 6.20: Querschnitt durch ein Sackloch in strukturierter Photoresistschicht mit darin abgeschiedenem Kupfersockel.

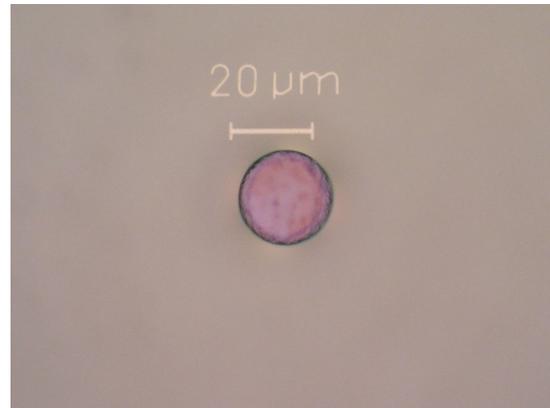


Abbildung 6.21: Abgeschiedener Kupfersockel auf Startschicht (Platingbase) nach Strippen des Photoresists.

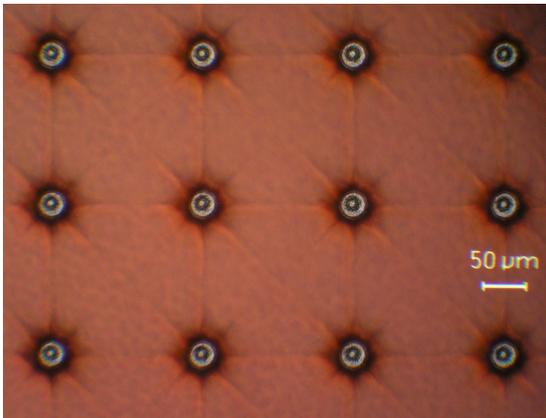


Abbildung 6.22: Lichtmikroskopische Aufsicht einer strukturierten Photoresistschicht mit in den Öffnungen abgeschiedenen PbSn-Lotdepots. Innerhalb der Strukturen ist eine durch die Kontaktfenster im BCB entstehende Vertiefung zu erkennen.

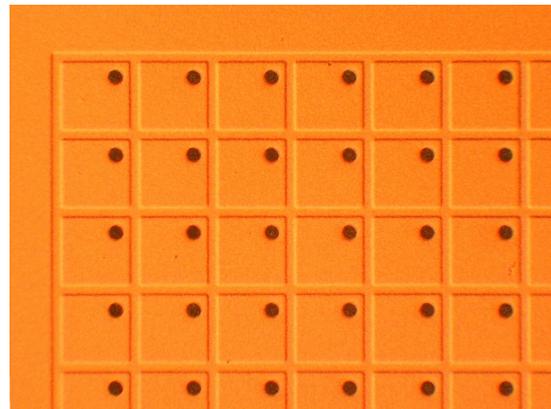


Abbildung 6.23: Ausschnitt aus Pixelmatrix mit abgeschiedenem Cu-Sockel und PbSn-Lotdepot in Interferenzkontrastdarstellung vor dem Differenzätzen der Galvanostartschicht (Platingbase). Die Matrix ist noch mit dieser flächig abgeschiedenen Metallschicht bedeckt.

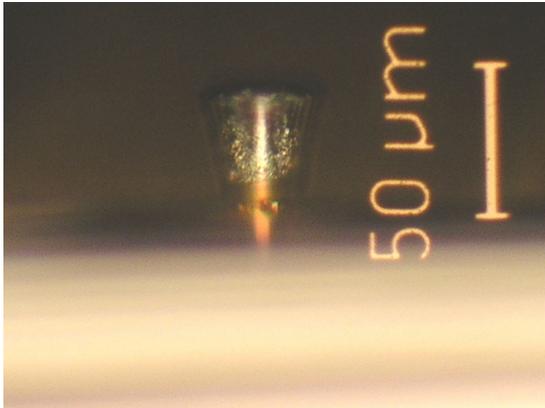


Abbildung 6.24: Lichtmikroskopische Aufnahme eines der über 4000 abgeschiedenen PbSn-Lotbumps in Seitenansicht. Deutlich ist der ca. $5\ \mu\text{m}$ dicke Cu-Sockel der UBM zu erkennen.

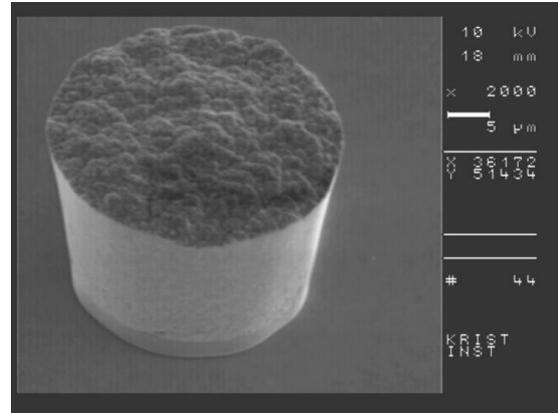


Abbildung 6.25: REM-Aufnahme eines abgeschiedenen Lotdepots. Auch hier kann deutlich zwischen den verwendeten Komponenten Kupfer für die UBM und Blei-Zinn als Lotdepot unterschieden werden.

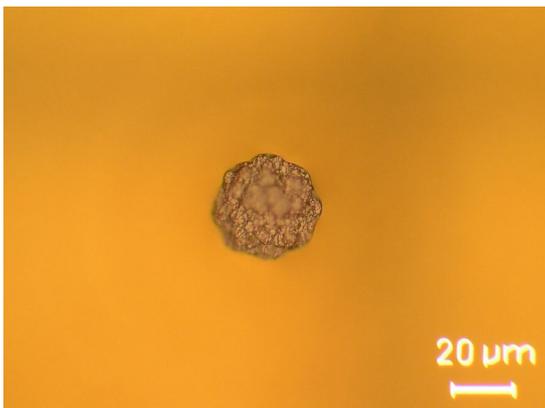


Abbildung 6.26: Lichtmikroskopische Aufnahme eines einzelnen Detektorpixels mit Fokussierung des Lichtmikroskops auf die Oberfläche des abgeschiedenen PbSn-Lotdepots.

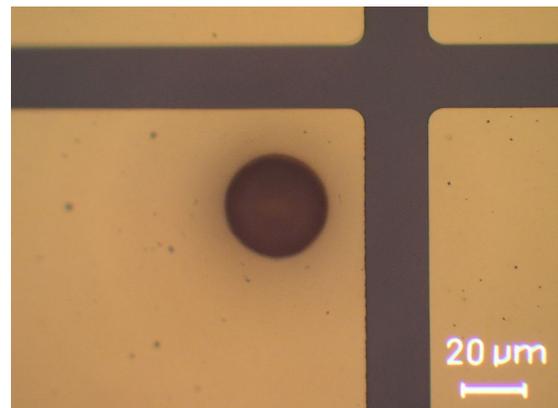


Abbildung 6.27: Gleicher Pixel wie in linker Aufnahme, jedoch wird durch die Fokussierung auf die Detektoroberfläche das Fehlen der Startschicht nach dem Differenzätzen ersichtlich.

Durch die Anwendung einer hohen Resistschicht konnte ohne Überplattierung der Resistformen das gesamte Volumen in den Resistkavitäten abgeschieden werden. Damit wurde eine weitgehend konstante Nutzfläche und relativ gleichbleibende Abscheidebedingung während des gesamten Abscheidvorgangs erreicht.

6.5.3 Abscheidung durch Bedampfung

Indium oder seine Legierungen werden gewöhnlich durch ein thermisches Tiegel-Aufdampfverfahren abgeschieden, das einen Standard für Metalle mit niedrigem Schmelzpunkt darstellt. Die Abscheidung erfolgt dabei in der Regel auf dem Detektor und auf dem Auslesechip in einer Höhe von etwa $5\ \mu\text{m}$. Dadurch wird ein Abstand zwischen dem Detektor und Auslesechip von $10\ \mu\text{m}$ erreicht. Dieser Abstand vermeidet eine Gefährdung der Bauteile während des Flip-Chip-Prozesses [Bre00]. Je größer die Bumphöhe ist, desto stärker kann sie den durch unterschiedliche Temperaturexpansion entstehenden Stress zwischen den Fügepartnern ausgleichen. Die Strukturierung des aufzudampfenden Lotmaterials kann dabei mittels Bedampfung durch eine Metallmaske oder durch *lift off* unter Verwendung einer photolithographisch strukturierten Resistschicht erfolgen. Bei der Bedampfung durch eine Metallmaske bestehen Grenzen im Hinblick auf eine minimal erzeugbare Strukturgröße. Darüber hinaus erfordert die Verwendung einer Metallmaske eine gute Ausrichtung zum Halbleiter und den direkten Kontakt zu dessen Oberfläche.

Aufgrund der mit einem Direktkontakt verbundenen Gefahr der Beschädigung der (Cd,Zn)Te-Oberfläche oder der Beeinträchtigung der darauf befindlichen Metallisierungsschichten, wurde die verfahrenstechnisch aufwendigere aber besser geeignete photolithographische Strukturierung durchgeführt. Bei der Bedampfung durch die Photoresistmaske wurde das In-Legierungsot auf die Kontaktfenster des Detektors aufgebracht. Entsprechend den Anforderungen der Liftoff-Verfahren wurde eine größere Schichtdicke der Resistmaske als die Höhe der aufgedampften Lotsäulen verwendet. Durch die Anwendung der Photolithographie zur strukturierten Abscheidung des Lotmaterials konnten die Vorteile in Form einer besseren Reproduzierbarkeit und einer höheren Präzision in der Ausrichtung der Maske zum Detektor genutzt werden. Dadurch wurde eine homogene Größe und Position der Lotdepots über die gesamte Matrix erreicht.

6.6 Rückseitenpräparation und Vereinzelung

Die Rückseite des (Cd,Zn)Te-Pixeldetektors wurde zum mechanischen Materialabtrag unter stufenweiser Herabsetzung der Korngröße des Schleifmittels geschliffen und geläpft. Im Anschluß

daran fand eine chemisch-mechanische Politur zu einer glänzenden und optisch glatten Oberfläche statt, auf die mittels chemischer Abscheidung aus einer Goldbromidlösung der flächige Rückseitenkontakt aufgebracht wurde. Die Vereinzelung der auf den (Cd,Zn)Te-Wafern prozessierten Pixel-Röntgendetektoren erfolgte mittels *Disc-Saw* mit Schnitten entlang der vorhandenen Sägegräben in der Passivierungsschicht. In der Abb. 6.28 ist ein vereinzelter (Cd,Zn)Te-Pixel-Röntgendetektor dargestellt.

6.7 Reflow der Lotabscheidungen

Neben der Auswahl einer geeigneten Metallisierung und Passivierung sind auch die Prozessparameter für das Umschmelzen der Lotdepots entscheidend. Während des Umschmelzens wird das säulenartig deponierte Lotmaterial zu einer Kugel bzw. Halbkugel umgeformt und geht eine metallurgische Verbindung mit der UBM ein. Darüber hinaus führt der Reflow zur Ausdünnung der während der Bumperzeugung gewachsenen Oxidschicht und begünstigt so einen sicheren Flip-Chip-Bonding-Prozess. Für das kontrollierte Umschmelzen und das Entfernen der aufgewachsenen Oxidschicht wird in der Regel ein aktiviertes Flussmittel eingesetzt. Der mit dem Lotmaterial versehene Chip wird mit Flussmittel benetzt und mit den Bumps nach oben gedreht. Anschließend erfolgt die Erhöhung der Temperatur auf einen Wert von typisch 10°C bis 50°C oberhalb des Lot-Schmelzpunktes. Das verwendete Temperaturprofil beeinflusst jedoch auch die Kinematik der Reaktion zwischen Lot und Metallisierung. Bei einer zu niedrigen Umschmelztemperatur liegt eine niedrige Schmelzrate des Lotes vor und es kann zu schlechter Kugelformation und hoher Ungleichförmigkeit kommen. Eine zu hohe Temperatur kann sich in einer extensiven Reaktion des Lotes mit der Bondpad-Metallisierung niederschlagen, die zur Bildung von intermetallischen Phasen und einer möglichen Entnetzung beiträgt.

Die Funktion der verwendeten Reflow-Methode war stark von der Art und Konzentration des Säuregehaltes im Flussmittel abhängig. Zur Bestimmung des optimalen Gehaltes mussten ver-

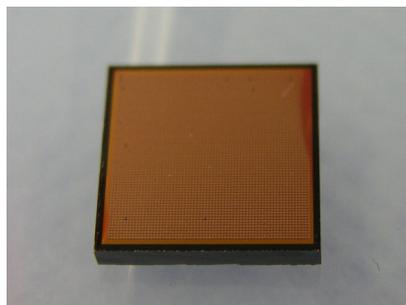


Abbildung 6.28: Hergestellter (Cd,Zn)Te-Pixel-Röntgendetektor nach der Vereinzelung mit Photoresist-Schutzschicht für den Sägeprozess.

schiedene Konzentrationen getestet und ein Parameter-Fenster für die Funktion des Flussmittels bestimmt werden.

Ergebnisse des Reflowprozesses auf (Cd,Zn)Te

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Aufbau erstellt, der die optische Kontrolle des Umschmelzens an einem Mikroskop bei Verwendung eines transparenten Flussmittels ermöglichte. Hierdurch konnte sofort nach dem erfolgten Umschmelzen die Wärmezufuhr unterbrochen und die thermische Belastung des Detektors niedrig gehalten werden. Mit dem erstellten Reflow-Prozess wurden die in den Abb. 6.29 bis 6.32 dargestellten und gut ausgebildeten Bump-Formationen erzielt. Die nach dem 1. Reflow zurückgebliebenen Flussmittelreste konnten leicht und rückstandsfrei entfernt werden. Dadurch wurden Partikel oder Rückstände, die zu einer inhomogenen Verteilung der beim Bondprozess auftretenden Kräfte führen könnten, vermieden.

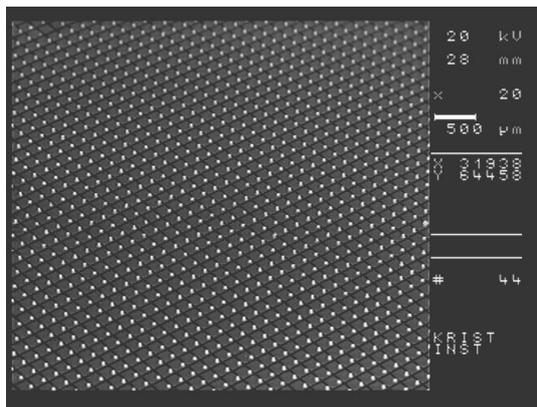


Abbildung 6.29: REM-Aufnahme eines Ausschnittes aus der mit PbSn-Lotbumps versehenen Pixelmatrix im Medipix-1-Layout.

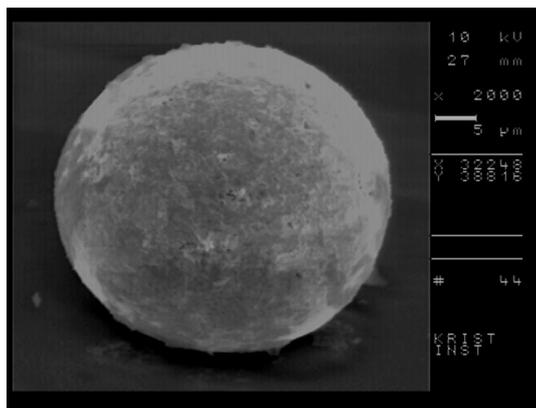


Abbildung 6.30: Einzelner ungereinigter PbSn-Lotbump mit Kugelform nach dem Reflow-Prozess. Auf der Oberfläche sind noch Flussmittelrückstände aus dem Umschmelzschritt zu erkennen.

6.8 Hybridisierung durch Flip-Chip-Montage

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Kriterien für die Anforderungen an den einzusetzenden Flip-Chip-Bonder erarbeitet und ein Flip-Chip-Bonder (siehe Abb. 6.33) ausgewählt. Dieser wurde vom Physikalischen Institut der Universität Freiburg zur Verfügung gestellt und im Reinraum des Technologielabors am FMF installiert und in Betrieb genommen.

