

# Nanostrukturierte Dünnschicht-Schottky-Fotodioden für SWIR-Fotodetektoren

Leonor Shala<sup>1,2</sup>, Jens Knobbe<sup>1</sup>, Lion Augel<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup>Fraunhofer IPMS (Institutsteil ISS), Cottbus, DE

<sup>2</sup>Lehrstuhl für Mikro- und Nanosysteme, Brandenburgische Technische Universität, Cottbus, DE  
leonor.shala@ipms.fraunhofer.de

## Kurzfassung

Silizium-basierte Schottky Fotodioden liefern einen Schnittpunkt zwischen Fotodetektion im SWIR-Bereich und einer CMOS-Kompatibilität, welche sie zu einem Bauelement von aktuellem Interesse macht. Mittels Verwendung einer Dünnschicht im Bereich von 10 – 20 nm als Schottky-Metall sowie einer pyramidalen Nanostrukturierung des Substrates können in vielversprechender Weise die interne sowie externe Quanteneffizienz verbessert werden. Ob man das Sputtern oder die pCVD als Abscheidemethode zum Aufbringen des Schottky-Metalls auf das Substrat wählt, hat einen Einfluss auf die Qualität der Schottky-Barriere. Der Einfluss der Abscheidemethode, der Schichtdicke des Schottky-Metalls sowie der Strukturierung des Substrats auf die Schottky-Barrierequalität wird mittels temperaturabhängiger Strom-Spannungsmessungen analysiert.

## Abstract

Silicon based Schottky Photodiodes offer detection in the SWIR range as well as a CMOS compatibility. Through introduction of a thin film in the range of 10 – 20 nm as Schottky-metal, as well as a pyramidal nanostructuring of the substrate, one can improve the quantum efficiency of the device in a promising manner. The choice of either sputtering or pCVD as deposition method for the Schottky-metal has a direct influence on the quality of the Schottky-barrier. In this work, the change of barrier quality through differing film thickness, deposition method and substrate structuring is examined through temperature dependent I-V measurements.

## 1 Motivation

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich der „komplementäre Metall-Oxid-Halbleiter“ (engl. CMOS) Prozess als Standard-Technologie im Bauelement-Design etabliert. Dies geht so weit, dass in der Halbleiter-Industrie die CMOS-Kompatibilität von neuartigen Technologien von entscheidender Bedeutung über den Fortschritt bzw. die weitere Verwendung einer solchen Technologie ist. Dazu kommt getreu „Moore’s Law“ die stetige Miniaturisierung der Bauelement-Strukturen, wodurch die Verwendung unter anderem von Dünnschichten im Bereich weniger Nanometer favorisiert wird. Die in diesem Bericht behandelten Dünnschicht-Schottky-Fotodioden folgen diesen zwei Schlüsselkompetenzen. Zum einen gelingt die CMOS-Kompatibilität dadurch, dass direkt auf Silizium als Substrat strukturiert und beschichtet wird. Zum anderen wird auf das Si-Substrat ein Dünnschicht-Metall als Schottky-Kontakt abgeschieden.

### 1.1 Si- und Schottky-basierte SWIR-Sensorik

Neben der CMOS-Kompatibilität ist Silizium als Substratmaterial ebenfalls aufgrund der Transparenz zu Licht mit Wellenlängen  $< 1,2 \mu\text{m}$  vom Vorteil. Denn die „Kurz-Wellenlängen Infrarot“ (engl. SWIR) Sensorik befasst sich mit dem Wellenlängenbereich  $1,4 - 3 \mu\text{m}$ . Somit kann ein

rückseitenbeleuchtetes System in Betracht gezogen werden, in welchem das Licht durch das Si-Substrat hindurch zum aktiven Bereich (hier dem Schottky-Kontakt) gelangt. Der Schottky-Kontakt wird durch das Abscheiden von Titan-Nitrid (TiN), welches aufgrund seiner vergleichsweise niedrigen Zustandsdichte nahe dem Fermiviveau favorisiert wird [1], als Dünnschicht auf der Si-Oberfläche geformt. Durch das Substrat hindurch gelangt das Licht zur Metallschicht, wo es mit seiner Energie einen Ladungsträger anregt. Dieser angeregte Ladungsträger (engl. „hot carrier“) kann nun über den Schottky-Übergang vom Metall in den Halbleiter emittieren, sofern seine Energie mindestens die der Barrierenhöhe ist, welche sich zwischen dem Metall und dem Halbleiter gebildet hat. Emittierte Ladungsträger können final als elektrisches Signal abgegriffen und verarbeitet werden.

