

Diss. ETH Nr. 13616

# Herstellung von sub- $\mu\text{m}$ $\text{CoSi}_2$ -Strukturen mit dem fokussierten Ionenstrahl

ABHANDLUNG  
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

HENNING ANDREAS FUHRMANN

Dipl. Phys. Ruhr-Univ. Bochum  
geboren am 14. September 1970  
in Bochum (Deutschland)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. H.R. Ott, Referent  
PD Dr. H. von Känel, Koreferent  
Dr. M. Döbeli, Koreferent

Zürich, 2000

## Kurzfassung

Aufgrund der immer weiter steigenden Anforderungen an die räumliche Auflösung von Lithographiemethoden werden Verfahren, die im Gegensatz zur Fotolithographie Elektronen oder Ionen zur Bestrahlung benutzen, in Zukunft immer wichtiger werden. Besonders flexibel sind maskenlose Techniken, die mit fein fokussierten Strahlen arbeiten; sie können deshalb sowohl für den Einsatz in der Forschung als auch in der Entwicklung von entsprechenden Projektionsmethoden von großer Bedeutung sein. Im Rahmen dieser Arbeit werden in diesem Zusammenhang zwei maskenlose Ionenstrahlmethoden untersucht, die sich zur Herstellung von Kobaltdisilizid ( $\text{CoSi}_2$ ) Schichten in Silizium eignen. Als sehr guter, metallischer Leiter mit einer Gitterkonstanten, die von derjenigen des Siliziums nur wenig abweicht, ist  $\text{CoSi}_2$  sowohl für Experimente der niederdimensionalen Physik als auch als Material für Leiterbahnen sehr interessant.

Bei der Methode der Ionenstrahlsynthese wird Silizium mit Co-Ionen bestrahlt und das  $\text{CoSi}_2$  anschließend durch einen Tempersschritt erzeugt. Diese Technik wurde in der vorliegenden Arbeit erstmalig für fokussierte Ionenstrahlen mit Energien unterhalb 30 keV untersucht. Es konnten Modelle für die Tiefenverteilung des Kobalts nach der Implantation sowie für die Lage der  $\text{CoSi}_2$ -Schichten in der Tiefe erstellt werden. Diese Modelle wurden experimentell bestätigt. Bei der Ionenstrahlsynthese hat die Temperatur des Siliziums während der Bestrahlung einen entscheidenden Einfluß auf die Qualität des  $\text{CoSi}_2$ : homogene Schichten gelingen erst oberhalb von etwa 400°C. Für den Energiebereich unterhalb von 30 keV konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, daß auch nach einer Bestrahlung bei Raumtemperatur Schichten entstehen, deren Qualität für praktische Anwendungen ausreicht. Die gemessenen spezifischen Widerstände bei 4.2 K liegen mit minimal 4  $\mu\Omega\text{cm}$  in der Nähe der Literaturwerte für epitaktische Schichten (1.7  $\mu\Omega\text{cm}$ ). Die Anwendbarkeit des Verfahrens auf empfindliche, mikromechanische Bauelemente, die durch naßchemische Schritte beschädigt würden, konnte demonstriert werden.

Die zweite untersuchte Methode ist eine neuartige Lithographietechnik für Silizium, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Sie kann insbesondere auch zur Strukturierung von  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  Heterostrukturen und damit auch zur Herstellung von sub- $\mu\text{m}$   $\text{CoSi}_2$ -Strukturen benutzt werden. Die Methode nutzt adsorbierten Wasserstoff als strahlungsempfindliche Schicht, also anstelle eines Fotolacks. Die Modellvorstellung geht davon aus, daß der Wasserstoff durch die Bestrahlung mit Ionen lokal desorbiert wird. Die bestrahlten Stellen können dann oxidiert werden, während die restliche Oberfläche durch den Wasserstoff weitgehend vor der Oxidation geschützt ist. Diese Modellvor-

