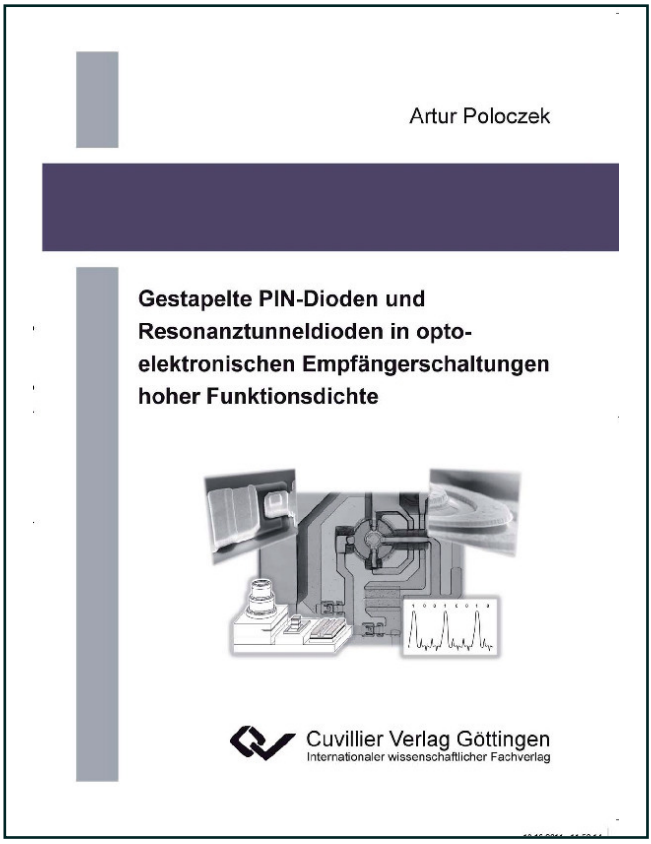
Artur Poloczek (Autor)

Gestapelte PIN-Dioden und Resonaztunneldioden in opto-elektronischen Empfängerschaltungen hoher Funktionsdichte



https://cuvillier.de/de/shop/publications/209

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

1 Einleitung und Aufbau der Arbeit

1.1 Motivation und Aufgabenstellung

Licht als Träger für die Übermittlung von Informationen ist sowohl zur Überbrückung von interkontinentalen Entfernungen Standard, als auch Gegenstand aktueller Forschung bezüglich der optischen Kommunikation zwischen integrierten Recheneinheiten auf engstem Raum. Die Vorteile des lichtbasierten Übertragungsmediums Lichtwellenleiter (LWL) im Vergleich zu Kupfer liegen in der deutlich höheren Übertragungskapazität, geringerer Signaldämpfung und seiner Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störeinflüssen. Im Bereich der on-chip Kommunikation ist es der geringere Leistungsbedarf für den Austausch von Daten, welcher eine entsprechende Entwicklung interessant macht, da der Abtransport der erzeugten Verlustleistung pro Flächeneinheit bei modernen Mikroprozessoren eine große Herausforderung darstellt.
Trotz der genannten Vorteile ist eine Handhabung der Daten in der elektrischen Ebene heute und auch auf absehbare Zeit unerlässlich, da alle kommerziellen Datenverarbeitungssysteme den Transistor als Grundelement beinhalten. Aus diesem Grund sind an den Schnittstellen zwischen Datenübermittlung und -verarbeitung entsprechende Wandlerelemente notwendig. Eingangsseitig des LWL-Netzes sind es Lichtemitter (Leuchtdiode oder Laserdiode) und ausgangsseitig Photodetektoren (PIN-Diode, MSM-Detektor, Wellenleiterabsorber, etc.), welche diese Aufgabe übernehmen.
Der Einsatz reiner Silizium-Bauelemente ist in diesem Bereich zwar auf Grund der monolithischen Integrierbarkeit mit CMOS-Prozessen von größtem Interesse, jedoch scheitert dieser Wunsch an der indirekten Bandstruktur und der mit den Kommunikationswellenlängen $\lambda = 1{,}3\ \mu m$ und $\lambda = 1{,}55\ \mu m$ inkompatiblen Bandlückenenergie des Siliziums. Der Silizium-Germanium Mischkristall (SiGe) macht die Einstellung einer Bandlückenenergie in diesem Bereich möglich (Bandgap-Engineering), jedoch sind die erreichbaren Absorptionskoeffizienten und damit die Effizienz mit diesem Material deutlich niedriger als die der III/V-Verbindungshalbleiter.
Das Indiumgalliumarsenid (InGaAs) auf Basis des Indiumphosphids (InP) ist bis heute das Material der Wahl für schnelle und effiziente Photodetektoren. Es zeichnet sich durch eine direkte Bandlückenenergie und eine hohe Absorption im Bereich der angesprochenen Wellenlängen aus. Das Material wird in epitaktischen Verfahren (MOVPE, MBE) als Dünnschicht auf einem Trägersubstrat (InP) abgeschieden und nimmt dessen Kristall-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

