

Ungekühlte Mikrobolometer-Arrays mit einer Pixelgröße von 12 μm basierend auf einer neuartigen thermisch isolierenden Struktur

Kai-Marcel Muckensturm, Dirk Weiler, Frank Hochschulz, Claudia Busch, Thomas Geruschke, Simone Wall, Jennifer Heß, Renee Lerch, Daniel Würfel, Holger Vogt

Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS), Finkenstraße 61, 47057 Duisburg, Deutschland

kai-marcel.muckensturm@ims.fraunhofer.de, dirk.weiler@ims.fraunhofer.de, frank.hochschulz@ims.fraunhofer.de, claudia.busch@ims.fraunhofer.de, thomas.geruschke@ims.fraunhofer.de, simone.wall@ims.fraunhofer.de,

jennifer.hess@ims.fraunhofer.de, renee.lerch@ims.fraunhofer.de, daniel.wuerfel@ims.fraunhofer.de, holger.vogt@ims.fraunhofer.de

Zusammenfassung

In diesem Paper wird ein innovatives Konzept zur Herstellung von hochempfindlichen ungekühlten Mikrobolometern, zur Detektion von langwelliger Infrarotstrahlung (IR-Strahlung) in einem Wellenlängenbereich von 8 μm – 14 μm , beschrieben. Der Ansatz basiert auf der Realisierung der thermischen Isolierung und gleichzeitiger elektrischer Kontaktierung der Mikrobolometer mit Hilfe von ausreichend langen und dünnbeschichteten Hohlröhrchen (hier als Nanotubes bezeichnet), welche mit Technologien und Prozessen aus der Mikrosystemtechnik hergestellt werden können. Somit wird der relative Flächenanteil des Absorbers bei einer gegebenen Pixelgröße maximiert, da laterale Stege, welche bislang Hauptbestandteil der thermischen Isolierung waren, komplett entfallen. Der resultierende thermische Leitwert kann über die einzelnen Schichtdicken, Grundradius und Länge der Nanotubes flexibel und unabhängig von der Pixelgröße eingestellt werden. Die gefertigten Nanotube-Mikrobolometer werden zunächst anhand von Teststrukturen im Hinblick auf die elektro-optischen und mechanischen Eigenschaften grundlegend charakterisiert. Der Fokus liegt in dieser Arbeit auf Pixelgrößen von 12 μm .

Keywords: Infrarot-Detektoren, IRFPA, Ungekühlte Mikrobolometer, Nanotubes

1 Einleitung

Der Trend in der Entwicklung der Mikrobolometer geht hin zu immer kleineren Pixelgrößen für hochauflösende IRFPAs (infrared focal plane arrays), bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an die Performance. Aktuell sind IRFPAs mit einer Pixelgröße von 17 μm im kommerziellen Bereich Stand der Technik [1-6]. In der Literatur sind bereits erste IRFPAs der nächsten Generation mit einer Pixelgröße von 12 μm vorgestellt worden [7-9].

Am weitesten verbreitet unter den ungekühlten Mikrobolometern sind so genannte Widerstandsmikrobolometer. Grundlegend sind diese gekennzeichnet durch eine Membran, bestehend aus Sensor- und Absorberschicht, welche von zwei Metallkontakten über dem Substrat im Vakuum aufgehängt und somit

thermisch isoliert ist. Weiterhin befindet sich unterhalb der Membran eine Metallschicht (Reflektor) auf dem Substrat, wodurch die zum Teil transmittierte Strahlung zurückreflektiert und anschließend von der Absorberschicht absorbiert wird. Diese Struktur bildet einen optischen Resonator, mit dem es möglich ist eine Absorption von nahezu 100 % bei einer bestimmten Hauptwellenlänge zu erzielen. Aufgrund der Absorption der einfallenden IR-Strahlung erwärmt sich die thermisch isolierte Membran, was eine Änderung des elektrischen Widerstandes der Sensorschicht zur Folge hat. Die resultierende Änderung des Messsignals kann mit Hilfe einer Ausleseschaltung (ROIC, read-out integrated circuit) detektiert werden.