Der prinzipielle Aufbau des Systems ist in Abb. 6.34 dargestellt. Es besteht im Wesentlichen aus einer Grundplatte mit Tragarm für den stationären Strahlenteiler, der es erlaubt, durch ein

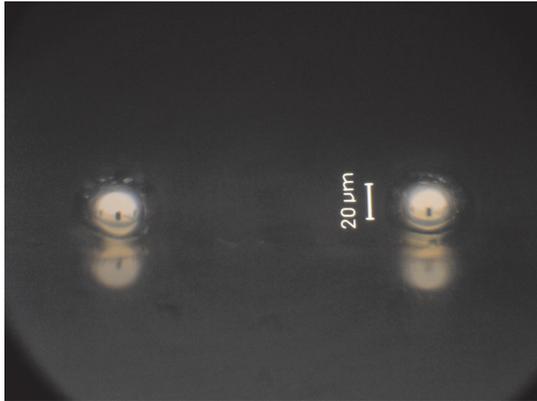


Abbildung 6.31: Lichtmikroskopische Seitenansicht von PbSn-Lotbumps nach erfolgreichem Re-flowprozess und durchgeführter Reinigung.

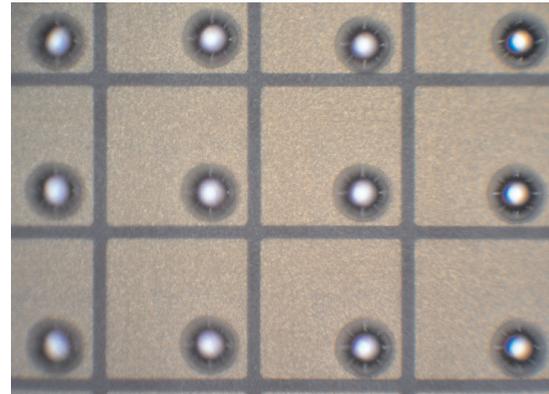


Abbildung 6.32: Lichtmikroskopische Aufsicht auf durch den Reflowprozess gerundete bleifreie In-Lotbumps mit 170 μm -Pixelpitch.

Instrument (Mikroskop oder Kamera) zur optischen Beobachtung ein überlagertes Bild aus der Zielfläche auf dem Substrat und aus dem Bauelement auf dem senkrecht stehenden Platzierarm darzustellen. Sind die Bauteile in den überlagerten Bildern zueinander ausgerichtet, kann der Platzierarm durch Abschwenken die beiden Bauteile aufeinander setzen. Der Platzierarm ist das einzige über ein Schwenklager bewegliche Element des Systems und ermöglicht dadurch eine hohe Bestückungspräzision.

Der eigentliche Prozessablauf zur Herstellung der Flip-Chip-Verbindung begann mit der Aufnahme des Auslesechips auf dem Platzierarm. Hierfür war es erforderlich, dass die strukturierte Seite des Auslesechips für die Aufnahme nach unten zeigte, damit der Platzierkopf auf die Rückseite des Auslesechips aufsetzen konnte. Um die strukturierte Seite des Auslesechips vor Beschädigung oder Verschmutzung zu schützen, erfolgte die Übernahme des Chips mittels eines eigens hierfür konstruierten Wendetools, das eine gefahrlose Handhabung des Auslesechips ermöglichte. Nach der Aufnahme des Auslesechips auf dem Platzierarm wurde der mit den Lotkugeln versehene Detektor auf den Positioniertisch aufgebracht, ein Flussmittel appliziert und die überlagerten Bilder von Detektor und Auslesechip zueinander durch Mikrometerschrauben ausgerichtet.

Anschließend erfolgte der Start des programmierten Temperatur- und Druckprofils und das Abschwenken des Platzierarmes und der Auslesechip wurde mit der im Profil festgelegten Kraft auf den Detektor aufgesetzt (s. Abb. 6.35). Um ein präzises Freigeben des Auslesechips ohne Verlust der Platziergenauigkeit zu erreichen, wurde der Flip-Chip-Bonder dahingehend modifiziert, dass der Auslesechip vor der Rückkehr des Platzierarmes in die vertikale Position mit angepasstem Druck abgeblasen werden konnte. Wie in Abb. 6.36 dargestellt, blieb die durch das Aligment der Fügepartner erreichte Übereinstimmung der Lage der Kontakte der Fügepartner vor dem Abschwenken des Platzierarmes bis zum Erreichen der Abschwenkposition erhalten. Über die Unterheizung und über den Bestückungskopf konnten der Detektor und der Auslesechip erwärmt

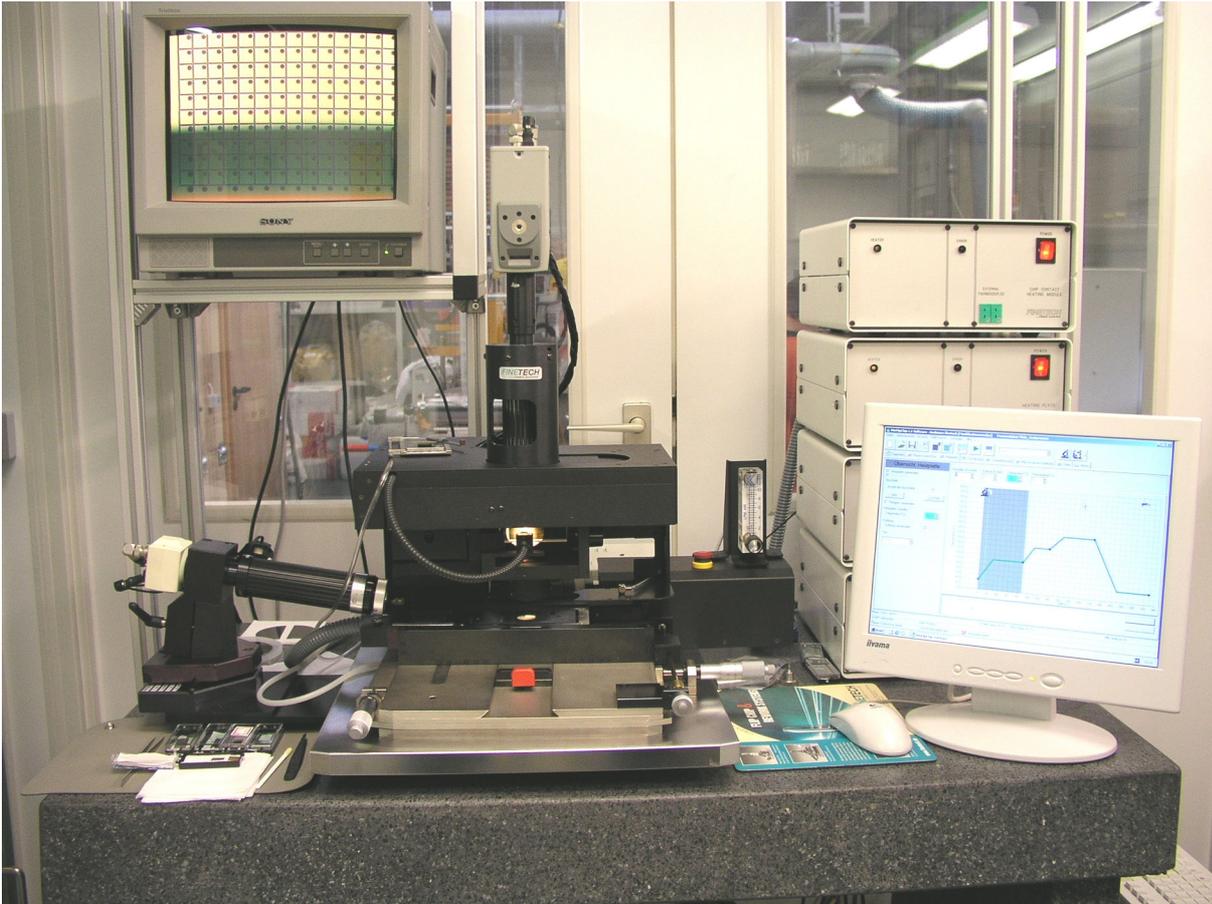


Abbildung 6.33: Flip-Chip-Bonder FINEPLACER Lambda 96 der Firma FINETECH im Reinraum des Technologielaors am Freiburger Materialforschungszentrum der Universität Freiburg.

und zwei separate Temperaturprofile vom PC gesteuert durchlaufen werden (siehe linkes Bild in Abb. 6.37). Die mittlere Aufnahme in Abb. 6.37 zeigt einen Blick in den Raum zwischen dem Ausleseelektronikchip und dem Pixeldetektor, das rechte Bild ein gesamtes (Cd,Zn)Te-Medipix-I-Assembly nach einer durchgeführten Hybridisierung.

6.9 Montage auf Chipboard

Im Anschluß an die Hybridisierung wurde jedes (Cd,Zn)Te-Medipix-I-Assembly mit silberhaltigem Leitkleber einzeln auf ein Chipboard⁷ montiert. Dadurch wurde das jeweilige Assembly mechanisch fixiert und die Rückseite des Auslesechips auf ein definiertes Potential gelegt. Die Pads für die Ein- u. Ausgabeleitungen sowie der Versorgungsleitungen des Medipix-Chips wurden nach der Montage wie in der Abb. 6.38 durch *wirebonding* mittels Aluminiumdraht mit den entsprechenden Kontakten auf dem Chipboard verbunden und die elektrische Verbindung zum Flächenkontakt auf der Rückseite eines (Cd,Zn)Te-Detektors mit Golddraht und Leitkleber

⁷Platine zum Anschluß an ein MUROS

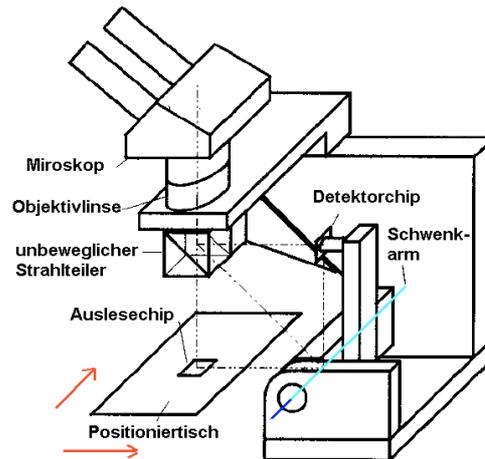


Abbildung 6.34: Skizze zum funktionellen Aufbau des verwendeten Fineplacer Flip-Chip-Bonder [FIN].

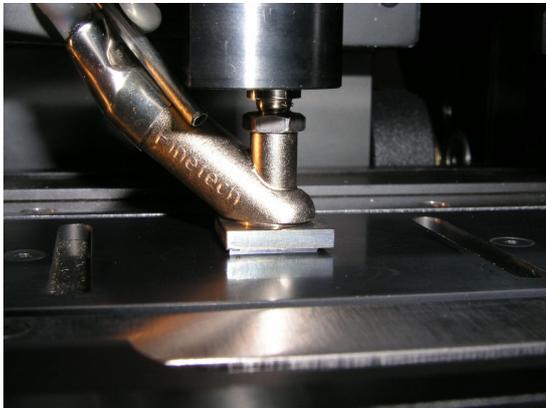


Abbildung 6.35: Abgeschwenkter beheizbarer Bestückungskopf mit Werkzeug für den Medipix-1-Chip und Parallelitätsausgleich.

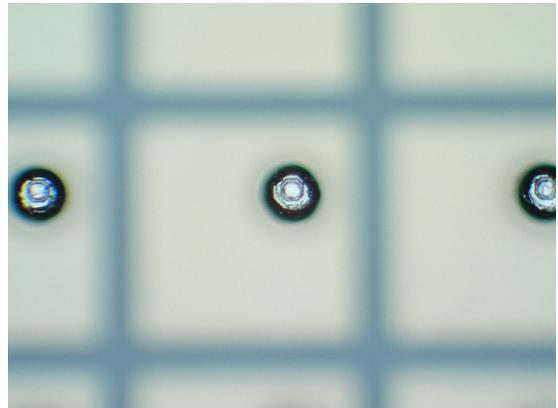


Abbildung 6.36: Abdrücke der Kontakte des Fügepartners im Zentrum der duktilen Lotbumps zeugen von der Platziergenauigkeit des verwendeten semiautomatischen Flip-Chip-Bonders.

ausgeführt. Die fertig montierten (Cd,Zn)Te-Medipix-I-Detektoren auf ihren Chipboards sind in Abb. 6.39 dargestellt.

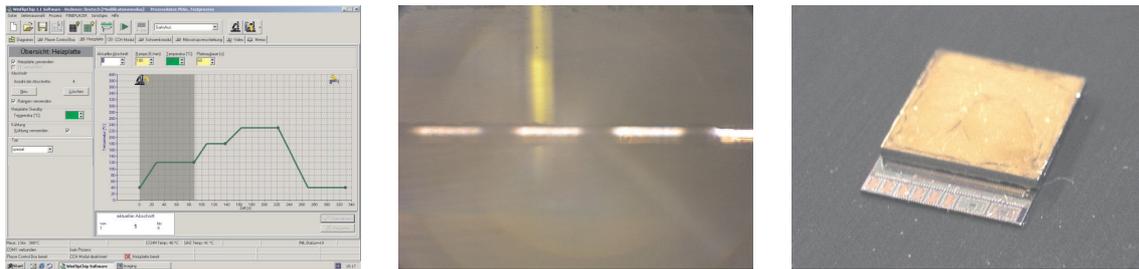


Abbildung 6.37: Linkes Bild: Beispiel eines programmierten Temperaturprofils für eutektische PbSn-Lotbumps. Mittleres Bild: Formen der Bumpverbindungen nach abgeschlossenem Flip-Chip-Bonding. Der horizontale Abstand zwischen den Lotverbindungen entspricht dem Pixel-Pitch von $170\ \mu\text{m}$ des Medipix-I-Auslesechips. Rechtes Bild: Hergestelltes (Cd,Zn)Te-Medipix-I-Assembly vor der Montage auf Chipboard.

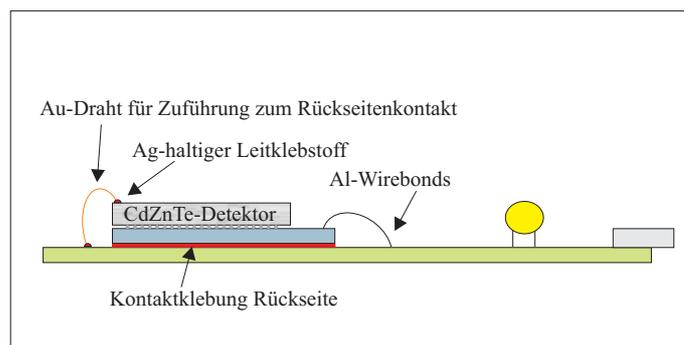


Abbildung 6.38: Skizze des Chipboards mit aufgeklebten (Cd,Zn)Te-Assembly.

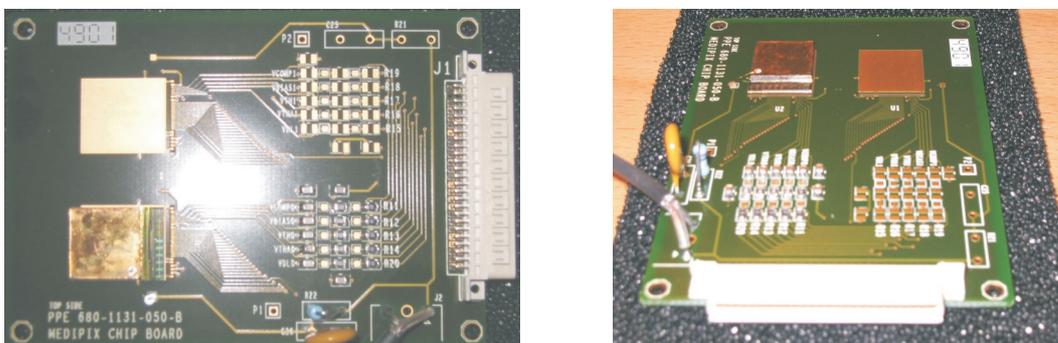


Abbildung 6.39: Aufnahmen von (Cd,Zn)Te-Assemblies auf Chipboards.

