Ursprüngliche Aufgabenstellung und wissenschaftlich technischer Stand, an dem angeknüpft wurde

Das Institut für Halbleitertechnik (IHT) der Universität Stuttgart ist im Rahmen des Teilprojektes „Ge-on-Si-SPAD Array“ hauptverantwortlich für die Entwicklung und die Herstellung eines neuartigen SPAD (engl. für Single Photon Avalanch Diode)-Empfängers. Gemeinsam mit den Partnern AMS und IBEO sollte damit ein adaptives SWIR (engl. für shortwave infrared)-LiDAR entwickelt und aufgebaut werden, der in der Lage ist, über KI schlechtes Wetter zu antizipieren und sich an dieses anzupassen. Der Empfänger beruht auf einer „Ge-on-Si“ (Germanium on Silicon) Technologie. Diese Technologie zeichnet sich dadurch aus, dass sie auf der weltweit führenden Si-Technologie aufbaut und damit für den Massenmarkt tauglich ist. Im Teilprojekt sollte ursprünglich ein SPAD-Array mit einer Auflösung von 160 x 120 Pixeln (1/4 VGA) aufgebaut und mit einem Auslesechip über eine Flip-Chip-Bondtechnik miteinander verbunden werden.

Neben Radar-, Ultraschall- und Kamerasensoren werden für die Realisierung des autonomen Fahrens LiDAR-Sensoren benötigt. Dabei wird eine hohe Reichweite von ~ 1 km des LiDAR-Systems angestrebt, wodurch die reflektierte Leistung an den Messobjekten um Größenordnungen kleiner ist, als die ausgesendete. Die einzigen Sensoren die diese Sensitivität erreichen können sind SPADs. Für ein LiDAR-System werden von diesen SPADs großflächige Arrays verwendet, um eine gute Auflösung der Umgebung zu ermöglichen. Kommerziell erhältlich sind zwei Arten von SPAD-Arrays. Dies sind zum einen Si-SPADs und SPADs aus Gruppe-III/V-Halbleitermaterialien (vorwiegend aus Legierungen von InGaAs/InP). SPADs aus Gruppe-III/V-Halbleitermaterialien sind extrem teuer und sind momentan für die kommerzielle Massenproduktion nicht geeignet. Dagegen ist die Si-SPAD-Technologie bereits sehr gut entwickelt. So sind beispielsweise bereits vollständig integrierte Si-SPAD-Arrays mit bis zu einem Megapixel realisiert.

Die gesetzlich festgelegte maximale Bestrahlungsintensität einer Punktquelle steigt um bis zu 6 Größenordnungen, wenn die verwendete Wellenlänge von 900 nm auf 1500 nm verschoben wird. Damit erlaubt der Einsatz eines Lasers mit einer Wellenlänge im SWIR-Bereich eine um mehrere Größenordnungen höhere optische Leistung im Vergleich zum NIR-Bereich. Die deutlich erhöhte ausgestrahlte optische Leistung vergrößert natürlich sowohl die Messentfernung des gesamten LiDAR-Systems als auch die gesamte Auflösung. Mit einem Si Detektor können nur Wellenlängen bis maximal 1100 nm detektiert werden, sodass für den SWIR Bereich Ge als Absorbermaterial eingesetzt werden soll. Mit diesem Material lässt sich Licht mit Wellenlängen bis zu 1550 nm detektieren. Der Einbau von Ge in eine Si basierte SPAD ist eine sehr interessante Detektorarchitektur für ein SWIR-LiDAR-System. Ge verspricht die vorteilhafte Verwendung von Wellenlängen im SWIR-Bereich und zugleich die vollständige Integration auf einem großflächigen Array. Hinzu kommt, dass diese Technologie aufgrund der Verwendung von Si als Trägermaterial sehr kostengünstig ist. Es gibt inzwischen einige Forschungsgruppen, welche den grundsätzlichen Nachweis für die Einzelphotonendetektion von „Ge-on-Si“-SPADs bei tiefen Temperaturen zeigten.

Ablauf des Vorhabens

Das IHT beteiligte sich an der Entwicklung eines neuartigen SWIR LiDAR-Sensors. Das Ziel dabei war, ein LiDAR-System der nächsten Generation durch die Einführung bedeutender Innovationen bei den Schlüsselkomponenten aufzubauen. Das IHT zeichnet dafür hauptverantwortlich für die Technologieentwicklung neuartiger „Ge-on-Si“ SPAD-Arrays.

Die IHT-Arbeitspakete waren:

AP	Arbeitspaket
AP 2	Anforderungen und Architektur
AP 3.2	SWIR LIDAR
AP 6	Demonstration, Nutzung und Bewertung

Der Hauptarbeitspunkt des IHTs war im Arbeitspunkt 3 „Hardware-Entwicklung“ der Aufbau eines neuartigen großen 2-dimensionalen SWIR Empfängers. Dieser Empfänger beruht auf der „Ge-on-Si“-Technologie, mit der die Detektion in einen Wellenlängenbereich bis zu 1550 nm ermöglicht wird. Dadurch lassen sich LiDAR-Systeme der nächsten Generation mit einer deutlich höheren Reichweite aufbauen. Im Teilprojekt verfolgt das IHT zwei parallele Entwicklungspfade. Zum einen wird am IHT während der gesamten Projektlaufzeit die einzelne „Ge-on-Si“ SPAD weiter entwickelt und optimiert. Mit der elektrooptischen Messtechnik sowohl im Gleichlicht aber auch unter gepulster Anregung werden alle notwendigen Parameter der SPAD ermittelt, sodass damit ein Model aufgestellt werden kann. Parallel dazu wurde die Technologie an einen kommerziellen Chiphersteller transferiert.

Wesentliche Ergebnisse + Zusammenarbeit mit anderen Forschungs-einrichtungen

Das IHT und der der Projektpartner asm Osram haben im Rahmen des AI-SEE Projektes auf der Basis einer „Ge-on-Si“- Technologie ein 5x5 „Ge-on-Si“ SPAD Array mit der zugehörigen Ausleseelektronik erfolgreich entwickelt. In diesem Sensor wandeln heteroepitaktisch integrierte Ge-on-Si SPADs einzeln einfallende Photonen pixelweise in Elektron-Loch-Paare um, verstärken diese, sodass diese als Photostrom detektiert werden können. Die Technologie des Einzelphotonendetektors auf der Basis der Gruppe IV wurde an einen kommerziellen Chiphersteller transferiert und es wurde damit der Photonik-Chip gefertigt. Dieser Chip des IHTs und der vom Projektpartner asm-Osram entwickelte und hergestellte Auswerteelektronik-Chip wurden in einem neu entwickelten Flip-Chip Bondprozess erfolgreich durch einen Unterauftragnehmer miteinander verbunden. Dies bietet nun die Möglichkeit der weiteren Skalierung zu Arrays mit größerer Pixelanzahl. Zur Analyse der neu entwickelten Ge-on-Si SPADs wurde im Projekt ein komplett neuer Einzelphotonenmessplatz aufgebaut, mit dem die Bauelemente in einem weiten Temperaturbereich zwischen 10 K und 330 K analysiert werden können. Mit diesem Messplatz konnte die Funktionalität der Ge-on-Si SPADs bis zu Raumtemperatur demonstriert werden. Parallel dazu wurden am IHT auch GeSn-on-Si SPADs entwickelt, um den detektierbaren Wellenlängenbereich weiter in das Nahe Infrarote zu verschieben.

Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse planen wir, die Arbeiten konsequent in die industrielle Anwendung zu überführen und die Weiterentwicklung der Technologie strategisch voranzutreiben. Dafür ist die Gründung eines Spin-offs mit dem Namen **Germanium Quantum Detectors** vorgesehen, das sich auf die Kommerzialisierung der Ge-SPAD-Technologie konzentriert. Ziel ist es, die einzigartigen Eigenschaften unserer bei Raumtemperatur betriebenen Einzelphotonendetektoren – insbesondere ihre hohe Empfindlichkeit, geringen Dunkelzählraten und CMOS-Kompatibilität – zu nutzen, um marktreife Produkte für Anwendungen in der LiDAR-Sensorik, der Telekommunikation und der Quantenoptik zu entwickeln.

Im Rahmen des Projektes wurde nur mit den Projektpartnern zusammengearbeitet.

Eingehende Darstellung

Im Folgenden werden für den Berichtszeitraum des BMBF-Verbundprojektes AI-SEE des Teilvorhabens „Ge-on-Si SPAD-Array“ alle relevanten wissenschaftlichen Ergebnisse vorgestellt. Dabei werden alle AP des IHTs einzeln diskutiert.

AP 2 Anforderungen und Architektur

Gemeinsam mit den Partnern aus dem Konsortium wurden die Ziel-Spezifikationen für den LiDAR-Sensor definiert, was in Tabelle 1 zusammengefasst ist.

Tabelle 1: Definition der Spezifikationen für den zu entwickelnden Lidarsensor.

Kenngröße	Ziel-Spezifikation	
	Horizontal	Vertikal
Anzahl Pixel	25	15
Sichtfeld	25 °	15 °
Auflösung	1 °/px	1 °/px
Distanz	~ 100 m	
Distanzauflösung	0,1 m	
Bildwiederholrate	25 Hz	
Laserwellenlänge	1500 – 1550 nm	

Die Verwendung der Wellenlänge von 1550 nm ist aus Sicht des LiDAR-Gesamtsystems wünschenswert. Da die Absorption in Ge allerdings bei 1550 nm bereits stark abgesunken ist, wird als Betriebswellenlänge zunächst der Bereich von 1500 nm bis 1550 nm festgelegt. Um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu reduzieren ist es empfehlenswert, die Pixel so klein wie möglich zu wählen. Umso kleiner die Pixel jedoch sind, umso größer ist auch der technologische Aufwand in der Herstellung. Als Projektziel wird deshalb ein Pixelpitch von ≤ 50 µm festgelegt. Für die Herstellung des SWIR-LiDAR‘s ist es notwendig das Ge-on-Si SPAD-Array mit der integrierten Ausleseschaltung der ams-Osram AG zu verbinden. Dazu wird ein Flip-Chip Prozess benötigt, dessen notwendigen Spezifikationen im Konsortium definiert worden.

AP 3.2 – SWIR LiDAR

Unter diesem AP findet sich das Hauptaufgabengebiet des IHTs für die Entwicklung und Herstellung neuartiger „Ge-on-Si“ SPAD-Arrays als Empfänger eines SWIR-LiDAR-Systems. Das IHT ist dabei im speziellen an den folgenden Arbeitspunkten AP 3.2.1 „LiDAR Demonstrator Integration“ und am AP 3.2.2 „Ge-on-Si SPAD-Array und Charakterisierung“ beteiligt.

AP 3.2.1 – LiDAR Demonstrator Integration

Das IHT konnte leider den Projektpartner IBEO aufgrund dessen Insolvenz im AP 3.2.1.2 „Elektronik Module“ nicht unterstützen. Die Mittel von diesem AP wurden in den Aufbau des Einzelphotonenmessplatzes teilweise investiert.

AP 3.2.2 – „Ge-on-Si“ SPAD-Array und Charakterisierung

Dieser AP wird hauptverantwortlich durch das IHT bearbeitet und unterteilt sich in 9 Unterpunkte.

AP 3.2.2.1 Heteroepitaxie von „Ge-on-Si" SPADs

Für die Reduzierung des Dunkelstromes in einer „Ge-on-Si" SPAD (schematischer Aufbau siehe linke Darstellung in Abb. 1) wird im Rahmen des Projektes das Ge virtuelle Substrat (Ge-VS) in den Gesamtprozessfluss des Bauelementes integriert. Dafür wird zunächst eine dünne Ge-Schicht (100 nm) bei einer niedrigen Temperatur abgeschieden und im Anschluss bei einer erhöhten Temperatur getempert. Diese Wachstumsstrategie passt zum einen die Gitterkonstante auf die des Ge an. Dies geschieht durch die Einbringung eines Versetzungsnetzwerkes zwischen dem Chargelayer der SPAD und dem eigentlichen Absorptionsgebiet. Bei diesem Prozess entstehen aber auch Durchstoßversetzungen, die sich bis zur Oberfläche hindurchziehen. Dadurch wird der Chargelayer und der Topkontakt kurzgeschlossen, wodurch das elektrische Feld im Absorptionsgebiet abgeschwächt wird. Ein Hochtemperaturschritt in der Nähe des Schmelzpunktes des Ge reduziert diese Durchstoßversetzungsdichte. Die Abb. 1 zeigt das Dunkelstromkennlinienfeld einer Ge-on-Si SPAD mit Ge-VS und ohne. Es wurde festgestellt, dass ein Ge-VS den Dunkelstrom um etwa Faktor 5 verringern kann.

