



## DER AUTOR

BOB GRIETENS ist Gründer und Geschäftsführer von Xenics in Leuven/Belgien.



**Bild 1.** Die digitale NIR-Kamera Xeva-2.5-320 mit vierstufig thermoelektrisch gekühltem FPA und einer Auflösung von 320 x 256 Pixeln überstreicht den erweiterten NIR-Bereich von 0,85 bis 2,5 µm Wellenlänge

BOB GRIETENS

InGaAs-Sensoren sind hybride Komponenten, die aus dem eigentlichen InGaAs-Sensor-Array und einer CMOS-Auswerteschaltung bestehen. Da mit NIR (Near Infrared, nahes Infrarot) auch CMOS- oder CCD-Bauteile mit einiger Infrarotempfindlichkeit bezeichnet werden, bevorzugt der Autor den Begriff SWIR (Short-Wave Infrared, kurzwelliges Infrarot). Als wichtigste Leistungsmerkmale derartiger Sensoren mit InGaAs oder HgCdTe (engl.: MCT) als Detektormaterial gelten:

- geringer Dunkelstrom, der hauptsächlich von der Breite der Bandlücke, der Qualität des Epitaxie-Materials, der Erzeugung der Dioden und vom ROIC- (Read-out-IC-) Design bestimmt wird,
- niedriges Rauschen, das von der Qualität der Fotodioden und der Ausleseschaltung abhängt,
- hohe Auslesegeschwindigkeit, bedingt durch das ROIC-Layout, die Pixeltaktfrequenz und die Anzahl der Ausgänge,
- hohe Empfindlichkeit, die von der Quanteneffizienz (QE) des Materials

und dem Verstärkungsfaktor des ROIC abhängt.

Grundsätzlich lassen sich alle diese Parameter nicht gleichzeitig optimieren. So übertreffen moderne InGaAs-Sensoren die kurzwelligen MCT-Varianten in Bezug auf Dunkelstrom, Rauschen und Empfindlichkeit. Während sich standardmäßiges InGaAs bis 1,7 µm Wellenlänge verwenden lässt, kann MCT bis 2,5 µm auswerten – wie auch InGaAs mit unterschiedlicher Gitterkonstante. Dies bedeutet aber eine schmalere Bandlücke und mehr Strukturfehler im Kristallaufbau mit der nachteiligen Folge eines höheren Dunkelstroms und stärkeren Rauschens. Deshalb bietet Xenics in seinen FPA- (Focal-Plane-Array-) Kameras für die längeren Wellenlängen MCT-Arrays und keine InGaAs-Sensoren an. Für Zeilenkameras sind allerdings InGaAs-Versionen mit unterschiedlicher Gitterkonstante von Substrat und Sensormaterial erhältlich.

Für den wirtschaftlich erfolgreichen Einsatz von NIR/SWIR-Sensoren in InGaAs-Technologie sprechen noch weitere Gründe: Es ist keine oder lediglich thermoelektrische (TE-) Kühlung notwendig, die Kameras kön-

## BILDERFASSUNG MIT SWIR-SENSOREN

# Mit InGaAs ins nahe Infrarot

Die Bilderfassung im nahen Infrarot war lange der Wehrtechnik vorbehalten. Wegen der großen Kameras und der teuren Sensorkühlung kam ein breiter Einsatz in der Industrie nicht infrage. InGaAs als Detektormaterial, das nicht für jeden Einsatzfall gekühlt werden muss, macht das nahe Infrarot jetzt auch industriellen Applikationen zugänglich.

nen sehr kompakt sein, preisgünstige Komponenten sind kommerziell verfügbar, und die Fertigung ist kostengünstig möglich.

## Typische NIR/SWIR-Sensorformate

Für zweidimensionale FPA-Sensoren im SWIR sind flächige InGaAs-Bildaufnehmer mit 320 x 256 oder 640 x 512 Pixeln für ein breites Anwendungsspektrum verfügbar. Bei kurzwelligen MCT-Detektoren ist das gebräuchlichste Format für Hyperspektral-Anwendungen 320 x 256, während die Auflösungen 500 x 256 und 1000 x 256 Pixel weniger üblich sind. Darüber hinaus gibt es noch größere Formate, die aber vorzugsweise für Projekte in der Welt-



## KONTAKT

**Xenics NV,**  
3001 Leuven/Belgien,  
Tel. +32(0)16/3899-00,  
Fax +32(0)16/3899-01,  
[www.xenics.com](http://www.xenics.com)

raumfahrt und in der Wehrtechnik von Interesse sind.

