

DISS. ETH NO. 21952

Highly strained Si and Ge micro- and nanobridges for micro- and op- toelectronic applications

A dissertation submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES OF ETH ZURICH

Presented by
MARTIN JOSEF SÜESS

MSc. ETH Mat. Sci., ETH Zürich
born on 21.09.1983
citizen of Ermensee LU, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Ralph Spolenak, examiner
Dr. Hans Sigg, co-examiner
Prof. Dr. André Studart, co-examiner
Prof. Dr. Jérôme Faist, co-examiner
Prof. Dr. Jean-Pierre Raskin, co-examiner

2014

Summary

For decades, the computational power has been increasing exponentially, following Moore's law. However, this trend has started to slow down, and despite increasing transistor count the performance of processing units is climbing at a lower rate. This deviation is called "Moore's gap" and generally accredited to the difficulties and challenges in downscaling the components and devices on chips, the increasing heat dissipation at operation with increasing integration density and size effects occurring in the regime below 10 – 100 nm. In order to compensate and bring Moore's law back on track, several solutions are currently addressed in science and industry. Although new materials concepts are being developed in industrial and academic research, which will eventually replace the status quo, key investors prefer a continuation of the established Si-based complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) route for the short term, since resources are plentiful and implementation of costly new technology can be postponed.

Strain engineering is an approach that can be applied to established and new materials systems to enhance performance. By changing the crystal parameters, the electronic band structure is changed as well, which can boost the properties of materials. In this thesis, a new strain enhancement method allowing fabrication of high uniaxial positive strain states from substrates with low biaxial pre-strain is introduced and demonstrated on the two most important semiconductors used in CMOS technology: silicon and germanium. The method works by patterning connected segments with different cross-sectional areas, so-called "bridges", whereby the initial biaxial strain is redistributed into the segment with the smallest cross-sectional area, and thus enhancing the strain in this particular segment by a factor proportional to the structure geometry.

In silicon uniaxial positive strain along the crystallographic direction $\langle 110 \rangle$ will increase the electron mobility, which is the basis for increased transistor speed. The potential application of the presented method to nanowire geometry additionally allows for improved electrostatic control and extension of the integration density. In this work Si nanobridges as thin as 30 nm are fabricated. The strain is characterized with a correlation between power-dependent Raman spectroscopy and finite element method (FEM) simulations. A maximum strain of 4.5 % is achieved and, generally, the measured strains match well with an analytical model depending only on geometrical parameters.

Germanium, on the other hand, is a CMOS compatible semiconductor with a quasi-direct band gap, but can be converted to a direct-gap semiconductor under sufficiently high positive strain. Consequently, a strained Ge crystal has poten-

tial application in optoelectronics as an on-chip laser. Such a laser, in turn, would allow for optical interconnects between individual processing cores, which reduces power dissipation and allows for parallelization at the speed of light. In this work, the bridge patterning method is applied to fabricate Ge microbridges and their strain state is validated with the same Raman/FEM correlation method. For the first time, a uniaxial strain along $\langle 100 \rangle$ of 3.1 % is achieved in a volume large enough ($6 \times 2 \times 2 \mu\text{m}^3$) to host a laser mode at the corresponding wavelength.

Zusammenfassung

Seit Jahrzehnten folgt die Rechenleistung dem Moore'schen Gesetz und nimmt exponentiell zu. Aber seit einigen Jahren steigt dieser Trend trotz weiter wachsenden Transistorzahlen nicht mehr im gewohnten Tempo. Diese Abweichung wird als Moore'sche Lücke bezeichnet und gemeinhin begründet mit Schwierigkeiten in der Skalierung von Bauelementen und Komponenten, mit zunehmendem Hitzeverlust im Betrieb bedingt durch die zunehmende Integrationsdichte, sowie Grösseneffekte auf Längenskalen unter 10 – 100 nm. Um den Trend zu korrigieren und das Moore'sche Gesetz wieder auf den richtigen Weg zu bringen, werden derzeit in der Industrie und in Universitäten mehrere mögliche Lösungen untersucht. Obwohl in industrieller und akademischer Forschung neue, vielversprechende Materialkonzepte ausgearbeitet werden, die schlussendlich den Status Quo ersetzen werden, bevorzugen die Hauptinvestoren kurzfristig die Weiterführung der komplementären Metall-Oxid-Halbleiter-Logikfamilie (CMOS), weil die dafür benötigten Ressourcen reichlich vorhanden sind und so die Umsetzung von neuen, kostspieligen Technologien verzögert werden kann.

Die Erzeugung und Abstimmung von Dehnungszuständen kann zur Leistungssteigerung auf etablierte und neue Materialsysteme angewendet werden. Indem die Kristallparameter geändert werden, verändert sich auch die elektronische Bandstruktur, was zu einer Verstärkung von Materialeigenschaften führen kann. In dieser Doktorarbeit wird eine neue Methode präsentiert, mit der niedrige, zweiachsige Dehnungszustände benutzt werden können, um hohe einachsige Dehnungszustände zu fabrizieren. Sie wird an den zwei wichtigsten Halbleitern für die CMOS-Technologie demonstriert: Silizium und Germanium. Die Methode funktioniert durch Strukturierung von sogenannten Brücken, was Segmente mit unterschiedlichen Querschnittsflächen sind. Dabei wird die anfänglich biaxiale Dehnung in das Segment mit der kleinsten Querschnittsfläche umverteilt und um einen Faktor proportional zur Strukturgeometrie verstärkt.

Uniaxiale Zugdehnung entlang der kristallographischen Richtung $\langle 110 \rangle$ erhöht die Elektronenbeweglichkeit von Silizium, was eine gute Basis für schnellere Transistoren bietet. Die potentielle Umsetzung der präsentierten Methode mit Si Nanodrähten würde zusätzlich eine verbesserte elektrostatische Kontrolle und Erhöhung der Integrationsdichte ermöglichen. In dieser Arbeit werden bis zu 30 nm dünne Si Nanobrücken fabriziert. Die Zugdehnung wird mit einer Korrelation von leistungsabhängiger Raman Spektroskopie und Finite Element Methoden charakterisiert. Dadurch wird eine Höchstdehnung von 4.5 % erreicht und eine gute Übereinstimmung mit einem analytischen Modell gefunden, das nur von geometrischen Parametern abhängt.

Demgegenüber ist Germanium ein CMOS-kompatibler Halbleiter, der eine quasi-direkte Bandlücke hat, welche sich wiederum durch eine genügend hohe Dehnung in eine direkte Bandlücke umwandeln lässt. Dadurch kann ein gedehnter Germaniumkristall potentiell als Laser direkt auf einer optoelektronischen Plattform angewendet werden. Solch ein Laser würde es ermöglichen einzelne Rechnerkerne auf einem Chip durch optische Leiterbahnen zu verbinden, was wiederum den Hitzeverlust verringern und Parallelisierung mit Lichtgeschwindigkeit erlauben würde. Die Brückenstrukturierungsmethode wird in dieser Arbeit ebenfalls angewendet um Ge Mikrobrücken zu fabrizieren, deren Dehnungszustand mit der gleichen Raman/FEM-Korrelationsmethode verifiziert wird. Dadurch wird zum ersten Mal eine uniaxiale Zugdehnung von 3.1 % entlang der kristallographischen Richtung $\langle 100 \rangle$ in einem Volumen erreicht, das gross genug ist ($6 \times 2 \times 2 \mu\text{m}^3$), um einen Laserschwingung für die entsprechende Wellenlänge zu halten.