gitterinformation auf. Auf Grund der hohen Differenz der Gitterkonstanten zwischen InP und Silizium ist eine einfache Übertragung der Technologie auf das Silizium nicht möglich. Ein Teil dieser Arbeit widmet sich dem Aufbau und der Charakterisierung einer InGaAs PIN-Diode auf einem zur CMOS-Technologie kompatiblen Siliziumsubstrat, dessen Gitterkonstante durch epitaktische Maßnahmen auf die des Indiumphosphids transferiert wurde. Da die PIN-Diode als optisches Bauelement sensibel bezüglich der Kristallqualität ist, lässt der Vergleich mit einem entsprechenden Element auf InP-Substrat Rückschlüsse für die untersuchte Strategie zu. Die PIN-Diode wird hier stellvertretend für die Möglichkeit des Transfers weiterer III/V-Bauelemente und Schaltungen untersucht und leistet somit einen Beitrag zur möglichen zukünftigen Fusion der Stärken beider Technologien.

Ein anderer Aspekt bei der allgemeinen Optimierung der Elektronik der vergangenen Dekaden ist die Weiterentwicklung der Prozesstechnologie zur Schaffung immer kleinerer Strukturgrößen und damit verbundenen höheren Integrationsdichten, welche dem Schaltungsdesigner mehr Freiheiten zur Erhöhung der Funktionalität bescherte. Dieser Prozess gerät allmählich an seine physikalischen Grenzen, so dass die Untersuchung alternativer Ansätze immer wichtiger wird. Hierbei ist es beispielsweise die Materialwissenschaft, welche durch den Austausch bewährter Materialen den durch die Miniaturisierung hervorgerufenen Restriktionen entgegenwirkt. Ein Beispiel hierfür ist der Wechsel zu den sogenannten High-k-Dielektrika anstatt des Siliziumdioxids im Bereich der Gateisolation bei MOS-Transistoren. Hierdurch kann die Dicke der Isolationsschicht bei gleichbleibender Kapazität erhöht und die parasitären Leckströme deutlich reduziert werden.
Ein weiteres großes Feld ist der relativ neue Bereich der Nanoelektronik, bei welchem die Erforschung von elektronischen und optischen Eigenschaften von meist halbleitenden nadelförmigen Strukturen (Carbon-Nanotubes, Nanowhisker, etc.) mit Abmessungen herab bis zu einigen zehn Nanometern im Vordergrund steht.
Es gibt jedoch auch Ansätze, die Funktionalität von einzelnen Bauelementen zu erhöhen, so dass sie in der Lage sind, zeitgleich oder variabel mehrere Funktionen zu erfüllen. Im Rahmen dieser Arbeit ist es die PIN-Diode, welche durch eine Erweiterung um eine zweite Absorptionsschicht bestehend aus dem quaternären III/V-Mischkristall InGaAsP in die Lage versetzt wird, zeitgleich eine weitere Wellenlänge zu detektieren und für die elektronische Weiterverarbeitung auf einem zweiten Kanal bereitzustellen. Dieser gestapelte Photodetektor ist auf die selektive Detektion der beiden Kommunikationswellenlängen abgestimmt, welche innerhalb einer Glasfaser übertragen und in das Bauelement

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

eingekoppelt werden. Diese Arbeit umfasst die komplette Entwicklung dieses Detektoptyps angefangen vom MOVPE-Materialwachstum, über die Prozesstechnologie bis hin zur messtechnischen Charakterisierung und Modellbildung für einen Schaltungssimulator. Es werden die Aspekte verschiedener Bauelement- als auch Materialdesigns für eine Optimierung hinsichtlich der HF-Performance bis in den GHz-Bereich und des Kanalübersprechens beleuchtet. Beim Kanalübersprechen wird auf eine Wechselwirkung der Signale sowohl in der optischen als auch in der elektrischen Ebene eingegangen, deren Schnittstelle der gestapelte Detektor selbst bildet.

