

Dan Mihai Buca: Fabrication and characterization of ultra-fast Si-based detectors for near-infrared wavelengths. 2002

Diese Dissertation beschreibt die physikalischen Konzepte und die Realisierung von ultraschnellen Photodetektoren, die einerseits mit Verfahren gefertigt wurden, die kompatibel zur Silizium-CMOS-Technologie sind und die andererseits auch im nahen Infrarot-Wellenlängenbereich bis etwa 1550 nm eine akzeptable Quanteneffizienz aufweisen. Die Wellenlängen von 1300 und 1550 nm werden in der modernen Optokommunikation im Fernverkehr eingesetzt, weil die Glasfasern in diesem Bereich ihr Absorptionsminimum aufweisen. Weil das technologisch überragend wichtige Silizium wegen seiner Bandlücke eine Absorptions-Grenzwellenlänge von 1.1 μm aufweist, kann es nicht direkt als Detektormaterial eingesetzt werden. Die im allgemeinen verwendeten III/V-Halbleiter sind nicht kompatibel zur Siliziumtechnologie, können also nicht zusammen mit Silizium aufgewachsen werden. Deshalb werden in dieser Arbeit Silizium - Germanium - Legierungen und reines Germanium als absorbierende Schichten untersucht. Das photoempfindliche Halbleitermaterial (Semiconductor S) wird mit zwei Metallen kontaktiert: "MSM - Detektor". Beide Metallflächen bilden sperrende Schottky - Kontakte zum Halbleiter aus, die gegeneinander geschaltet sind und die den Wert des Dunkelstromes bei angelegter Vorspannung begrenzen sollen, weil jeweils eine Schottkydiode sperrt. Dagegen können sowohl die photogenerierten Elektronen wie auch die Löcher direkt die Elektroden erreichen, denn für sie ist keine Schottky - Barriere zu überwinden. So wird ein sehr schnelles Zeitverhalten des Detektors erreicht. Zwei verschiedene Wege wurden beschritten, um eine ausreichende optische Absorption bei 1500 nm zu erzielen: Zum ersten wurden SiGe Übergitter mit Hilfe der Molekularstrahlepitaxie (MBE) auf einkristallinen dünnen Schichten aus CoSi₂ aufgewachsen. In diesen Übergittern wächst SiGe mit hoher Ge - Konzentration auf. Zusätzlich ist in diesen Übergittern das SiGe stark elastisch verspannt ("strained undulating layer superlattice"). Dadurch ergibt sich eine Verringerung der Bandlücke und eine verbesserte Infrarotabsorption. Die aus diesem Material strukturierten Detektoren haben eine Quanteneffizienz von 5 % bei 1300 nm und 0.9 % bei 1550 nm. Diese Detektoren setzen die erwähnte epitaktische Schicht aus metallischem CoSi₂ als "vergrabenen" elektrischen Schottkykontakt ein und sind "vertikal strukturiert", weil der zweite Schottkykontakt über dem SiGe als Cr - Deckschicht ausgebildet ist. Die charakteristische Driftlänge der photogenerierten Ladungsträger zu den Kontakten ist "senkrecht" durch die SiGe - Schicht und beträgt entsprechend nur etwa 400 nm. Die kurze Weglänge ergibt einen sehr schnellen elektrischen Pulsanstieg. Das gemessene Zeitverhalten ergab eine Puls - Halbwertsbreite von 9.4 ps bei 1550 nm. Diese Halbwertsbreite ist vor allem durch die relativ große Kapazität der Anordnung bedingt, denn die beiden Kontaktmetalle bilden einen SiGe - gefüllten Plattenkondensator mit sehr geringem Elektrodenabstand.

Zum zweiten wurde versucht, reines Ge auf Si (111) aufzuwachsen. Um die wegen der Gitterfehlanpassung zwischen Si und Ge zu erwartende Ge - Inselbildung zu unterdrücken, wurde beim Wachstum in der MBE eine inerte Oberflächenbedeckung durch Sb eingesetzt (Sb wirkt als "surfactant", also etwa wie ein schützendes "Flußmittel"). Ge wächst unter der passivierenden Sb - Deckschicht in Lagen auf Si (111) auf, weil Sb die Oberflächendiffusion des Ge behindert. Weil dieses Epitaxieverfahren nur direkt auf Si (111) erfolgreich realisiert werden konnte, mußte auf die vergrabene CoSi₂ - Elektrode verzichtet werden. Statt dessen wurden zur Realisierung des Detektors nach Entfernung der Sb - Schicht ineinandergreifende Fingerelektroden aus Cr auf der Ge - Oberfläche aufgedampft. Weil die Finger durch Photolithographie strukturiert werden müssen, ergab sich ein minimaler Fingerabstand von 1500 nm. Diese Detektoren zeigten eine Quanteneffizienz von 13 % bei 1320 nm und 7.5 % bei 1550 nm. Das Zeitverhalten ist wegen des Fingerabstandes von 1.5 μm etwas langsamer: eine Halbwertsbreite von 12.5 ps wurde gemessen. Die elektrische Pulslänge ist in diesem Fall ausschließlich durch den Driftweg der Ladungsträger zu den Cr - Elektroden gegeben. Das sehr schnelle elektrische Pulsverhalten beider Detektorbauweisen ist jedoch sehr befriedigend und stellt jeweils einen Rekordwert dar.

Die elektrischen Kurzzeitmessungen wurden auf einem eigens für diese Arbeit umgebauten optischen

Femtosekunden- Spektroskopie- Messplatz durchgeführt. Ein Ti:Saphir - Festkörperlaser liefert ultrakurze Pulse von 120 fs Halbwertsbreite und 780 nm Wellenlänge, die in einem nachgeschalteten optischen parametrischen Oszillator (OPO) mit Hilfe nicht- linearer Prozesse zu kurzen Pulsen längerer Wellenlänge (1300 - 1550 nm) konvertiert werden. Diese optischen Pulse wurden auf die Detektoren fokussiert. Das elektrische Signal der Detektoren wurde über eine Mikrostreifenleitung abgeleitet und mit Hilfe eines elektrooptischen LiTaO₃ Kristalles optisch ausgewertet ("Optical pump-probe set-up").

This thesis presents two different concepts for the fabrication of ultrafast metal-semiconductor-metal (MSM) photodetectors, which are to be used in the near-infrared wavelength regime and which are compatible to silicon processing techniques. To achieve this goal, we have grown Si-Si_{1-x}Ge_x undulating layer superlattices with $x=0.39$ and 0.45 by molecular beam epitaxy (MBE) on top of epitaxial implanted CoSi₂ layers and fabricated "vertical" MSM detectors. The devices show a quantum efficiency of 5% for the wavelength of 1320 nm and 0.9 % for 1550 nm. We performed time response measurements, using a Ti:sapphire laser and an optical parametric oscillator which generates ultrafast pulses at infrared wavelengths. An electrical response time of 11.6 ps full width at half maximum (FWHM) was obtained at a wavelength of 1300 nm. At 1550 nm a response time of 9.4 ps was measured.

In a second approach, we have grown pure Ge by MBE on Si (111). The sensitive volumes are 270 nm thick Ge films. Interdigitated Cr metal top electrodes of 1.5 - 3 μ m spacing and identical finger width form Schottky contacts to the Ge film. These detectors show a response time of 12.5 ps full width at half maximum both at 1300 nm and 1550 nm. The temporal response is limited by the transit time of the carriers between the electrodes.