7 Das prozessierte Detektorsystem

Innerhalb dieses Kapitels wird das als Ergebnis der vorliegenden Arbeit hergestellte CdTe- bzw. CZT-Detektorsystem und dessen Eigenschaften erläutert und ein Vergleich mit anderen CdTe-Pixeldetektoren und Hybridisierungsverfahren durchgeführt.

7.1 Detektorgeometrie und Detektoraufbau

Die prozessierten und untersuchten Pixeldetektoren aus dem Halbleiter (Cd,Zn)Te basieren auf dem Layout des Photo-Counting-Chips der Medipix-I-Kollaboration und auf dessen Nachfolger aus der Medipix-II-Kollaboration. Der Medipix-I-Chip verfügt wie bereits beschrieben über Pixelauslesezellen mit $170\ \mu\text{m} \times 170\ \mu\text{m}$ Größe, welche in einer Matrix von 64×64 bildgebenden Pixeln angeordnet sind. Die Pixelkontakte auf dem (Cd,Zn)Te-Detektor mussten deshalb mit dem Pitch des Auslesechips prozessiert werden. Das bedeutet, daß die eigentlichen Abmessungen eines Pixelkontaktes um die Breite des *gap* zwischen den Kontakten verringert ist. Bei den innerhalb dieser Arbeit verwendeten Masken für die Pixelmetallisierung betragen die Abmessungen der Kontakte $150\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ bei einem *gap* von $20\ \mu\text{m}$ und $160\ \mu\text{m} \times 160\ \mu\text{m}$ bei einem *gap* von $10\ \mu\text{m}$. In der Abb. 7.1 sind ein Ausschnitt aus dem GDSII-File der verwendeten Masken für die Detektorherstellung und der dazugehörige Bereich auf dem Medipix-1-Chip zu sehen. Die dargestellten Strukturen des Layouts galt es innerhalb der vorliegenden Arbeit durch die Entwicklung einer Abfolge von Technologieschritten zu verwirklichen.

Die Rückseite des Detektors ist vollständig mit einer durchgehenden Metallisierung versehen, die Vorderseite mit der segmentierten Kontaktfläche. Auf beiden Seiten des Detektors wurden Kontakte mit ohmschem Verhalten angestrebt. Über den Pixelkontakten befindet sich eine isolierende Polymerschicht, die als Lötstop- und Passivierungsschicht dient. Sie verfügt über Öffnungen mit $< 20\ \mu\text{m}$ Durchmesser, durch die die Bump-Pads mit der Pixelmetallisierung kontaktiert sind. Durch den Flip-Chip-Bonding-Prozess sind die einzelnen Pixelkontakte über die Bumps mit den Pixelzellen des Medipix-I-Chips mechanisch und elektrisch verbunden.

Zur Beurteilung der im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Medipix-1-(Cd,Zn)Te-Assemblies wurden die im folgenden beschriebenen Messungen durchgeführt. Sie dienen in erster Linie zur



Abbildung 7.1: Die linke Darstellung zeigt die Maskendaten eines Ausschnitts aus der Pixelmatrix, die innerhalb der vorliegenden Arbeit auf (Cd,Zn)Te verwirklicht werden musste. Die Pixelkontakte sind quadratisch und weisen eine Kantenlänge von $150\ \mu\text{m}$ auf. Der Abstand zwischen den Kontakten beträgt $20\ \mu\text{m}$. Die Pixelmatrix wird von einem $300\ \mu\text{m}$ breiten Guardring umfasst. Zwischen den Detektoren verlaufen die notwendigen Sägelinien. Jedes Pixel verfügt über ein Kontaktfenster in der Passivierungsschicht, das in der Zeichnung als Kreis erkennbar ist. Das rechte Bild zeigt eine Aufnahme des entsprechenden Ausschnitts der Pixelzellen auf dem Medipix-I-Chip mit dem der (Cd,Zn)Te-Pixeldetektor nach seiner Herstellung über ein Flip-Chip-Verfahren verbunden werden sollte.

Abschätzung der Güte des Herstellungs- und Verbindungsprozesses. Darüber hinaus geben sie einen ersten, wenn auch subjektiven Eindruck der Bildgebung. Es handelt sich jedoch ausdrücklich nicht um eine ausführliche Charakterisierung des digitalen Röntgensystems, bestehend aus (Cd,Zn)Te-Pixeldetektor und dem Medipix-1-Ausleseelektronikchip. Die Testmessungen wurden nur einmal durchgeführt und geben keinen Hinweis auf die Zuverlässigkeit der Ergebnisse.

Die Berücksichtigung von Einflüssen aus systematischen Fehlern durch ergänzende Messungen unter veränderten Messbedingungen und die Überprüfung der Reproduzierbarkeit unter Beachtung statistischer Fehler und der Fehlerfortpflanzung bleibt einer späteren, ausführlichen Charakterisierung des hergestellten Röntgensystems vorbehalten.

Die Testmessungen wurden mit einem Röntgenstrahler durchgeführt, der hierfür benutzte Röntgenmessstand ist in [Swz01] detailliert beschrieben.

Für den Strahlungsnachweis müssen die durch die Wechselwirkung der Röntgenquanten im Detektormaterial erzeugten freien Ladungsträger für die Ladungssammlung durch ein elektrisches Feld getrennt werden. Hierzu ist eine Hochspannung zwischen den Auslesezellen des Medipix-1-Chips und dem Flächenkontakt auf der Rückseite des (Cd,Zn)Te-Halbleiterdetektors für die Felderzeugung erforderlich. Das elektrische Feld ist bei idealen ohmschen Kontakten über die gesamte Detektordicke wirksam und somit steht das Volumen des Detektors vollständig für die Ladungssammlung zur Verfügung. Das Ziel dieser Ladungssammlung ist es, alle durch Wechsel-

wirkung von Röntgenquanten im Volumen unterhalb des Pixelkontaktes erzeugten Ladungsträger nachzuweisen.

Durch die Sensitivität des Auslesechips für positive Ladungsträger und die ungünstige Ladungssammlung dieser Ladungsträger wurden jedoch eingeschränkte Möglichkeiten der Bildgebung und eine schlechte Energieauflösung erwartet.

7.2 Inbetriebnahme und Kalibrierung des Auslesechips

Zum Betrieb des Medipixdetektors ist eine Ansteuerung durch Hard- und Software notwendig. Die Hardware setzt sich dabei im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten zusammen:

- Chip-Board (auf diese Platine ist jeweils ein Medipix-1-Assembly montiert)
- MUROS-Board (für die Pegel- und Spannungsanpassung des Chipboards)
- digitale PC-Messkarten (für Zugang zum Datenbus des Medipix-1-Chips)
- analoge PC-Messkarten (für Bias-, Kontroll- und Steuerspannungen)
- Steuer-PC (zur Aufnahme der Messkarten und für den Ablauf der Steuersoftware)

Alle Funktionen des Medipix-1-Chips werden über das Programm Medisoft gesteuert. Die hergestellten (Cd,Zn)Te-Assemblies wurden mit Hilfe dieses Steuer- und Auswertprogramms zuerst auf die Funktion der digitalen Schaltungen überprüft. Anschließend erfolgte der ANIN-Test. Hierbei wurden Folgen von Spannungsimpulsen auf die Eingänge aller Pixel gegeben und somit definierte Ladungen auf ihre Testkondensatoren aufgebracht, welche zur Überprüfung der analogen Schaltungen der Pixel dienen.

Darüber hinaus mussten die Arbeitspunkte der Pixelvorverstärker durch Anpassen der Spannungen V_{Bias} und V_{Comp} durchgeführt werden. Es galt dabei, eine hohe Anzahl funktionierender Pixel mit homogenem Ansprechverhalten bei geringem Rauschen und einer niedrigen globalen Diskriminatorschwelle zu erreichen. In Abb. 7.2 ist das Ergebnis eines ANIN-Tests mit einem der (Cd,Zn)Te-Medipix-I-Assemblies dargestellt. Es wurde hierfür auf die Testkapazität jeden Pixels (ohne Röntgenstrahlung) eine Folge von 1000 Pulsen gegeben, während eine für den späteren Messbetrieb geeignete Spannung (z.B. 300 V) am Detektor anlag. Am äußeren Bereich der Auslesepixelmatrix konnte eine Häufung von Pixeln mit niedrigeren Zählerständen beobachtet werden, die vermutlich durch Randeffekte verursacht wurde. Nur wenige Pixel zeigten Zählerstände oberhalb von 1010 Pulsen (gelb dargestellt). Der durchschnittliche Zählerstand aller Pixel des

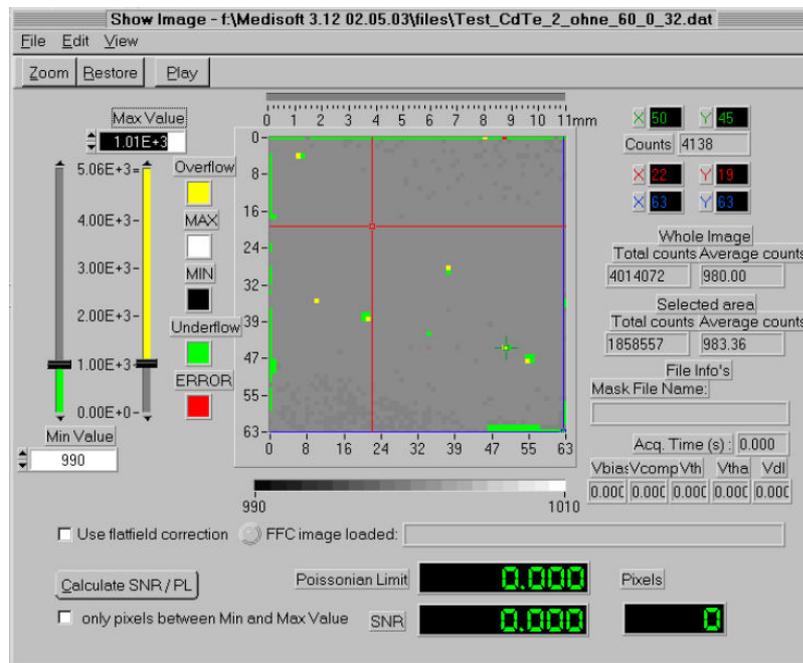


Abbildung 7.2: Die Darstellung zeigt die Zählerstände aller Pixel des Medipix-I-PCC nach der Folge von 1000 Pulsen ($V_{Bias} = 1,45 V$; $V_{Comp} = 3,95 V$; $V_{th} = 1,34 V$; $V_{tha} = 0,78 V$; $V_{dl} = 0,75 V$). Die Grautonskala reicht dabei von schwarz für einen Pixelzählerstand von 990 bis zu weiß mit einem Zählstand von 1010 Pulsen. Die blauen und roten Linien stellen Fadenkreuze zur Selektion einer beliebigen Fläche dar. Grün dargestellte Pixel weisen Zählerstände kleiner als 990 Pulse auf, gelb dargestellte Zählerstände über 1010 Pulse.

Medipix-1-Chips lag aufgrund einiger Randpixel mit niedrigeren Zählerständen bei 980 Pulsen von 1000.

In Abb. 7.3 ist das Ansprechverhalten der einzelnen Pixel in Abhängigkeit von der Höhe der Testpulse (in mV) dargestellt. Die Diskriminatorschwellen des Medipix-1-Auslesechips weisen leichte Differenzen in ihrem Ansprechverhalten bei Testpulsen auf. Zum Angleich des Ansprechverhaltens ist in jeder Pixelzelle ein 3-bit-Register (thresholdbits) implementiert, das die Feineinstellung der Diskriminatorschwelle im begrenzten Umfang ermöglicht. Das genaue Verfahren des Schwellenangleichs ist in [Mik00] und [Swz01] ausführlich dargestellt. Aufgrund der mit nur drei Threshold-Bits geringen Anzahl von acht verschiedenen einstellbaren Werten zur Kalibrierung unterteilen diese eine im gewissen Umfang einstellbare analoge Spannung (V_{tha}) und können so einen relativ großen Bereich von Differenzen der Diskriminatorschwellen zwischen den Pixeln ausgleichen.

Die Abb. 7.4 zeigt Screenshots von der Verteilung der Diskriminatorschwellen eines (Cd,Zn)Te-Medipix-I-Assembly mit nicht feinjustierten Schwellen und nach Durchführung der Schwellenjustierung. Durch das geeignete Setzen der Threshold-Bits resultiert eine geringere Breite der Schwellwertverteilung unter Erhöhung des mittleren Diskriminatorschwellwertes.

7.3 Dunkelstrom

Wie bereits erläutert, ist ein niedriger Dunkelstrom und damit hoher Widerstand des Detektormaterials für den Betrieb eines Halbleitermaterials mit ohmschen Kontakten notwendig.

Die Messungen des Dunkelstroms bei dem für die Bildgebung verwendeten (Cd,Zn)Te-Pixel-detektors erfolgte im verschlossenen Röntgenmessstand ohne äußere Lichteinwirkung. Um völlige Dunkelheit zu erreichen, wurden die Messungen bei nicht aktivem MUROS-Board durchgeführt.

Der Dunkelstrom des Detektors in Abhängigkeit von der Detektorspannung ist in Abb. 7.5 für Raumtemperatur dargestellt. Er wurde in Form der Stromdichte, d.h. dem Verhältnis von Gesamtstrom des Detektors (im unbestrahlten Zustand) zur Summe der Pixelkontaktflächen angegeben. Anhand des Kurvenverlaufs können bei Messungen des Dunkelstromes in Abhängigkeit von der Polarität und Höhe der Detektorspannung Aussagen bezüglich der Art der vorliegenden Kontakte getroffen werden. Aufgrund der nur für positive Ladungsträger sensitiven Medipix-1-Chips wurde der Dunkelstrom des vorliegenden (Cd,Zn)Te-Assembly nur mit der für die Messungen geeigneten Polarität vermessen. Die Detektorspannung wurde dabei allmählich erhöht, um sprunghafte Veränderungen zu vermeiden. Bei den Messungen wurde ein sich jeweils noch ständig verändernder Dunkelstrom bei Erreichen der jeweiligen Messspannungen festgestellt. Für die Messwertnahme wurde subjektiv der Zeitpunkt abgewartet, an dem sich das Ausmaß der

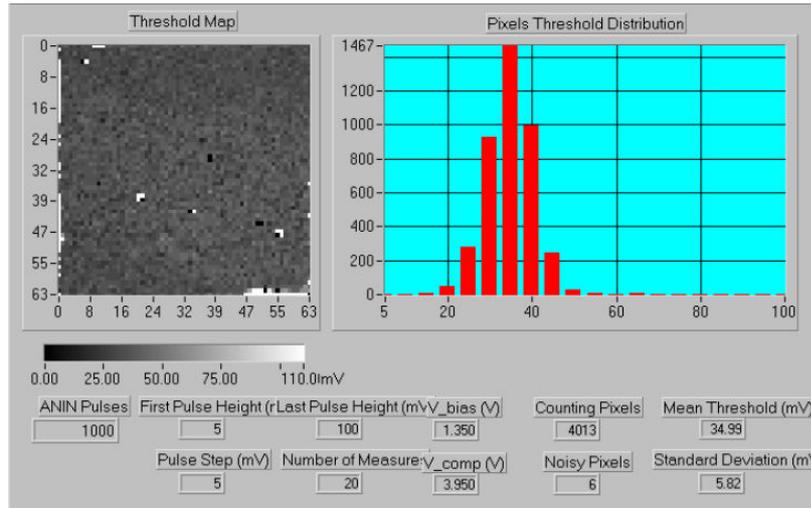


Abbildung 7.3: Die Darstellung zeigt das Ansprechverhalten jedes Pixels in Abhängigkeit von der Testpulshöhe ohne Angleich der Diskriminatorschwellen. Pixel, die bei niedrigen Testpulsspannungen ansprechen, z.B. bei 0 mV, sind schwarz dargestellt. Pixel, die erst bei der größten Pulshöhe ansprechen (100 mV), sind weiß dargestellt. Die Graustufen deuten auf Ansprechen der Pixel zwischen dem Minimal- und Maximalwert der Pulshöhe hin. Die Verteilung des Ansprechverhaltens ist im Histogramm dargestellt.