Tunnelstromelemente sind ebenfalls Kandidaten für alternative Ansätze. Resonanztunneldioden (RTD) beispielsweise zeichnen sich durch eine stark nichtlineare Strom/Spannungs-Charakteristik aus. Diese kann ausgenutzt werden, um durch eine einfache Reihenschaltung zweier RTDs ein sogenanntes Monostabiles-Bistabiles-Logik-Element (MoBiLE) zu bilden, welches über die komplette Funktionalität eines D-Flip-Flops verfügt und eingangsseitig Ströme verarbeitet. Dieses Element ist daher sehr gut geeignet, um in Kombination mit einem Photodetektor eine kompakte optoelektronische Empfängerschaltung zu bilden. Entsprechende Konzepte mit einem Photodetektor am Dateneingang sind bereits demonstriert worden [20].

Unter Verwendung des gestapelten Detektors wird das Konzept innerhalb dieser Arbeit hin zu einem vollständig optischen HF-Betrieb ausgeweitet. Das bedeutet, dass neben dem Datum auch das notwendige Taktsignal optisch übertragen und durch die Schaltung verarbeitet wird. Es entsteht eine sehr kompakte Empfängerschaltung, welche ohne Maßnahmen zur Taktrückgewinnung aus dem Datensignal auskommt (clock-recovery), was mit zusätzlichem Schaltungsaufwand verbunden wäre.

Eine weitere untersuchte Applikationsschaltung ist die Weiterentwicklung des in [21] entworfenen Demultiplexers auf Basis des MoBiLE-Elements. Über eine Erweiterung mit Hilfe des gestapelten Detektors kann der Datendemultiplex vom Zeitbereich auf die spektrale Ebene ausgeweitet werden (λt-DEMUX). Diese Schaltung stellt somit aus einem optischen Datenstrom vier Bit pro Taktperiode auf getrennten elektrischen Ausgängen zur Verfügung.

Hinsichtlich der Empfängerschaltungen umfasst die Arbeit die simulationstechnische Schaltungsentwicklung sowie deren Realisierung. Für den messtechnischen Funktionstest wurden Messumgebungen aufgebaut, welche den digitalen Betrieb der Schaltungen im GHz-Bereich abdecken.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

1.2 Gliederung der Arbeit

In dem folgenden Kapitel werden die Grundlagen der in dieser Arbeit verwendeten Bauelemente und des MoBiLE beschrieben, um das Verständnis der weiterführenden Ausführungen zu erleichtern. Einen besonderen Schwerpunkt bildet die Einführung zur PIN-Diode, da ihre Erweiterung zum gestapelten Detektor einen zentralen Punkt dieser Arbeit darstellt. Hierbei wird auf die physikalischen Grundlagen der Lichtabsorption und auf die Zusammenhänge im Hinblick auf das Hochfrequenzverhalten dieses Bauelements eingegangen. Es wird ein einfaches Ersatzschaltbild vorgestellt, auf dessen Grundlage die Modellierungsarbeiten des gestapelten Detektors durchgeführt wurden. Als weiteres Element wird die Resonanztunneldiode besprochen. Neben dem Tunnelprinzip werden an dieser Stelle die in [21] gewonnenen Erkenntnisse zur Großsignaldynamik zusammengefasst, da diese über die an sich sehr kurzen internen Schaltzeiten einer RTD dominieren, was für die untersuchten Applikationsschaltungen relevant ist. Der Heterostruktur-Feldeffekttransistor wird nur grob angesprochen, da er im Rahmen dieser Arbeit zwar als aktives Element Verwendung findet, jedoch nicht weiterentwickelt wird.
In Kapitel 3 ist die Beschreibung relevanter Technologieschritte und Prozessanlagen zusammengefasst, welche zum Verständnis des Herstellungsprozesses relevanter Hardware wichtig sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Anpassung der Standard PIN-Technologie im Bereich der nasschemischen Strukturierung des gestapelten Detektors vorgenommen. Des Weiteren beinhaltet der Schaltungsprozess Ätzschritte mittels eines trockenchemischen Verfahrens zum Erzielen eines möglichst präzisen Strukturübertrags.
Es folgt eine Beschreibung der relevanten Messtechnik. Streuparametermessungen bilden ein wichtiges Werkzeug bei der Bestimmung der HF-Ersatzschaltbildelemente für das elektrische Modell des gestapelten Detektors. Um eine gezielte Entwicklung von Photodetektoren für Hochfrequenzanwendungen durchführen zu können, ist eine Möglichkeit zur Charakterisierung der Empfindlichkeit (Responsivity) und der Bandbreite notwendig. Da das Fachgebiet diesbezüglich nicht über standardisierte Messplätze verfügt, werden in diesem Kapitel die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Messaufbauten und deren Grenzen beschrieben.
Kapitel 5 behandelt die durchgeführten Arbeiten bezüglich der Einzelbauelemente. Eingangs wird der komplette Standard-Herstellungsprozess einer PIN-Diode vorgestellt, sowie dessen Erweiterung zur Kombination mit trockenchemischen Verfahren. Es folgt die Übertragung des PIN-Diodenprozesses auf ein Siliziumsubstrat mit einer (001)- Kristall-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

