

Si-kompatible Schottky SWIR-Detektortechnologie für Anwendungen in der Gassensorik

Lion Augel^{1,2}, Hanying Wen², Jens Knobbe²

¹ Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 03046 Cottbus, Germany

² Fraunhofer Institut für Photonische Mikrosysteme IPMS, 01109 Dresden, Germany
augel@b-tu.de

Zusammenfassung

Die nahinfrarote Absorptionsspektroskopie erlaubt die Unterscheidung verschiedenster Gase und Gas-konzentrationen. Die in diesem Wellenlängenbereich typischerweise verwendeten III-V-Detektoren sind in ihren Herstellungsverfahren nicht kompatibel zu Si-basierter Technologie. Schottky-Photodetektoren ermöglichen auch im Wellenlängenbereich ab einem Mikrometer die Detektion von Strahlung bei technolo-gischer Kompatibilität. Das Projekt adressiert die technologischen Herausforderungen durch nano-photonische Strukturen und ein TiN-Schichtsysteme.

Keywords: Infrarot, Silizium-Technologie, Schottky-Photodetektor, Gassensorik

Motivation

Die Gasabsorptionsspektroskopie unterscheidet Gase und deren Konzentration anhand ihrer spezifischen spektralen Absorption. Die Bindungen der im Gas enthaltenen Moleküle werden durch die auf sie einfallende Strahlung zu Schwingungen angeregt. Die dabei aufgenommene Energie kann als Absorption bestimmt werden. Typischerweise wird hierzu Strahlung im (nah-)infraroten Wellenlängenbereich genutzt, da sich hier die erste Ordnung der meisten Schwingungsmoden befinden [1].

Zur Detektion der nahinfraroten Strahlung werden typischerweise Detektoren mit III-V-Halbleitern verwendet. Diese Halbleitermaterialien und ihre Technologien sind nicht kompatibel mit denen der Silizium-Technologie [2]. Diese bilden aber die Grundlage für praktisch alle Schaltungen, die zur Auswertung der generierten Signale verwendet werden. Die Verfügbarkeit eines technologisch kompatiblen Detektors für den nah-infraroten Wellenlängenbereich wäre somit aus technischer und technologischer Sicht vorteilhaft.

Einleitung

Si-basierte Detektoren für den nahinfraroten Wellenlängenbereich (*engl.* Short wavelength infrared, SWIR), beginnend ab etwa 1 μm Wellenlänge, können nicht mithilfe der Interband-Absorption in Si realisiert werden, da hierfür die Bandlücke in Si zu groß ist. Alternative Absorptionsprinzipien in diesem Material basieren auf der Verwendung von Zwischenbandzuständen, nicht-linearen Absorptionsvorgängen oder der



Abb. 1. Schematischer Querschnitt durch das Detektorbauelement.

Barriere an einem Schottky-Kontakt. Während Zwischenbandzustände technologisch komplexe Dotierprofile erfordern und für nicht-lineare Absorptionsprozesse hohe Feldstärken erforderlich sind, ist die Realisierung eines Schottky-Überganges durch die Kombination eines Metalls und eines Halbleiters technologisch einfach möglich [3].

Der Photostrom eines Schottky-Photodetektors ergibt sich durch die Trennung der im Metall angeregten Ladungsträger entlang der Metall-Halbleiter-Barriere. Für einen rückseitenbe-leuchteten Detektor ergibt sich die optische Empfindlichkeit \mathcal{R}_{opt} über

$$\mathcal{R}_{\text{opt}} = (1 - R)\eta_{\text{int}}\frac{q}{E_{\lambda}}. \quad (1)$$

Hierbei ist R die Reflexion an der Grenzfläche Metall-Halbleiter, η_{int} die interne Quanteneffizienz, q die Elementarladung und E_{λ} die Energie eines Photons bei einer Wellenlänge λ . Die Quanteneffizienz ist dabei durch die energetische Verteilung und die Übergangswahrscheinlichkeit der generierten Ladungsträger stark reduziert. Zusätzlich ergibt sich eine deutliche Reflexion entlang der Halbleiter-Metall-Grenzfläche für planare Bauelemente.