### 1.2 Dünnschicht-Metallisierung

Die Güte eines Fotodetektors wird zu einem wesentlichen Teil durch seine interne Quanteneffizienz (IQE) bestimmt. Hierbei handelt es sich im Fall eines Schottky-Detektors um das Verhältnis der Anzahl erfolgreich über den Schottky-Kontakt emittierter Ladungsträger zu der Anzahl an Photonen einer bestimmten Energie, welche vom Detektorsystem (hier dem Schottky-Metall) absorbiert wurden und einen „hot carrier“ erzeugt haben. Findet demnach jeder durch eingehende Photonen erzeugte „hot carrier“ mittels Schottky-Emission den Weg in den Halbleiter, liegt die IQE folglich bei 1.

Ein „hot carrier“ kann neben der Schottky-Emission auch thermisch oder mittels Elektron-Phonon-Streuung emittieren. Die hierbei freigewordene Energie trägt nicht zur Schottky-Interaktion bei und verringert folglich die IQE. Das statistische Auftreten dieser Effekte wird u.a. durch die mittlere freie Weglänge eines Ladungsträgers beschrieben. Ist das Verhältnis der mittleren freien Weglänge zur Schichtdicke des Metalls aufgrund einer hohen Schichtdicke gering, so ist die Schottky-Emissionswahrscheinlichkeit ebenfalls gering, da der „hot carrier“ vor einer Schottky-Emission wahrscheinlich anderweitig (thermisch, phononisch) emittiert. Um die Schottky-Emissionswahrscheinlichkeit (und damit auch die IQE) zu erhöhen, kann man daher die Schichtdicke des Metalls reduzieren. [2]

### 1.3 Pyramidale Nanostrukturierung

Neben der IQE ist in Anbetracht des Gesamt-Bauelements auch die externe Quanteneffizienz (EQE) relevant. Diese beschreibt das Anzahlverhältnis Schottky-emittierter Ladungsträger zu allen eingehenden Photonen. Werden keine eingehenden Photonen durch das Bauelement reflektiert oder transmittiert, sondern alle Photonen absorbiert („hot carrier“-Erzeugung), so entspricht die EQE der IQE. Eine verringerte Reflektion und Transmission aus dem Bauelement heraus erhöht somit die EQE.

Um Reflektionen an der Schottky-Zwischenfläche aus dem System heraus zu minimieren, werden in das Si-Substrat vor der Metallabscheidung sog. „Pyramidenstrukturen“ geätzt, wie in Bild 1 zu sehen ist. Diese Strukturierung sorgt im Vergleich zu einer planaren Substratoberfläche dafür, dass eingehende Photonen zwar weiterhin an der Zwischenfläche reflektiert werden, diese reflektierten Photonen aber durch die „Einbuchtung“ weiterhin mittels Mehrfachreflektion die Möglichkeit haben, absorbiert zu werden. Zudem begünstigt die nun nanostrukturierte Metallschicht bei eingehenden Photonen Effekte wie die „Oberflächenplasmonenresonanz“ (engl. SPR), welche die verstärkte Absorption von Photonen bestimmter Frequenz durch im Nanometerbereich beschränkte freie Elektronen mit passender Schwingungsfrequenz beschreibt. [3]

Semi-transparente Oxidschichten auf der Rückseite des Substrats sowie auf dem Schottky-Metall minimieren zusätzlich Reflektionen und Transmissionen aus dem System heraus.

## 2 Methodik

Die Herstellung der Fotodioden erfolgt in Vielzahl auf 200-mm-Wafern im Reinraum des Fraunhofer IPMS in Dresden, welcher auf industriellem Fabrikationsstandard operiert. Die nachgehende Charakterisierung der Fotodioden erfolgt im Wesentlichen am Institutsteil ISS des Fraunhofer IPMS, welches in Cottbus ansässig ist.

