

Modellierung der Ionenimplantation in Silizium

G. Hobler¹, A. Simionescu¹, S. Herzog¹, L. Palmetshofer², K. Piplits³

¹ Institut für Festkörperelektronik, TU Wien, 1040 Wien

² Institut für Experimentalphysik, Universität Linz, 4040 Linz

³ Institut für Analytische Chemie, TU Wien, 1040 Wien

In diesem Beitrag werden Implantationsexperimente und deren Auswertung zur Modellierung der Ionenimplantation in Silizium präsentiert. Es handelt sich hierbei um Implantationen mit verschiedenen Dosen in [100]-, [110]- und [211]-Channeling-Richtung sowie parallel zu einer (111)-Ebene. An Hand der gemessenen Reichweiten in [100]- und [110]-Richtung wurde ein Modell der elektronischen Abbremsung gechannelter Ionen entwickelt, das sich auch im Fall der [211]- und (111)-Implantationen bewährt. Aus der Dosisabhängigkeit der Implantationsprofile wurde ein verbessertes Modell der Kristallgitterschädigung abgeleitet. Mit Hilfe dieser Modelle konnten Profile von 7° geneigten Implantationen in (100)-Silizium und von 38° geneigten Implantationen in (110)-Silizium erfolgreich simuliert werden.

1. Einleitung

Die Ionenimplantation ist das in der Siliziumtechnologie am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Einbringung von Dotieratomen in den Halbleiterkristall. Hierbei tritt im allgemeinen der sogenannte Channeling-Effekt auf, der eine Vergrößerung der Ionenreichweite in niedrig indizierten Kristallrichtungen zur Folge hat. Die Bedeutung der Modellierung dieses Effektes ergibt sich unter anderem daraus, daß das Verhältnis der Eindringtiefen gechannelter und nicht gechannelter Ionen bei niedrigen Implantationsenergien größer als bei hohen ist und somit der Channeling-Effekt mit fortschreitender Miniaturisierung zunehmend in Erscheinung tritt. Überdies ist man bemüht, die Diffusion der Dotieratome in nachfolgenden Prozeßschritten möglichst gering zu halten, wodurch die korrekte Beschreibung der Implantationsprofile allgemein an Bedeutung gewinnt.

Für Standard-Implantationsbedingungen und große Strukturbreiten ist die Beschreibung von implantierten Dotierstoffprofilen durch analytische Funktionen mit empirisch bestimmten Parametern eine gebräuchliche und effiziente Methode. Die Untersuchung von Effekten, die bei neuen Prozeßkonzepten oder auf Grund der Miniaturisierung auftreten, ist nur mit Hilfe physikalischer Modellierungsansätze möglich. Die Monte-Carlo-Methode, die in der Verfolgung einer statistisch repräsentativen Anzahl von Ionenbahnen besteht, hat sich für diesen Zweck als erfolgreiches Werkzeug erwiesen. Der Channeling-Effekt wird hierbei automatisch modelliert, wenn die Positionen der vom Ion gestoßenen Targetatome gemäß ihrer Anordnung im Kristallgitter gewählt wird. Allerdings werden bei gechannelten Ionen Effekte wirksam, die bei Bewegung in zufälliger („random“) Richtung nicht relevant sind. So beeinflusst die Auslenkung der Targetatome zufolge von Gitterschwingungen das Hinein- und Hinausstreuen der Ionen in die/aus den Kanälen, die elektronische Abbremsung der Ionen in Kanälen ist geringer als in random Richtung und während der Implantation entstehende Kristallgitterdefekte vermindern den Anteil gechannelter Ionen mit zunehmender implantierter Dosis. Die Modellierung der beiden letztgenannten Effekte ist das Thema der vorliegenden Arbeit.