Veränderung verringert hat. Die in der Abb. 7.5 dargestellten Messpunkte sind deshalb nur eingeschränkt verwendbar und können nur einen subjektiven Hinweis geben, dass hier vermutlich kein reines lineares Verhalten der Kontakte vorliegt, wie es für ohmsche Leitungscharakteristik zu erwarten ist.

Der Medipix-1-Chip verfügt über eine Leckstromkompensation, die pro Pixel einen Leckstrom von bis zu 10 nA kompensieren kann. Die Bestimmung des Leckstromes erfolgt jedoch für die jeweils 64 aktiven Pixel innerhalb einer Spalte durch ein passives 65. Pixel. Der dort gemessene Dunkelstrom wird für die Kompensation aller Pixel dieser Spalte verwendet. Bei einer theoretisch möglichen homogenen Verteilung des Dunkelstroms über alle Pixel des Detektors dürfte der gesamte Dunkelstrom demnach 41 μA betragen. Der maximale gemessene Dunkelstrom aller Pixel des (Cd,Zn)Te-Pixeldetektors betrug bei 500 V Detektorspannung in der Summe 3,10 μA . Damit liegt er im Falle einer homogenen Widerstandsverteilung im Konversionsmaterial deutlich unterhalb der Grenze für die Dunkelstromkompensation.

7.4 Detektorspannung

Um das Verhalten des (Cd,Zn)Te-Pixeldetektors bei Veränderung der Detektorspannung zu überprüfen, wurde die Abhängigkeit der bei Belichtung mit Röntgenstrahlung gezählten Photonen von der Detektorspannung im Bereich von 0 V bis 500 V gemessen. Hierzu wurden mittels einer

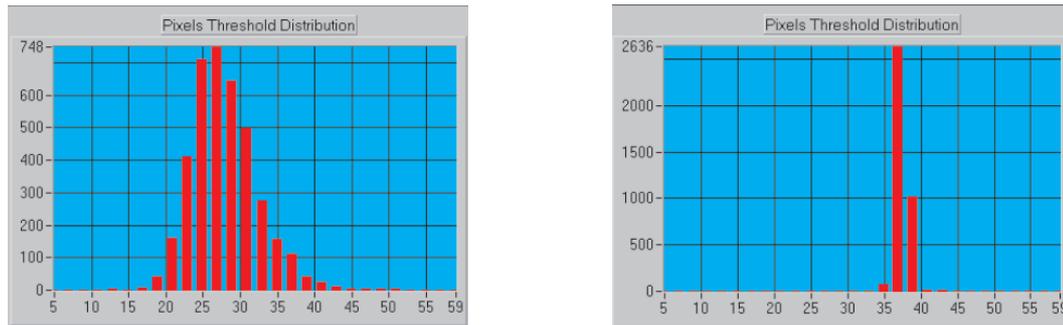


Abbildung 7.4: Beispiel der Verteilung von Schwellenhöhen der Diskriminatoren eines auf (Cd,Zn)Te gebondeten Medipix-I-Elektronikchips bei gleichen Arbeitspunkteinstellungen ohne Schwellenangleich (linkes Histogramm) und mit Angleich (rechtes Histogramm). Die Standardabweichung betrug vor dem Angleich $4,45 \text{ mV}$ bei einem mittleren Schwellenwert von $28,07 \text{ mV}$ und nach der Durchführung des Schwellenangleichs $1,36 \text{ mV}$ bei einer mittleren Diskriminatorschwelle von $37,55 \text{ mV}$.

Röntgenröhre die Flächenbelichtung des Detektors unter schrittweiser Erhöhung der Detektorspannung durchgeführt. Die im Halbleiter deponierte Dosis wurde bei den Messungen konstant gehalten. Jedoch sind Einflüsse auf die Messergebnisse aufgrund der Lichtempfindlichkeit des Detektors durch die am MUROS-Board vorhandenen LEDs nicht vollständig auszuschließen.

Für die Messung war zu erwarten, dass die ansteigende Detektorspannung bei ohmschen Kontakten zu einer Vergrößerung der elektrischen Feldstärke führt und deshalb innerhalb einer gleichen Zeitspanne eine größere Anzahl von Ladungsträgern nachgewiesen werden kann, solange sich deren Geschwindigkeit nicht bereits in der Sättigung befindet.

In der Abb. 7.6 ist die durchschnittliche Anzahl der in einem Pixel gezählten Überschreitungen des Schwellenwertes (Zählerstand) gegen die Biasspannung aufgetragen. Auf die Angabe der Abweichungen der einzelnen Pixelstände vom Mittelwert wurde verzichtet, da sie noch orts aufgelöst und dadurch aussagekräftiger in Flood-Exposure-Belichtungen oder Flatfield-Aufnahmen dargestellt werden (vgl. linkes Bild der Abb. 7.9). Die Zählrate als Funktion der angelegten Detektorspannung zeigt eine stetige Zunahme bei Erhöhung der Detektorspannung. Dennoch wurde kein zu erwartendes Plateau mit einer maximalen Zählrate erreicht, da die verwendete Hochspannungsquelle keine Spannungen über 500 V zuließ. Der lineare Verlauf der Kurve kann auf eine Ladungsträrgeschwindigkeit unterhalb der Sättigung hinweisen, jedoch sind aufgrund des bei großen Detektordicken starken Einflusses von Charge-Sharing überlagernde Effekte wahrscheinlich.

7.5 Linearität

Ein weiterer Versuch galt der Ermittlung der Linearität im Zählverhalten des (Cd,Zn)Te-Detektorassembly. Durch die Verwendung des photonenzählenden Medipix-Auslesechips sollte der große

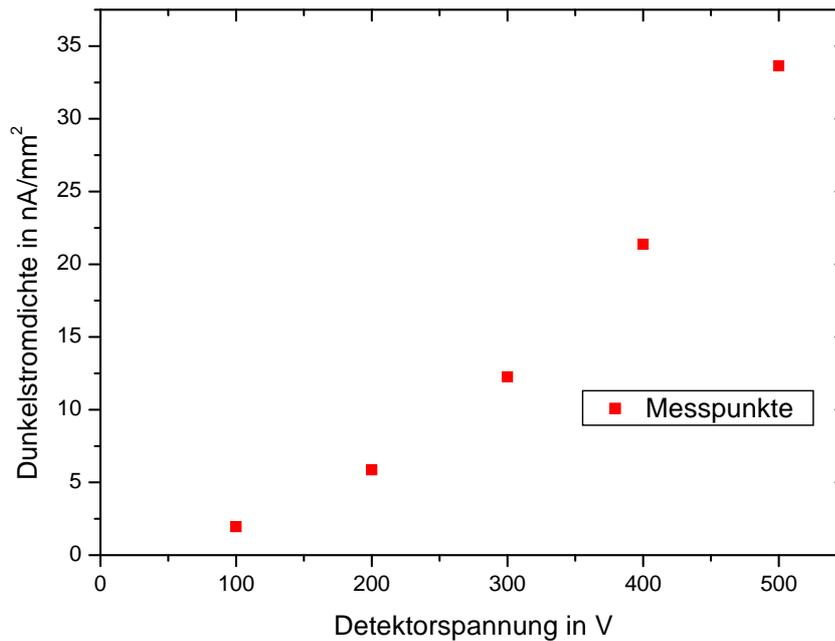


Abbildung 7.5: Dunkelstrom eines (Cd,Zn)Te-Pixeldetektors in Abhängigkeit von der Detektorspannung. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde der Dunkelstrom unter Berücksichtigung der Detektorfläche in Form der Dunkelstromdichte aufgetragen.

dynamische Arbeitsbereich ein lineares Ansteigen der Zählrate in Abhängigkeit von der Belichtungszeit aufweisen. Hierzu wurde der Detektor mit einer Röntgenröhre bei 70 kV Beschleunigungsspannung und einem Anodenstrom von 7 mA in der Fläche mit steigender Belichtungszeit der Röntgenröhre beleuchtet. Die am (Cd,Zn)Te-Detektor anliegende Spannung betrug bei den Messungen 400 V. Die für die Messwertaufnahme der Pixel notwendige Zeit wurde konstant gehalten.

Das in Abb. 7.7 dargestellte Verhalten der Zählrate als Funktion der Belichtungszeit zeigt bei den ersten Testmessungen ein weitgehend lineares Verhalten. In Abb. 7.8 ist ein vergrößerter Ausschnitt aus der Darstellung in Abb. 7.7 zu sehen. Bei kurzen Belichtungszeiten der Röhre ist eventuell mit verstärkten Einflüssen aus den Fluktuationen des Röhrenstroms bzw. aus den An- und Abstiegsphasen der Röhre zu rechnen. Bei der Messung wurde eine maximale Belichtungszeit von 1000 ms verwendet. Dabei wurden pro Pixel durchschnittlich 25674 Ereignisse gezählt. Eine deutlich höhere Belichtungszeit hätte die Anzahl der durch den 15-Bit-Zähler auf 32767 pro Pixel begrenzten registrierbaren Ereignisse überschritten.

7.6 Bildkorrektur

Zur Reduzierung von Einflüssen aus den in Halbleiterdetektoren gewöhnlich vorhandenen, jedoch verschieden stark ausgeprägten Inhomogenitäten des Detektormaterials und für den Ausgleich

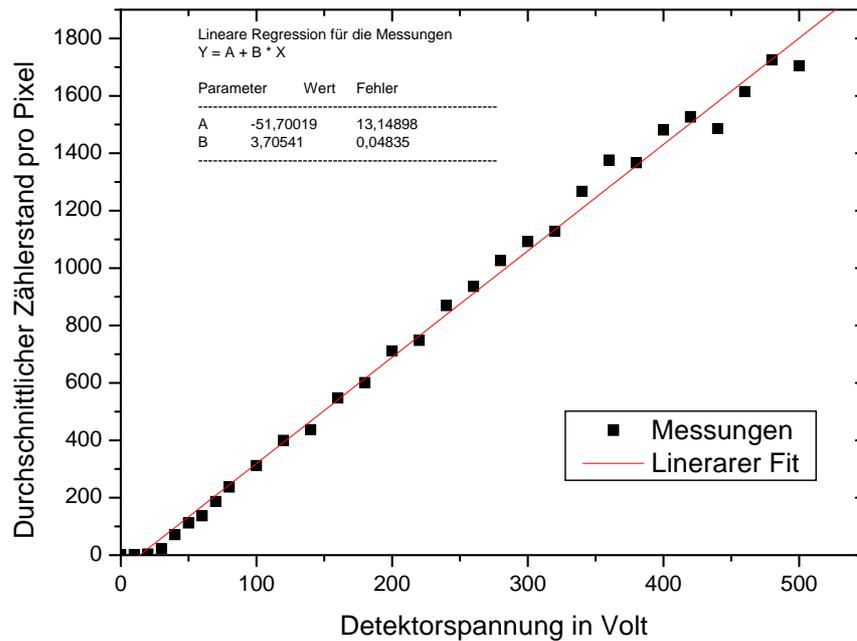


Abbildung 7.6: Darstellung der Abhängigkeit des durchschnittlichen Zählerstandes pro Pixel in Abhängigkeit von der Detektorspannung.

von verbleibenden Differenzen in den Diskriminatorschwellen der Auslesechips werden Bildkorrekturen durchgeführt. Für die nachfolgenden Beispiele der Bildgebung mit den hergestellten Detektorhybriden wurde eine sogenannte Fixed-Pattern-Korrektur durchgeführt. Grundlage für dieses Korrekturverfahren sind sogenannte Flat-Field-Aufnahmen. Darunter sind Bilder zu verstehen, die ohne Objekt zwischen Röntgenröhre und Detektorsystem aufgenommen werden. Die Inhomogenitäten in Flat-Field-Aufnahmen werden überwiegend durch Defekte im Halbleiter und Differenzen in der Feldstärkeverteilung des Detektors, aber auch durch Unregelmäßigkeiten des Röntgenquantenflusses und des Ansprechens der einzelnen Pixelverstärker hervorgerufen. Für eine Korrektur müssen mehrere Flat-Field-Aufnahmen unter gleichen Bedingungen, d. h. unveränderter Detektorspannung, gleichen Arbeitspunkteinstellungen des Ausleseelektronikchips und gleicher energetischer Zusammensetzung der wechselwirkenden Röntgenquanten wie bei den späteren Objektaufnahmen erstellt werden. Aus diesen Aufnahmen wird die gemittelte Matrix A_{ij} mit $i, j = 0 \dots 63$ gewonnen.

Die Berechnung der nun notwendigen Korrekturmatrix erfolgt durch $K_{ij} = \frac{A_{ij}}{\bar{A}}$ (vgl. [Zwe03]). \bar{A} ist gleich $\frac{1}{N} \sum_{i,j=1 \dots 63} A_{ij}$ mit N als gesamte Anzahl der Pixel ohne nichtzählende und rauschende Pixel. Für die eigentliche Korrektur muss nun jede Matrix B_{ij} einer Röntgenaufnahme mittels skalarer Multiplikation von $B_{ij} \cdot K_{ij}$ korrigiert werden.

In Abb. 7.9 ist eine Flat-Field-Aufnahme eines (Cd,Zn)Te-Medipix-I-Detektorassembly, d. h. eine Belichtung ohne Objekt dargestellt (links). Die weiteren Bilder zeigen Aufnahmen eines Objektes im Strahlengang, im Beispiel eine Metallschraube vor der Korrektur (mittleres Bild)

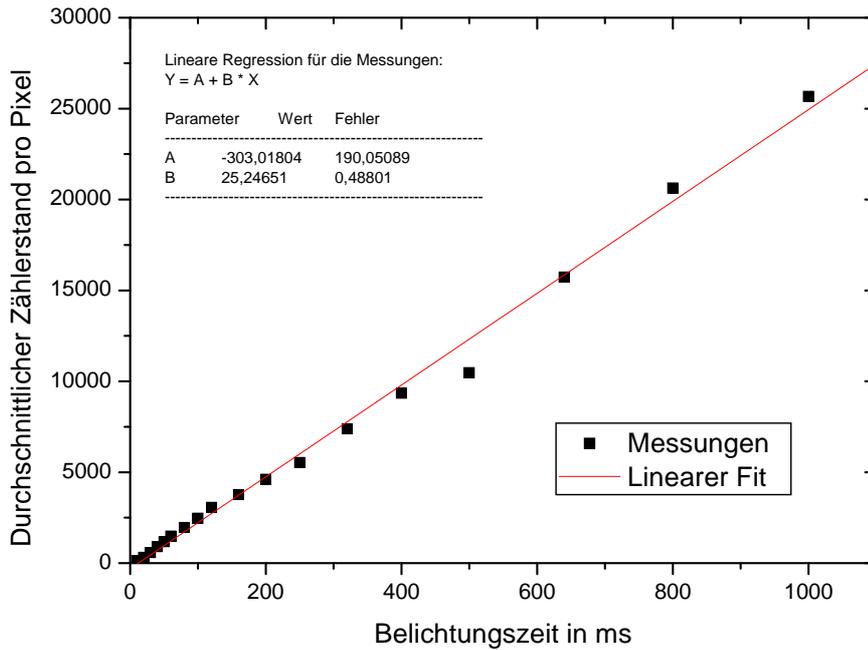


Abbildung 7.7: Darstellung der durchschnittlichen Zählerstände pro Pixel in Abhängigkeit von der Belichtungszeit bei *Flood-Exposure*-Aufnahmen mit einer 70kV-Röntgenröhre.

und nach der *fixed pattern*-Korrektur (rechtes Bild). Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, gibt die korrigierte Aufnahme das Objekt im Strahlengang wesentlich besser wieder.