### 2.1 Herstellung

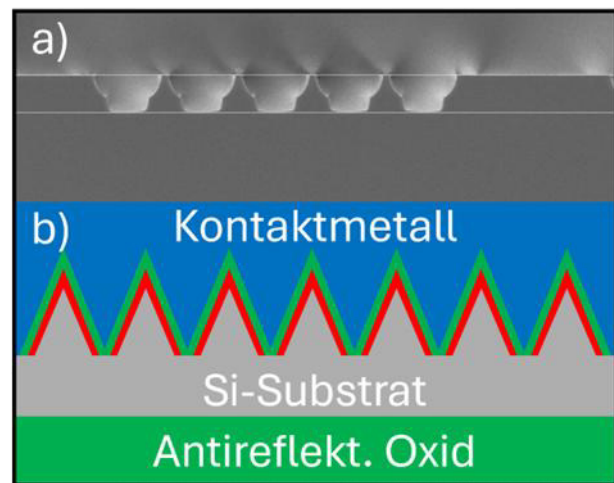
Die wesentlichen Vorgänge in der Fabrikation sind die Ätzung der Pyramidenstrukturen sowie die Abscheidung des Schottky-Dünnschichtmetalls.

Bei der Strukturätzung werden mittels reaktivem Ionenätzen (engl. RIE) in zwei Stufen isotrop Wölbungen in das Si-Substrat geätzt, woraus sich dann eine Pyramidenform ergibt. Diese haben einen Abstand (Spitze zu Spitze) von 400 – 800 nm und eine Breite (Pyramidenboden) von 1000 – 1500 nm.

### 2.2 Abscheidung

Die Abscheidung des Schottky-Metalls erfolgt entweder durch Sputtern (Niederschlag des zuvor zerstäubten Metalls auf Substrat) oder durch eine gepulste chemische Gasphasenabscheidung (engl. pCVD; Abwechselnde „Eintrittspulse“ eines Präkursors und eines Ko-Reaktanten sowie Reaktion zum gewünschten Schichtmaterial auf dem Substrat). Während das Sputtern grundsätzlich mit weniger Prozessaufwand verknüpft ist und auf planaren Substraten hochqualitative Schichten erzeugt, hat pCVD den Vorteil, dass es auch auf strukturierten Substraten homogene und konforme Schichten erzeugt [4].

Im Sputterprozess werden sowohl TiN-Schichten als auch TiN/AlSiTi-Schichten als Schottky-Metallschicht abgeschieden. Im pCVD-Prozess wird lediglich TiN abgeschieden.



**Bild 1** a: Querschnittsaufnahme der pyramidalen Strukturen mittels REM, b: Schema des Schichtaufbaus der Fotodiode. Auf dem Pyramidal strukturierten Substrat wird vor der Metallisierung (blau) das Schottky-Metall (rot) sowie eine Oxidschicht (grün) abgeschieden.

### 2.3 Charakterisierung

Durch temperaturabhängige Strom-Spannungs-Messungen kann Aufschluss über die Barriere-Eigenschaften des Schottky-Übergangs erlangt werden (Ladungsträgertransport, Barriere-Inhomogenitäten).

Es werden im Folgenden die Unterschiede im Strom-Spannungs-Kurvenverlauf bei verschiedenen Temperaturen ( $T=233/253/273/293/313$  K) zwischen Proben mit unterschiedlichen Abscheidemethoden des Schottky-Metalls

(Sputtern, pCVD), unterschiedlichen Schottky-Metallschichtdicken (10 nm/20 nm) und unterschiedlicher Strukturierung (planar/pyramidal) verglichen.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Abscheidemethode