stellung wird in der vorliegenden Arbeit eingehend experimentell überprüft und bestätigt. Andere Effekte, die durch die Bestrahlung mit Ionen auftreten, sind die Ansammlung von Defekten im Silizium bis hin zur Amorphisierung und Wechselwirkung der Oberfläche mit Bestandteilen des Restgases im Vakuumsystem. Es wurde gezeigt, daß diese Effekte schon bei einer Substrattemperatur von 200°C vernachlässigt werden können oder deutlich reduziert sind. Die direkte Analyse des Oxids mittels Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie ergibt eine Dicke von nur 0.2-0.4 nm. Dieses Oxid kann als Maske für eine Tiefenätzung von bis zu 430 nm benutzt werden, wenn man KOH als Ätzlösung verwendet. Mit einer TMAH-Lösung (Tetramethylammoniumhydroxid) sind sogar 2  $\mu\text{m}$  erreicht worden. Die Anwendbarkeit der neuen Lithographiemethode auf  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  Heterostrukturen wurde demonstriert; dabei gelang die Herstellung eines 160 nm breiten  $\text{CoSi}_2$  Drahtes. Die Auflösung der Methode ist bisher nur durch den Durchmesser des fokussierten Ionenstrahles begrenzt. Kommerzielle Anlagen erreichen bereits Durchmesser von 5 nm. Eine analytische Modellierung der Desorption von Wasserstoff durch den Ionenstrahl zeigt, daß auch bei solchen Strahldurchmessern die Auflösung des Verfahrens noch nicht durch den Desorptionsprozeß selbst begrenzt sein sollte, da die intrinsische Auflösung der Desorption bei etwa 2 nm liegt.

## Abstract

Due to an increasing demand for high-resolution lithography processes, electron- or ion-beam based methods become more and more attractive. Among them, techniques using finely focused beams are the most flexible ones, because they do not require masks and therefore are very well suited for applications in research and for the development of corresponding mask-based methods. In this context, this thesis presents two maskless and ion-beam based lithography techniques that can be used for the generation of Cobalt-disilicide ( $\text{CoSi}_2$ ) structures. Being a metal with low resistivity and a small lattice mismatch to silicon,  $\text{CoSi}_2$  is a very interesting material both for experiments in low-dimensional physics and for wiring applications.

In the first method, called ion beam synthesis, silicon is irradiated with Co ions.  $\text{CoSi}_2$  can then be formed in a thermal annealing step. This thesis reports of the first experiments of this kind with focused ion beams at energies lower than 30 keV. Analytical models for the depth distribution of Co after implantation and for the position of the resulting  $\text{CoSi}_2$  layers have been established and experimentally verified. In ion beam synthesis, the substrate temperature during irradiation has a crucial influence on the quality of the  $\text{CoSi}_2$ : for homogeneous layers, a minimal temperature of 400°C is required. Nevertheless, it has been shown in this work that even for irradiations at room temperature, the quality of  $\text{CoSi}_2$  layers is sufficient for many practical purposes. The smallest specific resistivity measured was 4  $\mu\Omega\text{cm}$ , which is close to values for epitaxial  $\text{CoSi}_2$  known from literature (1.7  $\mu\Omega\text{cm}$ ). It has also been demonstrated that this method is applicable to fragile, micromechanical devices that could not be processed wet-chemically.

The second method is a novel lithography technique for silicon that has been newly developed during the course of this thesis. One of its possible applications is the structuring of  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  heterostructures and thus the generation of  $\text{CoSi}_2$  structures with sub- $\mu\text{m}$  resolution. The technique uses hydrogen that is adsorbed on the silicon surface as a resist layer. The corresponding model assumes that the hydrogen atoms are locally desorbed by irradiation with ions. Subsequently, the irradiated areas can be oxidised, whereas the rest of the surface is passivated against oxidation by the hydrogen layer. This model is investigated in great detail and confirmed with experiments. Other effects induced by the irradiation with ions are accumulation of defects up to amorphisation and interaction of components of the residual gas in the vacuum system with the surface. It is shown that at a substrate temperature of 200°C, these effects are negligible or significantly reduced. A direct analysis of the oxide layer with x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) yields a thick-

ness of only 0.2-0.4 nm. This oxide can be used as a mask in a wet-chemical KOH etch; the maximum depth of the etch is 430 nm. Replacing KOH by TMAH (Tetramethylammoniumhydroxide) resulted in depths of up to 2  $\mu\text{m}$ . The applicability of this lithography process to  $\text{CoSi}_2/\text{Si}$  heterostructures has been demonstrated; a  $\text{CoSi}_2$  wire with a width of 160 nm has been fabricated using this technique. The lateral resolution of the method is only restricted by the diameter of the ion beam used. Commercial focused ion beam systems offer beam diameters as small as 5 nm. An analytical model for the desorption process shows that a single ion only desorbs hydrogen from an area with a diameter of approximately 2 nm. Therefore, it should be expected that the lateral resolution of the lithography method is not limited by the desorption process itself, even for a focused ion beam with a very high resolution.