Die Korrekturmatrix ist jeweils nur für ein bestimmtes Röhrenspektrum und eine Detektorspannung gültig. Durch die Absorption eines Teils der Röntgenphotonen im Objekt, z.B. der in Abb. 7.10 dargestellten Kupferplatte, kommt es zur Aufhärtung der Röntgenstrahlung. Dadurch können die durch das Detektormaterial und den Auslesechip bedingten Differenzen nicht mehr vollständig korrigiert werden. Ungleichförmigkeiten treten deshalb auch in den korrigierten Abbildungen in Erscheinung.

Im rechten Röntgenbild der Abb. 7.10 wurde diese Beobachtung ausgenutzt, um die Unterschiede der Detektormaterialeigenschaften in Bezug auf das Röhrenspektrum verstärkt wiederzugeben. In der Darstellung ist deutlich ein relativ homogener Bereich (grau) zu erkennen, der von einem dunkelgrauen Band durchtrennt wird, welches von links unten aus durch den Detektor bis zur Mitte der oberen Matrixkante verläuft. Dieses Band weist gegenüber der Umgebung verringerte Zählraten auf. Eine mögliche Ursache für diesen Bereich kann z.B. ein eventuell vorhandener Kristallzwilling im Detektormaterial sein.

7.7 Objekte

Die durch die Herstellung der (Cd,Zn)Te-Pixeldetektoren auf Basis des Medipix-I-Chips möglich gewordene Bildgebung sollte anhand der Röntgenbilder von Objekten, deren Ausmaße etwa

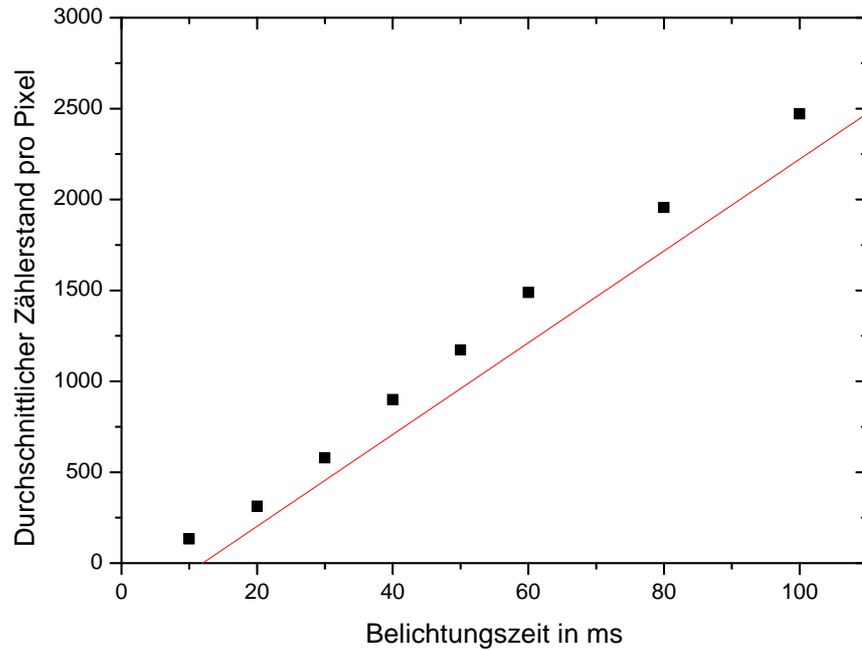


Abbildung 7.8: Vergrößerte Darstellung der kurzen Belichtungszeiträume von Abb. 7.7.

denen der aktiven Fläche des Medipix-I-Chips entsprechen, aufgezeigt werden. Die Objekte befanden sich bei der Erstellung der Aufnahmen in einigen mm Abstand zur Detektoroberfläche und wurden bei unterschiedlichen Detektorspannungen, Röhrenspannungen und Belichtungszeiten durchgeführt. Die Abbildungen 7.11 bis 7.14 zeigen von rechts nach links das jeweilige Objekt in der Gesamtansicht mit *cm*-Maßstab, den daraus für die Röntgenbildgebung gewählten Ausschnitt und die eigentliche *fixed pattern*-korrigierte Röntgenaufnahme des Objektes oder des Objektausschnittes als Screenshot aus dem Medisoft-Programm.

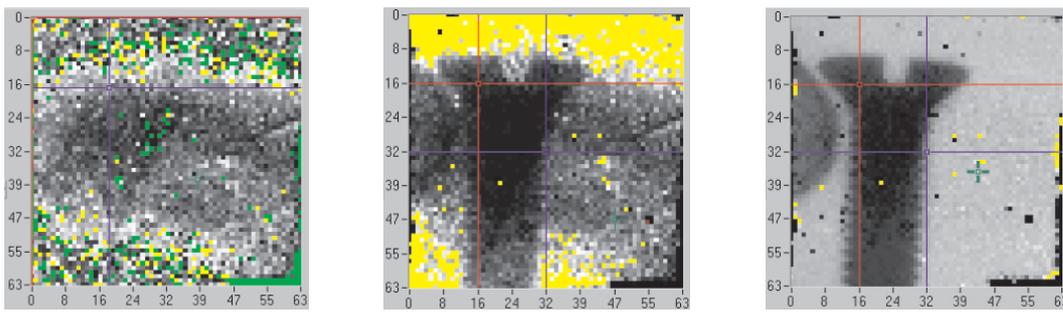


Abbildung 7.9: Links ist eine sogenannte Flat-Field-Aufnahme dargestellt. Die Pixel weisen je nach Farbe codiert folgende unterschiedliche Zählerstände auf: grün < 3000 counts; schwarz bis weiß zwischen 3000 und 30000 counts; gelb > 30000 counts. Das mittlere Bild zeigt die Rohdaten einer Metallschraube, die bei 60 kV-Röhrenspannung durch 500 ms langer Belichtung und einer Detektorspannung von 400 V gewonnen wurden. Die gleiche Aufnahme ist im rechten Bild dargestellt, für dieses Bild wurde jedoch die beschriebene Fixed-Pattern-Korrektur durchgeführt.

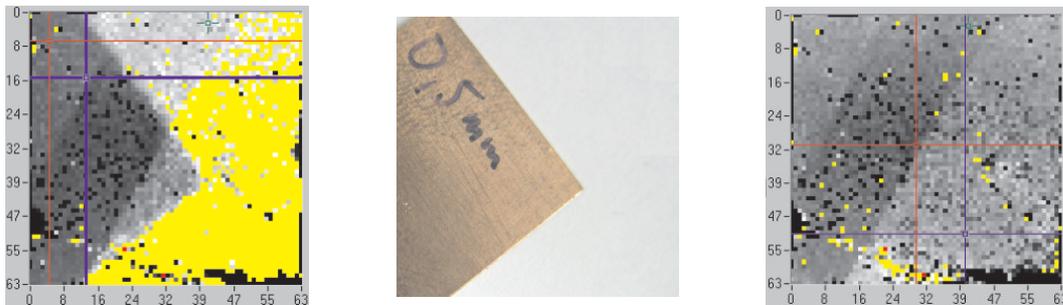


Abbildung 7.10: Die Grenzen der *fixed pattern*-Korrektur werden in der Röntgenaufnahme (linkes Bild) einer $0,5$ mm dicken Kupferplatte (mittleres Bild) ersichtlich. Die für das unveränderte Röhrenspektrum gültige Korrekturmatri ist für die durch das Kupferblech hindurchdringende Strahlung mit dem dadurch aufgehärteten Röntgenspektrum nicht mehr gültig. Dadurch werden die im Detektormaterial vorhandenen Differenzen zwischen den Pixeleigenschaften nicht mehr richtig korrigiert. Im rechten Bild ist eine mit einer Röhrenspannung von 60 kV durchgeführte Flat-Field-Aufnahme dargestellt, welche mit einer für 70 kV Röhrenspannung erstellten Korrekturmatri bearbeitet wurde.



Abbildung 7.11: Korrigierte Röntgenaufnahme (links) eines Zahnrades (Mitte) mit etwa 7 mm Durchmesser (rechts). Aufnahmedaten: 60 kV Röhrenspg., Belichtung 500 ms, Detektorspg. 400 V. Die im Röntgenbild erkennbaren niedrigen Zählerstände entlang der Bildränder traten bereits im ANIN-Test des Auslesechips, d.h. ohne Röntgenstrahlung und Signalerzeugung durch den (Cd,Zn)Te-Halbleiter auf.



Abbildung 7.12: Das Bild rechts zeigt einen 4,51 mm dicken Schliff eines menschlichen Zahns, in dem sich zwei Sackbohrungen befinden. Im mittleren Bild sind die Bohrungen mit 0,5 mm und 1 mm Tiefe deutlich zu erkennen, während sie in der links dargestellten Röntgenaufnahme nur als helle Flecken im unteren Bildbereich vermutet werden können. Deutlich tritt jedoch in der korrigierten Röntgenaufnahme die in den Photographien nicht erkennbare Amalgam-Füllung hervor. Aufnahme-daten: 60 kV Röhrenspg., Belichtungszeit 400 ms, Detektorspg. 300 V, Detektordicke: 1,35 mm.



Abbildung 7.13: Die rechte Aufnahme stellt einen Standard-Logik-IC dar, dessen geröntgter Ausschnitt markiert ist und im mittleren Bild die gleiche Lage einnimmt wie in der Röntgenaufnahme links davon. Deutlich sind in der korrigierten Röntgenaufnahme die elektrischen Zuleitungen von den Anschlußbeinen des IC zum eigentlichen Halbleiter zu erkennen. Die Aufnahme wurde bei 60 kV Röhrenspannung und zwei Sekunden Belichtungszeit und einer Detektorspannung von 400 V durchgeführt.

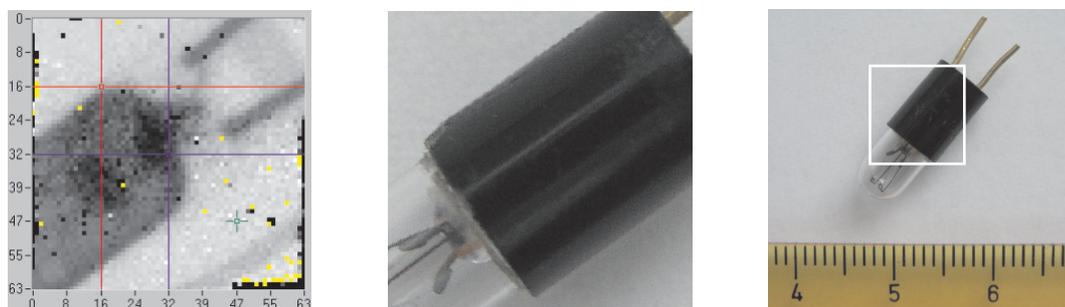


Abbildung 7.14: Bei diesem Objekt handelt es sich um ein kleines elektrisches Birnchen (rechtes Bild). Die korrigierte Röntgenaufnahme (linkes Bild) zeigt das in der Photographie (mittleres Bild) nicht erkennbare Ende des Glaskörpers und den Verlauf der im Kunststoffgehäuse befindlichen Anschlussdrähte zu den Metallbeinchen der Birne. Die Aufnahme entstand bei 60 kV Röhrenspg. mit einer Belichtungszeit von 500 ms unter Verwendung einer Detektorspannung von 400 V.

7.8 Vergleich mit anderen CdTe- und (Cd,Zn)Te-Pixeldetektoren

Die innerhalb dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Entwicklung eines Flip-Chip-Prozesses führten zum Aufbau von hybriden CdTe- bzw. (Cd,Zn)Te-Pixel-Röntgendektoren. Diese werden im folgenden Abschnitt mit anderen¹ hergestellten CdTe- oder (Cd,Zn)Te-Dektoren in Bezug auf ihre Pixelgröße und Hybridisierungsverfahren verglichen.

Die Pixeldetektoren des einzigen kommerziellen europäischen Herstellers von CdTe- und (Cd,Zn)Te-Kristallen und -Technologie, der französischen Firma *Eurorad*, verfügen im Vergleich zu den in dieser Arbeit hergestellten Pixeldetektoren über sehr viel größere Pixel mit einer Pixelfläche von 1 mm^2 . Als Ausgangsmaterial werden von diesem Hersteller Einkristalle mit guter Homogenität bis zu einem Durchmesser von 50 mm gezüchtet.

Der führende Hersteller von (Cd,Zn)Te-Detektor-Technologie, die Firma *eV Products* (USA), züchtet hochohmige Kristalle mit bis zu 140 mm Durchmesser und hohem $\mu\tau$ -Produkt. Daraus werden sowohl Pixel- als auch Einzeldetektoren hergestellt. Bei der Herstellung dieser Pixeldetektoren wird ein Fine-Pitch-Flip-Chip-Bonding-Verfahren unter Verwendung von anisotroper konduktiver *Z-BondTM*-Technologie benutzt. Es handelt sich hierbei um ein bleifreies Nieder-temperaturverfahren, bei dem ferromagnetische Partikel² in ein Epoxydmedium eingelagert sind. Diese werden durch Einbringen des Substrates bzw. ASICs und des (Cd,Zn)Te-Detektors in ein spezielles Magnetsystem in Z-Richtung ausgerichtet. Hierdurch wird die elektrische Kontaktierung von Substrat und Detektor durchgeführt. Nach Herstellerangaben werden - in Abhängigkeit von der Kontaktanzahl - Widerstände in Z-Richtung von $< 3 \Omega$ (Maximum) erreicht. In der XY-Ebene betragen die Widerstände zwischen den Kontakten $> 10^{13} \Omega$. (Cd,Zn)Te-Dektoren, die durch das Z-Bond-Verfahren mit dem Substrat oder direkt mit dem ASIC verbunden werden, sind momentan Pixel mit einem Pitch von $200 \mu\text{m}$ herstellbar. Die Pixelgrößen der im Rahmen der vorliegenden Arbeit bereits verwirklichten (Cd,Zn)Te-Pixeldetektoren weisen im Vergleich dazu bereits einen geringeren Pixelpitch von $170 \mu\text{m}$ auf.

Niederohmige *In*-dotierte(Cd,Zn)Te-Kristalle mit guter Homogenität werden in einem horizontalen Bridgman-Verfahren von der israelischen Firma *Imarad* (*Orbotech Medical Solutions*) gezüchtet. Die daraus hergestellten (Cd,Zn)Te-Pixeldetektoren weisen mit einer Pixelgröße zwischen 0,5 mm und 1 mm auch einen wesentlich größeren Pixel-Pitch als $170 \mu\text{m}$ auf.

Auch das über ein THM-Verfahren hergestellte *Cl*-dotierte CdTe, welches als niederohmige Einkristalle mit bis zu 50 mm Durchmesser bei sehr guter Homogenität von der japanischen Firma *Acrorad* gezüchtet wird, findet als Ausgangsmaterial verschiedenster Pixeldetektoren Anwendung.

¹außerhalb der Medipix-1- und Medipix-2-Kollaboration

²fibers

Bei der Hybridisierung mittels Indium-Bump-Bonding (vgl. [Cly03]) werden von Herstellern häufig Pitches von $50\ \mu\text{m}$ verwirklicht und auch Pitches von $18 - 20\ \mu\text{m}$ wurden bereits erreicht. Für dieses Verfahren werden auf dem Substrat und dem Detektor mittels Aufdampf-Verfahren in Kombination mit Photolithographie oder Metallmasken Indium-Bumps mit einer Abmessung von typisch $15 - 20\ \mu\text{m}$ Durchmesser und einer Höhe von 7 bis $10\ \mu\text{m}$ auf eine UBM aufgebracht. Diese werden jedoch nicht umgeschmolzen, sondern kalt oder bei niedrigen Temperaturen aufeinander gepresst. Der daraus resultierende Abstand der Fügepartner nach der Hybridisierung ist nur etwa 8 bis $15\ \mu\text{m}$ groß. Bei einer Vergrößerung der Pixelanzahl bzw. Verringerung des Pitches steigt der für eine sichere Verbindung notwendige Druck stark an und kann eine Gefahr für den (Cd,Zn)Te-Halbleiter darstellen. Mit Drücken von 1-2 g pro Bump liegt die mechanische Beanspruchung des Detektormaterials beim Kalt-Verpressen weit über der Beanspruchung, die innerhalb des in der vorliegenden Arbeit verwirklichten Verfahrens auf das Detektormaterial ausgeübt wird. Dennoch wird das Verpress-Verfahren für Anwendungen mit Betriebstemperaturen unterhalb von 0 Grad eingesetzt, da hier die Materialunterschiede in Bezug auf den CTE³ eine möglichst niedrige Temperatur bei der Verbindungsherstellung erfordern.