Zwei Schlüsselparameter für das Design von hochempfindlichen Mikrobolometern sind die thermische Isolierung und die effektive Absorberfläche. In typischen Mikrobolometern

wird die thermische Isolierung mittels Verbindungselementen (auch als Stege bezeichnet) zwischen der aufgehängten Membran und den Metallkontakten realisiert [1-6]. In Abbildung 1 ist ein IRFPA bestehend aus derartigen Mikrobolometern zu sehen, welches am Fraunhofer IMS hergestellt wurde.

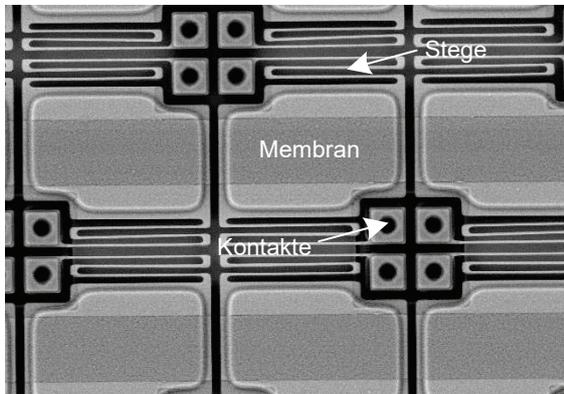


Abb. 1: REM-Aufnahmen eines IRFPA mit einer Pixelgröße von 17 µm [6].

Der resultierende thermische Leitwert ist abhängig von der Länge, sowie der Breite und der Dicke der Stege. Diese Strukturmaße der Stege sind jedoch limitiert durch die verwendete Technologie der Fotolithografie, sowie durch die mechanische Stabilität. Aus diesem Grund beanspruchen die Stegflächen bei einer Reduzierung der Pixelgröße relativ zu dieser immer mehr Platz bei einem gegebenen thermischen Leitwert. Folglich wird die effektive Absorberfläche eingeschränkt und die Performance der Mikrobolometer signifikant gemindert.

In diesem Paper wird ein Konzept zur Herstellung von hochempfindlichen ungekühlten Mikrobolometern beschrieben, welches die oben beschriebene Einschränkung nicht aufweist. Dieses Konzept bezieht sich auf eine Maximierung der effektiven Absorberfläche bei einer gegebenen Pixelgröße, da laterale Stege, welche bislang Hauptbestandteil der thermischen Isolierung waren, komplett entfallen. Der Ansatz der zum Patent angemeldeten neuartigen Mikrobolometer-Struktur basiert auf der elektrischen Kontaktierung, sowie thermischen Isolierung der Mikrobolometer mittels strukturierter Nanotubes. Der resultierende thermische Leitwert ist somit unabhängig von der Pixelgröße. Die Platzeinsparung kann genutzt werden, um die effektive Absorberfläche zu vergrößern. Besonders für Pixelgrößen von 12 µm oder kleiner erzielen eine maximierte Absorberfläche in Kombination mit einem geringen thermischen Leitwert einen erheblichen Vorteil. In Abbildung 2 sind REM-

Aufnahmen der hergestellten Mikrobolometer-Strukturen mit einer Pixelgröße von 12 µm zu sehen.

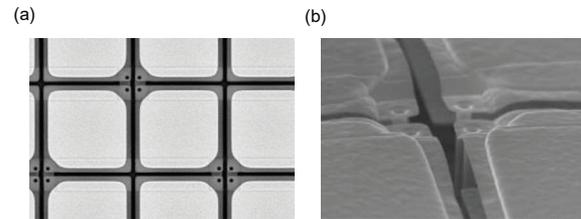


Abb. 2: REM-Aufnahmen eines hergestellten 12 µm Mikrobolometer-Arrays.

2 Thermisch isolierende Nanotubes

Die Nanotubes werden mit Hilfe eines Opferschichtprozesses hergestellt. Dabei wird zunächst eine Öffnung für den späteren Kontaktbereich in die Opferschicht geätzt und im Anschluss beschichtet. Die Beschichtung erfolgt mittels der Atomlagenabscheidung, sodass selbst bei steilen Kantenwinkeln und großen Aspektverhältnissen die geätzten Öffnungen bedeckt sind. Im Weiteren werden die abgeschiedenen Schichten je nach Herstellungsprozess strukturiert. Zuletzt folgt dann die Entfernung der Opferschicht, sodass die gefertigten Nanotubes frei stehen (vgl. Abbildung 3).