2. Experimente

Die elektronische Abbremsung und das Herausstreuen der Ionen aus den Kanälen kann am besten an Hand von Implantationen in Channeling-Richtung beobachtet werden. Daher wurden Implantationen in [100]-, [110]- und [211]-Richtung bzw. parallel zu einer (111)-Ebene durchgeführt. Als Ionen wurden B bei 20 keV und P bei 25 keV verwendet. Die [100]- und [110]-Implantationen wurden durch senkrechten Einschuß in (100)- bzw. (110)-Wafer realisiert, die [211]- und (111)-Implantationen in (110)-Wafer mit 30° bzw. 10° Neigungswinkel und [111] Kippachse. Die Ausrichtung mit den Channeling-Richtungen wurde mit Hilfe von H-Backscattering feinjustiert. In allen Fällen wurde mit verschiedenen Dosen implantiert, um aus der Dosisabhängigkeit der Profile auf die Menge und die Wirkung der Kristallgitterschäden schließen zu können.

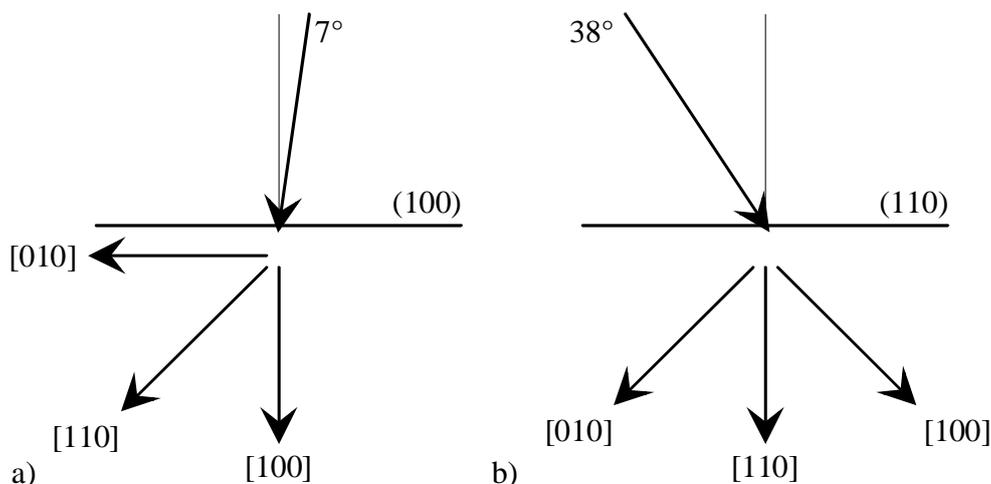


Abb. 1: Kristallographische Richtungen und Ioneneinfallsrichtung a) bei 7° geneigter Implantation in einen (100)-Wafer, b) bei 38° geneigter Implantation in einen (110)-Wafer.

Zusätzlich zu den Channeling-Implantationen wurden Implantationen in (100)-Wafer mit 7° Neigungswinkel und solche mit 38° Neigungswinkel in (110)-Wafer bei [100] Kippachse durchgeführt. Die Motivation für diese Implantationsbedingungen soll an Hand von Abb. 1 erläutert werden. Wird wie weit verbreitet mit einem Neigungswinkel von 7° in einen (100)-Wafer implantiert, so können Ionen nicht nur in den [100]-Kanal senkrecht zur Oberfläche gestreut werden, sondern auch in [110]-Richtungen, die unter 45° zu dieser stehen. Dies hat besondere Bedeutung, da einerseits die [110]-Richtung jene mit der größten Ionenreichweite ist und andererseits die entlang [110] gechannelten Ionen maßgeblich die zweidimensionale Dotierstoffverteilung an Maskenkanten bestimmt (man stelle sich hierzu vor, daß die linke Seite des in Abb. 1a dargestellten Wafers mit einer Maske bedeckt sei). Um in den [110]-Kanal zu gelangen, müssen die Ionen, wie aus Abb. 1a ersichtlich ist, um 38° gestreut werden. Dasselbe gilt, wenn man in einen (110)-Wafer mit 38° implantiert, wobei die solcherart gechannelten Ionen jetzt aber im vertikalen Dotierstoffprofil als Tail zu finden sind und wesentlich einfacher gemessen werden können. Durch Vergleich mit Monte-Carlo-Simulationen wird deren Vorhersagekraft bezüglich zweidimensionaler Dotierstoffverteilungen überprüft, da untersucht werden kann, ob neben der Reichweite und dem Herausstreuen aus den Kanälen auch das Hineinstreuen in die Kanäle um große Winkel korrekt beschrieben wird.