Neben dem spektralen Empfindlichkeitsbereich von InGaAs und MCT sind die Kosten und die Anwenderfreundlichkeit entscheidend, die eindeutig für InGaAs sprechen. Darüber hinaus ermöglicht InGaAs wegen seines niedrigeren Dunkelstroms längere Integrationszeiten, was die Einsatzbreite deutlich erhöht.

In den letzten Jahren haben NIR/SWIR-Detektoren mit InGaAs entscheidende Fortschritte gemacht:

- Hybridisierung – moderne Flip-Chip-Prozesse ermöglichten kleinere Pixelabmessungen, größere Bildformate und eine bessere Pixel-Ausbeute,
- neue Verarbeitungstechniken für InGaAs führten zu geringeren Dunkelströmen,
- verbessertes ROIC-Design ermöglichte entweder niedriges Rauschen bzw. geringeren Dunkelstrom oder Hochgeschwindigkeitsbetrieb,
- das Empfindlichkeitsspektrum von InGaAs wurde auf kürzere Wellenlängen bis ins Sichtbare NIR oder SWIR-Bereich (0,4 bis 1,7  $\mu\text{m}$ ) ausgedehnt.

### Spektral erweitert bis 2,5 $\mu\text{m}$

Um den Wellenlängenbereich auszudehnen, hat sich XenICs auf die Entwicklung von Sensoren in InGaAs- und MCT-Technologie konzentriert, die unterschiedliche Spektren von 0,9 bis 1,7  $\mu\text{m}$ , 1,0 bis 2,2  $\mu\text{m}$  und 1,0 bis 2,5  $\mu\text{m}$  abdecken. Die Erweiterung bis 2,5  $\mu\text{m}$  wird mittels Variation des Indium-Anteils im InGaAs erreicht. Mehr Indium verringert die Band-

lücke und erweitert die Empfindlichkeit zu größeren Wellenlängen hin.

Allerdings ändert sich mit der Zusammensetzung des Mischkristalls auch seine Gitterkonstante. Die meisten Infrarotsensoren werden auf einem Substrat gefertigt, das die gleiche Gitterkonstante wie das Sensormaterial selbst aufweist. So dienen üblicherweise GaAs, InP, InAs, GaSb und InSb als Substrate für III-V-Verbindungen. Vor allem die Gitterkonstanten von InGaAs-Mischkristallen mit einer Grenzwellenlänge von 1,7  $\mu\text{m}$  und InP stimmen gut überein. Um das Empfindlichkeitsspektrum zu erweitern, erfolgt die Epitaxie auf einem Substrat abweichender Gitterkonstante, entweder InP oder GaAs.

### Die Verarbeitung von InGaAs

Die Herstellung von InGaAs-Sensoren mit erweitertem Empfindlichkeitsbereich erfordert spezifische Prozessschritte: Mittels metallorganischer Gasphasen-Epitaxie (MOCVD) wachsen üblicherweise dünne InGaAs-Schichten auf Substraten mit übereinstimmenden Kristallgitterkonstanten wie InP. Dieser Prozess findet auf ausbeutestarken Wafern mit bis zu 10 cm Durchmesser statt. Durch optische Lithografie festgelegte Öffnungen werden in die isolierende Glasschicht geätzt und bilden die Pixel-Elektroden. Nach dem Teilen des Wafers und dem Funktionstest erfolgt dann die Verbindung mit der Signalverarbeitungsschaltung.

Wie bei den CCD-Sensoren ist der Anschluss von InGaAs-Flächen-Sensoren

nicht einfach, denn beide Technologien eignen sich nicht besonders gut für analoge und digitale Signalaufbereitungs- und Logikfunktionen. Während ladungsgekoppelte Bauteile mit einem Minimum an externen Signalanschlüssen auskommen, werden InGaAs-Sensoren mit vielpoligen Flip-Chip-Verbindungen zwischen Sensor-Array und Anpassungsschaltung ausge-