Für das High-Energy-Focusing-Telescope (HEFT) konnten (Cd,Zn)Te-Detektor-Assemblies für Betriebstemperaturen nahe dem Nullpunkt unter Nutzung von Polymer- und Au-Studbumps realisiert werden. Die Detektoren weisen eine Pixelmatrix von 24×44 Pixel bei einem Pitch von $498\ \mu\text{m}$ auf. Auf diesen (Cd,Zn)Te-Detektoren wurden mittels eines Schablonendruckverfahrens 1056 leitende Epoxy-Bumps mit einer Breite von $130 - 140\ \mu\text{m}$ und Höhe von $27 - 27\ \mu\text{m}$ aufgebracht (vgl. [Cly03]). Der verwendete VLSI-Chip verfügt hierbei über Au-Studbumps mit einer Höhe von $44\ \mu\text{m}$. Durch die etwa doppelte Höhe der Studbumps gegenüber den Epoxy-Bumps wurde bei diesem Verfahren ein Vordringen des Leitklebers zum (Cd,Zn)Te-Detektormaterial verhindert. Einen enormen Nachteil gegenüber des in der vorliegenden Arbeit verwirklichten Hybridisierungsverfahrens stellt die serielle Herstellung der Au-Studbumps dar. Für die Herstellung aller Kontakthöcker auf einem Wafer werden bei hoher Bumpzahl 8 bis 12 Stunden pro Wafer benötigt [Cly03], während die Abscheidung von Lotdepots mittels Elektrogalvanik oder Aufdampfverfahren simultan erfolgt und in wesentlich kürzeren Zeiträumen durchgeführt werden kann.

Der Vergleich der innerhalb dieser Arbeit entwickelten bzw. verwendeten Herstellungs- und Hybridisierungsverfahren für (Cd,Zn)Te-Pixel-Detektoren mit anderen bereits realisierten (Cd,Zn)Te-Detektor-Technologien zeigt, dass es sich vor allem durch eine sehr kleine realisierbare Pixelgröße bei gleichzeitig hoher Pixelanzahl und simultaner Herstellung der Lotdepots auszeichnet. Das Hybridisierungsverfahren eignet sich dadurch potentiell für die Herstellung von Detektoren in größeren Stückzahlen.

³coefficient of thermal expansion

8 Diskussion

Als Ergebnis dieser Arbeit steht eine Technologie zur Herstellung von Pixeldetektoren aus dem Halbleiter (Cd,Zn)Te und deren Hybridisierung mittels Flip-Chip-Bonding auf Ausleseelektroniken zur Verfügung. Erstmals besteht dadurch die Möglichkeit, den gesamten Prozessfluss von der Kristallzüchtung und Kristallpräparation über die Herstellungstechnologie und die abschließende Charakterisierung innerhalb eines Entwicklungslabors durchzuführen und die Prozessparameter zu erfassen. Hierdurch ist die Chance zu einer hohen Prozesstransparenz und der Beobachtung von Auswirkungen einzelner Prozessschritte auf das gesamte digitale Röntgensystem gegeben. Das hervorstechende Merkmal des Prozesses ist die schnelle Variierbarkeit der eingesetzten Materialien und Prozessschritte.

Zukünftige Ergebnisse aus der Charakterisierung der durch den entwickelten Prozess hergestellten (Cd,Zn)Te-Detektorassemblies können dadurch direkt in die Optimierung der Züchtungs- und Technologieparameter einfließen. Damit kann die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur zukünftigen Untersuchung der Grundlagen für das Verständnis des Halbleiters (Cd,Zn)Te und seinen Einsatz als Detektormaterial für die Röntgenbildgebung liefern.

Durch die Fortschritte in der Anpassung der innerhalb dieser Arbeit weiterentwickelten Prozesse zur Detektortechnologie von (Cd,Zn)Te an das Chiplayout des Medipix 2-Auslesechips, kann innerhalb kurzer Zeit mit der Fertigstellung von (Cd,Zn)Te-Medipix-2-Dektoren innerhalb der Arbeitsgruppe gerechnet werden. Der Medipix-2-Chip ist auch für negative Ladungsträger sensitiv und sollte die Möglichkeit zur intensiven Charakterisierung der (Cd,Zn)Te-Assemblies bieten. Durch die Entwicklung und Herstellung eines Medipix-2-Nachfolgers besteht in naher Zukunft prinzipiell die Möglichkeit, aus vielen kleinen Detektorassemblies große Detektorflächen mit für die medizinische Bildgebung geeigneten Ausmaßen zu erzielen. Die Verwendung von (Cd,Zn)Te als Halbleitermaterial kann bei entsprechender Implementierung einer das Charge-Sharing berücksichtigenden Elektronik in den photonenzählenden Auslesesystemen und bei geeigneten Materialeigenschaften vor allem in Verbindung mit der Energiefensterung zu neuen Anwendungsmöglichkeiten in der medizinischen Röntgenbildgebung führen.

9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit sollte die Herstellbarkeit eines photonenzählenden Pixeldetektors mit (Cd,Zn)Te als Konversionsmaterial demonstriert werden. Für die Herstellung von Detektorhybriden war es erforderlich, die einzelnen Auslesezellen auf dem Ausleseelektronikchip mit den Kontakten der entsprechenden Pixel auf dem (Cd,Zn)Te-Kristall zu verbinden. Aufgrund der hohen Pixelanzahl und der kleinen Pixelabmessungen stellte diese sogenannte Hybridisierung der Pixeldetektoren mit den Ausleseelektronikchips hohe Anforderungen an die Verbindungstechnologie. Deshalb wurde ein Verfahren benötigt, welches eine hinreichende Platziergenauigkeit gewährleistete und den Anforderungen der Materialeigenschaften von (Cd,Zn)Te entsprach.

Anhand von Literaturstudien wurde zu Beginn der Arbeit eine Evaluierung unterschiedlicher Ansätze zur Hybridisierung durchgeführt. Dabei wurde herausgefunden, daß sich ein Lötverfahren (solder-bump-bonding) am besten für die Flip-Chip-Montage von (Cd,Zn)Te-Detektoren eignet. Es erfüllt die von den geometrischen Maßen der Bildzellen der Ausleseelektroniken gestellten Anforderungen und genügt den materialspezifischen Anforderungen für (Cd,Zn)Te zur Erhaltung der Detektorqualität.

Die Arbeiten zur Entwicklung der notwendigen Prozess-Schritte zur Herstellung der Detektoren erfolgte im Reinraum des Technologielabors des Freiburger Materialforschungszentrums. Unter Verwendung von Photolithographieprozessen konnten Pixelkontakte angefertigt und eine geeignete Polymer-Passivierung auf den (Cd,Zn)Te-Kristallen aufgebracht und strukturiert werden. Es gelang erfolgreich, die Under-Bump-Metallisierungen zu deponieren, die aus einer Haftsicht, einer Diffusionsbarriere und einer Benetzungsschicht bestehen und die bei elektrochemischer Abscheidung des Lots um eine Platingbase ergänzt wurden. Im Anschluss daran konnte durch elektrolgalvanische Abscheidung von eutektischen PbSn-Bumps oder durch Bedampfung mit niedrigschmelzendem bleifreien Lot die Herstellung der Lotbumps durchgeführt werden. Zum Umschmelzen der abgeschiedenen Lotbumps wurde erfolgreich ein Reflow-Prozess entwickelt. Die an den Herstellungsprozess des Detektors und der Bumperzeugung anschließende Hybridisierung wurde mit einem Flip-Chip-Bonder durchgeführt.

Testmessungen an den hergestellten Medipix-I-Assemblies zeigten, dass der entwickelte Flip-Chip-Prozess erfolgreich mit dem Halbleiter (Cd,Zn)Te durchgeführt werden konnte und der Anteil der funktionierender Pixel bereits bei den ersten Hybriden 95% übertraf.

Literaturverzeichnis

- [Ave67] M. Aven, J. Prener, . *Physics and Chemistry of II-VI Compounds*. North-Holland, Amsterdam, 1967.
- [Bar97] H. Barber, B. Apotovsky, F. Augustine, H. Barrett, E. Dereniak, F. Doty, J. Eskin, W. Hamilton, D. Marks, K. Matherson, J. Venzon, J. Woolfenden, E. Young. *Semiconductor pixel detectors for gamma-ray imaging in nuclear medicine*. Nucl. Instr. and Meth., Elsevier, A 395, 1997, S. 421-428.
- [Bei83] A. Beiser. *Atome, Moleküle, Festkörper*, Braunscheig, Wiesbaden, Vieweg, 1983.
- [Bel00] D. San Segundo Bello, B. Nauta, J. Visschers. *Pixel-Level Analog-To-Digital Converters for Hybrid Pixel Detectors with energy sensitivity*. Proceedings of the ProRISC/IEEE workshop, Nov. 30 - Dec. 1, 2000.
- [Ber02] C. Bert. *Zirkulare Tomosynthese mit dem Medipix1-Detektor*. Diplomarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002.
- [Bis98] M.G. Bisogni, M. Campbell, M. Conti, P. Delogu, M.E. Fantacci, E.H.M. Heijne, P. Maestro, G. Magistrati, V.M. Marzulli, G. Meddeler, B. Mikulec, E. Pernigotti, V. Rosso, C. Schwarz, W. Snoeys, S. Stumbo, J. Watt. *PERFORMANCE OF A 4096 PIXEL PHOTON COUNTING CHIP*, Proc. SPIE Vol. 3445 (1998) 298-304 und CERN-EP/98-162.
- [Bre00] J. Breibach. *Development of GaAs Pixel Detectors*. Dissertation, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, August 2000.
- [Brc87] J. Brice. *Properties of Mercury Cadmium Telluride*, EMIS Datareviews, No. 3, INSPEC, IEEE(1987)4
- [Bri03] G. Brix. *Grußwort des Bundesamts für Strahlenschutz zum Symposium: 5 Jahre Konzer-
tierte Aktion Dosisreduktion CT*, Deutsche Röntgengesellschaft u. Fachverband Elektrome-
dizinische Technik, Tagungsband, Berlin, 2003.

- [Buz04] T. Buzug. *Einführung in die Computertomographie. Mathematisch-physikalische Grundlagen der Bildkonstruktion*, Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- [Cah91] R. Cahn, P. Haasen, E. Kramer. *Material Science and Technology: a comprehensive treatment*, Processing of metals and alloys, Vol. 15, VCH-Verlag, Weinheim, 1991.
- [Cah96] R. Cahn, P. Haasen, E. Kramer, A. Jackson. *Material Science and Technology: a comprehensive treatment*, Processing of Semiconductors, Vol. 1.6, VCH-Verlag, Weinheim, 1996.
- [Cam98] M. Campbell, E. Heijne, G. Meddeler, E. Pernigotti, W. Snoeys. *Readout for a 64 x 64 Pixel Matrix with 15-bit Single Photon Counting*, IEEE Trans.Nucl.Sci. 45 (3), June 1998, 751-753.
- [Cap97] P. Capper. *Narrow Gap II-VI Compounds for Optoelectronic and Electromagnetic Applications*. Electronic Materials Series, Vol. 3, Chapman & Hall, London, 1956.
- [Chm04] M. Chmeissani, M. Maiorino, G. Blanchot, G. Pellegrini, J. Garcia, M. Lozano, R. Martinez, C. Puigdengoles, M. Ullan. *Charge Sharing Measurements of pixilated CdTe using Medipix-II-chip.*, IMTC 2004 - Instrumentation and Measurement Technology Conference, Italy, 18-20 May 2004.
- [Cho99] H. Chotas, J. Dobbins, C. Ravin. *Principles of Digital Radiography with Large-Area, Electronically Readable Detectors: A Review of the Basics*. Radiology 1999; 210: 595-599.
- [Chu98] S. Chung, H. Hein und J. Schulz. *Strukturprofilsimulation dicker Schichten in der optischen Lithographie mit DNQ-Novolak-basierenden Photoresists*, Dissertation, Universität Karlsruhe, Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, 1998.
- [Cla02] T. Claesson, A. Kerek, J. Molnar, D. Novak. *An X-ray computed tomography demonstrator using a CZT solid-state detector*. Nucl. Instr. and Meth., Elsevier, A 487, 2002, S. 202-208.
- [Cly03] J. E. Clayton. *Very High Pin Count Flip Chip Assembly Using Conductive Polymer Adhesives*. International Symposium on Microelectronics, Boston, 16-20 November, 2003.
- [Con03] M. Conti, M. Mairino, G. Mettivier, M. Montesi, P. Russo. *Preliminary Test of Medisoft 4: Control Software for the Medipix Readout Chip*. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 50, No. 4, August 2003.
- [Eis96] Y. Eisen. *Current state-of-the-art industrial and research applications using room-temperature CdTe and CdZnTe solid state detectors*. Nucl. Instr. and Meth., Elsevier, A 380, 1996, S. 431-439.
- [Ewn98] K. Ewen. *Moderne Bildgebung: Physik, Gerätetechnik, Bildbearbeitung und -kommunikation, Strahlenschutz, Qualitätskontrolle*. Mit Beitr. von J. Bochers. Stuttgart, New York, Thieme, 1998 (Referenz-Reihe Radiologische Diagnostik).

-
- [Fel01] T. Feltgen. *Gasphaseneinkristalle im System Cadmium-Zink-Tellur für die Detektoranwendung*. Dissertation an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., 2001.
- [Fie96] M. Fiederle. *CdTe Röntgendetektoren: Materialeigenschaften und Charakterisierung*., Shaker Verlag, Aachen, 1996. Dissertation Universität Freiburg, 1996.
- [Fie04] M. Fiederle, A. Fauler, J. Konrath, V. Babentsov, J. Franc, J. James. *Comparison of undoped and doped high resistivity CdTe and (Cd,Zn)Te detector crystals*. IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 51, 2004, S. 1864-1868.
- [Fie05] M. Fiederle, A. Zwerger, H. Braml, J. Ludwig. *Overview of (Cd,Zn)Te based pixel detectors*. International Workshop on Semiconductor Pixeldetektoren for Particles and Imaging, Bonn, Sept. 5-8, 2005.
- [FIN] <http://www.finetech.de>
- [Gem99] A. Gemmler, H. Richter. *Präzisionsgalvanik für die Mikroelektronik*. Galvanotechnik Nr. 12, Leuze-Verlag, Bad Saulgau, 1999.
- [Ger95] V. Gerrish. *Semiconductors for Room Temperature Nuclear Detector Applications: Characterization and Quantification of Detector Performance*. Semiconductors and Semimetals, Vol. 43, Academic Press, San Diego, 1995.
- [Gie02] J. Giersch. *Photonenzählende Pixel-Röntgendetektoren*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002.
- [Hem02] B. Hemdal, I. Andersson, A. Thilander-Klang, G. Bengtsson, W. Leitz, N. Bjurström, O. Jarllman, S. Mattsson. *Mammography - recent technical developments and their clinical potential*. SSI report, Swedish Radiation Protection Authority, Vol. 08, 2002.
- [Her04] P. Hertrich. *Röntgenaufnahmetechnik - Grundlagen und Anwendungen*. Publicis Corporate Publishing-Verlag, Erlangen, 2004.
- [Hoh01] M. Hoheisel, L. Bätz. *Requirements on amorphous semiconductors for medical X-ray detectors*. Thin Solid Films, Vol. 383: 132-136, Elsevier-Verlag, 2001.
- [Jam95] R. James, T. Schlesinger, J. Lund, M. Schieber. *Cd_{1-x}Zn_xTe spectrometers for Gamma and X-Ray Applications*. Semiconductors and Semimetals, Academic Press, Vol. 43, 1995.
- [Joe04] W. Joerger. *Der photorefraktive Effekt in vanadiumdotierten CdTe- und (Cd,Zn)Te-Kristallen*. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., 2004.
- [Kal03] W. Kalender. *Der Einsatz von Flachbilddetektoren für die CT-Bildgebung*. Radiologe, 43:379-387, Springer-Verlag, 2003.
- [Kan] Kanani et al. *Kupferschichten - Abscheidung, Eigenschaften, Anwendungen*. Eugen-Leuze-Verlag, Bad Saulgau, 2000.

