

Vertical Transport and Intersubband Emission in SiGe

Dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology Zürich
for the degree of
Doctor of Natural Sciences
presented by

Gabriel Dehlinger

Dipl. Phys. (University of Tübingen)
born June 17, 1969
German citizen

accepted on the recommendation of

Prof. K. Ensslin	examiner
Prof. J. Faist	co-examiner
Dr. U. Gennser	co-examiner

Abstract

In this thesis the path towards the first realization of an intersubband emitter in Si/SiGe is described. The first part of this work deals with resonant tunneling diodes (RTDs), specifically the study of vertical transport in the valence band of this material system and the determination of ideal growth parameters. In the second part the experiments on quantum cascade structures (QCS) are described. The samples are grown by molecular beam epitaxy and investigated with transmission electron microscopy, high resolution x-ray diffraction, electrical measurements and optical experiments. The I-V characteristics of the RTDs are studied as a function of structural parameters, temperature, magnetic field and post growth annealing. A new resonance, appearing at higher temperatures is attributed to tunneling from higher states in the emitter. The influence of the emitter structure is also shown by the appearance of another resonance in magnetic field. In annealing experiments with samples grown at low temperature, the interdiffusion at the interfaces is determined from the shift of the resonances and is attributed to point defects. In addition, a large increase in the peak to valley current ratio, up to a record value of 4.75, was observed in these samples and it can be concluded that the point defects play a minor role in the performance of these devices. The successful deposition of RTDs as the first building block of QCS permitted the development of more complex structures. QCS require a low deposition temperature to avoid the formation of dislocations, induced by the high amount of strain. From structures with twelve cascade periods, each with five quantum wells, intersubband electroluminescence is obtained in the mid-infrared at around $9.5 \mu\text{m}$ with a small bandwidth of $\sim 22 \text{ meV}$. Polarization dependence, absorption experiments and especially the tuning of the wavelength from $9.5 \mu\text{m}$ to $8 \mu\text{m}$ by using a proper design of the cascade structure, reveal that the signal stems from the intended transitions between the first excited heavy hole state and the ground state. An estimate for the lifetime of the upper state can be given and the different possible scattering mechanisms are discussed.

Zusammenfassung

In dieser Doktorarbeit ist die Realisierung des ersten Intersubband Lichtemitters in Si/SiGe beschrieben. Auf dem Weg dorthin wurden zunächst Untersuchungen an Resonanten Tunnelnioden (RTDs) gemacht, um vertikalen Transport im Valenzband dieses Materialsystems zu studieren und geeignete Wachstumsparameter zu finden. In einem zweiten Schritt wurden die gewonnenen Erkenntnisse benutzt um die ersten Quantum Kaskaden Strukturen (QCS) herzustellen. Die Proben wurden mittels Molekular Strahl Epitaxy hergestellt und mit Transmissions Elektronenmikroskopie, hochauflösender Röntgendiffraktometrie, sowie elektrisch und optisch untersucht. Die Strom-Spannungs Charakteristiken der RTDs wurden als Funktion von strukturellen Parametern, Temperatur, Magnetfeld und thermischer Nach-Behandlung untersucht. Eine neue Resonanz, welche bei höheren Temperaturen auftritt, wird Tunneln aus angeregten Zustände im Emitter zugeschrieben. Die wichtige Rolle des Emitters wurde auch durch seinen Einfluss auf eine andere Resonanz aufgezeigt, welche im Magnetfeld auftritt. An Proben, welche bei tiefen Temperaturen gewachsen wurden, konnte die Diffusion von Si und Ge an den Grenzflächen an Hand der Verschiebung der Resonances bestimmt werden. Diese Diffusion wird durch Punktdefekte verstärkt. In diesen Proben konnte ausserdem eine starke Erhöhung des PVR beobachtet werden, mit einem Rekordwert von 4.75. Offensichtlich spielen Punktdefekte nur eine untergeordnete Rolle bei der Performance dieser Bauteile. Nach der erfolgreichen Realisierung von RTD wurden die Einsichten eingesetzt um QCS herzustellen. Die hohen Verspannungen in diesen Strukturen fordern eine niedrige Wachstumstemperatur um Versetzungsbildung zu vermeiden. Die Proben sind aus zwölf Kaskaden mit je fünf QWs aufgebaut. Sie zeigen elektrisch stimulierte Lichtemission im mittleren Infrarot bei ca. $9.5 \mu\text{m}$ mit einer Halbwertsbreite von ca. $\sim 22 \text{ meV}$. Die Polarisationsabhängigkeit, Experimente zur Absorption und besonders das gezielte Verschieben der Wellenlänge zu $8 \mu\text{m}$ durch ein entsprechendes Design, lassen annehmen, dass das Signal in der Tat von dem beabsichtigten Übergang zwischen dem ersten angeregten schwer-loch Zustand und dem Grundzustand stammt. Eine Abschätzung der Lebensdauer des oberen Zustands wird gegeben und die verschiedenen möglichen Streuprozesse diskutiert.