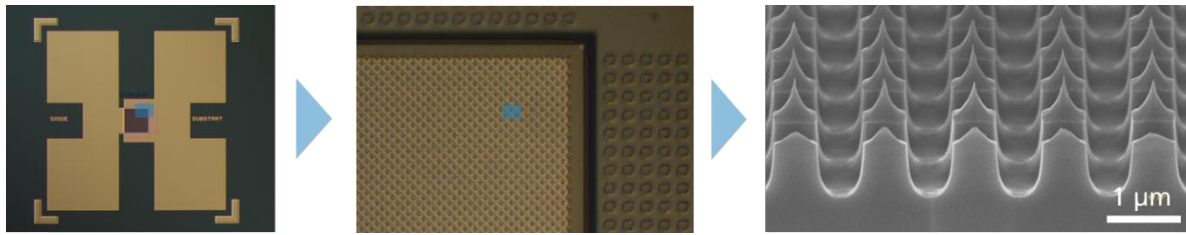


Abb. 2. Mikroskopische Aufnahme des Detektorbauelements und Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der nanophotonischen Strukturen ohne Metallisierung.

Detektordesign

Das Si-Substrat absorbiert im Wellenlängenbereich oberhalb von einem Mikrometer nur geringfügig, womit ein rückseitenbeleuchteter Ansatz verwendet werden kann. Die Metallschicht des Detektors muss dabei nicht durchdrungen werden und die Ladungsträger werden nahe des Metall-Halbleiter-Übergangs generiert (siehe Abb. 1). Die Grenzfläche des p-Substrats wird mittels eines zweistufigen Trocken-Ätzverfahren in Form von pyramidalen nanophotonischen Strukturen strukturiert (siehe Abb. 2). Hiermit wird die Reflexion R an der Grenzfläche reduziert [4]. Die Strukturen vergrößern dabei nicht nur die Oberfläche, sondern zwingen die Strahlung zu mehrfachen Interaktionen mit der Grenzfläche.

Die Metallisierung ist als Zwei-Schicht-System ausgeführt. Auf eine dünne Schicht TiN mit einer Dicke von 5 nm wird eine AlSiCu-Schicht von 500 nm aufgebracht.

Elektrische Eigenschaften

Die Barrierenhöhe des Metall-Halbleiter-Übergangs definiert die Funktion des Bauelements. Mithilfe von $I(U, T)$ -Messungen wurde an einem

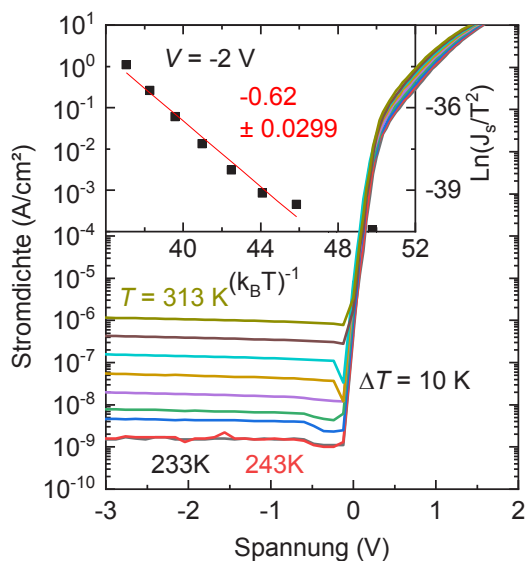


Abb. 4. Temperaturabhängig Strom-Spannungs-Charakteristik und "Richardson-Plot" zur Bestimmung der Barrierenhöhe.

planaren Referenzbauelement eine Barrierenhöhe Φ_B von 0,6 eV bestimmt [5] (siehe Abb. 3). Dies entspricht etwa einer maximal detektierbaren Wellenlänge von etwa 2 μm .