Der thermische Leitwert der Kontaktörhrchen lässt sich berechnen zu

$$g_{\text{tubes}} = \frac{\pi}{2l_{\text{tube}}} \sum \Lambda_{\text{tube},i} (r_{i,2}^2 - r_{i,1}^2), \quad (1)$$

wobei l_{tube} die Länge der Nanotubes und $\Lambda_{\text{tube},i}$ die thermische Leitfähigkeit eines Nanotube-Materials beschreiben. Der Term $(r_{i,2}^2 - r_{i,1}^2)$ ist äquivalent zur Dicke der einzelnen Materialien innerhalb der Kontakte. Um eine gute thermische Isolierung zu erzielen sollten demnach die Nanotubes möglichst lang sein und aus sehr dünnen Materialien bestehen, welche eine geringe thermische Leitfähigkeit aufweisen. Zudem sollte der Grundradius der Kontakte ebenfalls möglichst klein gewählt werden. Zur Veranschaulichung ist beispielhaft in Abbildung 4 ein prinzipieller Querschnitt eines Nanotube-Kontaktes bestehend aus drei Materialien illustriert.

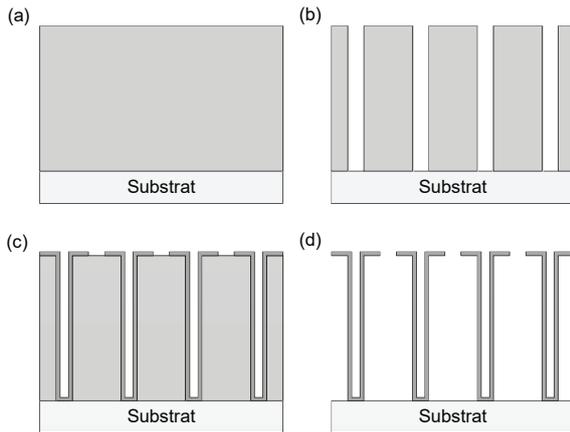


Abb. 3: Prinzipieller Herstellungsprozess von Nanotubes: (a) Abscheidung der Opferschicht auf dem Substrat, (b) Strukturierung der Opferschicht, (c) Abscheidung und Strukturierung der Nanotube-Materialien, (d) Entfernung der Opferschicht.

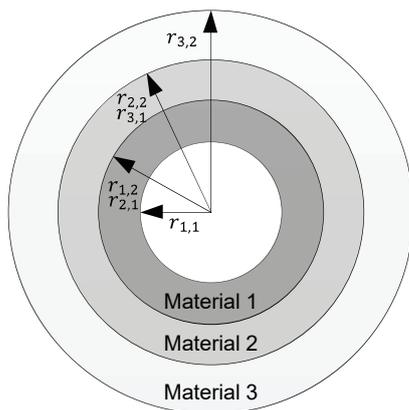


Abb. 4: Prinzipieller Querschnitt eines Nanotube-Kontaktes, bestehend aus drei Materialien.

3 Resonatorstruktur

Für eine maximale Absorption der einfallenden IR-Strahlung bei der detektierten Haupt-Wellenlänge muss die Resonatorbedingung (vgl. Gl. (2)) erfüllt sein.

$$nd = (2k + 1) \frac{\lambda}{4}, \quad k = 0, 1, 2 \dots \quad (2)$$

wobei nd den optischen Weg zwischen Reflektor und Absorber und λ die Wellenlänge der infraroten Strahlung beschreiben. Der optische Weg setzt sich zusammen aus der Summe der Schichtdicken gewichtet mit den Brechungsindizes der Medien innerhalb der Kavität. Zur Veranschaulichung ist die Resonatorstruktur vereinfacht in Abbildung 5 dargestellt.

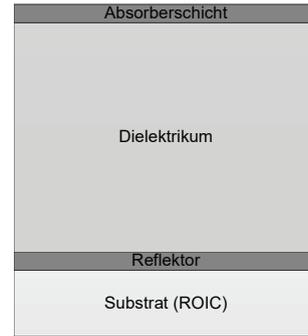


Abb. 5: Aufbau der optischen Resonatorstruktur.