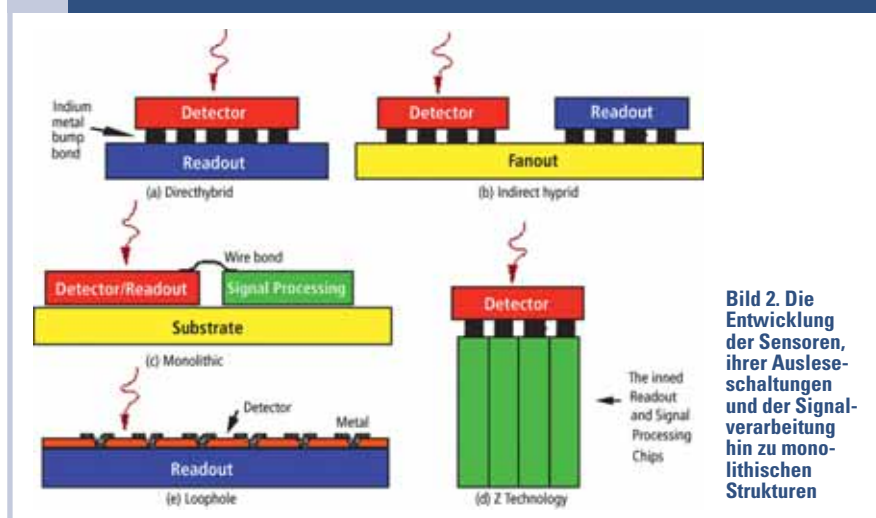
## APPLIKATION

### Spektrale Bildverarbeitung.

Eine wichtige Anwendung von NIR-Bildsensoren sind Spektalkameras: Die Kombination aus Spektrograf und monochromen Matrixkamerafunktionen arbeitet prinzipiell wie eine Zeilenkamera, die aber das Spektrum auffächert. Für jedes seiner in einer Linie angeordneten Pixel wird das Spektrum erzeugt und als Intensitätsverteilung auf der orthogonalen Spektralachse des Sensor-Arrays abgebildet. Die horizontale Achse dient weiterhin als geometrische Achse. Eine Bewegung des Objekts oder der Kamera erzeugt ein zweidimensionales Spektralbild, das abhängig von seiner spektralen Intensitätsverteilung Entscheidungsgrößen für eine Materialklassifizierung oder Prozesssteuerung liefert. Dies unterscheidet sich vom alleinigen Gebrauch eines Spektrometers, da diese Methode gleichzeitig Bildinformationen liefert. Dieses Verfahren wird daher auch als ortsauflösende Spektralanalyse bezeichnet.

Spektalkameras dienen der Messung von Feuchte, der Verteilung von Ölfilmen oder Lackschichten, der Sortierung von Früchten und Gemüse nach ihrem Reifegrad, der sich insbesondere im NIR/SWIR-Bereich deutlich zeigt, oder der Trennung unterschiedlicher Stoffe, wie Polymeren und natürlichem Material. Derartige Systeme der Spektralen Bildverarbeitung enthalten eine oder mehrere Spektalkameras, einige spektral angepasste Beleuchtungskörper hoher Leistung, ein Transportsystem und Verarbeitungsalgorithmen, die oft höchsten Ansprüchen genügen müssen.

## 2 SENSOR-EVOLUTION



rüstet. Damit sorgt die Stapelung von Sensor und ROIC übereinander für einen besonders kleinen aktiven Bereich, der für die Konstruktion kompakter Kameras von Vorteil ist. Diese funktionelle Kombination wird dann in einem Flachgehäuse mit NIR-

transparentem Glasfenster ausgeliefert.

Zum Aufbau eines kompletten Kamerasystems wird dieses Subsystem um Optik, Verbinder und passende Software erweitert sowie bei Bedarf mit einem thermoelektrischen Kühlsystem (TE) ergänzt.

**Bild 1** zeigt die NIR-Kamera Xeva-2.5-320 mit TE4-Kühlung, die mit einer standardmäßigen Optik mit C-Fassung ausgestattet ist. Alternativ kann auch ein Spektrometer angeflanscht werden. Mit einem vierstufig thermoelektrisch gekühlten FPA und einer Auflösung von 320 x 256 Pixeln deckt diese Kamera den erweiterten Wellenlängenbereich von 0,85 bis 2,5  $\mu\text{m}$  ab. Ihre technischen Daten zeigt auszugsweise **Tabelle A**.



## WISSENSWERT

**Den VIS-SWIR-Grenzbereich erfassen.** Glühlampen mit einer Farbtemperatur von etwa 2800 K haben ihr Strahlungsmaximum im kurzwelligen Infrarot bei etwa 0,9  $\mu\text{m}$ . Bei dieser Wellenlänge ist die Quanteneffizienz von Si- und InGaAs-Bildsensoren gleich (**Bild**). Ist zur Objekterfassung bei dieser Wellenlänge also eher Silizium oder InGaAs geeignet?

Diese Frage betrifft mehrere Merkmale der beiden Alternativen, die je nach Einsatzfall unterschiedliche Gewichtung erfordern. Für den Spektralbereich gilt aber grundsätzlich, dass die Bandlücke der Materialien eine harte Grenze setzt [1]: Bei Silizium sind dies bei einer Bandlücke von 1,12 eV etwa 1,1  $\mu\text{m}$  Wellenlänge.