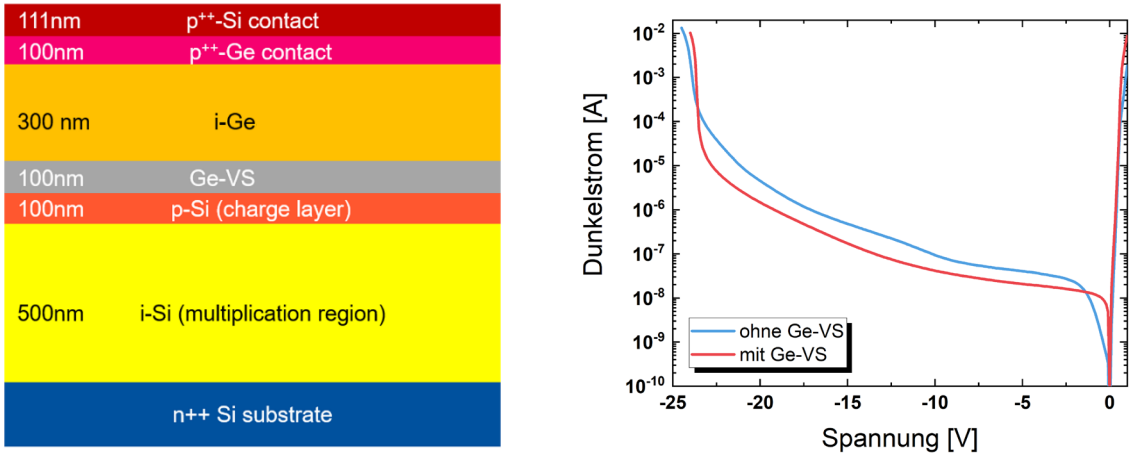

Abb. 1: Schematischer epitaktischer Schichtaufbau der zu untersuchenden GeSn-on-Si SPADs (links). Strom-Spannungskennlinie einer Ge-on-Si SPAD mit und ohne Ge-VS (rechts). Die Proben sind bis auf das Ge-VS identisch und der Diodendurchmesser beträgt 40 µm.

Durch die Beimischung von Sn in die Ge-Matrix verkleinert sich die Bandlücke des Mischkristalls und das Absorptionsvermögen schiebt zu größeren Wellenlängen. Das Wachstum der GeSn-on-Si SPADs ist nur leicht gegenüber der Ge-on-Si SPADs abgeändert. Nach der Herstellung des Ge-VS wird die darauffolgende GeSn-Schicht pseudomorph aufgewachsen. Der Sn-Gehalt bei diesem Experiment variiert nominell in 0,5% Schritten von 0% bis 2%. Die Diode unterteilt sich in den Vervielfachungsbereich (i-Si multiplication region) und den eigentlichen Absorptionsbereich aus GeSn. In diesem Absorptionsbereich werden Elektron-Loch-Paare generiert, die in dem angelegten elektrischen Feld getrennt werden. Die Löcher driften dabei zum Topkontakt und die Elektronen in den Vervielfachungsbereich, wo diese dann eine Ladungsträgerlawine auslösen. Um den tatsächlichen Sn-Gehalt der einzelnen Proben zu bestimmen wurde eine hochauflösende Röntgenanalyse (HR-XRD) durchgeführt. Dazu wurde die asymmetrische (-2-24) Beugung vermessen. Zur Bestimmung der parallelen Gitterkonstanten der einzelnen Schichten muss mit einem asymmetrischen Reflex eine reziproke Raumkarte (RSM) aufgenommen werden. Zur

besseren Darstellung wurden diese in die realen Gitterparameter umgerechnet. Die Abb. 2 zeigt die Messergebnisse für die verschiedenen GeSn-on-Si SPADs.

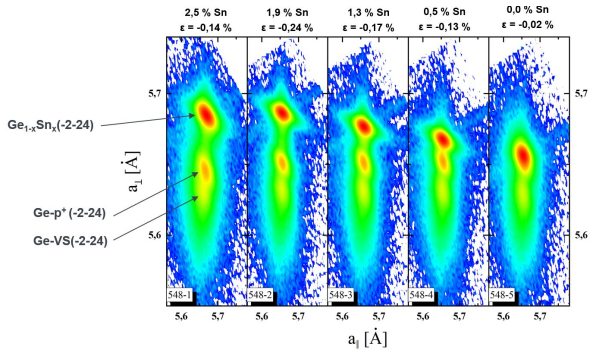

Abb. 2: HR-XRD Raumkurven der asymmetrischen (224) Beugung aller 4 Proben.

Aus diesen Messungen lassen sich mit einer einfachen Elastizitätstheorie für eine biaxiale Verspannung die entsprechenden Sn-Gehalte berechnen. Die erhaltenen Werte finden sich jeweils oberhalb von den Bildern.

Ein weiterer Wachstumsparameter, die Rauigkeit der Oberfläche wurde im Rahmen dieses Projektes untersucht. Es konnte mit dem Verfahren der AFM (Atomic Force Microscopy) festgestellt werden, dass durch die Hochtemperaturtemperschritte die Ge-Oberfläche eine deutlich höhere Rauigkeit aufweist. Durch höhere Wachstumstemperaturen und dickere Ge Schichten auf dem Ge-VS konnten glattere Oberflächen hergestellt werden. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass durch eine zweite Temperung des gesamten Ge-Schichtstapels die Dunkelströme um mehr als eine Größenordnung reduziert werden können.

AP 3.2.2.2 Bauelementtechnologie

Für die Optimierung der Ge-on-Si SPAD ist insbesondere das interne elektrische Feld des Bauelements zu optimieren. Dabei bestimmt die „Charge Layer“ Dotierung maßgeblich die internen elektrischen Felder. In der Abb. 3 sind die Simulationen der elektrischen Felder innerhalb der „Ge-on-Si“ SPAD in Abhängigkeit der „Charge Layer“ Dotierung dargestellt. Grundsätzlich ist es wünschenswert das elektrische Feld im Ge-Absorptionsgebiet möglichst gering zu halten, um so Feld-induzierte Tunnelmechanismen zu verhindern. Es ist zu erkennen, dass das elektrische Feld im Ge mit steigender „Charge Layer“ Dotierung absinkt. So wurde nun eine Dotierstoff-konzentration von 1 - 2,5×10^{17} cm^{-3} als das Optimum für die „Ge-on-Si“ SPADs ermittelt.

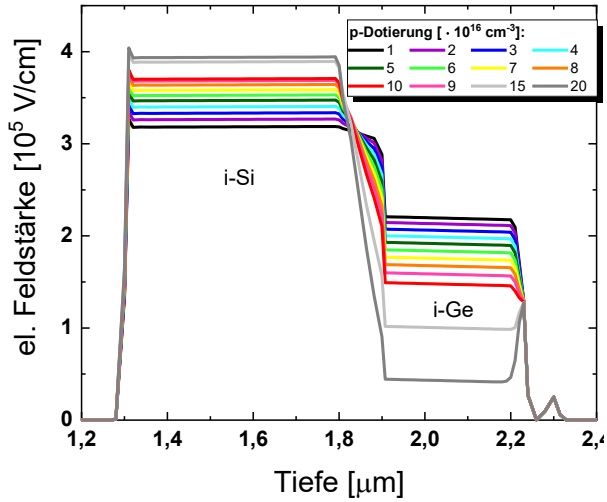

Abb. 3: Simulierte elektrische Felder in einer Ge-on-Si SPAD mit variierten „Charge Layer“ Dotierungen im Bereich von 1×10^{16} cm^{-3} bis 2×10^{17} cm^{-3}.

In diesem AP wurden gemeinsam mit dem Projektpartner ams-Osram umfangreiche Simulationen mit dem Halbleitersimulationsprogramm Sentaurus Devices durchgeführt. Dabei konnte die hohe Dunkelzählrate der „Ge-on-Si“ SPADs auf Oberflächeneffekte zurückgeführt werden. Die hohen elektrischen Felder an den Seitenwänden der Mesadioden (also an der Halbleiter-Oxid-Grenzfläche) erhöhen überdurchschnittlich die Dunkelzählraten der SPADs. Es muss eine Stromführung im Durchbruch der Diode gefunden werden, so dass das elektrische Feld im Volumen des Avalanche-Bereiches geführt wird und an den Grenzflächen zum Oxid merklich

verkleinert wird. Das ist die Key-Performance, um eine „Ge-on-Si“ SPAD möglichst bei Raumtemperatur betreiben zu können.

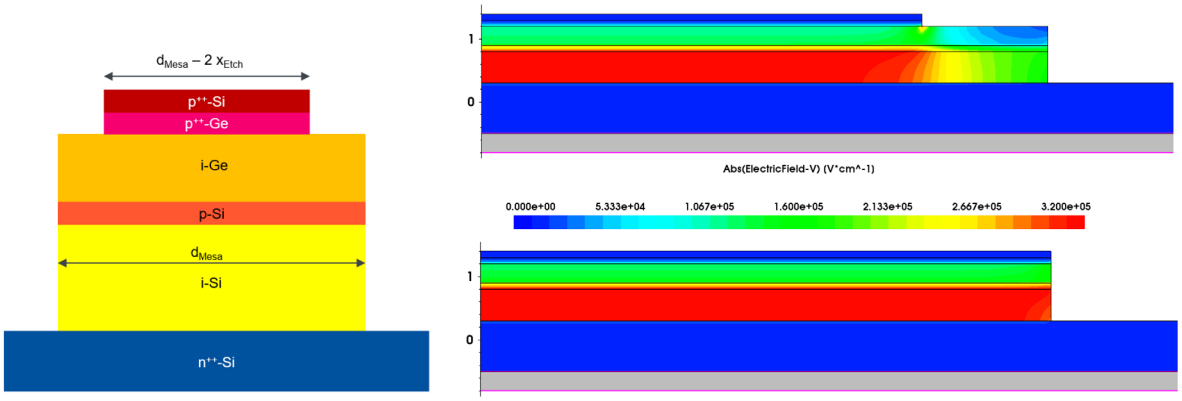

Abb. 4: Schematische Struktur der Ge-on-Si SPAD mit zusätzlicher Ätzung des p^+-Kontaktes (links) und die simulierten elektrische Felder mit der üblichen Mesaätzung (rechts oben) im Vergleich zu einer zusätzlichen Ätzung des p^+-Kontaktes (rechts unten).

Während des Projektes wurden verschiedenste Bauelementparameter variiert, um das elektrische Durchbruchsfeld an der Oberfläche zu minimieren. Der größte Effekt konnte durch ein sogenanntes Doppelmesa Design erzielt werden (siehe linke Darstellung in Abb. 4). Dabei wird zusätzlich zur üblichen Mesaätzung zur Isolation der Bauelemente eine weitere partielle Ätzung durchgeführt. Dabei wird lediglich der oben liegende p^+-Kontakt (also bis zum i-Ge) mit einem Abstand x_{Etch} zur Mesa geätzt. Die rechten beiden Bilder in Abb. 4 zeigen die Simulationen des elektrischen Feldes im Vergleich zur üblichen Mesaätzung. Es ist zu erkennen, dass das elektrische Feld an den Mesaseitenwänden im Si als auch im Ge verringert werden kann. Die Verringerung des elektrischen Feldes im Ge ist beträchtlich, sodass an den Mesaseitenwänden die elektrische Feldstärke auf Null herabfällt. Im Si beträgt diese Verringerung einen Faktor von 2, was die Wahrscheinlichkeit eines Avalanche bereits stark verringert. Für eine effektive Verringerung der elektrischen Feldstärke wurde ein Abstand $x_{Etch} \geq 2$ µm ermittelt.

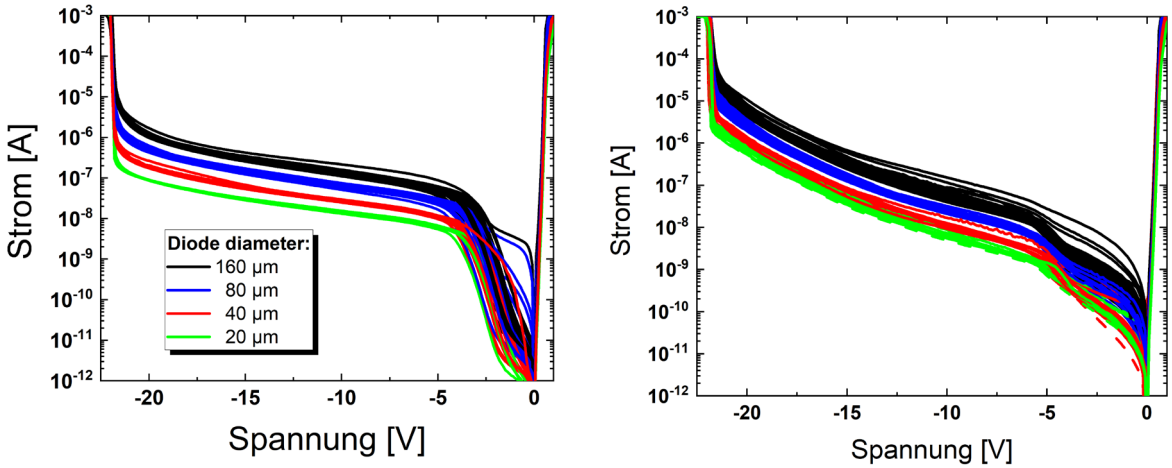

Abb. 5: Dunkelstromcharakteristik der neuen Doppel-Mesa-Struktur (links) und Standard Ein-Mesa-Struktur (rechts) für Dioden mit verschiedenen Durchmessern.