Da die resultierende Länge der Nanotubes den optischen Abstand hauptsächlich bestimmen, kann diese nicht frei gewählt werden, sondern muss nach Gl. (2) angepasst werden. Nach [10] kann die Absorption einer derartigen Resonatorstruktur bestimmt werden zu

$$A(\lambda) = \frac{4}{Dn^2} \{ [f_s(f_r + 1)]^2 / n^2 + f_r \sin^2 \theta + (f_r + f_s) \cos^2 \theta \}, \quad (3)$$

mit

$$D = [(f_r + 1)(f_s + 1)/n^2 + 1]^2 \sin^2 \theta + [(f_r + f_s + 2)/n^2] \cos^2 \theta,$$

$$f_r = Z_0/R_r, \quad (4)$$

$$f_s = Z_0/R_s,$$

$$\theta = 2\pi nd/\lambda,$$

wobei R_r und R_s der Schichtwiderstand des Reflektors bzw. des Absorbers und Z_0 der Wellenwiderstand des Vakuums sind.

In Abbildung 6 ist die Absorption im Wellenlängenbereich von $8 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$ für verschiedene k -Werte aufgetragen. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, ist die Absorption bei der Hauptwellenlänge von $\lambda = 10 \mu\text{m}$ in allen Fällen nahe 1. Die Absorptionskurve wird mit steigendem Wert von k jedoch deutlich gestaucht, sodass die Absorption im Mittel abnimmt. Für viele Mikrobolometer Anwendungen sind allerdings eine gute Absorption nicht nur bei einer bestimmten Wellenlänge, sondern über dem gesamten betrachteten Bereich von $8 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$ vonnöten, um einen möglichst großen Signalanteil zu realisieren.

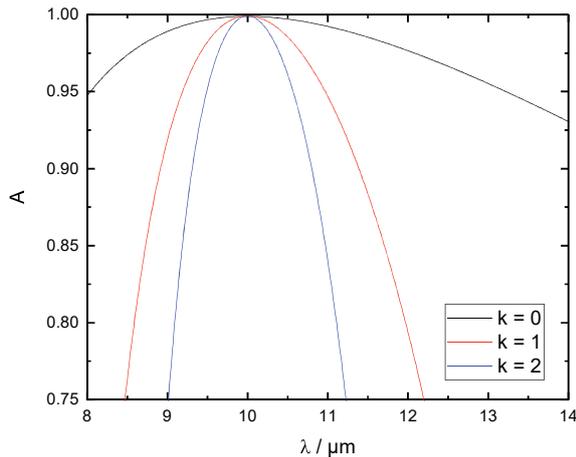


Abb. 6: Absorption als Funktion der Wellenlänge für unterschiedliche k -Werte (bei $R_r = 10 \Omega/\text{sq}$ und $R_s = 377 \Omega/\text{sq}$).

Die genannten Einschränkungen entfallen, wenn der Reflektor derart realisiert wird, dass der optische Weg zwischen diesem und der Absorberschicht, unabhängig von der Länge der Nanotubes, genau ein Viertel der zu detektierenden Hauptwellenlänge beträgt (Resonatorbedingung erfüllt für $k = 0$). Dies kann ermöglicht werden, indem der Reflektor ebenfalls mit Hilfe von Nanotubes hochgestellt wird.

4 Messergebnisse der Teststrukturen

Absorption:

Zunächst wird die Messung der Absorption der Nanotube-Mikrobolometer unter Verwendung der FTIR-Spektroskopie durchgeführt. Es ist zu erwähnen, dass mit dem verwendeten Messaufbau zunächst die an der Mikrobolometer-Oberfläche reflektierte Strahlung detektiert wird. Da sich unter der Membran der angehobene Reflektor bzw. ein zusätzlicher Reflektor auf der Substratoberfläche befindet, kann davon ausgegangen werden, dass nahezu keine Strahlung transmittiert. In diesem Fall berechnet sich die Absorption zu $A = 1 - R$. Die Ergebnisse für Mikrobolometer-Strukturen sowohl mit und ohne angehobenen Reflektor sind in Abbildung 7 für einen Wellenlängenbereich zwischen $8 \mu\text{m}$ und $14 \mu\text{m}$ dargestellt. Der prinzipielle Verlauf der gemessenen Absorption liegt in zufriedenstellender Übereinstimmung mit den simulierten Werten des Modells (vgl. Abb. 6 für $k = 0$). Für Strukturen mit angehobenem Reflektor kann somit eine mittlere Absorption von etwa 91 % erzielt werden. Erwartungsgemäß ist die mittlere Absorption der Strukturen ohne angehobenen Reflektor mit etwa 70 % deutlich kleiner. Dennoch

könnten derartige Mikrobolometer-Arrays für Anwendungen eingesetzt werden, bei denen mäßigere Empfindlichkeiten ausreichend sind. Aufgrund des vereinfachten Herstellungsprozesses sind diese Sensoren zudem kostengünstiger zu fabrizieren.