Photonische Eigenschaften

Die spektrale optische Empfindlichkeit wurde mithilfe einer abstimmbaren Lichtquelle bestimmt. Hier konnte gezeigt werden, dass die Detektoren mit photonischen Strukturen gegenüber den Detektoren mit einer planaren Grenzfläche eine vergrößerte optische Empfindlichkeit besitzen. Es ist dabei auch ersichtlich, dass die photonischen Strukturen durch ihr spezifisches größenabhängiges Resonanzverhalten in einigen spektralen Bereichen die optische Empfindlichkeit verstärken bzw. erniedrigen kann (siehe Abb. 4)

Demonstrator für Methan

Der Detektor wurde in einer Gasabsorptionsstrecke getestet. Hierbei wurde Strahlung eines Lasers mit einer Wellenlänge von 1650 nm in eine Herriott-Zelle eingekoppelt, welche mit zwei verschiedenen Methan-Konzentrationen geflutet wurde. Zwischen jeder Messung wurde die Zelle mit N_2 gespült. Die verwendeten CH_4 -

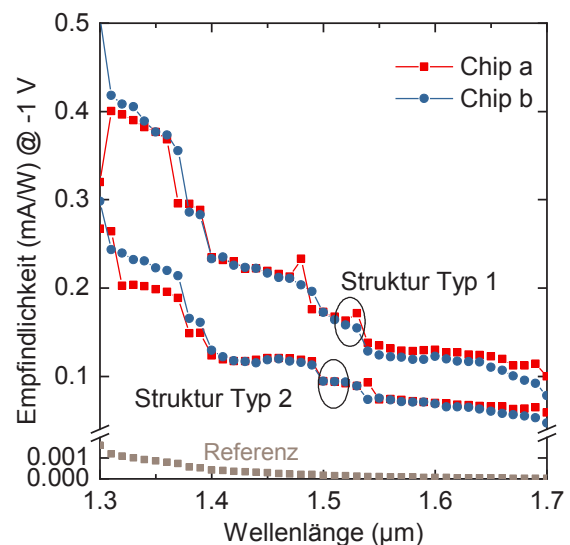


Abb. 3. Spektrale optische Empfindlichkeit für zwei verschiedene Chips (a, b) und zwei verschiedene Strukturen (Typ 1, 2) im Vergleich zu einem planaren Detektor als Referenz.

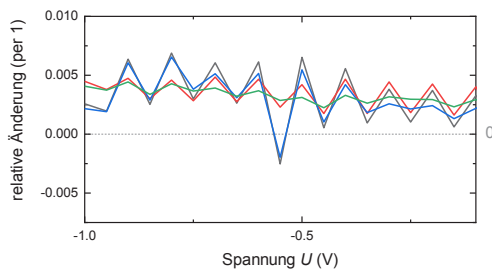


Abb. 5. Relative Änderung der optischen Empfindlichkeit zwischen zwei CH_4 -Konzentrationen von 2500 ppm und 100 ppm. Dargestellt ist das Ergebnis von vier konsekutiven Messzyklen.

Konzentrationen betragen 0,25% (2500 ppm) und 100 ppm. In vier aufeinanderfolgenden Messungen konnte eine Variation von 0,5 % im elektrischen Strom zwischen den beiden Konzentrationen bestimmt werden (siehe Abb. 5).

Literatur

- [1] H. Günzler and H.-U. Gremlich, *IR-Spektroskopie: Eine Einführung*, 4th ed. Weinheim: Wiley-VCH GmbH & Co. KGaA, 2003.
- [2] C. Zeng, D. Fu, Y. Jin, and Y. Han, "Recent Progress in III-V Photodetectors Grown on Silicon," *Photonics*, vol. 10, no. 5, p. 573, 2023, doi: 10.3390/photonics10050573.
- [3] M. Casalino, G. Coppola, M. Iodice, I. Rendina, and L. Sirleto, "Near-infrared sub-bandgap all-silicon photodetectors: state of the art and perspectives," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 10, no. 12, pp. 10571–10600, 2010, doi: 10.3390/s101210571.
- [4] B. Desiatov, I. Goykhman, N. Mazurski, J. Shappir, J. B. Khurgin, and U. Levy, "Plasmonic enhanced silicon pyramids for internal photoemission Schottky detectors in the near-infrared regime," *Optica*, vol. 2, no. 4, p. 335, 2015, doi: 10.1364/OPTICA.2.000335.
- [5] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*, 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.