Die Simulationsergebnisse wurden durch ein Experiment verifiziert. Die Ergebnisse zeigt die Abb. 5. Zuerkennen ist sowohl, dass der Dunkelstrom bei der Doppelmesa grundsätzlich geringer ist, als auch, dass die Homogenität der Dioden verteilt über die Probe besser ist. Um einen besseren Vergleich zwischen den beiden Proben zu ermöglichen wurden im Folgenden alle Dioden auf den jeweiligen Proben vermessen

und eine statistische Analyse der Dunkelströme erstellt. In der Abb. 6 ist zum einen der Dunkelstrom der Einzel-Mesa mit dem der Doppel-Mesa bei einem Diodendurchmesser von 20 µm verglichen. Zum andere ist ein Kastendiagramm, welches den Umfangstrom aller Dioden beim selben Arbeitspunkt von 95 % der Durchbruchspannung dargestellt.

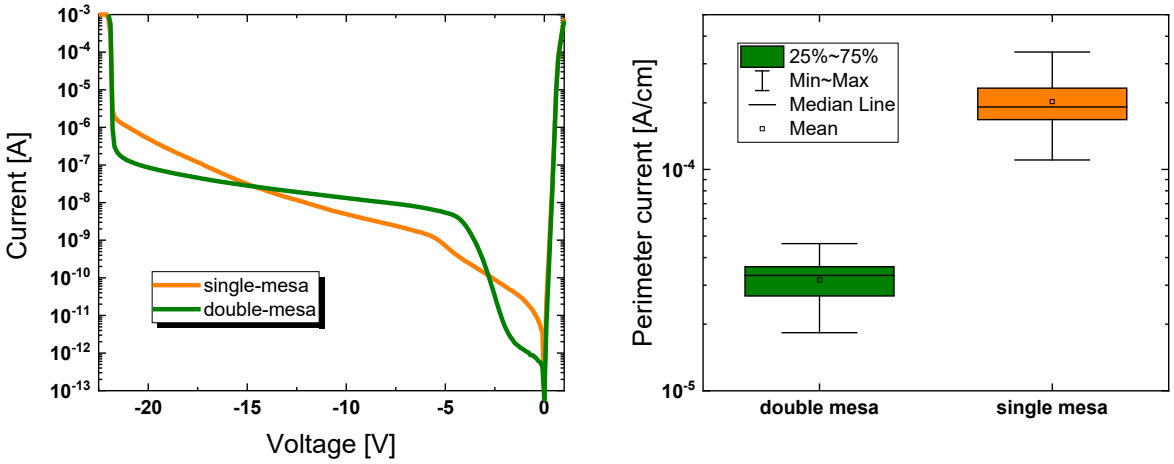

Abb. 6: Vergleich des Dunkelstroms einer Doppelmesa-Struktur und einer Einzelmesa-Struktur (Diodendurchmesser: 20 µm) (links) und Kastendiagramm des Umfangsdunkelstroms bei 0,95×U_{BD} für beide Proben. Die Kastendiagramme zeigen die Dunkelstromwerte von etwa 75 Dioden für jede Probe (rechts).

Beim direkten Vergleich der Dunkelstromcharakteristik ist zu erkennen, dass sich der Verlauf über der Spannung verändert hat. Bei der neuen Doppel-Mesa-Struktur steigt der Dunkelstrom für steigende Rückwärtsspannungen schwächer an als bei der Standard Einzel-Mesa-Struktur.

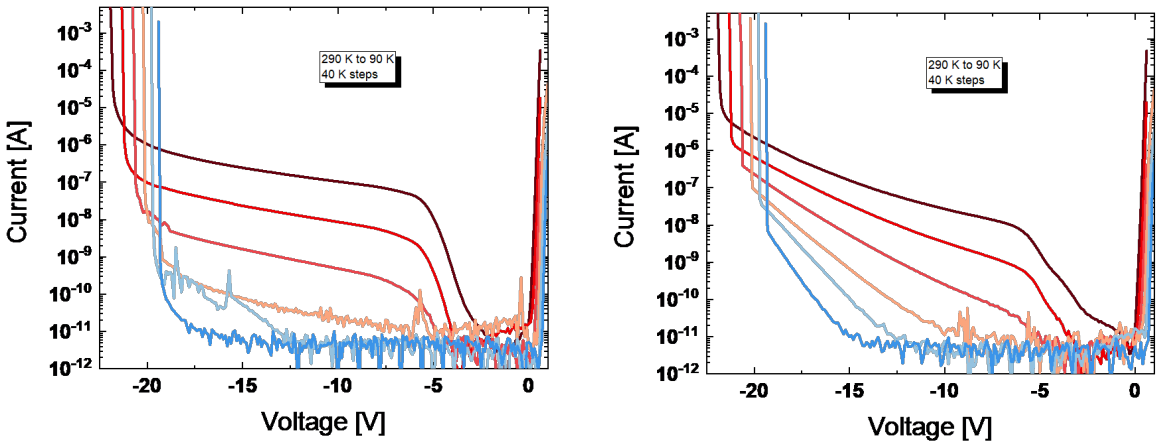

Abb. 7: Temperaturabhängige Dunkelstromcharakteristik der Einzel-Mesa (links) und der Doppel-Mesa (rechts) in einem Temperaturbereich von 90 K bis 290 K.

Für die gute Funktion der „Ge-on-Si“ SPADs ist insbesondere das Dunkelstromverhalten bei geringeren Temperaturen (typischer Arbeitspunkt im Bereich 80 – 140 K) relevant. Daher wurden im Folgenden noch die Temperaturabhängigkeit des Dunkelstromes untersucht. In Abb. 7 ist der temperaturabhängige Dunkelstrom für die Einzel-Mesa (links) mit dem der Doppel-Mesa verglichen (rechts).

Bei beiden Dioden ist eine Abnahme des Dunkelstromes mit geringerer Temperatur zu beobachten, was maßgeblich durch die Reduktion der intrinsische Ladungsträgerkonzentration zu begründen ist. Auffällig ist im direkten Vergleich

jedoch, dass diese Verringerung des Dunkelstromes bei der Doppel-Mesa stärker zu beobachten ist. So erreicht die Doppel-Mesa bei einer Temperatur vor 170 K und dem Arbeitspunkt von 95 % der Durchbruchspannung einen Dunkelstrom von 0,7 nA, was im Vergleich zur Einzel-Mesa mit einem Dunkelstrom von 36 nA ein Faktor 50 geringer ist. Dieser Unterschied zwischen den Proben wird für noch geringere Temperaturen größer, wobei das Erreichen des messplatzspezifischen Rauschens eine Analyse der sehr geringen Dunkelströme erschwert.

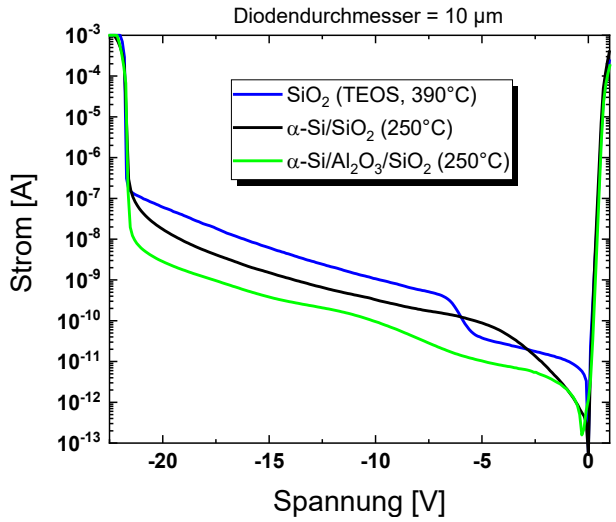

Abb. 8: Strom-Spannungskennlinie mit verschiedenen Passivierungen

Neben einer optimierten Führung des Durchbruchstromes im Bauelement ist ein weiterer wichtiger Faktor die Passivierung der Oberflächen. Hierzu wurden im Rahmen des Projektes Experimente mit verschiedenen Passivierungsschichten (SiO_2, SiN_x, Al_2O_3 und amorphes Silizium (a-Si)) durchgeführt. Diese Materialien zeigen gute Passivierungs-eigenschaften auf Si. Von besonderem Interesse ist dabei das α-Si, da dieses sowohl auf Si als auch auf Ge nachweislich gute Passivierungseigenschaften zeigt. Mit diesem Prozess wurden in zwei Iterationen Ge-on-Si SPADs hergestellt, um die These der besseren Passivierung zu bewahrheiten. Abb. 8 ist die Dunkelstromcharakteristik von Dioden mit einem Durchmesser von 10 µm und verschiedenen Passivierungen dargestellt. Der bisherige Standard-Passivierung besteht aus einer SiO_2-Schicht, welche bei 390 °C in der PECVD mit einem TEOS-Präkursor abgeschieden wurde. Diese bietet die Referenz für die neu hergestellten Ge-on-Si SPADS mit α-Si Passivierung. In einem ersten Schritt wurde eine Doppelschicht aus 30 nm α-Si und 300 nm SiO_2 verwendet welche bereits eine Dunkelstromverringerung um Faktor 4 zur Folge hat. In einem weiteren Prozess wurde nun eine Dreifach-Schicht aus 15 nm α-Si, 15 nm Al_2O_3 und 300 nm SiO_2 verwendet. Mithilfe dieser konnte der Dunkelstrom weiter verringert werden, sodass nun ein um Faktor 20 geringerer Dunkelstrom erreicht wurde.

AP 3.2.2.3 - Elektrooptische DC Charakterisierung der „Ge-on-Si“ SPADs

Für die geplante Anwendung der Ge-on-Si SPADs in einem LiDAR-System wurde mit den Projektpartnern eine gezielte Verwendung des Wellenlängenbereichs von 1500nm - 1550 nm abgesprochen. Der Grund dafür ist die Augensicherheit bei Bestrahlung mit einem Laser. Die Abb. 9 zeigt die gesetzlich vorgeschriebene maximale Bestrahlung für einen Laserpuls mit einer Länge von 1ns als Funktion der Wellenlänge. Aktuell erhältliche kommerzielle SPADs sind Si SPADs, die bei einer Wellenlänge von 940 nm arbeiten. Lässt sich eine SPAD auch im Wellenlängenbereich ab 1500 nm betreiben, dann darf die ausgestrahlte Laserleistung um 6 Größenordnungen höher sein, im Vergleich zu Si SPADs. Das ist die treibende Kraft für die Entwicklung von SWIR SPADs.

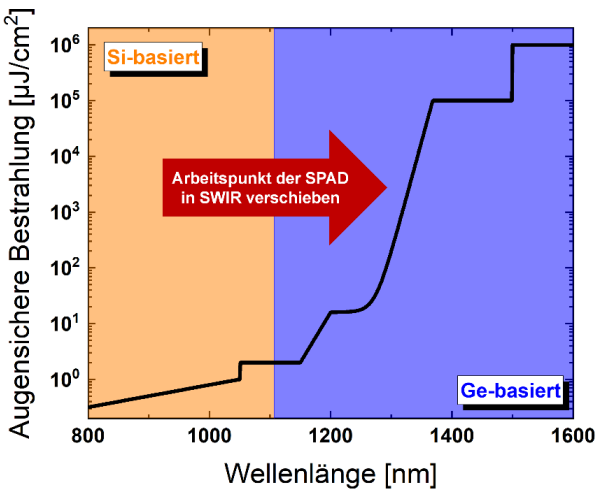

Abb. 9: Maximal zulässige Laserpulsleistung in Abhängigkeit von der Wellenlänge für einen optischen Puls mit einer Länge von 1 ns.

Das Absorbermaterial Ge besitzt eine direkte Bandlücke bei einer Energie von 0,8 eV liegt, was einer Wellenlänge von 1550 nm entspricht bei Raumtemperatur. In der Nähe der Bandlücke verkleinert sich die Absorption deutlich. Dies zeigt die linke Darstellung in der Abb. 10, in der auch der Verlauf des Absorptionskoeffizienten von Si aufgetragen ist. Bereits ab einer Wellenlänge von 1500 nm sinkt das Absorptionsvermögen von Ge deutlich. Die Kühlung der Proben, die zum jetzigen Zeitpunkt noch notwendig ist, verschlimmert diese Tatsache zusätzlich, da die Bandlücke mit sinkender Temperatur weiter ansteigt, was einer Verringerung der Wellenlänge gleichkommt (siehe rechte Darstellung von Abb. 10).