- [Kar04] J. Karg, D. Niederlöhner, J. Giersch, G. Anton. *Using the Medipix2 Detector for Energy Weighting*. 6th International Workshop on Radiation Imaging Detectors Glasgow, Scotland, UK, 2004.
- [Khs00] J. Karthaus, K. Bade, W. Bacher. *Galvanische Abscheidung von Metallen aus nichtwässrigen Elektrolyten für die Mikrosystemtechnik*. Wissenschaftliche Berichte, Forschungszentrum Karlsruhe, 2000.
- [Kir02] V. Kirchner. *Elektrochemische Mikrostrukturierung mit ultrakurzen Spannungspulsen*. Dissertation, Fachbereich Biologie, Chemie, Pharmazie, Freie Universität Berlin, 2002.
- [Kla99] J. Klaiber-Lodewigs. *Eigenschaften und Einsatz von CdTe/CdZnTe-Mikrostreifen-detektoren*. Diplomarbeit, Fachbereich Physik, Universität Bonn, 1999.
- [Kno99] G. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [Kot02] E. Kotter, M. Langer. *Digital radiography with large-area flat panel detectors*. Eur. Radiol., Vol. 12, S. 2562-2570, Springer-Verlag, 2002.
- [Kri01] S. Krimmel. *Entwicklung eines Auslesesystems für Röntgen-Pixelchips und Messungen mit einem CdTe-Sensor*. Diplomarbeit, Physikalisches Institut, Universität Bonn, 2001.
- [Kun99] T. Kunz. *Wandfreie CdTe-Einkristallzüchtung im halboffenen Gastransportsystem und deren Modellierung*. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., 1999.
- [Kuz00] M. Kuzawinski. *The Limits of Wirebond Technology: Is Flip-Chip-Attach Now a Prerequisite for Advanced Packaging ?*. IBM, MicroNews, Vol. 6, No. 4, 2000.
- [Lam02] P. Lambracht. *Materialwissenschaftliche Aspekte bei der Entwicklung bleifreier Lotlegierungen*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2002.
- [Lau95] J. Lau. *Flip-Chip Technologies*, McGraw-Hill, New York, 1995.
- [Lau00] J. Lau. *Low cost flip chip technologies*, McGraw-Hill, New York, 2000.
- [Lin01] M. Lindner. *Entwicklung eines zählenden Pixeldetektors für „Digitales Röntgen“*. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2001.
- [Llo01] X. Llopart, M. Campbell, R. Dinapoli, D. San Segundo, E. Pernigotti. *Medipix2, a 64k pixel readout chip with 55 mm square elements working in single photon counting mode*. Proc. of the IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, San Diego, California, 2001.
- [Llo03] X. Llopart. *Performance of the 65536 pixel Medipix2 assembly operating in single photon counting mode*. Präsentation, IWORID, Riga, 2003.

-
- [Lut99] G. Lutz. *Semiconductor Radiation Detectors: Device Physics*. Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- [Luu97] G. Luurtsema. *Spin coating for rectangular substrates, Master of science thesis*, Dep. Of. Elec. Eng. and Computer Sc. University of California, Berkeley, USA, 1997.
- [Mai02] J. Mainprize, N. Ford, S. Yin, E. Gordon, W. Hamilton, T. Tümer, M. Yaffe. *A CdZnTe slot-scanned detector for digital mammography*. Med. Phys., Vol. 29, No. 12, Am. Assoc. Phys. Med., 2002.
- [Mat01] K. Mathieson. *Modelling Semiconductor Pixel Detectors*. Dissertation, Department of Physics and Astronomy, University of Glasgow, 2001.
- [Mav02] O. Maatev, A. Terentev, V. Karpenko, N. Zelenia, A. Fauler, M. Fiederle, K. Benz. *CdZnTe:Cl crystals for X-ray computer tomography detectors.*, Physica Status Solidi B, Wiley-CVH, Vol. 229, No. 3, S. 1073-1076, Feb. 2002.
- [Meh92] S. Mehdizadeh, J. Dubkovic, P. Andricacos, L. Romankiw, H. Cheh. *The influence of lithographic patterning on current distribution in electrochemical microfabrication I. Theory and numerical model, II. Experimental study and mass transfer effects*. Proceedings of the first international symposium on Electrochemical Microfabrication, Proc. Vol. 92-3, 1992.
- [Mey91] Meyers Lexikonredaktion. *Meyers Memo: Das Wissen der Welt nach Sachgebieten*. Verlag Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim, 1991.
- [Mik00] B. Mikulec. *Single Photon Detection with Semiconductor Pixel Arrays for Medical Imaging Applications*, Dissertation, CERN, Genf, 2000.
- [Nei04] U. Neitzel, S. Günther-Kohfahl, G. Borasi, E. Samei. *Determination of the detective quantum efficiency of a digital x-ray-detector: Comparison of three evaluations using a common image data set*. Med. Phys., Vol. 31, No. 8, S. 2205-2211, August 2004.
- [Nie02] D. Niederlöhner. *Röntgenpixeldetektoren in der Computertomographie*. Diplomarbeit, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002.
- [Ric] H. Richter, K. Rueß, A. Gemmler und W. Leonhard. *Präzisionsgalvanik für die Flip-Chip-Montage - Mikroabscheidung hochreiner Pb/Sn-Legierungen*. metalloberfläche, 11/9, Carl-Hanser-Verlag.
- [Ricq00] S. Ricq, F. Glasser, M. Garcin. *CdTe and CdZnTe detectors behavior in X-ray computed tomography conditions*. Nucl. Instr. and Meth., Elsevier, A 442, 2000, S. 45-52.
- [Ricq01] S. Ricq, F. Glasser, M. Garcin. *Study on CdTe and CdZnTe detectors for X-ray computed tomography conditions*. Nucl. Instr. and Meth., Elsevier, A 458, 2001, S. 534-543.
- [Rud93] P. Rudolph, M. Mühlberg, Mater. Sci. Eng., B 16, 8, 1993.

- [Rud98] P. Rudolph. *Melt growth of II-VI compound single crystals*. aus M. Isshiki: Recent Development of Bulk Crystall Growth, Signpost, Trivandrum, 1998.
- [Sbr00] C. Scheiber. *CdTe and CdZnTe detectors in nuclear medicine.*, Nucl. Instr. and Meth., Elsevier, A 448, 2000, S. 513-524.
- [Sbr01] C. Scheiber, G. Giakos. *Medical applications of CdTe and CdZnTe detectors.*, Nucl. Instr. and Meth., Elsevier, A 458, 2001, S. 12-25.
- [Schb95] M. Schieber, R. James, T. Schlessinger. *Summary and Remaining Issues for Room Temperature Radiation Spectrometers*. Semiconductors and Semimetals, Vol. 43, Academic Press, New York, 1975.
- [Schl00] M. Schlesinger, M. Paunovic. *Modern Electroplating*. John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [Sch01] T. Schlessinger, J. Toney, H. Yoon, E. Lee, B. Brunett, L. Franks, R. James. *Cadmium zinc tellurid and its use as a nuclear radiation detector material*. Material Science and Engineering, 32, Elsevier Science, 2001.
- [Shi95] K. Shimizu et. al. *Solder Joint Reliability of Indium-Alloy Interconnection*. Journal of Electronic Materials, Vol. 24, No. 1: 39-45, 1995.
- [Spa03] M. Spahn, V. Heer, R. Freytag. *Flachbilddetektoren in der Röntgendiagnostik*. Der Radiologe, 43: 340-350, Springer-Verlag, 2003.
- [SSK04] Strahlenschutzkommission. *Digitale Mammographie in der kurativen Anwendung und im Screening - Stellungnahme der Strahlenschutzkommission*. Geschäftsstelle der Strahlenschutzkommission, 2004.
- [Ste70] J. Steiniger, A. Strauss, R. Brebick. *Phase Diagram on lthe Zn-Cd-Te Ternary System*. J. Electrochem. Soc., Vol. 117, No. 10: 1305, 1970.
- [Sto99] S. Stoll. *CdTe:Röntgendetektoren: Optimierung der Materialeigenschaften für ortsaufgelöste Systeme*. Diplomarbeit, Kristallographisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 1999.
- [Sze85] S. M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley and Sons, New York, 1985.
- [Str02] M. Strotzer. *Flachdetektoren in der digitalen Radiographie: Sofortbilder hoher diagnostischer Qualität bei reduzierter Strahlenbelastung*. Dtsch. Ärztebl. 2002;99: A 2484-2488 [Heft 38]
- [Swd89] M. Sherwood und C. Sutton. *Physik im Alltag*. Bertelsmann-Verlag, Gütersloh, 1989.

-
- [Swz01] C. Schwarz. *Digital X-ray Imaging Using Hybrid Semiconductor Pixel Detectors in Single Photon Counting Mode*. Doktorarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg., August 2001.
- [Szl04] C. Szeles. *Growth and Characterization of Semi-Insulating CdZnTe Crystals for Semiconductor Detectors*. Presentation on the 13th International Workshop on Room Temperature Semiconductor X- and Gamma-Ray Detectors, Rome, 2004.
- [Wal98] P. Waloschek. *Wörterbuch Physik*. Deutscher Taschenbuch-Verlag Gmbh & Co. KG, München, 1998.
- [Wid88] D. Widmann, H. Mader, H. Friedrich. *Technologie hochintegrierter Schaltungen*, Halbleiter-Elektronik: Bd. 19, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [Wil88] K. Wilke, J. Bohm. *Kristallzüchtung*. Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt/Main, 1988.
- [Zan78] K. Zanio. *Cadmium Telluride*, in R.K. Willardsen & A.C. Beer (Hrsg.), *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 13, Academic Press, New York, 1978.
- [Zen] R. Zengerle. *Vorlesungsskript: Mikrosystemtechnik 1*. IMTEK, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.
- [Zwe03] A. Zwerger. *Untersuchungen von digitalen Röntgensensoren basierend auf der MEDIPIX Elektronik.*, Wissenschaftliche Arbeit, Fakultät für Mathematik und Physik, Physikalisches Institut, Universität Freiburg, 2003.

A Pixelmetallisierung

Die Herstellung der Pixelmetallisierung auf (Cd,Zn)Te erfordert die nachstehende Abfolge von einzelnen Prozess-Schritten:

- ➊ Reinigung der Substrate
- ➋ Schleuderbelackung
- ➌ Ausbacken des Photoresists
- ➍ Belichtung mit Maske 1
- ➎ Entwicklung
- ➏ Deposition der Metallisierungen durch Bedampfen oder Sputtern
- ➐ Liftoff der Metallisierungen
- ➑ Optische Inspektion, Schichtdickenmessung mit Profilometer

Substratpräparation	TI PRIME empfohlen
Resist-Dicke	2,6 μm bis 3,5 μm
Breitbandbelichtung oder auf g, h, i - Linien	100 mJ/cm^2 bis 350 mJ/cm^2 (typ. 200 mJ/cm^2)
Belichtungszeit	10 s bis 35 s (typ. 20 s)
Wartezeit	5 min bis 20 min
Flood Exposure ohne Maske	300 mJ/cm^2 bis 800 mJ/cm^2 (typ. 540 mJ/cm^2)
Entwickler	Clariant AZ 825 MIF, AZ 400K 1:4, AZ 351B
Hardbake	135°C bis 145°C für 2 min
Liftoff-Medium	NMP, Aceton, MMP, EEP, DMF, Ethyllaktat, PGMEA
Remover	AZ 100 Remover, Aceton

Tabelle A.1: Eine Zusammenfassung der Herstellerangaben für die Prozessierung des Umkehr-Photolackes *TI35ES* der Firma Microchemicals.

B Passivierung

Folgende Prozess-Schritte werden vom Hersteller für die Anfertigung und Strukturierung einer Polymer-Passivierungsschicht mit photosensitiven *Cyclotene* benötigt:

- ❶ Oberflächen-Reinigung
- ❷ Haftvermittler
- ❸ Schleuderbeschichtung BCB
- ❹ Hotplate Softbake
- ❺ Belichtung
- ❻ Reset-Bake (Predevelop bake)
- ❼ Entwicklung
- ❽ Plasma Descum

- einfach strukturierbar	- hoher Volumenwiderstand $1 \cdot 10^{19} \Omega cm$
- niedrige dielektrische Konstante (2.65)	- niedriges Niveau von ionischen Verunreinigungen
- hohe Durchbruchspannung $5,3 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$	- geringe Aufnahme von Feuchtigkeit
- geringer Leckstrom	- hohe Lösungsmittelbeständigkeit
	- keine Kupfermigration

Tabelle B.1: Zusammenfassung der elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften von photosensitiven BCB *Cyclotene 4024-40*.

C Dickschichtlithographie mit AZ 4562

Die Dickschicht-Photolacke der AZ-4500-Serie von Clariant sind nach Herstellerangaben für Anwendungen ausgelegt, die Schichtdicken über $3 \mu m$ erfordern. Herkömmliche Lacke benötigen bei großen Schichtdicken aufgrund der hohen Absorption der photoaktiven Komponenten große Belichtungs Dosen ($> 1000 \frac{mJ}{cm^2}$). Dies kann zu ungewollt starker Vernetzung der Resistoberfläche führen. Darüber hinaus kann während der langen Belichtung viel Stickstoff entstehen, der sich innerhalb der Resistschicht aufgrund von zu langsamer Diffusion ansammelt und zum Anheben der Resistschicht führt.

Feststoffgehalt [%]	39,5
Viskosität [cST bei 25°C]	440
Absorptionsfähigkeit [l/g*cm] bei 398 nm	1.01
Lösungsmittel	PGMEA ¹
Max. Wassergehalt [%]	0,50
Spektrale Empfindlichkeit [nm]	310 - 440
Beschichtungscharakteristik	striation free
Filtrierung [μm absolut]	0,2

Tabelle C.1: Physikalische und chemische Eigenschaften des Dickschichtphotolackes AZ 4562 der Firma Clariant.

Für die AZ-4500-Serie wurde vom Hersteller deshalb eine spezielle photoaktive Komponente mit niedriger Absorption und reduziertem Stickstoffgehalt ausgewählt. Durch die hohe Viskosität des Photoresists AZ 4562, dessen Feststoffgehalt (vgl. Tab.C.1) nahe an der Löslichkeitsgrenze liegt, können nach Angaben aus dem Datenblatt² bis zu $10 \mu m$ Schichthöhe bei reduzierter Drehzahl ($2000 \frac{1}{min}$) in einem Schritt erreicht werden. Um größere Schichtdicken zu erzielen, können beim AZ 4562 darüber hinaus verschiedene spezielle Beschichtungstechniken angewandt werden. Eine Methode besteht in der Reduzierung der Spindauer³ auf bis zu 3 s, wodurch Schichtdicken bis zu $20 \mu m$ erreichbar sind. Des Weiteren gibt es bei dem AZ 4562 die Möglichkeit, Mehrfach-Spinprozesse mit Zwischenbacksritten unterhalb von $90 \text{ }^\circ\text{C}$ durchzuführen. Bei der Anfertigung dicker Resistschichten sind jedoch bestimmte Richtlinien zu verfolgen. So ist es erforderlich, die

²Produktdatenblatt: AZ 4500 Series Thick Film Photoresist, Clariant GmbH Wiesbaden, Deutschland

³normale Spindauer beträgt zwischen 30 s und 40 s

Resistschicht nach ihrer Herstellung 15 min bei Raumtemperatur zu halten, um ein Abdampfen des überwiegenden Anteils an Lösemittel zu ermöglichen. Erst danach soll der Resist bevorzugt unter Verwendung einer Hotplate und langsamer Erhöhung der Temperatur ausgebacken werden. Dadurch wird ein Einschluss großer Lösemittelmengen innerhalb des Resists, wie er durch Bildung einer schnell trocknenden Oberflächenschicht entsteht, vermieden und der Blasenbildung und dem Anheben der Resist-Schicht entgegengewirkt.