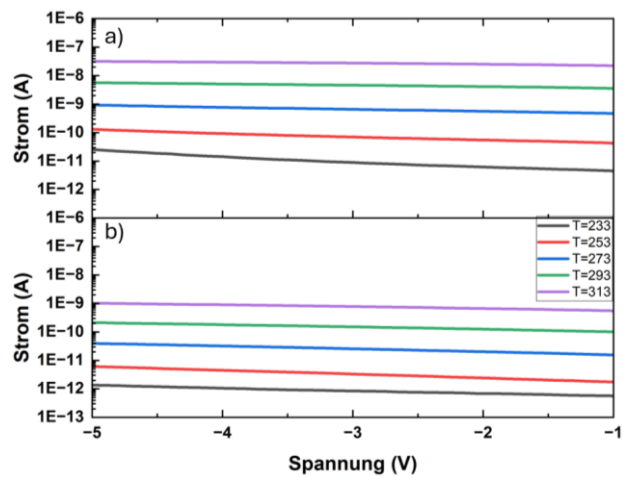
Im direkten Vergleich der Abscheidemethoden (Sputtern siehe Bild 2a; pCVD siehe Bild 2b) bei gleicher Dicke von 10 nm und planarer Struktur stellt man zunächst fest, dass der Strom im Falle der pCVD-Probe um etwa eine Größenordnung geringer ist als der der Sputter-Probe. Bei Schichtdicken von 10 nm ist es vor allem im Sputterprozess möglich, dass über die Diodenfläche lokale Störstellen am Kontakt der Substratoberfläche mit dem Schottky-Metall (Versetzungen, Korngrenzen) auftreten, welche Möglichkeiten für Leckströme bieten. Räumlich betrachtet ist die Kontaktfläche zwischen Substrat und Schottky-Metall nicht flach, sondern rau, wodurch es grundsätzliche räumliche Fluktuationen in der Barrierenhöhe gibt. Dies erklärt den grundsätzlichen linearen Anstieg des Stroms beider Proben bei niedrigeren Spannungen [5]. Der leichte, nicht-lineare Anstieg des Stroms der Sputter-Probe bei  $T=233$  Kelvin suggeriert, dass Tunnelströme vom Schottky-Metall in den Halbleiter existieren.

#### 3.2 Schichtdicke

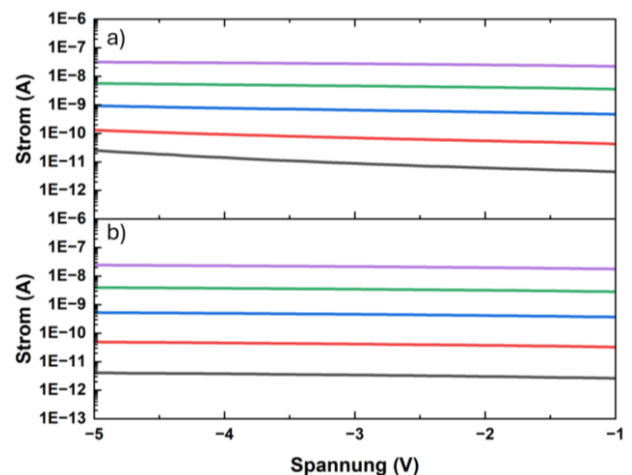
Dies wird bei Betrachtung von Bild 3 deutlich, in welchem bei gleicher Abscheidung (Sputtern) und planarer Struktur die Unterschiede in den Schichtdicken (10 nm siehe Bild 2a; 20 nm siehe Bild 2b) verglichen werden. Vor allem der nicht-lineare Anstieg bei  $T=233$  Kelvin, aber auch der grundsätzliche lineare Anstieg aller Kurven wird durch die Erhöhung der Schichtdicke minimiert. Dies lässt sich durch eine längere Beschichtungsdauer und somit einer gleichmäßigeren Beschichtung begründen, welche Störstellen wie z.B. Freistellen am Schottky-Kontakt oder auch in der Schottky-Metallschicht minimiert.