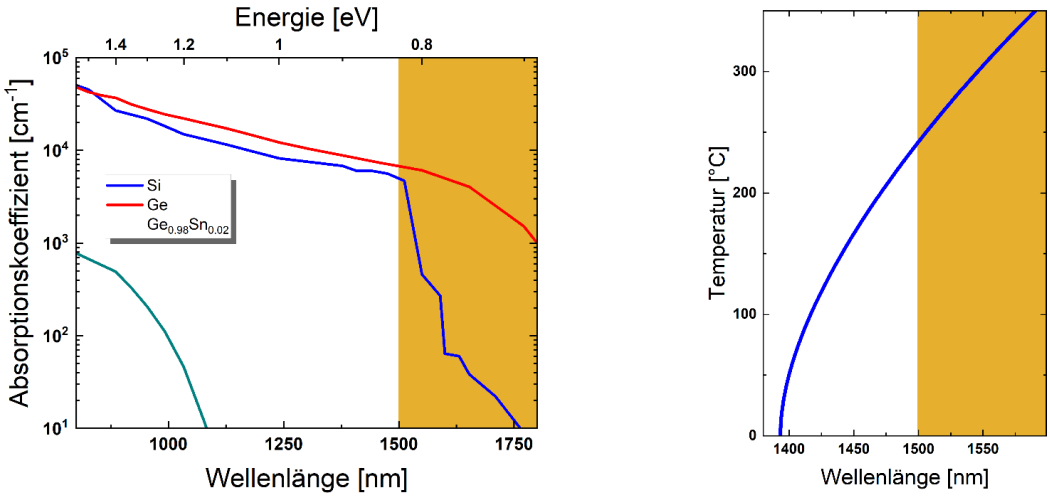

Abb. 10: Absorptionskoeffizient für verschiedene Materialien der Gruppe IV als Funktion der Wellenlänge (links) bei Raumtemperatur. Temperaturabhängige Änderung der direkten Bandlücke von Ge (rechts).

Um dem entgegenzuwirken wurden GeSn-on-Si SPADs hergestellt (siehe Beschreibung in AP 3.2.2.1 - Heteroepitaxie von „Ge-on-Si" SPADs). Dabei wurde dem Ge eine kleine Konzentration von bis zu 2,2 % Sn beigemischt. Es konnte gezeigt werden, dass die Absorption bei einer Wellenlänge von 1550 nm unter Raumtemperaturbedingungen stark ansteigt, während der Dunkelstrom nicht signifikant degradiert. Die folgende Abb. 11 zeigt den Dunkelstrom einer Probenserie mit verschiedenen Sn-Konzentrationen am Beispiel zwei verschieden großer Dioden.

Es ist zu erkennen, dass die Beimengung von Sn in den Ge-Kristall zu keinem signifikanten Anstieg des Dunkelstromes führt. So werden für eine Spannung von U = 0,95 U_{DB} Ströme von ca. I = 8 µA erreicht (Diodendurchmesser 20 µm). Betrachtet man nun Dioden mit verschiedenen Größen und normiert diese auf die Fläche bzw. den Umfang ist es möglich Rückschlüsse auf die primären Rekombinations-

mechanismen zu geben. Dies ist beispielhaft an der 2,2 % Sn Probe in Abb. 12 dargestellt.

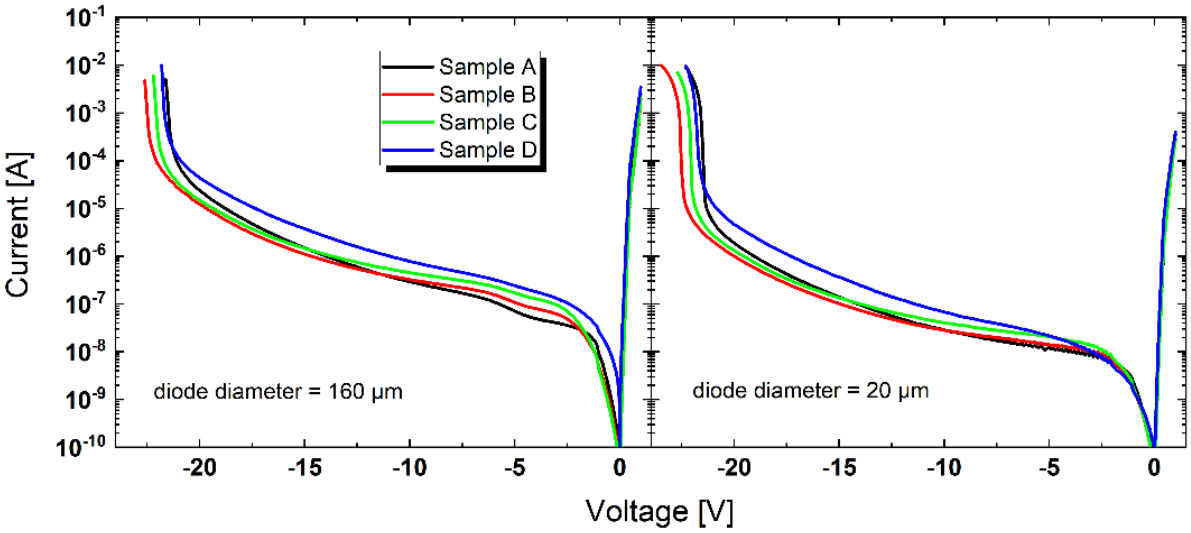

Abb. 11: Strom-Spannungscharakteristik von GeSn-on-Si SPADs mit Sn Konzentration von 0 % bis 2,2 % für große (160 µm) und kleine (20 µm) Dioden.

Es zeigt sich, dass der primäre Dunkelstrom über den Umfang und damit über die Mesaseitenwänden fließt. Dies ist analog zu den Ge-on-Si SPADs weist die Problematik der erhöhten Feldstärken an den Mesaseitenwänden auf. Mithilfe der elektrooptischen Charakterisierung ist es nun möglich die optische Empfindlichkeit der Proben zu ermitteln. Dies wurde für die relevante Wellenlänge von 1550 nm getan, was in Abb. 13 dargestellt ist.

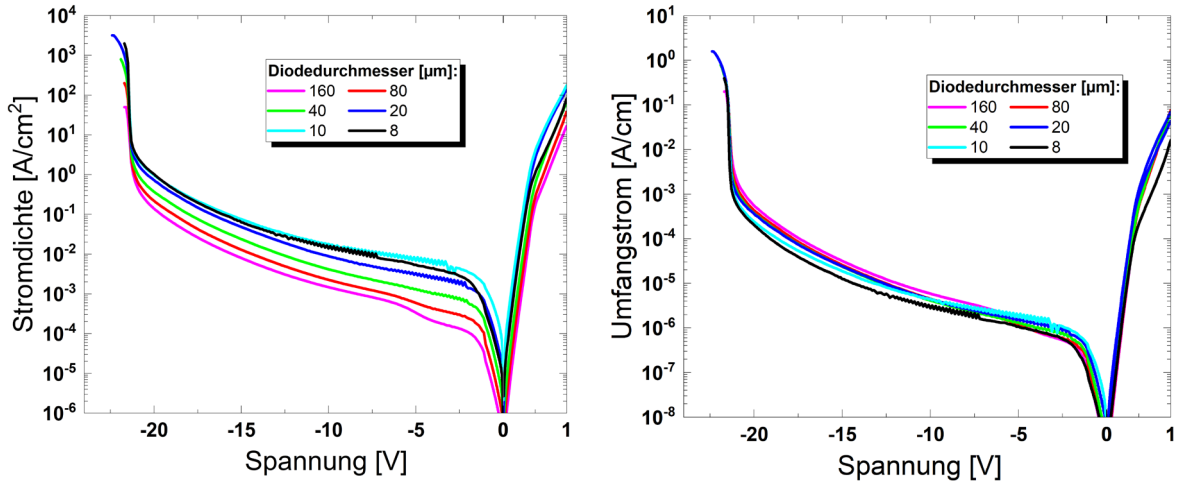

Abb. 12: Strom-Spannungscharakteristik der GeSn-on-Si SPADs normiert auf die Fläche (links) bzw. den Umfang (rechts).

Eine Beimengung von 2,2% Sn ermöglicht so die Vervierfachung der optischen Empfindlichkeit im Vergleich zu einer Probe rin aus Ge. Diese Ergebnisse sind in Hinblick einer möglichen Anwendung besonders relevant. Zum jetzigen Stand ist die Kühlung der Proben zur Verringerung der Dunkelzählrate und damit für deren Funktionsweise notwendig. Diese Kühlung hat zur Folge, dass die Absorption von 1550 nm im Ge abnimmt und dabei bietet die Beimischung von Sn eine geeignete Lösung diesem entgegenzuwirken.

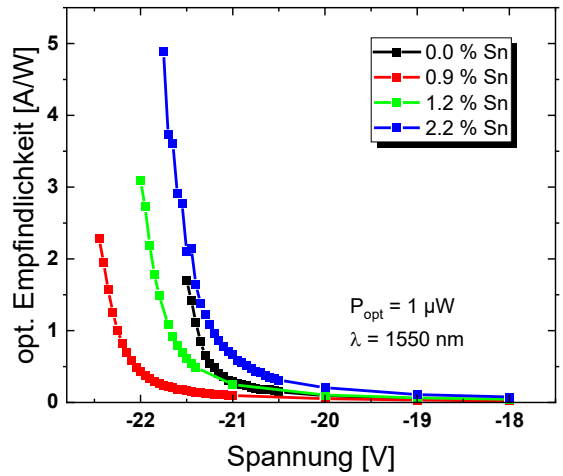

Abb. 13: Optische Empfindlichkeit einer GeSn-on-Si APD bei einer Wellenlänge von 1550 nm mit der Leistung von 1 µW.

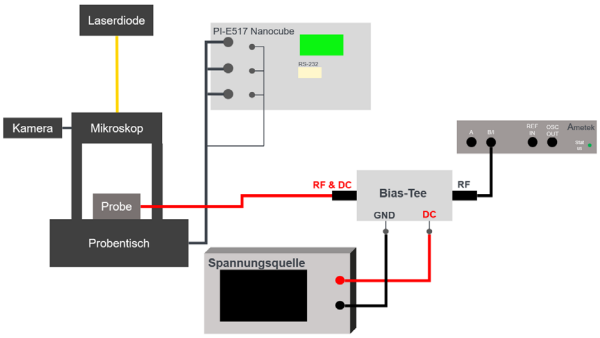

Abb. 14: Schematischer Aufbau des SPCM-Messplatzes zur ortsaufgelösten Messung des Photostromes.

Für die Messung ortsaufgelöster Photoströme an den SPADs wurde im Rahmen des Vorhabens ein spezieller Messplatz aufgebaut. Dieser „Scanning-Microscopy Photocurrent Measurement“ (SPCM) Messplatz ist in Abb. 14 dargestellt. Mit diesem Messplatz ist es möglich sowohl spannungs- als auch ortsabhängig (mit einer Auflösung von ~ 500 nm) den Photostrom und somit auch die optische Empfindlichkeit der Ge-on-Si SPADs zu vermessen. Die in AP 3.2.2.2 vorgestellte neue Doppelmesa-Struktur wurde einer solchen Messung unterzogen, um den Einfluss der verringerten elektrischen Feldstärke am Rand zu ermitteln. In Abb. 15 sind die Messungen an Diode mit einem Durchmesser von 80 µm dargestellt. Dabei ist links die Diode mit nur einer Mesa und rechts die Diode mit der neuen Doppelmesa-Struktur dargestellt.

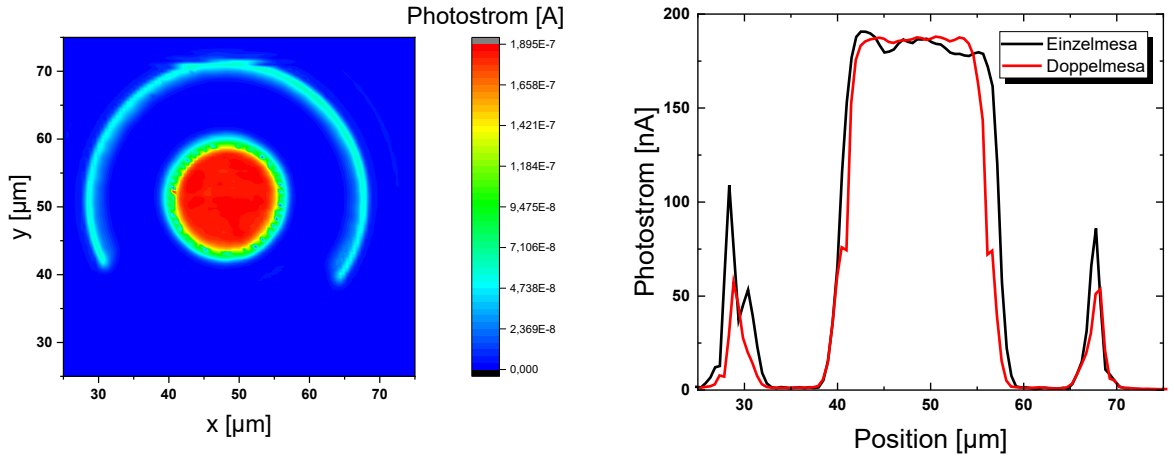

Abb. 15: 2-Dimensionale Photostrommessung an einer Doppelmesastruktur (links). Vergleich zwischen Doppel- und Einzelmesa mit einem Schnitt (rechts).