Um den Empfindlichkeitsbereich von Si-Bildaufnehmern auszudehnen, wird die frequenzabhängige Absorption des Halbleitermaterials ausgenutzt [2]. Jedes Pixel besteht dann aus drei Fotodioden, deren Sperrschichten in unterschiedlicher Tiefe liegen: Direkt unter der Oberfläche (0,20  $\mu\text{m}$  tief) ist die Diode für Blau (0,44  $\mu\text{m}$ ), in 0,85  $\mu\text{m}$  Tiefe die Diode für Grün (0,475  $\mu\text{m}$ ) und bei 3,0  $\mu\text{m}$  die Diode für Rot (620  $\mu\text{m}$ ) angeordnet. Da die Blau- und Grün-Dioden auch ungedämpfte Rotanteile aufnehmen, sorgen einfache Rechenoperationen für eine Trennung in die einzelnen Spektralanteile.

Auch das Empfindlichkeitsspektrum von InGaAs-Bildaufnehmern lässt sich – jetzt in umgekehrter Richtung in den sichtbaren Bereich – erweitern, allerdings auf eine andere

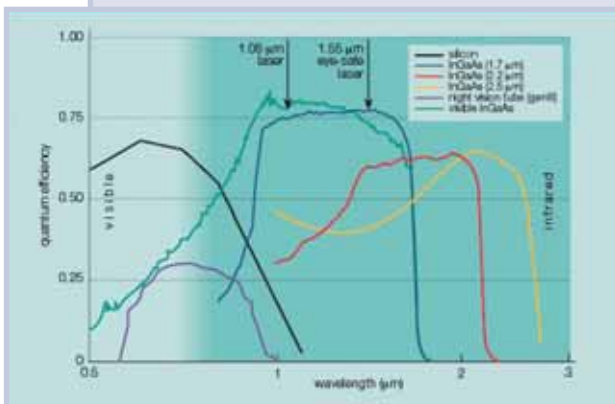
Weise. Bei bisherigen Realisierungen absorbiert das relativ dicke Substrat bei Backlight-Betrieb das sichtbare Licht, sodass die Empfindlichkeit für kürzere Wellenlängen unterhalb 0,9  $\mu\text{m}$  stark absinkt. Wird das Substrat jetzt bis auf eine Stärke von nur etwa 5  $\mu\text{m}$  chemisch ausgedünnt [3], dann fällt das sichtbare Licht fast ungedämpft auf den Sensor. Damit erfassen derartige VISWIR-Bildaufnehmer in InGaAs-Technologie einen Spektralbereich von 0,4 bis 1,7  $\mu\text{m}$ .

Ein typisches Beispiel

für den Einsatz dieser spektral erweiterten Flächensensoren sind Landehilfen in der Luftfahrt, die besonders bei Nebel und schlechter Sicht den kritischen Landevorgang unterstützen: Während herkömmliche SWIR-Detektoren die bisher eingesetzten Glühlampen der Landebahnbegrenzung sehr gut aufnehmen, sind VISWIR-Sensoren darüber hinaus auch in der Lage, auch die im sichtbaren Bereich strahlenden LED-Landeleichter gut zu erkennen, was die Sicherheit im heute hochdichten Luftverkehr erhöhen kann.

### Literatur

- 1 J.C.H. Cheng et al.: A Review of Near Infrared Photon Emission Microscopy and Spectroscopy, Proceedings of 12th IFPA 2005, Singapur, S. 275 bis 281
- 2 David L. Gilblom und Sang Keun Yoo: Infrared and Ultraviolet Imaging with a CMOS Sensor Having Layered Photodiodes, SPIE, 16. Annual Symposium 2004
- 3 www.xenics.com



**Quanteneffizienz unterschiedlicher Bildsensormaterialien in Abhängigkeit von der Wellenlänge für den sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich**

## Die Evolution der Sensoren

Die linearen Arrays der ersten Generation wurden üblicherweise von der Vorderseite belichtet, wobei man den jeweiligen Detektorsignalausgang über Bonddrähte herausführt und außerhalb des luftleeren Gehäuses mit einem individuellen Vorverstärker auf Raumtemperatur verbindet, der eine Verstärkungsanpassung vornimmt. Dies begrenzte die Linear-Arrays der ersten Generation auf weniger als 200 Elemente. Die ein- und zweidimensionalen Arrays der zweiten Generation werden oft schon von der Rückseite her durch ein transparentes Substrat beleuchtet. **Bild 2** stellt einige alternative FPA-Architekturen gegenüber.