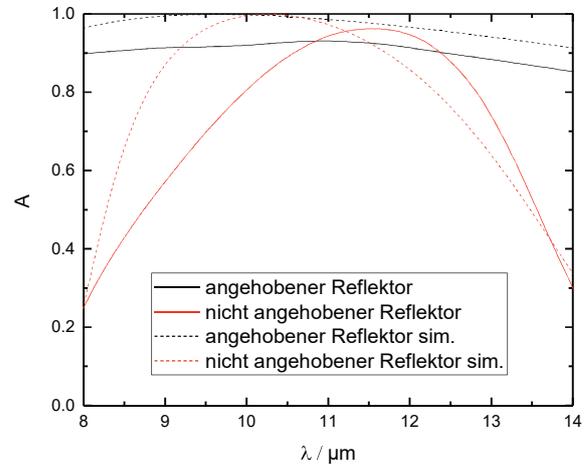


Abb. 7: Absorption der Nanotube-Mikrobolometer sowohl mit und ohne angehobenem Reflektor.

Thermisches Verhalten:

Zur Analyse des thermischen Verhaltens der Nanotube-Mikrobolometer werden diese in ein DIL-Gehäuse gebracht und die jeweiligen Anschlüsse mittels Drahtbonden verbunden. Zur elektrischen Ansteuerung werden die DIL-Gehäuse auf einer Messplatte platziert. Um den Einfluss der durch Gaskonduktion hervorgerufenen Wärmeleitung zu eliminieren, wird die Messung in einer Vakuum-Kammer bei einem Innendruck von etwa $2,3 \cdot 10^{-2}$ mbar durchgeführt. In Abbildung 8 ist der Messaufbau schematisch illustriert.

Mit Hilfe eines Semiconductor Analyzers (HP 4155) werden unterschiedliche elektrische Stromstärken eingepreßt und zugleich die resultierende Spannung über der Mikrobolometer-Struktur gemessen. Aufgrund der Eigenerwärmung im Vakuum sinkt der elektrische Widerstand des Mikrobolometers, da der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes (TCR) der SiGe-Sensorschicht negativ ist. Der Temperaturanstieg kann anhand der Widerstandsänderung und des TCR bestimmt werden. In einem kleinen Temperaturintervall kann der TCR als konstant angenommen werden, sodass ein linearer Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur besteht. Der Temperaturanstieg berechnet sich dann zu

$$\Delta T_{\text{vac}} = \frac{(R(T_0) - R(T))}{R(T_0)\alpha}, \quad (5)$$

wobei $R(T_0)$ und $R(T)$ die Widerstände bei Referenztemperatur T_0 bzw. bei angestiegener Temperatur T und α der TCR des Mikrobolometers sind.

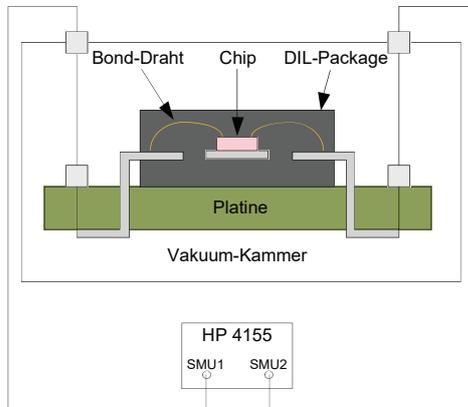


Abb. 8: Messaufbau zur Analyse des thermischen Verhaltens der Nanotube-Mikrobolometer.