orientierung. Vergleichende Messungen mit einer Standard-PIN auf InP-Substrat dienen der Beurteilung des angewandten Konzepts. Eine generelle Diskussion zur monolithischen Integration von III/V-Prozessen mit der CMOS-Technologie schließt dieses Unterkapitel unter Nennung der noch zu überwindenden Hürden ab.
Es folgen die Vorstellung des Konzepts und der durchgeführten Arbeiten zum gestapelten Photodetektor. Hierbei handelt es sich zunächst um Untersuchungen zur Schichtepitaxie, da Vorversuche gezeigt haben, dass speziell die mittels Kohlenstoff p-dotierte Schicht, so wie sie in der herkömlichen PIN-Diode eingesetzt wird, beim gestapelten Detektor über keine ausreichend hohe aktive Dotierung verfügt und dadurch die Kontakteigenschaften massiv degradieren. Anschließend wird auf die entworfenen Bauelementdesigns und auf die entsprechenden Untersuchungen zur Prozesstechnologie eingegangen, bevor die Ergebnisse zum Kanalübersprechen präsentiert werden. Das Kanalübersprechen ist ein wichtiger Bauelementparameter, dessen Kenntnis für eine erfolgreiche Schaltungsapplikation unbedingt erforderlich ist. Es findet eine selektive Untersuchung bezüglich der optisch und der elektrisch hervorgerufenen Störung des Nachbarkanals statt, sowie ein entsprechender Abgleich mit dem Bauelement- und dem Schichtdesign. Messungen des Frequenzgangs sowie die Modellierung des Bauelements runden das Unterkapitel ab. Bezüglich der Resonanztunneldiode wurde in dieser Arbeit eine für Transistoren in [22] entwickelte Technologie zur direkten Kontaktierung adaptiert. Sie erlaubt die Herstellung von Bauelementen mit Submikron-Abmessungen und einer sehr genauen Kontrolle des Strukturübertrags durch eine anisotrope Ätzung mittels der Trockenchemie. Dadurch wird eine reproduzierbare technologische Einstellung des für das MoBiLE notwendigen Steuerstroms, welcher aus der Flächendifferenz der RTDs resultiert, bis hinab zu 100 µA möglich.
In Kapitel 6 werden die geleisteten Arbeiten zu den realisierten kompakten optoelektronischen Empfängerschaltungen vorgestellt und diskutiert. Einleitend findet eine Abwägung des Integrationskonzeptes statt, wobei die Vor- und Nachteile der Integration mit Bipolar- bzw. Feldeffekttransistoren aus technologischer Sicht im Vordergrund stehen. Es werden das Konzept, die Simulations- und Messergebnisse eines vollständig optisch gesteuerten MoBiLE-Gatters und eines im Wellenlängen- und Zeitbereich arbeitenden Demultiplexers in eigenen Unterkapiteln zusammengefasst.
Die Zusammenfassung der Arbeit sowie ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten erfolgen abschließend in Kapitel 7.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.