Die implantierten Dotierstoffprofile wurden mit Hilfe von SIMS an einer Cameca-IMS-3f-Anlage gemessen. Die Messung der B- (P-) Profile erfolgte mit einem O_2^+ (Cs^+) Primärstrahl mit einer Energie von 5.5 keV (14.5 keV). Für die Gewinnung der P-Profil wurde eine extreme Energiefilterung vorgenommen, um ^{30}SiH Cluster-Interferenzen zu vermeiden. Die Kratertiefen wurden mit einem Sloan-Dektak-Profilometer ermittelt.

3. Modellierung

Alle Simulationen wurden mit dem Monte-Carlo-Programm IMSIL [1] durchgeführt. Hier sollen nur die Modelle für die elektronische Abbremsung und für die Gitterschäden beschrieben werden [2], die im Rahmen der Arbeit verbessert wurden. In beiden Fällen wurde ein phänomenologischer Ansatz gewählt, der die wesentlichen Merkmale richtig beschreibt. Die elektronische Abbremsung wird in einen ortsunabhängigen Anteil und einen exponentiell mit zunehmendem Stoßparameter abnehmenden Anteil aufgeteilt. Das Modell ist so formuliert, daß die mittlere Abbremsung, die in random Richtung beobachtet wird, automatisch mit den aus der Literatur bekannten Werten übereinstimmt. Der Gewichtungsfaktor der beiden Anteile sowie die Abschirmlänge des stoßparameterabhängigen Terms wurden an [100]- und [110]-Implantationsprofile angepaßt. Wie aus Abb. 2a am Beispiel von B zu sehen ist, lassen sich mit diesem Modell nicht nur Channeling-Profilen in diesen beiden Richtungen gut simulieren, sondern auch solche in [211]-Richtung und entlang einer (111)-Ebene.

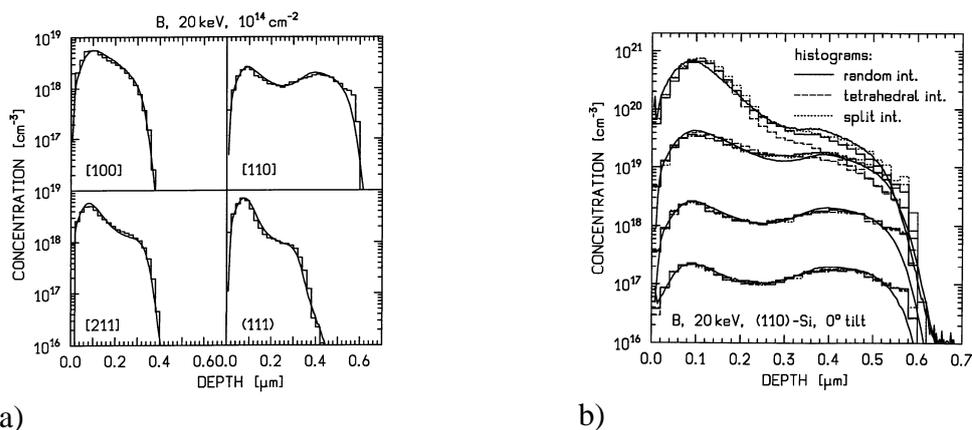


Abb. 2: Vergleich von gemessenen (kontinuierliche Linien) und simulierten 20 keV B-Profilen (Histogramme) nach Implantation a) in verschiedenen Channeling-Richtungen sowie b) mit verschiedenen Dosen in [110]-Richtung. Die verschiedenen Simulationen im rechten Bild korrespondieren zu verschiedenen Annahmen über die Position der Defekte.