Der gesamte thermische Leitwert für die vermessene Mikrobolometer-Struktur mit einer Pixelgröße von $12\ \mu\text{m}$ ist vergleichbar mit dem thermischen Leitwert der Mikrobolometer der vorherigen Generation, basierend auf dem konventionellen Steg-Design und einer Pixelgröße von $17\ \mu\text{m}$ (vgl. Abb. 1). Neben dem thermischen Leitwert wird auch die thermische Zeitkonstante τ_{th} abgeschätzt. Hierbei wird mittels des Semiconductor Analyzers ein konstanter Strom eingepreßt und die resultierende Spannung über der Mikrobolometer-Struktur in definierten Zeitabständen gemessen (minimale Auflösung 4 ms). Der Temperaturanstieg in Abhängigkeit von der Zeit ist in Abbildung 9 dargestellt.

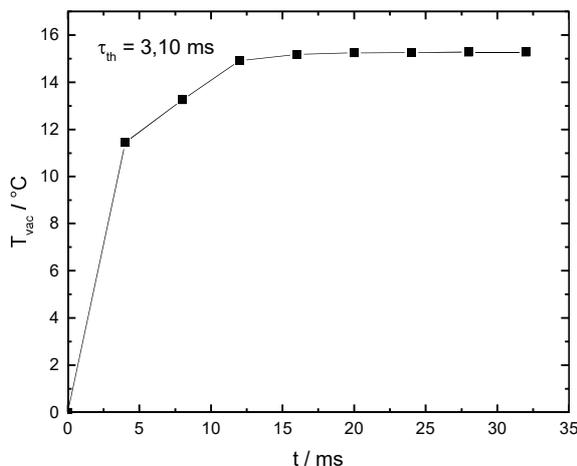


Abb. 9: Temperaturanstieg der hergestellten Nanotube-Mikrobolometer in Abhängigkeit von der Zeit.

Die thermische Zeitkonstante entspricht der Zeitspanne in der die Temperatur auf etwa 63,2 % des Endwertes angestiegen ist. Somit ergibt sich für die $12\ \mu\text{m}$ Mikrobolometer-Struktur ein Wert von etwa $\tau_{\text{th}} = 3,10\ \text{ms}$. Der theoretische Zusammenhang kann ausgedrückt werden als

$$\Delta T_{\text{vac}} = \frac{IU}{g_{\text{th}}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{th}}}} \right). \quad (6)$$

5 CMOS-ROIC und Chip-Scale-Package

Die entwickelten Mikrobolometer werden auf einer bestehenden CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor)-Ausleseschaltung monolithisch gefertigt, um diese zukünftig vereinfacht elektro-optisch zu charakterisieren. Die Ausleseschaltung ist für einen Pixelabstand von $17\ \mu\text{m}$ konzipiert. Es wird ein QVGA-IRFPA mit unterschiedlichen Pixelgrößen hergestellt. Bei diesem wird jeweils ein Viertel des Arrays mit $12\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}$ und $6\ \mu\text{m}$ Mikrobolometern versehen. Jedes Viertel für sich weist somit eine Auflösung von QVGA (Quarter-QVGA, 160×120 Pixel) auf.

CMOS-ROIC:

Die verwendete Ausleseschaltung wird am Fraunhofer IMS in einer $0,35\ \mu\text{m}$ CMOS-Technologie auf 8-Zoll-Wafern hergestellt. Das Blockschaltbild ist in Abbildung 10 dargestellt [6]. In herkömmlichen Ausleseschaltungen wird der elektrische Widerstand der einzelnen Pixel zunächst analog ausgelesen und dann im Folgenden in ein digitales Signal gewandelt. Die Architektur der hier verwendeten Schaltung basiert auf sogenannten $\Sigma\Delta$ -ADCs. Mit diesen ist es möglich den elektrischen Widerstand der Pixel direkt in ein 16-Bit Signal zu konvertieren. Somit kann der Signal-Rausch-Abstand deutlich verbessert werden.

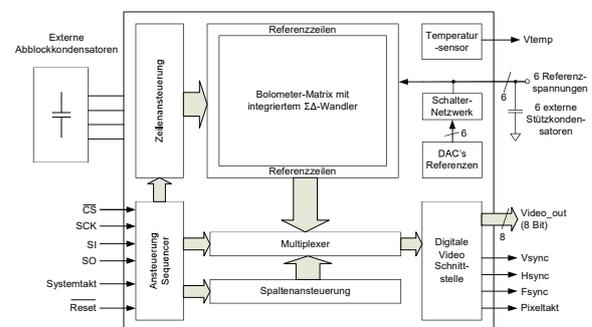


Abb. 10: Blockschaltbild des QVGA-IRFPAs [6].