Nach Herstellerangaben ist es notwendig, auch den Entwicklungsprozess aufgrund der beschränkten Löslichkeit von bereits überbelichteten Positivlacken⁴ an die großen Schichtdicken anzupassen. Es wird eine Entwicklungsrate von ca. 2 μm pro Minute empfohlen, die über die Anpassung der Belichtungszeit eingestellt werden kann. Als Entwickler werden der AZ 351B oder der AZ 400 K empfohlen.

Spin-Geschwindigkeit [rpm]:	2000	3000	4000	5000	6000
AZ 4562	8,77	7,16	6,20	5,55	5,06

Tabelle C.2: Schichtdicke in μm als Funktion der Spin-Geschwindigkeit.

Verdünnung und EBR ⁵	AZ EBR Solvent
Prebake	100°C, 50 s, Hotplate
Exposure	Breitband oder monochromatisch
Post exposure bake	nicht benötigt ⁶
Entwicklung	AZ 351B, 1:4, 30 s pro μm Schichtdicke
Postbake	115°C, 50 s (Hotplate) oder 60 min (Ofen)
Entfernung	AZ 100 Remover

Tabelle C.3: Prozess-Richtlinien des Herstellers für den Dickschicht-Photoresist AZ 4562.

Die vom Hersteller empfohlenen Prozesse⁷ zur Einfachbelackung bis 30 μm Schichtdicke und multipler Belackung mit Gesamtschichtdicken bis 100 μm dienen als Ausgangsbasis, um einen Dickschichtlithographieprozess für (Cd,Zn)Te-Substrate zu entwickeln.

⁴es tritt eine Sättigung bei Werten in der Größenordnung von 100 $\frac{\text{nm}}{\text{s}}$ auf

⁷Application Note: Process Recommendation for AZ 4500 Photoresists with high Film Thickness, Clariant

Prozess-Schritt	10 μ	15 μ	20 μ	30 μ
Belackung				
Dispersion	statisch	statisch	statisch	statisch
Verteilung	(250rpm/10s)*	(250rpm/10s)*	(250rpm/10s)	(250rpm/10sec)
Spinnen	1500rpm/30s	700rpm/30s	2000rpm/4s	1500rpm/4s
Wartezeit	60 s	60 s	180 s	> 180 s
Backen (HP)	110°C/3min	110°C/3min	110°C/5min	110°C/5min
Wartezeit	>30 min	>1h	>1h	>1h
Belichtung	Breitband, 500 mJ/cm ² bis 2000 mJ/cm ²			
Entwicklungszeit	5min	7 min	10 min	15 min

Tabelle C.4: Prozess-Empfehlungen für AZ 4500 Photolacke mit hoher Schichtdicke (* optional).

Folgender Prozess wird vom Hersteller für Schichtdicken bis 30 μm empfohlen:

- ❶ Das Aufbringen des Resists für die Belackung des Substrates sollte nach Herstellerangaben durch statische Dispersion durchgeführt werden. Darauf sollte ein Verteilschritt mit einer Geschwindigkeit von 250 rpm für eine Dauer von 10 s folgen. Der Verteilungsschritt muss dabei so angepasst werden, dass der Wafer vor dem Anwenden der endgültigen Spin-Geschwindigkeit vollständig mit dem Photoresist bedeckt ist. Für den Spin-Prozess sind je nach der zu erzeugenden Schichtdicke die in Tab. C.4 aufgelisteten unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten und Spin-Zeiträume zu wählen.
- ❷ Nach dem Spinvorgang ist je nach Schichtdicke eine Wartezeit von 60 s bis über 180 s einzuhalten. Die Wartezeit vor dem Hotplate-Backschritt ist notwendig, um das Zurückziehen des Photoresists vom Substratrand während des Ausbackens zu verhindern.
- ❸ Für den Ausbackschritt wird vom Hersteller eine Temperatur von 110°C auf der Hotplate empfohlen. Die Ausbackzeit beträgt je nach Schichtdicke 3 min bis 5 min.
- ❹ Die sich dem Backprozess anschließende Wartezeit ist ebenfalls von der Schichtdicke abhängig und kann aus Tab. C.4 entnommen werden. Die Wartezeit vor der Belichtung ist notwendig, um der Resistschicht die Aufnahme von Feuchtigkeit zur Rehydratation zu ermöglichen und dadurch eine gute Photosensitivität zu erhalten.
- ❺ Die im weiteren Prozessverlauf durchzuführende Belichtung soll im Breitband mit einer Dosis von 500 mJ/cm^2 bis 2000 mJ/cm^2 erfolgen.
- ❻ Der den Prozess abschließende Entwicklungsschritt sieht in Abhängigkeit von der Schichtdicke Entwicklungszeiten von 5 min bis 15 min vor. Die Entwicklungsbedingungen gelten für Raumtemperatur und einen AZ 400 K oder AZ 351 B Entwickler mit einem Verhältnis von 1:4 zwischen der Entwicklerlösung und dem DI-Wasser. Bei der Entwicklung verweist der Hersteller darauf, dass Spuren von Verunreinigungen aus MIF Entwicklern den Entwicklungsprozess des Photoresists in anorganischen Entwicklern wie z.B. dem AZ 400 K, AZ 351 oder AZ Entwicklern vollkommen stoppen können.

Für Schichtdicken bis zu 100 μm gelten folgende Empfehlungen des Herstellers für die Beschichtung und Strukturierung:

- ❶ Auch für die Herstellung einer endgültigen Schichtdicke von 100 μm wird vom Hersteller für den Belackungsprozess eine statische Dispersion des Photoresists empfohlen. Der anschließende Verteilungsschritt bei 250 rpm sollte 10 s lange durchgeführt und von einem 4 s langen Spin-Schritt bei 2000 rpm abgeschlossen werden. Aufgrund der hohen Viskosität des Resists ist dabei eine blasenfreie Applikation des Resists wichtig.
- ❷ Nach dem Belacken hat nun der erste Softbake-Schritt zu erfolgen. Er wird typischerweise bei 90°C auf einer Hotplate für 2 min Dauer durchgeführt. Nun werden die Belackung und der Softbake so oft wiederholt, bis die gewünschte Gesamtschichtdicke erreicht ist. 100 μm Schichtdicke sollte nach Herstellerangaben mit 4 Belackungs- und Softbake-Zyklen erreicht werden können.
- ❸ Im Anschluss hat nun der zweite Softbake in einem Konvektionsofen zu erfolgen. Der Ofen sollte dafür eine Temperaturstabilität von $\pm 2^\circ\text{C}$ aufweisen. Für den Softbake werden vom Hersteller lange Zeiträume, z. B. zwei bis drei Stunden bei mittlerer Temperatur (100 °C) vorgeschlagen. Bei dem nachfolgenden Abkühlprozess wird vom Hersteller ein langsames Herunterrampen der Temperatur empfohlen, um Rissbildungen in der Resistschicht zu vermeiden.
- ❹ Aufgrund der notwendigen Aufnahme von Wasser aus der Luftfeuchtigkeit muss die erzeugte Resistschicht nach Herstellerangaben für etwa acht Stunden bei geeigneter Temperatur rehydrieren, um einen beträchtlichen Verlust an Photosensitivität zu vermeiden.
- ❺ Um beste Profile und die niedrigste Entwicklungszeit zu erzielen ist es notwendig, den Photoresist mit einer maximalen Dosis von etwa $15 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2}$ zu belichten.
- ❻ Für die Entwicklung sieht der Hersteller die Verwendung von AZ 400 K im Verhältnis 1:4 mit DI-Wasser vor. Diesem Entwickler soll die Resistschicht bei Raumtemperatur unter leichter Bewegung für typischerweise 45 min ausgesetzt sein.
- ❼ Anschließend kann bei Bedarf ein Hardbake mit 80°C bis 90°C für ein bis zwei Stunden im Konvektionsofen erfolgen.
- ❽ Aufgrund der möglichen Bildung einer intensiven Randwulst bei großen Schichtdicken, wird nach dem Belacken ein Schritt zur Entfernung der Randwulst bei niedrigen Drehzahlen empfohlen.

D Mikrostrukturgalvanik

Parameter	Arbeitsbereich	Optimal
Kupfer	10 - 25 g/l	20 g/l
Schwefelsäure	90 - 120 ml/l	100 ml/l
	160 - 220 g/l	180 g/l
Chloridionen	50 - 80 mg/l	60 mg/l
Grundzusatz	3 - 15 ml/l	
Zusatz	1 - 5 ml/l	
Temperatur	20 - 30 °C	25 °C
kathodische Stromdichte	1 - 4 A/dm ²	
anodische Stromdichte	0,5 - 2,5 A/dm ²	
Abscheidungsrate bei 2 A/dm ²		0,44 μm/min

Tabelle D.1: Konzentrations- und Arbeitsbereich des Kupferbades SLOTOCOUP CU 50 der Firma Schlötter Galvanotechnik.

Parameter	Arbeitsbereich	Optimal
Säurekonzentrat	120 - 180 g/l	150 g/l
Blei	6,5 - 10 g/l	8 g/l
Zinn	15 - 22 g/l	18 g/l
Feinkornzusatz	15 - 25 ml	20 ml
Temperatur	20 - 30 °C	25 °C
Kathodische Stromdichte	1 - 4 A/dm ²	2 A/dm ²
Abscheidungsgeschwindigkeit		ca. 1 μm/min

Tabelle D.2: Konzentrations- und Arbeitsbereiche des Bleizinnbades SLOTOLET BP 10 (Firma Schlötter Galvanotechnik) für eine Legierung mit 40% Blei und 60% Zinn .

E Die Medipix1-Kollaboration

European Organization for Nuclear Research CERN
Medipix Team MPX
1211 Geneva 23, Switzerland

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.B.
Fakultät für Physik, Arbeitsgruppe Halbleiterdetektoren
Hermann-Herder-Str. 3b, 79104 Freiburg, Germany

University of Glasgow
Department of Physics and Astronomy, Detector group
The Kelvin Building, Glasgow, G12 8QQ, United Kingdom

Università di Napoli Federico II
Dipartimento di Scienze Fisiche, Medical Physics MED
Via Cintia, 80126 Napoli, Italy

Università di Pisa
Medical Physics Department
Dipartimento di Fisica, Università di Pisa
Via Buonarroti 2, 56126 Pisa, Italy

F Die Medipix2-Kollaboration

Institut de Física d'Altes Energies IFAE Barcelona
X-ray group XRAY
UAB Campus, Edifici Cn, 08193 Cerdanyola del Valles, Spain

University of Cagliari
Department of Physics
Cittadella Universitaria Monserrato, 09042 Cagliari, Italy

Commissariat à l'Energie Atomique CEA
Laboratory of Integration of Systems and Technologies (LIST)
CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette C Bedex, France

European Organization for Nuclear Research CERN
Medipix Team MPX
1211 Geneva 23, Switzerland

Czech Academy of Sciences
Institute of Physics
Na Slovance 2, 18221 Praha 8, Czech Republic

Czech Technical University
Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering Nuclear Physics Group
Brehová 7, 11519 Praha 1, Czech Republic

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Physikalisches Institut, Arbeitsgruppe SPOC
Erwin-Rommel-Str. 1, 91058 Erlangen, Germany

European Synchrotron Radiation Facility ESRF
Instruments Support Group ISG
BP 220, 38043 Grenoble Cédex, France

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.B.
Fakultät für Physik, Arbeitsgruppe Halbleiterdetektoren
Hermann-Herder-Str. 3b, 79104 Freiburg, Germany

University of Glasgow
Department of Physics and Astronomy, Detector group
The Kelvin Building, Glasgow, G12 8QQ, United Kingdom

Medical Research Council MRC
Laboratory of Molecular Biology LMB
Hills Road, Cambridge, CB2 2QH, United Kingdom

Mid-Sweden University (Mitthögskolan) MSU
85170 Sundsvall, Sweden

Università di Napoli Federico II
Dipartimento di Scienze Fisiche, Medical Physics MED
Via Cintia, 80126 Napoli, Italy

National Institute for Nuclear and High-Energy Physics NIKHEF
Pixel Team
Kruislaan 409, Postbus 41882, 1009 DB Amsterdam, The Netherlands

Università di Pisa
Medical Physics Department
Dipartimento di Fisica, Università di Pisa Via Buonarroti 2, 56126 Pisa, Italy

Danksagung

Bei Herrn PD Dr. Michael Fiederle möchte ich mich für die Möglichkeit, in seiner Arbeitsgruppe diese Dissertation anfertigen und die Ergebnisse auf Konferenzen präsentieren zu dürfen, sowie für sein stetes Interesse am Fortgang der Arbeit und die erhaltene Förderung herzlich bedanken. Durch seine freundliche und offene Art und das angenehme Arbeitsklima in der Servicegruppe Materialcharakterisierung und Detektortechnologie bleiben die über drei Jahre Mitarbeit in seiner Abteilung in angenehmer Erinnerung.

Herrn Prof. Dr. Arne Cröll danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats der Dissertation.

Für die Möglichkeit des Arbeitens als Gastwissenschaftler am Freiburger Materialforschungszentrum durch die Bereitstellung der notwendigen finanziellen Mittel sowie für die erhaltene Unterstützung bin ich Frau Prof. Dr. Gisela Anton und den Kollegen des Physikalischen Instituts der Friedrich-Alexander-Universität in Erlangen sehr dankbar.

Herr Dr. Jürgen Giersch gab mir die Anregung zum wissenschaftlichen Arbeiten und sorgte für den entscheidenden Impuls zur Aufnahme der Arbeiten für die nun vorliegende Dissertation. Hierfür und für das Heranführen an das Thema der Arbeit gilt mein aufrichtiger und freundschaftlicher Dank.

Ohne die Bereitstellung des Flip-Chip-Bonders und der Reinraumeinrichtung durch die Herren Prof. Dr. Karl Jacobs und Prof. Dr. Jens Ludwig wäre die Durchführung der Forschungsarbeiten nicht möglich gewesen. Hierfür und für die gute Zusammenarbeit mit dem Physikalischen Institut der Universität Freiburg möchte ich mich bedanken.

Zu besonders tiefem Dank bin ich meinem Kollegen und Doktoranden Herrn Dipl. Phys. Alex Fauler verpflichtet. Er ist maßgeblich am Erfolg der vorliegenden Arbeit beteiligt. Ohne dessen Kristallzüchtung und fachliche Unterstützung hätten die Arbeiten zur vorliegenden Dissertation nicht stattfinden können. Er stand stets mit Rat und Tat zur Seite und regte zahlreiche fruchtbare Diskussionen an. Es machte mir immer Freude, mit ihm zusammenzuarbeiten.

Gerne erinnere ich mich an den regen Austausch sowie die Unterstützung bei der Probenpräparation und den experimentellen Arbeiten durch Herrn Dipl. Phys. Stefan Lindekugel und dem Doktoranden Andreas Zwerger zurück. Ebenso bedanke ich mich für die fachliche Unterstützung am Röntgenmessplatz durch Dipl. Phys. Uwe Stör.

Herrn Manfred Kranz-Probst danke ich für die Hilfestellung bei chemischen Arbeiten und den hilfreichen Ratschlägen für den Laboralltag.

Stellvertretend für alle technischen Angestellten aus der Mechanik- und Elektronikwerkstatt, ohne die vieles nicht möglich gewesen wäre, möchte ich mich bei Herrn Werkstattmeister Winfried Drayer und Herrn Dipl. Ing. Markus Webel bedanken.

Für die Unterstützung und das angenehme Arbeitsklima möchte ich darüber hinaus allen nicht namentlich genannten Mitarbeitern des FMF und des Kristallographischen Instituts danken, die mich während meiner Zeit in der Arbeitsgruppe begleitet haben.

Meine tiefe Dankbarkeit möchte ich gegenüber meiner Frau Ilona ausdrücken, die mich aufgrund des Forschungsaufenthaltes in Freiburg häufig entbehren musste.