Die Messung im linken Graph von Abb. 15 zeigt, dass im Allgemeinen der gemessene Photostrom in der Mitte der Diode am größten ist. Nichtdestotrotz ist an den Rändern der Diode noch ein Photostrom messbar. Zum Vergleich mit der Einzel-Mesa wurde nun ein y-Schnitt bei y = 50 µm durch diese Messung gezogen und in der rechten Darstellung von Abb. 15 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der gemessene Photostrom am Rand bei der Doppel-Mesa um Faktor 2 geringer ist als bei der Einzel-Mesa, was die Effektivität der Doppel-Mesa beweist.

AP 3.2.2.4 Zeitkorrelierte Charakterisierung der Einzelphotonenzählung

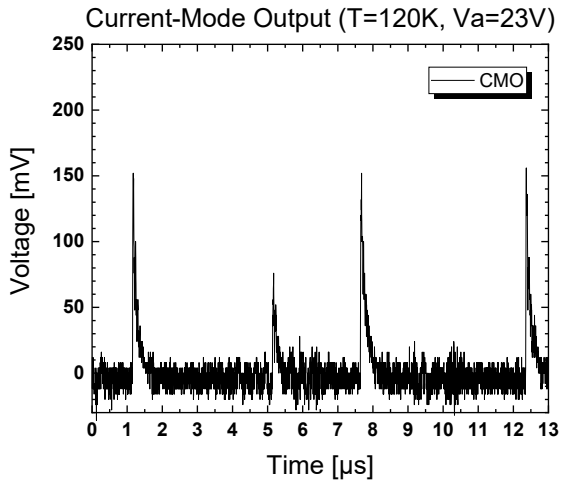

Abb. 16: Geiger-Pulse an einer Ge-on-Si SPAD hergestellt vom IHT. Gemessen wurde dieser in einem Kryostat bei einer Temperatur von 120 K und einer Spannung von -23 V.

Die grundsätzliche Funktionsweise der Bauelemente konnte bereits im Vorfeld des Projektes gezeigt werden. Für die Verwendung als Einzelphotonen Avalanche Dioden müssen die Dioden allerdings im sogenannten Geiger-Modus (GM) betrieben werden, welcher den Spannungsbereich größer der Durchbruchspannung U_{DB} beschreibt. Ge-basierte SPADs besitzen durch den noch nicht weit fortgeschrittene Entwicklung noch hohe Dunkelzählraten (DCR), weshalb das Kühlen der SPADs in einem Kryostat notwendig ist. Dazu wurde am IHT ein geeigneter Messplatz mit einem Kryostat aufgebaut. Dieser besteht aus einem „Closed-Cycle"-Kroystat, einer SMU zur Ansteuerung der Dioden, einem Oszilloskop, welches im Rahmen des Projektes beschafft wurde, und einer Durchführung für die Glasfaser. Mit einem solchen Messplatz ist es nun möglich das GM-Verhalten der SPADs zu zeigen. In Abb. 16 ist das Spannungssignal für eine Temperatur von 120 K dargestellt.

Es zeigt mehrere Geiger-Pulse, welche den sogenannten Dark Counts entsprechen und beweist somit die grundlegende Funktion der Ge-on-Si-SPAD. Für die Anwendung im Projekt sind allerdings kryogene Temperaturen nicht erreichbar. Da eine Verwendung als LiDAR-Sensor in einem autonomen Fahrzeug angestrebt wird, ist eine Erhöhung der Betriebstemperatur notwendig. Dieser Temperaturanstieg hat zur Folge, dass die Anzahl der generierten Ladungsträger ansteigt und somit auch die Anzahl der Dark Counts ansteigt. Dieses Verhalten ist in der Abb. 17 zu erkennen.

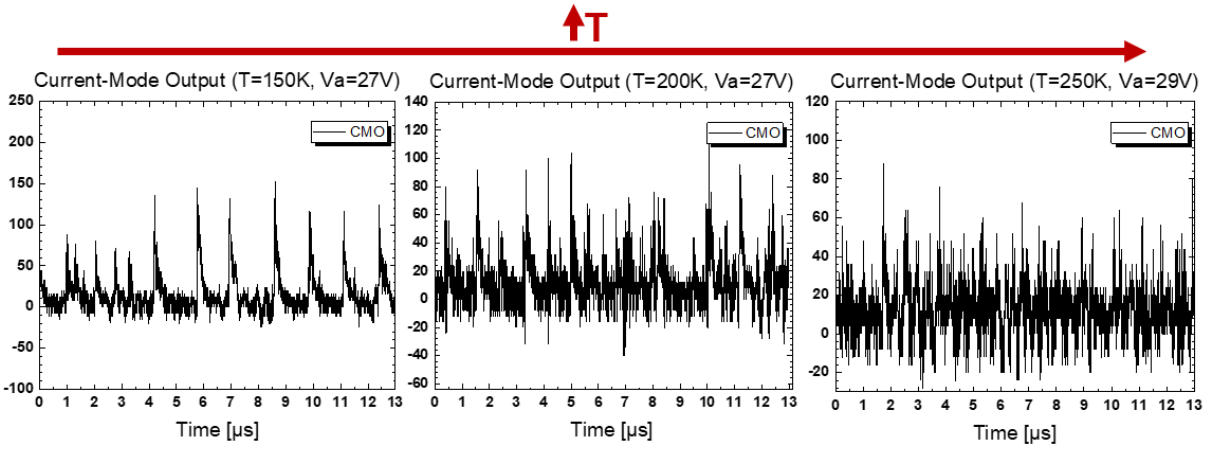

Abb. 17: Geiger-Pulse einer Ge-on-Si SPAD hergestellt vom IHT. Gemessen wurde dieser in einem Kryostat in einem Temperaturbereich von 150 K bis 250 K.

Es ist zu erkennen, wie die Anzahl der Dark Counts stark ansteigt. Zugleich degradiert die Spannungsamplitude des Geiger-Pulses, was das Zählen der Dark Counts zunehmend erschwert. Um den Dunkelstrom und damit auch die Dark Count

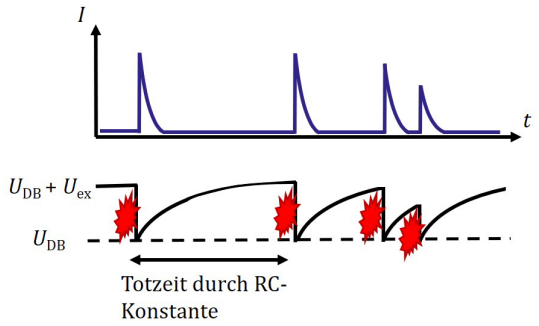

Abb. 18: Schematische Darstellung der Funktionalität einer SPAD Diode. Nach dem Eintritt eines Events wird in der SPAD eine Ladungsträgerlawine ausgelöst, wodurch ein Signal ausgegeben wird.

Rate weiter zu verringern ist es notwendig die Qualität der Mesaoberfläche weiter zu verbessern. Die untere Darstellung in Abb. 18 zeigt diese Funktionalität. Dabei wird die Erhöhung des Arbeitspunktes oberhalb von U_{DB} als Excess-Spannung U_{Ex} bezeichnet. Die SPAD bleibt so lange bei einer Spannung von $U_{DB} + U_{Ex}$ bis ein Event auftritt (rote Wolke), d.h. die Generation eines Elektron-Loch-Pares. Dieses Event kann durch ein Photon ausgelöst werden oder durch andere Generationsvorgänge die zusammengefasst als Dunkelzählrate bezeichnet werden. Dadurch wird in der SPAD eine Ladungsträgerlawine ausgelöst. Es fließt ein signifikanter Strom, so dass die Spannung an der Diode unter U_{DB} abfällt. Dadurch bricht die Ladungsträgerlawine zusammen. Die Totzeit der SPAD wird nur durch das RC-Glied beeinflusst. Um diese zu verringern besteht grundsätzlich die Möglichkeit den Löschwiderstand zu verkleinern.

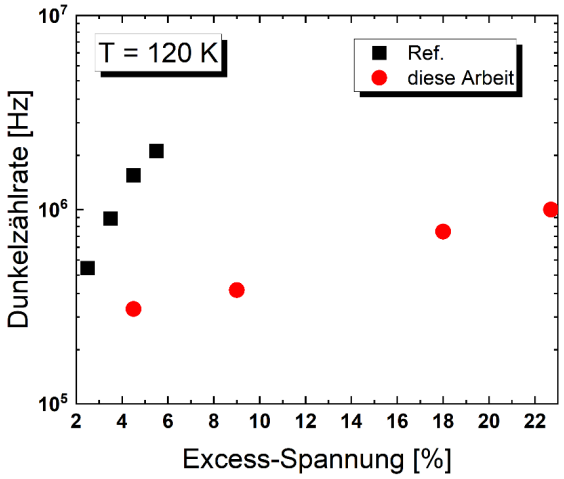

Abb. 19: Dunkelzählrate einer Ge-on-Si SPAD als Funktion der Excess-Spannung bei einer Temperatur von 120 K. Zum Vergleich sind Literaturwerte aus eingetragen.

Entscheidend für die SPAD ist nun die Dunkelzählrate. Wenn diese zu hoch ist, lassen sich mit einer passiven Löschschaltung aufgrund der langen Totzeit keine genaue Messung dieser Events durchführen. Die Abb. 19 zeigt die Dunkelzählrate einer Ge-on-Si SPAD bei einer Temperatur von 120 K. Diese wird immer über der prozentualen Excess-Spannung zur Durchbruchspannung aufgetragen, d.h. bei U_{DB} = 30 V entspricht U_{Ex} (10%) = 3 V. Es zeigt sich ein klares logarithmisches Verhalten. Im Vergleich mit Daten aus der Literatur fällt auf, dass unsere Messwerte weniger stark in Abhängigkeit der Excess-Spannung ansteigen. Dies ist begründet mit der Messmethode über eine passive Schaltung mit einer so langen Totzeit, dass ein weiteres Event auftritt bevor die Spannung an der SPAD auf $U_{DB} + U_{Ex}$ zurückgesetzt ist. Die Lösung dieses Problems ist mit Messung im Gate-Mode möglich.

Die Verwendung der Gated-Mode-Bias ermöglicht eine weitere Reduzierung des Dunkelzähler-Rauschens (DCR), da die Bauelemente nur für kurze Zeiträume in die Avalanche-Betriebsart versetzt werden. Hierzu verwenden wir eine Gleichstromquelle und überlagern sie mit einem gepulsten Spannungssignal von einem Pulsgenerator mittels eines Bias Tee. Die Einschaltdauern des SPAD müssen mit dem optischen Laser-Signal synchronisiert werden, damit der Laser den SPAD während der Einschaltdauer beleuchtet. Die zeitliche Abstimmung der verschiedenen Komponenten ist in Abb. 20 dargestellt.

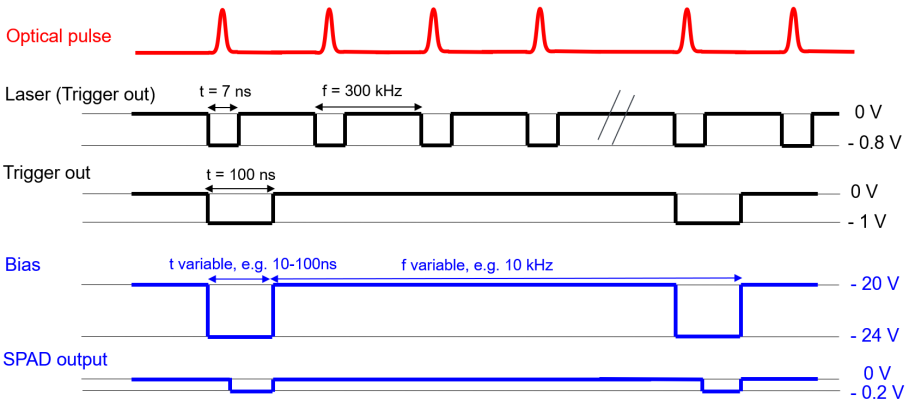

Abb. 20: Zeitliche Übersicht des optischen Pulses, der Eingangsspannung und des SPAD-Ausgangssignals.