Die einzelnen Pixel des Arrays sind zu Clustern angeordnet, welche parallel bei einer Framerate von 30 Hz ausgelesen werden. Die

Pixel innerhalb eines Clusters werden nacheinander ausgelesen. Ein Sequenzer steuert hierbei das Ausleseverfahren und gibt die 16-Bit Videodaten an die Schnittstelle aus. Um die aktiven Mikrobolometer des Arrays herum befinden sich sogenannte blinde Pixel mit einer deutlich geringeren Empfindlichkeit. Diese können genutzt werden, um den Einfluss der Umgebungstemperatur auf das resultierende Wärmebild zu minimieren. In Abbildung 11 ist ein Foto des 17 μm Pixel-Pitch CMOS-ROIC zu sehen.

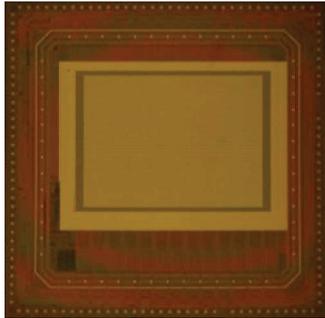


Abb. 11: Foto des 17 μm Pixel-Pitch CMOS-ROIC [6].

Chip-Scale-Package:

Die hergestellten Mikrobolometer müssen im Vakuum betrieben werden, um die Wärmeverluste durch Gaskonduktion zu minimieren. Hierzu wurde am Fraunhofer IMS ein sogenanntes Chip-Scale-Package entwickelt [11], welches chipweise auf die hergestellten Arrays des Chips aufgebracht wird. In Abbildung 12 ist das Chip-Scale-Package schematisch illustriert.

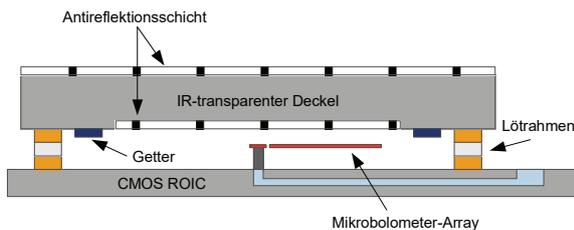


Abb. 12: Schematischer Aufbau des Chip-Scale-Packages, nach [11].

Das Package wird durch einen IR-transparenten Deckel gebildet, welcher das Substrat mittels einer Lötverbindung hermetisch dicht versiegelt. Der IR-transparente Deckel besteht aus Silizium, wodurch die Produktionskosten im Vergleich zu den häufig verwendeten Germanium-Deckeln verringert werden. Durch die Wahl von Silizium wird zudem die Zuverlässigkeit der realisierten Chip-Scale-Packages gesteigert, da kein zusätzlicher Stress durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten entsteht. An der Ober- und

Unterseite des Deckels befindet sich eine Antireflectionsschicht, um die Transmission der einfallenden Strahlung zu steigern. Weiterhin befindet sich eine Getterbeschichtung innerhalb des Packages. Diese hat die Funktion freie Gasmoleküle, welche durch Ausgasen der Bolometer-Materialien entstehen können, zu adsorbieren und einen stabilen Innendruck zu gewährleisten. Ein weiterer Vorteil des Chip-Scale-Packages ist, dass der Deckel mittels eines Flip-Chip-Prozesses nur auf auserwählten Chips aufgebracht werden kann, welche eine zuvor getestete Funktionalität aufweisen. Zusätzlich kann im Vergleich zum Waferlevel-Package die Größe des IR-transparenten Deckels unabhängig von der Größe des ROICs optimiert werden. Dadurch können die Herstellungskosten weiter gesenkt werden. In Abbildung 13 ist ein Wafer mit teilweise aufgetragenen Deckeln veranschaulicht.