Bei der Modellierung der Kristallgitterschäden muß man einerseits die Menge der Schäden richtig beschreiben, andererseits die Art der Gitterdefekte, da diese die Wirksamkeit bezüglich des Hinein- bzw. Herausstreuens in die bzw. aus den Kanälen bestimmt. Grundsätzlich wird angenommen, daß eine Leerstelle entsteht, wenn das Ion eine größere Energie als die „Displacementenergie“ von 15 eV auf ein Targetatom überträgt. Kommt das Targetatom zum Stillstand, so entsteht an dieser Stelle ein Zwischengitteratom, wobei das Targetatom auf seinem Weg weitere Targetatome anstoßen kann, wodurch es zu einer Stoßkaskade kommt. Auf diese Weise kann die Anzahl der von ihrem Gitterplatz entfernten Atome abgeschätzt werden. Allerdings tritt unter realen

Bedingungen insbesondere bei B während des Abkühlens der Kaskaden Rekombination auf, wodurch die tatsächlich zurückbleibende Menge an Gitterschäden reduziert wird. Es wurde gefunden, daß dieses Ausheilen der Defekte durch einen ionenart-, nicht aber orts- oder energieabhängigen Faktor f_{rec} sowie durch eine Sättigungsdichte N_{sat} der Defekte beschrieben werden kann. Zur Beantwortung der Frage nach der Position der Defekte wurden 3 verschiedene Hypothesen getestet: Aufenthalt an vollkommen zufälligen (random) Positionen, tetraedrische Interstitials sowie split-(110)-Interstitials. In Abb. 2b sind die mit diesen 3 Annahmen und den optimierten Werten von f_{rec} und N_{sat} erzielten Ergebnisse mit den experimentellen Profilen verglichen. Es ist zu erkennen, daß das split-Interstitial-Modell und das random-Modell nahezu gleichwertig sind, das tetraedrische Interstitialmodell jedoch versagt.

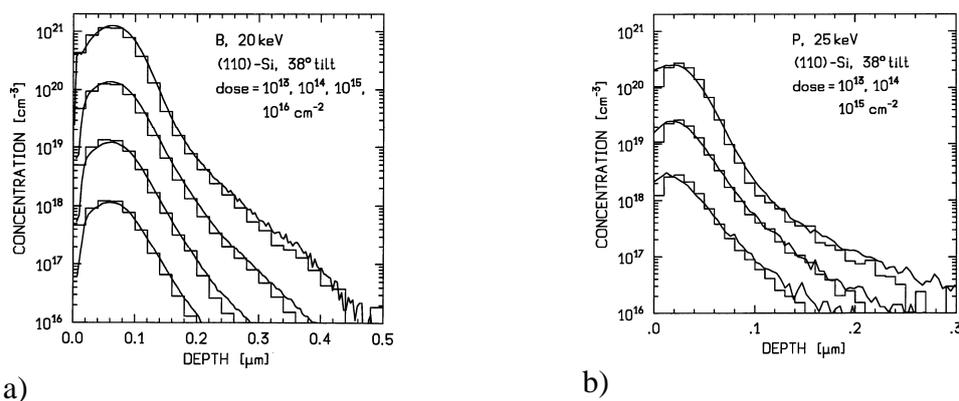


Abb. 3: Vergleich von gemessenen (kontinuierliche Linien) und simulierten Profilen (Histogramme) nach Implantation mit 38° Neigungswinkel in einen (110)-Wafer. a) B, 20 keV, b) P, 25 keV.

Schließlich sind in Abb. 3 die Ergebnisse der 38° B- und P-Implantationen in (110)-Silizium gezeigt. Exzellente Übereinstimmung kann beobachtet werden, wobei zu beachten ist, daß bei diesen Simulationen keinerlei anpaßbare Parameter verwendet wurden. Die langen Tails bei den hohen Dosen lassen darauf schließen, daß [110]-Channeling einen beträchtlichen Einfluß auf zweidimensionale Dotierstoffprofile hat.

Danksagung

Diese Arbeit wurde vom Jubiläumsfonds der Österreichischen Nationalbank, Projekt Nr. 4880 und von der Hochschuljubiläumsstiftung der Stadt Wien gefördert. Die Autoren danken R. von Criegern (Fa. Siemens, München) für die Durchführung von SIMS-Vergleichsmessungen.

Literaturverzeichnis

- [1] G. Hobler: „Monte Carlo simulation of two-dimensional implanted dopant distributions at mask edges“, Nucl. Instr. Meth. B, 1995 (im Druck).
- [2] G. Hobler, A. Simionescu, L. Palmetshofer, C. Tian, G. Stinger: „Boron channeling implantations in silicon: Modeling of electronic stopping and damage accumulation“, J. Appl. Phys. 77 (8) 1995 (im Druck).