Um dies zu erreichen, verwenden wir einen ps-gepulsten Superkontinuum-Laser, mit dem wir die Beleuchtungswellenlängen in Schritten von 1 nm zwischen 670 nm und 2200 nm ändern können, um eine vollständige Charakterisierung der Bauelemente durchzuführen. Der Laserpuls hat eine Leistung von mehreren µW, was mehreren Milliarden Photonen entspricht. Um die Laserleistung genau zu kalibrieren, muss ein geeignetes optisches Leistungsmessgerät verwendet werden, um sie während der Messung zu steuern. Der Teil des Laserpulses, der die Bauelemente beleuchtet, muss mit einem optischen Dämpfer auf das Einzelphotonenniveau abgeschwächt werden. Um die erforderliche Temperaturreduzierung zu erreichen, muss ein Kryostat in den Messaufbau integriert werden. Die Bauelemente werden auf einer Leiterplatte (PCB) im Kryostaten montiert und mit koaxialen Kabeln verbunden. Eine schematische Übersicht des kompletten Messaufbaus ist in Abb. 21 dargestellt.

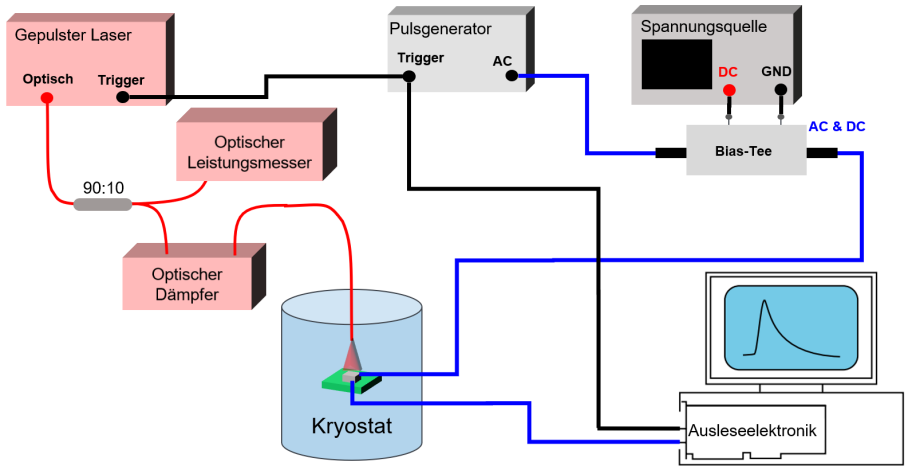

Abb. 21: Messaufbau für eine Gated-Mode Zeitkorrelierte Einzelphotonenzählung von Ge-on-Si-SPADs bei kryogenen Temperaturen.

Die Lawinen-Signale müssen mit einem zeitkorrelierten Zählermodul gesammelt werden, und dann wird das Lawinen-Signal mit einer Genauigkeit im Pikosekundenbereich mithilfe eines integrierten Diskriminators gezählt. Mit diesem Messaufbau können Kennzahlen wie DCR, PDE und Jitter in Abhängigkeit von Temperatur, Bias-Spannung und Beleuchtungswellenlänge gemessen werden.

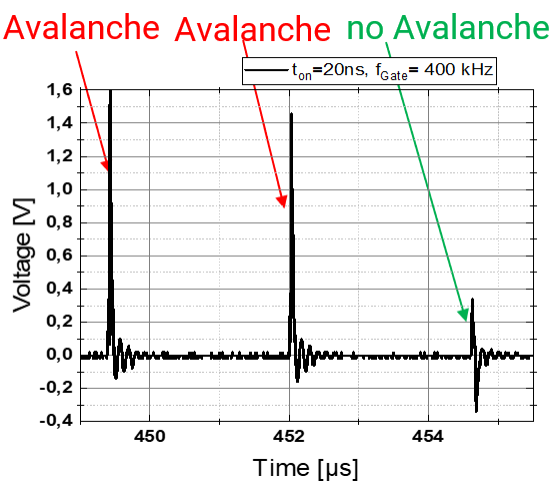

Abb. 22: Das Spannungsausgangssignal eines Ge-on-Si SPAD mit einer Gated-Mode-Messanordnung zeigt zwei Lawinen und ein Gate ohne Lawine.

Die Abb. 22 zeigt Spannungssignale der Ge-on-Si SPAD mit einer Gated-Mode Messung. Das DCR wird gemessen, indem alle Spannungssignale über einen längeren Zeitraum ohne Beleuchtung gezählt werden. Dies wird für verschiedene Bias-Spannungen an mehreren Geräten durchgeführt, und das resultierende DCR vs. Excess-Spannungs-Diagramm wird in Abb. 23 dargestellt. Zu erkennen ist zunächst die Zunahme der Dunkelzählrate mit steigenden Excess-Spannungen, welcher aufgrund erhöhter elektrischer Felder zu erwarten ist. Bei der Variation der Wiederholfrequenz der Gate-Pulse ist zusätzlich einen weiteren Anstieg der Dunkelzählrate für hohe Excess-Spannungen zu erkennen. Dieser Anstieg lässt sich auf das Afterpulsing, das Auslösen eines Avalanches aufgrund gefangener Ladungsträger, erklären. Dieses Afterpulsing ist nicht gewollt und wird in den folgenden Messungen unterdrückt, indem nur kleine Wiederholfrequenzen verwendet wurden.

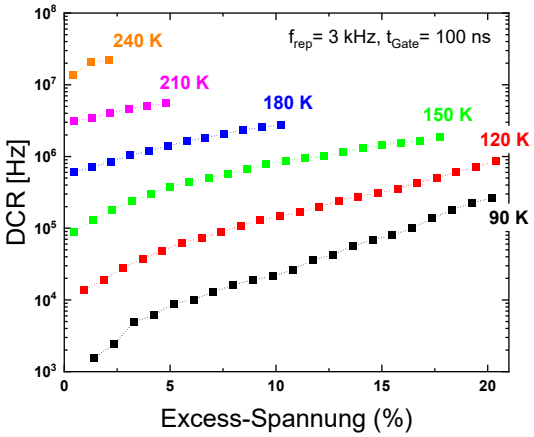

Abb. 23: Dunkelzählrate von Ge-on-Si SPADs in Abhängigkeit der Excess-Spannung bei verschiedenen Temperaturen von 90 K – 240K

Insbesondere für die Anwendung als LiDAR-Sensor im Automobilbereich ist die Erhöhung der Betriebstemperatur bis hin zur Raumtemperatur. Aufgrunddessen wurden im Folgenden die Dunkelzährate in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt, was in Abb. 23 dargestellt ist. Zu erkennen ist eine exponentielle Zunahme der Dunkelzählrate mit steigender Temperatur. Nichtdestotrotz ist aufgrund der sehr guten Funktionalität und dem geringen Rauschen bei 90 K, die Erhöhung der Betriebstemperatur bis auf 240 K möglich. Eine solch hohe Betriebstemperatur kann mit sehr vereinfachten Kühlern, bspw. Peltier-Kühlung, realisiert werden und markiert einen signifikanten Meilenstein für die weitere Anwendung der Ge-on-Si SPAD.

AP 3.2.2.5 Technologietransfer an kommerziellen Chiphersteller

Für die Herstellung eines großflächigen Pixelarrays (PA) wurde ein Prozessfluss für die Ge-on-Si Einzelphotonen-„Avalanche“-Dioden (SPAD) entwickelt. Die ersten beiden Prozessschritte werden durch eine Foundry hergestellt. Danach erfolgen die Prozesse für die Definierung der Justiermarken und der Gebiete für die Dotierbereiche des vergrabenen Kontaktes mit der anschließenden Ionenimplantation und Ausheilung. Dabei muss eine Borkonzentration von $5 \cdot 10^{19}$ cm^{-3} eingebracht werden. Der dotierte Bereich soll sich dabei von der Oberfläche bis in eine Tiefe von 500 nm

erstrecken. Danach werden die Wafer an das IHT geliefert. Am IHT wird zuerst das thermische Oxid kurz vor dem eigentlichen Epitaxieprozess entfernt. Danach starte das Wachstum mit einer 500 nm dicken Si Schicht, gefolgt von einer 100 nm dicken p-dotierten Si Schicht. Darauf wird das Absorptionsgebiet von 300 nm Ge gewachsen. Jedoch ist die Gitterkonstante von Ge gegenüber dem Si um 4,2 % größer. Dadurch beginnt die Schicht bereits nach der Abscheidung einiger Monolagen zu relaxieren. Dies geschieht durch das Einfügen eines Versetzungsnetzwerkes am Interface zwischen Ge und Si. Zusätzlich bilden sich auch Durchstoßversetzungen, die auf den (111) Ebenen liegen. In gewöhnlichen vertikalen pin-Strukturen bilden diese Durchstoßversetzungen kleine leitfähige Kanäle. Dadurch können sperrende pn-Übergänge kurzgeschlossen werden. Bei dieser sogenannten „Seperate Absorption, Charge and Multiplication“ Struktur ist dies nicht der Fall, da der sperrende pn-Übergang in der internen Si-Diode liegt, in welcher keine Durchstoßversetzungen liegen. Der obere Kontakt ist als B-dotierter Ge/Si Heterokontakt ausgeführt. Dieser besteht aus einer 100 nm dicken Ge-Schicht mit einer Dotierkonzentration von $5 \cdot 10^{19}$ cm^{-3} und einer 100 nm Si-Schicht mit einer Dotierkonzentration von $1 \cdot 10^{20}$ cm^{-3}. Nach der Epitaxie) erfolgen die restlichen Schritte wieder in der Foundry.

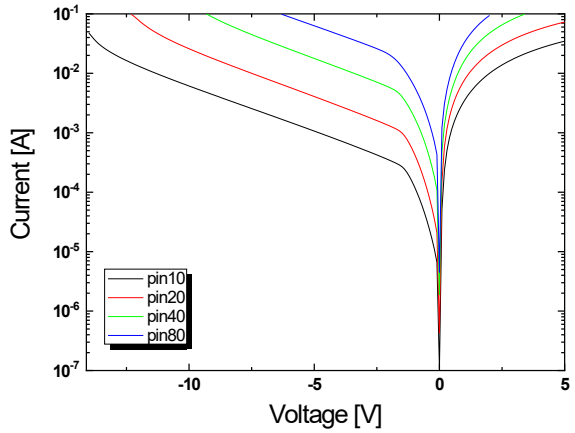

Abb. 24: Strom-Spannungskennlinien von Ge-on-Si SPADs zeigen Kurzschlüsse, hergestellt an einer Foundry.

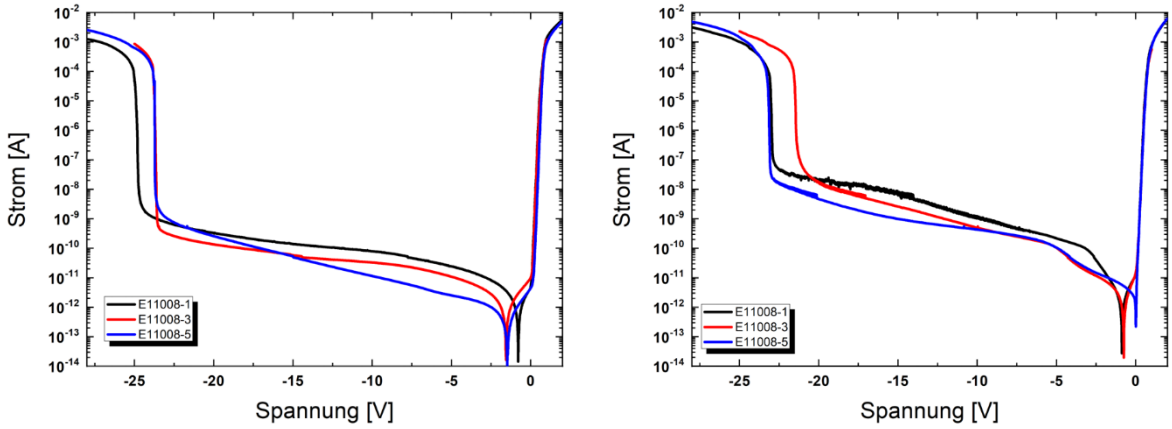

Abb. 25: Strom-Spannungscharakteristik aller 3 gelieferten Wafer für die Ge SPADs mit dem Radius von 2 µm (links) und 4 µm (rechts).

Am IHT wurde in enger Absprache mit allen Projektpartnern aus dem Prozessfluss in ein Maskendesign für die Herstellung von PA erstellt. Der Chip besitz eine Größe von 9 x 9 mm^2. Es befinden sich verschiedene Teststrukturen, wie z.B. TLM (engl. für Transmission Line Methode) Strukturen für die Prozessanalyse auf dem Chip. Neben Einzelpixeln sind auch verschiedene zweidimensionale PA auf dem Design. Für die Herstellung eines großflächigen Pixelarrays (PA) wurde ein angepasster Prozessfluss an einer Foundry (IMS Chips) durchgeführt. Im ersten Run zeigten die Ge-on-Si-SPADs ein Strom-Spannungsverhalten, dass einem Kurzschluss ähnelt. Die vermessenen Kennlinien sind in Abb. 24 dargestellt. Nach Foundry-interner

Fehlersuche ist davon auszugehen, dass die Oxidätzung fehlgeschlagen ist. Dabei ist es zu einer erhöhten Ätzung des Oxids seitlich von der Mesa gekommen, welche im Anschluss der Metallabscheidung zu Kurzschlüssen führte. Eine Entfernung der Metall- und Oxidschichten zur Reprozessierung gestaltet sich als schwierig.