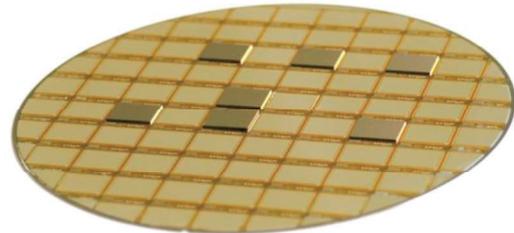


Abb. 13: Vereinzelte Chip-Scale-Packages auf einem Wafer.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Paper wurden Nanotube-Mikrobolometer mit einer Pixelgröße von 12 μm erfolgreich hergestellt und charakterisiert. Aufgrund des hier beschriebenen Konzeptes, ergeben sich deutliche Vorteile gegenüber aktuellen konventionellen Mikrobolometer-Designs. So ist es möglich den relativen Flächenanteil des Absorbers bei gegebener Pixelgröße zu maximieren, da laterale Stege, welche bislang Hauptbestandteil der thermischen Isolierung waren, komplett entfallen. Zudem kann die thermische Isolierung über die einzelnen Schichtdicken, Grundradius und Länge der Nanotubes flexibel und unabhängig von der Pixelgröße eingestellt werden. Besonders für Pixelgrößen von 12 μm oder kleiner erzielen eine maximierte Absorberfläche in Kombination mit einem geringen thermischen Leitwert einen erheblichen Vorteil.

In einem Wellenlängenbereich von 8 μm – 14 μm weisen die realisierten Nanotube-Mikrobolometer eine sehr hohe Absorption von etwa 91 % auf. Der resultierende thermische

Leitwert ist vergleichbar mit den am Fraunhofer IMS bisher verwendeten 17 μm Steg-Design-Mikroblometern. Weiterhin wurden die verwendete CMOS-Ausleseschaltung sowie das entwickelte Chip-Scale-Package beschrieben. In zukünftigen Veröffentlichungen folgen die messtechnische Bestimmung der NETD sowie der Einsatz im Kamerasystem zur Aufnahme von Thermographie-Bildern.

Literaturnachweis

- [1] Schimert, T., et al. "Amorphous silicon based large format uncooled FPA microbolometer technology." *SPIE Defense and Security Symposium*. International Society for Optics and Photonics, 2008; doi: 10.1117/12.784661.
- [2] Murphy, D., et al. "640× 512 17 μm microbolometer FPA and sensor development." *Defense and Security Symposium*. International Society for Optics and Photonics, 2007; doi: 10.1117/12.724345.
- [3] Li, Chuan, Chien-Jih Han, and George Skidmore. "Overview of DRS uncooled VOx infrared detector development." *Optical engineering* 50.6 (2011): 061017-061017; doi: 10.1117/1.3593155.
- [4] Tissot, Jean-Luc, et al. "High-performance uncooled amorphous silicon video graphics array and extended graphics array infrared focal plane arrays with 17- μm pixel pitch." *Optical engineering* 50.6 (2011): 061006-061006; doi: 10.1117/1.3572155.
- [5] Blackwell, Richard, et al. "17 μm microbolometer FPA technology at BAE Systems." *SPIE Defense, Security, and Sensing*. International Society for Optics and Photonics, 2009; doi: 10.1117/12.819389.
- [6] Weiler, D., et al. "Uncooled digital IRFPA-family with 17 μm pixel-pitch based on amorphous silicon with massively parallel Sigma-Delta-ADC readout." *SPIE Defense+ Security*. International Society for Optics and Photonics, 2014; doi: 10.1117/12.2050445.
- [7] Sengupta, Louise, et al. "BAE systems' SMART chip camera FPA development." *SPIE Defense+ Security*. International Society for Optics and Photonics, 2015; doi: 10.1117/12.2177011.
- [8] Becker, Sebastien, et al. "Latest pixel size reduction of uncooled IR-FPA at CEA, LETI." *SPIE Security+ Defence*. International Society for Optics and Photonics, 2012; doi: 10.1117/12.974579.
- [9] Kennedy, A., et al. "Advanced uncooled sensor product development." *SPIE Defense+ Security*. International Society for Optics and Photonics, 2015; doi: 10.1117/12.2177462.
- [10] Liddiard, K. C. "Application of interferometric enhancement to self-absorbing thin film thermal IR detectors." *Infrared Physics* 34.4 (1993): 379-387; doi: 10.1016/0020-0891(93)90070-N.
- [11] Bauer, J., et al. "Fabrication method for chip-scale-vacuum-packages based on a chip-to-wafer-process." *Security+ Defence*. International Society for Optics and Photonics, 2010; doi: 10.1117/12.865019.