**Bild 2a** zeigt ein Detektor-Array, das elektrisch mit einem Array von Vorverstärkern und/oder Schaltern auf der Readout-Ebene verbunden ist. Bumps aus Indium sorgen für einen weichen metallischen Kontakt für jedes Pixel. Dieser Typ eines direkten Hybriden kann eine große Anzahl von Pixeln mit individuellen Vorverstärkern verbinden, die ihrerseits mit Multiplexern für Reihe und Spalte ein sequenzielles Auslesen des Arrays gestatten.

Indirekte Hybrid-Konfigurationen nach **Bild 2b** sind für große Linear-Arrays gebräuchlich, die auf ein Substrat mit gleichem Temperaturkoeffizienten montiert werden. Sie lassen sich auch für eine serielle Hybridisierung nutzen, bei der sich der Detektor vor der Übergabe an die Ausleseschaltung (Readout) testen lässt. Mit dieser Anordnung ist es möglich, auch komplexere Auslesezellen anzukoppeln, deren Fläche die Größe einer Detektorzelle übersteigt. Verbunden werden Detektoren und Ausleseschaltungen über metallische Leiterbahnen auf dem Fanout-Substrat.

Bei den monolithischen Sensor-Arrays nach **Bild 2c** mit integrierten Detektor- und Auslesefunktionen liegt die Signalverarbeitungseinheit neben dem Detektor-Array statt unterhalb und wird mit Drahtbonden angeschlossen. Dazu muss die Signalver-

Typ	Technologie	Spektralbereich	Auflösung	Bildrate	Datenbreite	Kühlung
Xeva-1.7-320	InGaAs	0,9 – 1,7 $\mu\text{m}$	320 x 256	60 Hz 100 Hz 350 Hz	12 Bit 12 Bit 14 Bit	TE1 to TE3
Xeva-1.7-640	InGaAs	0,9 – 1,7 $\mu\text{m}$	640 x 512	30 Hz 60 Hz 90 Hz	14 Bit	TE1 to TE3
Xeva-2.5-320	HgCdTe (MCT)	0,85 – 2,5 $\mu\text{m}$	320 x 256	60 Hz 100 Hz	14 Bit	TE4

**Tabelle A. Technische Daten einiger NIR/SWIR-Kameras von Xenics**

arbeitungseinheit nicht auf dem gleichen Substrat (wie im Bild gezeigt) liegen oder sich auf gleicher Temperatur befinden. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise monolithische PtSi-Detektor-Arrays herstellen, deren Signalverarbeitung an der Peripherie des Detektor-/Readout-Chips integriert ist.

Die in **Bild 2d** dargestellte „Z-Technologie“ bietet durch Erweiterung der Struktur in orthogonaler Richtung für jedes Pixel eine wesentlich erweiterte Fläche für Signalverarbeitungsfunktionen. Gestapelte und gedünnte Auslese-Chips werden zu-

sammengeklebt und das Detektor-Array mit Indium-Bumps mit der Kante dieses Signalverarbeitungs-Stapels verbunden.

Der „Loophole“-Ansatz nach **Bild 2e** schließlich dünnt das Detektormaterial, nachdem es mit der Ausleseschaltung in Si-Technologie verklebt wurde. Eine elektrische Verbindung der Detektorelemente mit der darunter liegenden Ausleseschaltung erfolgt über Vias, die durch das Detektormaterial geätzt wurden, zu Kontaktflächen auf dem Ausleseteil. (m/)



## FAZIT

**InGaAs ermöglicht kompakte SWIR-Spektralkameras.** Kommerziell verfügbare Sensor-Arrays haben dank InGaAs das kurzwellige Infrarot für die breitbandige Spektroskopie und Bildverarbeitung erschlossen. Ohne Kühlung decken sie Wellenlängen bis 1,7  $\mu\text{m}$  ab, mit TE-Kühlung sogar bis 2,5  $\mu\text{m}$ . Xenics erzeugt dünne InGaAs-Schichten auf unterschiedlichen InP-Substraten mit gleicher oder abweichender Gitterkonstante. Sensor und Auswerteschaltung werden mithilfe einer kostengünstigen mehrpoligen Flip-Chip-Verbindung aufeinander gestapelt. Dieses Einbauverfahren erlaubt kompakte Kameras, die Spektrografie und monochrome Matrixfunktionen kombinieren. Zu den industriellen Anwendungen gehören die Messung von Feuchte oder der Verteilung von Oberflächenfilmen und Lacken oder Sortieraufgaben, wie die Trennung von Polymeren und natürlichen Stoffen.