



Doctoral Thesis

STM study of Si-Ge heterostructures grown by magnetron sputter epitaxy

Author(s):

Vögeli, Bernhard

Publication Date:

1998

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001989893> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 12882

**STM study of Si-Ge heterostructures grown
by magnetron sputter epitaxy**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by

Bernhard Vögeli
Dipl. Phys. ETH

born March 26, 1968
citizen of Gächlingen (Schaffhausen)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. P. Wachter, examiner
Prof. Dr. G. Bauer, co-examiner
PD Dr. H. von Känel, co-examiner

1998

Abstract

Sputtering is normally used to grow amorphous or polycrystalline thin films. It was often believed that the high kinetic energy of the sputtered atoms cannot be reduced enough in order to allow for defect-free epitaxial growth, in particular not of semiconductors. Recently it has been shown that Si-Ge heteroepitaxy can be achieved if a sufficiently high working pressure is used. The kinetic energy of the sputtered atoms will be reduced by elastic collisions with Ar atoms. Hence, the energy of the incident atoms lies within $\approx kT$ and a few eV/atom, generally small enough to allow for epitaxial growth with abrupt interfaces.

It was the goal of this work to investigate the influence of the sputter-parameters on the crystal quality of particular Si-Ge heterostructures by scanning tunneling microscopy (STM). The results of these studies have been used in order to improve the electrical properties of sputtered 2-dimensional electron gases.

In Chapter 2 it is shown that the kinetic energy of the sputtered atoms can be modified with the Ar working pressure. The additional non-thermal energy cannot, however, be used to increase the surface diffusion at low substrate temperatures since surface defects, the density of which is also increased with higher kinetic energy of the incident atoms, act as ideal nucleation sites for the growth of the next monolayer. Generally spoken, suitable sputter parameters provided, homoepitaxial growth was found to be similar as attained with more convenient (and more complicated) growth techniques, such as MBE or UHV-CVD.

Chapter 3 deals with Ge quantum dots (QDs). The considerable interest in this system is due to their possible application in opto-electrical devices. The growth of self-assembled QDs and their overgrowth with silicon has been studied with STM images. The tremendous structural changes occurring during the Si deposition could be explained by Ge segregation and alloying of the wetting layer within a simple model.

Using a large number of different analysis techniques, the overall quality of sputtered SiGe-buffers is shown in Chapter 4. Threading dislocation densities as low as $2.6 - 8.5 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$ have been measured in strain relaxed $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ buffers. In a STM study, the surface of SiGe-buffers has been monitored as a function of distinct growth parameters. By cross-sectional analysis of these images we were able to determine the density of misfit dislocations and hence, the relaxation in the virtual substrates. The (D_A) steps of double

layer height, present at the surface slip due to misfit dislocations could be explained in terms of the Ge induced reversal of the surface strain anisotropy. 2 dimensional islands of double layer height were found to be the result of anisotropic surface strain and Ge segregation, too.

Chapter 5 is devoted to the challenge of our choice, the modulation doped strained Si quantum well (MODQW). Low-temperature (2K) electron mobilities up to 20000 cm²/Vs were measured with a sheet carrier density of $8.5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$. Both the problem of metal (Al) contamination and background (P) doping could be solved by system modifications and by using a different doping technique, respectively. The observed *vanishing* longitudinal magnetoresistance (ρ_{xx}) as well as the plateaus in the transversal magnetoresistance (ρ_{xy}) indicate transport in the normal quantum hall regime. Finally, also for the very first time, photoluminescence (PL) was measured on buried SiGe quantum wells. Despite the relatively high background level, which is probably due to remaining point defects, the fact that PL can be obtained is indeed the most convincing result to demonstrate the structural quality of magnetron sputtered heterostructures.