Nach der Fertigstellung des 2. kompletten Prozessruns durch den kommerziellen Chipherstellers wurde am IHT eine intensive elektrische Charakterisierung des Dunkelstromverhaltens durchgeführt. Die Kennlinien für die Ge SPADs mit den Radien von 2 µm zeigt die linke Darstellung in Abb. 25 und für die mit 4 µm die rechte Darstellung. Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass sehr geringe Dunkelströme im Bereich kleiner als 1 nA im Durchbruch erreicht werden konnten. Dies ist eine hervorragende Ausgangsposition für den Betrieb der Ge SPADs im Geiger-Modus.

AP 3.2.2.6 Demonstrator 5 x 5 „Ge-on-Si" SPAD Array

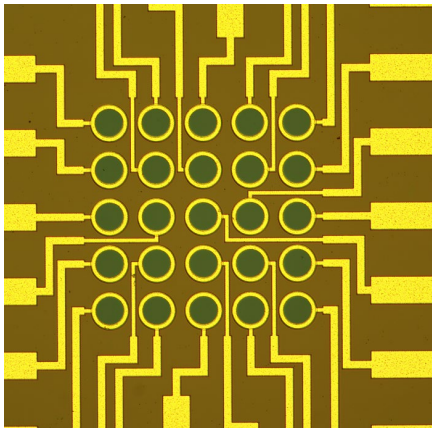

Abb. 26: Mikroskop-Aufnahme eines 5x5 Ge-on-Si SPAD Array mit einem Diodendurchmesser von 80 µm.

Ein 5x5 SPAD-Array wurde entworfen, hergestellt und charakterisiert unter Verwendung einzelner Ge-auf-Si SPADs. Abb. 26 zeigt ein mikroskopisches Bild des fertigen SPAD-Arrays, das aus 25 Pixeln mit einem Pixelabstand von 100 µm und einer Pixelgröße von 80 µm besteht. Für den anfänglichen Funktionsprüfungstest des Arrays werden die elektrischen Verbindungen über Bondpads nach außen geführt. Die Abb. 27 zeigt die elektrische Gleichstrom-Charakterisierung des Ge-auf-Si SPAD-Arrays. Der linke Graph zeigt die Dunkelströme in Abhängigkeit von der angelegten Spannung bei Raumtemperatur für alle 25 Pixel. Der rechte Graph zeigt die statistische Variation des Dunkelstroms bei hoher Rückwärtsspannung. Die Pixel weisen niedrige Dunkelstromwerte mit sehr geringen pixelübergreifenden Variationen auf.

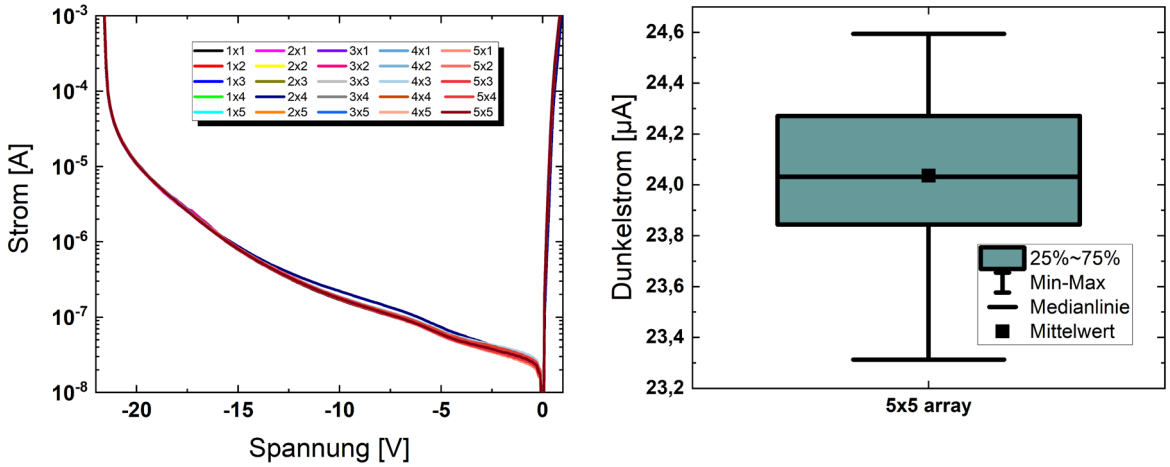

Abb. 27: Dunkelstrom-Spannungscharakteristik von 25 Ge-on-Si SPADs im 5x5-Array (links), statistische Variation des Dunkelstroms bei einer Spannung von 95% U_{DB} (rechts).

Die Charakteristiken der Ge-on-Si SPADs im 5x5-Array sind sehr stabil, was für den Aufbau eines großen Pixel-Arrays erforderlich ist. Dies liegt daran, dass alle Pixel

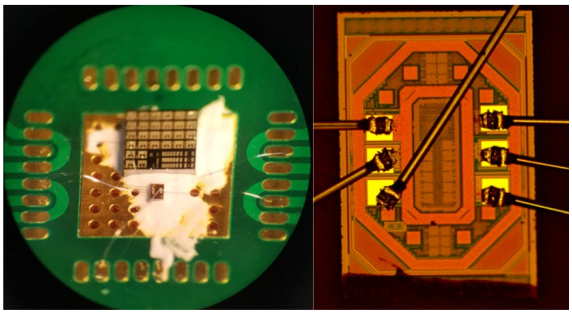

Abb. 28: Mikroskop-Aufnahme eines Einzelpixel-Prototyps, montiert auf einer Leiterplatte, bestehend aus einem Ge-auf-Si SPAD, das mit der Löschschaltung verbunden ist (links), und eine vergrößerte Darstellung der Löschschaltung mit den entsprechenden Drahtbond-Verbindungen (rechts).

gleichartig vorgespannt sind und Abweichungen in der Durchbruchspannung oder im Rauschen die Empfindlichkeit des Detektors stark beeinflussen können. Die Durchbruchspannung beträgt U_{DB} = -21,58 V und variiert nur geringfügig (+/- 0,07%), und der Dunkelstrom bei 95% U_{DB} variiert zwischen 23,4 µA und 24,6 µA mit einem durchschnittlichen Dunkelstrom von etwa 24 µA. Wie oben beschrieben, ist eine spezielle Löschschaltung erforderlich, um die Ge-on-Si SPADs im Geiger-Modus zu betreiben, die von ams-Osram entwickelt wurde. Für den ersten Demonstrator wurden die SPADs und die Löschschaltung über Drahtbond-Verbindungen miteinander verbunden. Die linke Abbildung in Abb. 28 zeigt ein Mikroskopbild des Einzelpixel-Prototyps, der auf einer Leiterplatte montiert ist und aus einem Ge-on-Si SPAD und der Löschschaltung besteht. Ein vergrößertes Bild der Löschschaltung mit den entsprechenden Drahtbond-Verbindungen ist auf der rechten Seite von Abb. 28 zu sehen.

AP 3.2.2.7 Aufbau eines ¼ VGA SPAD Arrays

Die technologische Realisierbarkeit eines ¼ VGA SPAD Arrays würde sich im Rahmen des Projektes prinzipiell umsetzen lassen. Jedoch wird für die gesamte Kamera noch die Elektronik-Seite benötigt. Diese muss neben der Auslesung der einzelnen Pixel auch eine weitere Verarbeitung beinhalten, damit die riesigen Datenmengen verarbeitet werden können. Hierzu hätte die Firma Ibeo die entsprechenden Architekturen liefern sollen, damit diese durch ams-Osram umgesetzt werden kann. Das darauffolgende Flip-Chip-Bonden wurde bereits zwischen den Projektpartnern und der Firma Andanta technisch diskutiert und als realisierbar eingeschätzt.

AP 3.2.2.8 Waferbumping und Assembly

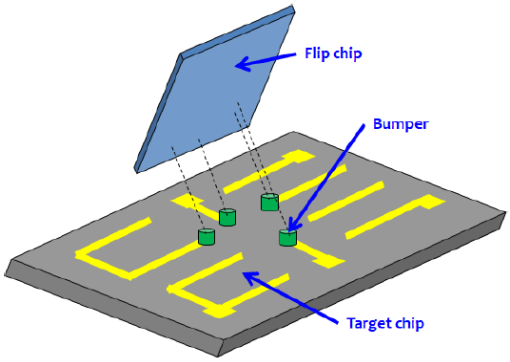

Abb. 29: Schematische Zeichnung einer Flip-Chip-Verbindung von Ge-on-Si SPAD Array mit Rückseitenbeleuchtung und einem CMOS ROIC (©Andanta).

Die Kombination von Komponenten aus verschiedenen Technologie-knoten ermöglicht beispielsweise die Herstellung von Sensorgeräten mit deutlich überlegenen Empfindlich-keiten zu wettbewerbsfähigen Kosten. Dies wird in der Regel durch Nutzung von Material- und Technologievorteilen für spezifische Geräte auf Paketebene erreicht. Es ist zum Beispiel möglich, infrarotsensitive Ge-on-Si- oder sogar InGaAs-Sensoren mit Si-basierten CMOS-ICs zu kombinieren. Das Stapeln der Komponenten in heterogenen

Integrationsverfahren eliminiert oder reduziert weitgehend diese parasitären Effekte. Darüber hinaus ermöglicht es auch eine Verkleinerung der Grundfläche des endgültigen Geräts (siehe Abb. 29), was ein treibender Faktor für viele Anwendungen ist. Um nahtlose heterogene 3D-Integrationsversuche zu ermöglichen, wurden mit zwei externen Fertigungspartnern, IMS Chips und Andanta, alle Prozessschritte abgesprochen. Wichtig für eine erfolgreiche 3D-Bonding ist auch das Management der hohen Topografie des SPAD-IC. Das Design der Ge-on-Si-SPADs führt zu einem Höhenunterschied von etwa 2,2 µm zwischen der Anoden- und Kathodenmetallisierung. Für eine erfolgreiche Hybridintegration muss der Höhenunterschied jedoch auf weniger als 0,6 µm reduziert werden. Dies erfordert einen maßgeschneiderten Metallisierungsprozess für das Ge-on-Si-SPAD-Array.

AP 3.2.2.9 Analyse und Evaluation des Sensorsystems

Das Ergebnis der Flip-Chip Montage zeigt die Abb. 33. Hier sehen wir den kleinen Photonik-Chip kopfüber angeschlossen auf der Auswerteelektronik. In der rechten Darstellung von Abb. 33 sind noch die benötigten elektrischen Anschlüsse durch Bonddrähte zu sehen.

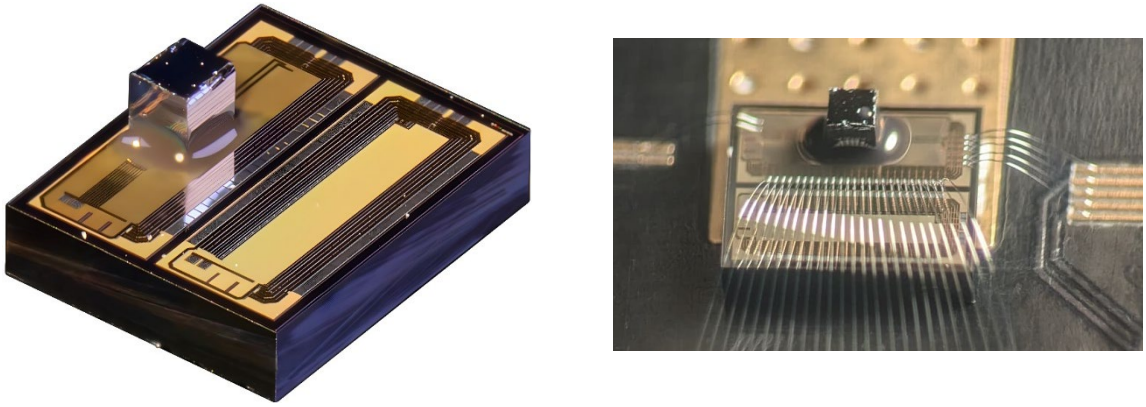

Abb. 30: Flip-Chip-Montage eines Ge-on-Si SPAD-Arrays mit einer dedizierten CMOS-Löschschaltung für einen LiDAR-Demonstrator mit Rückseitenbeleuchtung (links) und die entsprechenden elektrischen Verbindungen (rechts).