#### 3.3 Strukturierung

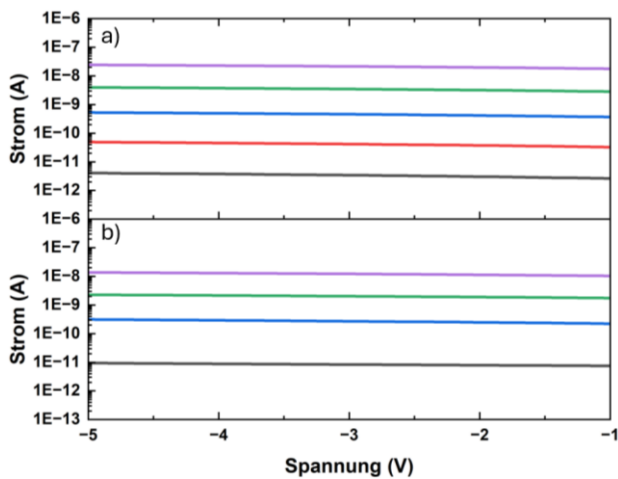
Bei gleicher Schichtdicke (20 nm) und Abscheidung (Sputtern) werden die Proben bei planarer Struktur (Bild 4a) und pyramidaler Strukturierung (Bild 4b) verglichen. Durch die Minimierung des Kurvenanstiegs über die Schichtdicke ist der Kurvenverlauf in diesem Vergleich nahezu identisch. Die im Vergleich zu pCVD inkonformere und inhomogenere Schicht bei strukturiertem Substrat fällt bei einer Schichtdicke von 20 nm allen Anschein nach nicht mehr wesentlich ins Gewicht.



**Bild 2** Vergleich der Sperrströme bei Temperaturen von 233 – 313 Kelvin (siehe Inlet). a: Planare Probe mit 10 nm Schottky-Metallschicht, abgeschieden durch Sputtern. b: Planare Probe mit 10 nm Schottky-Metall, abgeschieden durch pCVD.



**Bild 3** Vergleich der Sperrströme bei Temperaturen von 233 – 313 Kelvin (siehe Inlet Bild 2). a: Planare Probe mit 10 nm Schottky-Metallschicht, abgeschieden durch Sputtern. b: Planare Probe mit 20 nm Schottky-Metallschicht, abgeschieden durch Sputtern.



**Bild 4** Vergleich der Sperrströme bei Temperaturen von 233 – 313 Kelvin (siehe Inlet Bild 2). a: Planare Probe mit 20 nm Schottky-Metallschicht, abgeschieden durch Sputtern. b: Pyramidal strukturierte Probe mit 20 nm Schottky-Metallschicht, abgeschieden durch Sputtern.

## 4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden über temperaturabhängige Strom-Spannungs-Messungen Fotodioden mit unterschiedlichen Schottky-Metallschichtdicken, Schottky-Metallabscheidemethoden und Substratstrukturierungen verglichen, um einen Einfluss dieser Parameter auf die Schottky-Barrierenqualität zu ermitteln. Neben der Erhöhung der Schichtdicke hat auch die Wahl der pCVD als Abscheidemethode einen positiven Einfluss auf den Kurvenverlauf, da lineare sowie nicht-lineare Anstiege des Sperrstroms in negative Richtung minimiert werden. Ein Einfluss der Strukturierung des Substrats konnte bei erhöhter Schichtdicke nicht ermittelt werden.

Es gilt in Folgeversuchen nun, vor allem bei geringeren Schichtdicken die Unterschiede bei sich ändernder Strukturierung von Proben mit gesputterter sowie mit pCVD vollführter Schottky-Metallabscheidung zu untersuchen. Grundsätzlich wird jedoch nach den präsentierten Ergebnissen aus Bild 2 die pCVD als Abscheidemethode für zukünftige Versuche favorisiert.

## 5 Literatur

- [1] A.J. Khurgin, „Fundamental limits of hot carrier injection from metal in nanoplasmonics”, *Nanophotonics*, vol. 9, no. 2, pp. 453-471, 2020
- [2] J. Duran and A. Sarangan, “Schottky-barrier photodiode internal quantum efficiency dependence on nickel silicide film thicknesses”, *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 1, pp. 3-5, 2019
- [3] H. Wen; L. Augel; J. Knobbe „Approaches for Optimizing Near Infrared Si Photodetectors Based on Internal Photoemission”, *ICICDT*, 2021
- [4] D.J.H. Emslie; P. Chadha, J.S.Price „Metal ALD and pulsed CVD: Fundamental reactions and links with solution chemistry”, *Coordination Chemistry Reviews*, vol. 257, no. 23-24, pp. 3282-3296, 2013

- [5] J.H. Werner and H.H. Güttler “Barrier inhomogeneities at Schottky contacts”, *J. Appl. Phys.* 69, 1522-1533, 1991