Kurzfassung

Die Methode der Kaltkathodenzerstäubung (engl. *Sputtering*) wird im allgemeinen dazu verwendet, amorphe oder polykristalline dünne Schichten herzustellen. Meist wurde angenommen, dass die hohe kinetische Energie der gesputterten Atome kaum genügend reduziert werden kann um defektfreies, epitaktisches Wachstum zu ermöglichen, insbesondere nicht von Halbleitern. Kürzlich wurde gezeigt, dass mit Sputtering sehr wohl Halbleiter-Epitaxie erreicht werden kann, wenn der Edelgasdruck in der Wachstumskammer genügend hoch gewählt wird. Energiereiche Si- und Ge-Atome erleiden dann elastische Stöße mit den Edelgasatomen und geben so einen Teil ihrer kinetischen Energie ab. Beim Auftreffen auf das Substrat liegt ihre Energie zwischen $\approx kT$ und wenigen eV/Atom, genügend klein um epitaktische Filme mit scharfen Grenzflächen herzustellen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluss der Wachstums-Parameter auf die Schichtqualität ausgewählter Si-Ge Heterostrukturen mit einem Raster-Tunnel-Mikroskop zu untersuchen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind dazu verwendet worden, die bisher erreichten elektrischen Transporteigenschaften gesputterter 2-dimensionaler Elektronengase zu verbessern.

In Kapitel 2 wird gezeigt, dass sich die kinetische Energie der Atome mit dem Gasdruck zwar verändern lässt, trotzdem aber nicht genutzt werden kann, um die Oberflächendiffusion bei tieferen Temperaturen zu erhöhen, da Oberflächendefekte, deren Dichte mit zunehmender Energie der ankommenden Atome ebenfalls wächst, als ideale Nukleationskeime für das Wachstum der nächsten Monolage wirken. Generell lassen sich, geeignete Wachstumsparameter vorausgesetzt, homoepitaktische Schichten herstellen, deren Qualität durchaus vergleichbar ist mit solchen, die mit gängigen (und komplizierteren) Wachstumsverfahren, wie MBE und UHV-CVD, abgeschieden werden.

Kapitel 3 befasst sich mit Ge Quanten Dots (QDs), welche weltweit grosses Interesse erweckten durch die mögliche Anwendung in opto-elektronischen Bauelementen. Die Entstehung der QDs und ihr "Vergraben" in Si, beides physikalisch äusserst interessante Prozesse, wurden mittels STM Bildern analysiert. Dabei konnten die auftretenden strukturellen Veränderungen der QDs während der Si Deposition durch Ge Segregation und Legierungsbildung erklärt werden.

Mittels umfassender Analytik wird in Kapitel 4 gezeigt, dass gesputterte SiGe-Puffer einen hohen Relaxationsgrad bei geringster Defektdichte

($2.6 - 8.5 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$) aufweisen. In einer STM Studie untersuchten wir die Oberfläche von SiGe-Puffern als Funktion verschiedenster Wachstumsparameter und schätzten den Relaxationsgrad der Schichten durch Bestimmen der Versetzungsliniendichte auf den STM Bildern ab. Biatomare D_A Stufen sowie 2-dimensionale Inseln von doppelter Höhe konnten auf anisotrope kompressive Verspannung, Ge Segregation und die Ge induzierte Umkehr der Oberflächen-Verspannung zurückgeführt werden.

Dem modulationsdotiertem Si Quantentopf (2DEG), der Herausforderung unserer Wahl, widmet sich Kapitel 5. Elektronenbeweglichkeiten bis zu $20000 \text{cm}^2/\text{Vs}$, bei einer Flächenladungsdichte von $8.5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$, konnten bei tiefen Temperaturen (2 K) gemessen werden. Dank einer neuen Dotiermethode und daher deutlich reduzierter Hintergrunddotierung konnte nun, bei einem Magnetfeld von 4.37 T, ein *verschwindender* longitudinaler Magnetowiderstand (ρ_{xx}) nachgewiesen werden, der, wie auch die Plateaus im transversalen Magnetowiderstand (ρ_{xy}), zeigt, dass das Regime des normalen Quanten-Hall-Effektes erreicht werden kann. Schliesslich wurde, ebenfalls zum ersten Mal, an vergrabenen SiGe-Quantentöpfen Photolumineszenz (PL) gemessen. Obwohl ein relativ hoher Untergrund noch Punktdefekte in geringer Dichte vermuten lässt, ist die PL in der Tat der effektivste Beweis für die hohe strukturelle Qualität der gesputterten Schichten.