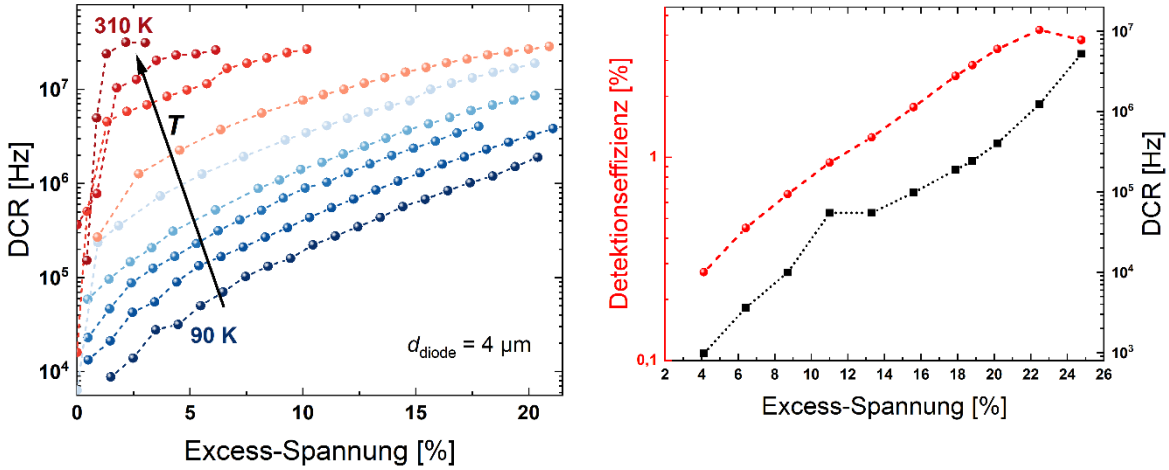

Abb. 31: Dunkelzählrate von Ge-on-Si SPADs in Abhängigkeit der Excess-Spannung bei verschiedenen Temperaturen von 90 K – 310K (links). Detektionseffizienz einer Ge-on-Si SPAD bei einer Wellenlänge von 1310 nm und einer Temperatur von 90 K (rechts).

An den Einzelbauelementen wurde eine vollumfängliche elektrooptische Analyse durchgeführt. Die Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt die Abb. 31. Wir konnten

diese neuen Ge-on-Si SPADs bis zu Temperaturen von 310 K betreiben, was bisher noch nicht in der Literatur gezeigt wurde. Ein weiterer wichtiger Parameter der SPAD ist die Detektionseffizienz. Die Ergebnisse dazu zeigt die rechte Darstellung in Abb. 29. Es konnte Eine Detektionseffizienz von 4,2% bestimmt werden.

AP 6.1 – Verbreitung

Die Verbreitung der Projektarbeit erfolgt zum Einen durch die Homepage des IHT's (https://www.iht.uni-stuttgart.de/forschung/drittmittelprojekte/) und zum anderen durch das Abschließen studentischer Arbeiten. Dazu sind im Berichtszeitraum folgende studentische Arbeiten abgeschlossen worden:

- Forschungsarbeit zur „Development of a circuit for characterization of Ge-based Single-Photon Avalanche Diodes" von Qi Shen, 2021
- Bachelorarbeit zur „Herstellung und Charakterisierung von Einzelphotonen-„Avalanche"-Dioden für LiDAR-Sensoren" von Harish Ramachandra, 2021
- Bachelorarbeit zur „Herstellung und Charakterisierung von GeSn-basierten „Avalanche"-Photodioden" von Christian Spieth, 2022
- Forschungsarbeit zur „Entwicklung von GeSn-basierten Avalanche-Photodiode für die Anwendung im Geiger-Modus" von Harish Ramachandra, 2024
- Forschungsarbeit zur "Process Optimization of Passivation Materials for Si-based valanche Photodiodes" von Sadab Bin Islam, 2024
- Bachelorarbeit zur "Verringerung des Dunkelstromes an den Oberflächen von Ge-basierten Avalanche Photodioden" von Sebastian Wingert, 2024
- Masterarbeit zur "Entwicklung von GeSn-basierten Avalanche-Photodioden für die Anwendung im Geiger-Modus" von Harish Ramachandra, 2025

Zusätzlich dazu wurden die erreichten Ergebnisse auf diversen internationalen Konferenzen vorgestellt und in Fachzeitschriften veröffentlicht:

Konferenzbeiträge:

- M. Wanitzek et al. „GeSn-on-Si Avalanche Photodiodes for Short-Wave Infrared Detection" ESSCIRC 2022- IEEE 48th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC), Milan, Italy, 2022.
- M. Wanitzek et al. "Bandwidth enhancement in GeSn-on-Si avalanche photodiodes with a 60 GHz gain-bandwidth-product" 2024 IEEE Silicon Photonics Conference (SiPhotonics), Tokyo, Japan, 2024.
- M. Wanitzek et al. " Reduction of dark current in Ge-on-Si avalanche photodiodes using a double me-sa structure" SPIE Optics+Photonics, San Diego, USA, 2024.

Veröffentlichungen:

- M. Wanitzek, et al., "GeSn-on-Si Avalanche Photodiodes for Short-Wave Infrared Detection," ESSCIRC 2022- IEEE 48th European Solid State Circuits Conference, Italy, 169-172, 2022, doi: 10.1109/ESSCIRC55480.2022.9911363.
- M. Wanitzek, et al., "Low-temperature performance of GeSn-on-Si avalanche photodiodes toward single-photon detection," Materials Science in Semi-conductor Processing, 176, 108303, 2024, doi: 10.1016/j.mssp.2024.108303.
- M. Oehme, et al., "Group-IV based pin photodetectors for C-band application", J. Vac. Sci. Technol. B 42, 033202, 2024, https://doi.org/10.1116/6.0003556
- M. Wanitzek, et al., "Bandwidth enhancement in GeSn-on-Si avalanche photodiodes with a 60 GHz gain-bandwidth-product," 2024 IEEE Silicon Photonics Conference (SiPhotonics), Tokyo Bay, Japan, pp. 1-2, 2024, doi: 10.1109/SiPhotonics60897.2024.10543351.

- M. Wanitzek, et al., " Reduction of dark current in Ge-on-Si avalanche photodiodes using a double me-sa structure, " Proc. SPIE 13109, 1310907, San Diego, USA, 2024, doi: 10.1117/12.3028061.
- M. Wanitzek, et al., "Ge-on-Si single-photon avalanche diode using a double mesa structure, " Optics Letters, vol. 47, no. 22, pp. 6345-6348, 2024, doi: 10.1364/OL.534436

Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Position	Positionsbezeichnung	Ausgaben
0812	Beschäftigte E13	220.092,13 €
0835	Vergabe von Aufträgen	106.972,65 €
0843	Sonst allg. Verw.-ausgaben	104.105,74 €
0846	Dienstreisen	3720,14 €
0850	Gegenstände über 410 €	33577,29 €
	Entstandene Ausgaben insgesamt	**468.467,95 €**

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren sowohl notwendig als auch angemessen, um die gesteckten wissenschaftlich-technischen Ziele zu erreichen. Die Entwicklung der rauscharmen, bei Raumtemperatur betriebenen Ge-SPAD-Bauelemente erforderte ein hohes Maß an technologischem Know-how sowie umfangreiche Prozessoptimierungen in der Mikro- und Nanofabrikation. Nur durch die systematische Kombination aus Materialentwicklung, Prozessintegration und umfassender elektrischer und optischer Charakterisierung konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Detektoren die hohen Anforderungen hinsichtlich Dunkelzählrate, Nachweiswahrscheinlichkeit und Zeitauflösung erfüllen.

Darüber hinaus war die enge Zusammenarbeit mit Industrie- und Forschungspartnern unabdingbar, um die Prozesskompatibilität mit gängiger CMOS-Fertigung sicherzustellen und die Relevanz der Arbeiten für potenzielle Anwendungen in LiDAR, Telekommunikation und Quantenoptik zu validieren. Die gewählte Methodik und der Umfang der Arbeiten standen damit in einem angemessenen Verhältnis zu der Komplexität der technologischen Herausforderungen und der angestrebten Innovationshöhe.

Zusätzlich konnte Herr Maurice Wanitzek seine Dissertation „GeSn-basierte Avalanche-Photodioden für die Einzel-Photonendetektion“ am 25.04.2025 offiziell bei der Universität Stuttgart einreichen. Herr Wanitzek’s Forschung wurde durch dieses Projekt gefördert.

voraussichtliche Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses

Das IHT und der der Projektpartner asm Osram haben im Rahmen des AI-SEE Projektes auf der Basis einer „Ge-on-Si“- Technologie ein 5x5 „Ge-on-Si“ SPAD Array mit der zugehörigen Ausleseelektronik erfolgreich entwickelt. In diesem Sensor wandeln heteroepitaktisch integrierte Ge-on-Si SPADs einzeln einfallende Photonen pixelweise in Elektron-Loch-Paare um, verstärken diese, sodass diese als Photostrom detektiert werden können. Zusammen mit einem kommerziellen Chiphersteller wurde der Photonik-Chip gefertigt. Dabei wurden die ersten Prozessschritte beim Chiphersteller durchgeführt. Anschließend erfolgte ein Transfer dieser Wafer an das

IHT. Hier wurde die photoaktive- und die Verstärkerstruktur mit Hilfe des Verfahrens der Molekularstrahlepitaxie auf den Substraten hergestellt. Die fertige Prozessierung erfolgte nach einem erneuten Transfer beim Chiphersteller. Im Rahmen des AI-SEE Projektes konnte gezeigt werden, dass unter Einhaltung spezieller Voraussetzung ein Austausch von Wafern in den verschiedenen Reinräumen erfolgreich möglich ist.

Der Photonik-Chip und die vom Projektpartner asm-Osram entwickelte und hergestellte Auswerteelektronik-Chip wurden in einem neu entwickelten Flip-Chip Bondprozess erfolgreich durch einen Unterauftragnehmer miteinander verbunden. Dies bietet nun die Möglichkeit der weiteren Skalierung zu Arrays mit größerer Pixelanzahl, wobei hier primär die Auswerteschaltung entsprechend entworfen werden muss. Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse planen wir, die Arbeiten konsequent in die industrielle Anwendung zu überführen und die Weiterentwicklung der Technologie strategisch voranzutreiben. Dafür ist die Gründung eines Spin-offs mit dem Namen **Germanium Quantum Detectors** vorgesehen, das sich auf die Kommerzialisierung der Ge-SPAD-Technologie konzentriert. Ziel ist es, die einzigartigen Eigenschaften unserer bei Raumtemperatur betriebenen Einzelphotonendetektoren – insbesondere ihre hohe Empfindlichkeit, geringen Dunkelzählraten und CMOS-Kompatibilität – zu nutzen, um marktreife Produkte für Anwendungen in der LiDAR-Sensorik, der Telekommunikation und der Quantenoptik zu entwickeln.

Parallel zur Unternehmensgründung streben wir die Initiierung mehrerer Nachfolgeprojekte mit unseren bisherigen Projektpartnern aus der Industrie und der Wissenschaft an. Diese Projekte sollen dazu beitragen, die Leistungsfähigkeit der Bauelemente weiter zu steigern, ihre Fertigung zu skalieren und neue Einsatzgebiete zu erschließen. Durch die enge Kooperation mit unseren Partnern wollen wir sowohl die technologischen Grundlagen als auch die Marktposition nachhaltig stärken. Damit gewährleisten wir eine erfolgreiche Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis und leisten einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung der nächsten Generation photonischer Sensoren.

Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die taiwanesische Forschungsgruppe um Na et al. (DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-024-07076-x) hat 2024 entscheidende Fortschritte bei der Entwicklung eines CMOS-kompatiblen GeSi-SPAD erzielt, der bei Raumtemperatur betrieben werden kann. Bisher scheiterten derartige Detektoren an zu hohen Dunkelzählraten (DCR) und der damit notwendigen kryogenen Kühlung. Die Gruppe demonstriert nun erstmals einen 15-µm-Detektor, der bei der für LiDAR relevanten Wellenlänge von 1310 nm sowohl sehr rauscharme Eigenschaften als auch eine hohe Empfindlichkeit bietet. Sie erreichten DCR von nur 19 kHz µm^{-2}, eine Effizienz von bis zu 24 %, einen sehr niedrigen Jitter von rund 115 ps sowie Nachpuls-Wahrscheinlichkeiten unter 2 %. Diese Leistung konnte durch eine spezielle implantierte Dotierung innerhalb des Si erzielt werden, dass die empfindlichen Ge-Seitenwände vor elektrischen Feldern abschirmt. Zudem wurde der gesamte Prozess mit standardmäßigen CMOS-Verfahren umgesetzt, was die Herstellung kostengünstig und skalierbar macht. Die Praxistauglichkeit belegten die Forschenden anhand der Aufnahme hochaufgelöster 3D-Punktwolkenbilder bei Raumtemperatur im direkten Time-of-Flight-Betrieb. Ihre Ergebnisse zeigen, dass GeSi-SPADs künftig LiDAR-Sensorik und andere SWIR-Anwendungen eine attraktive Alternative zu InGaAs-Detektoren darstellen und sich gut in bestehende CMOS-Sensorplattformen integrieren lassen.