

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

FZR-323

Mai 2001

ISSN 1437-322X

Archiv-Ex.:



Jochen Teichert und Johannes von Borany

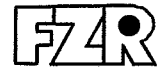
**Entwicklung einer Niederenergie-
Implantationskammer mit einem neuartigen
Bremslinsensystem**

Herausgeber:
Forschungszentrum Rossendorf e.V.
Postfach 51 01 19
D-01314 Dresden
Telefon +49 351 26 00
Telefax +49 351 2 69 04 61
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE



FZR-323

Mai 2001

Jochen Teichert und Johannes von Borany

**Entwicklung einer Niederenergie-
Implantationskammer mit einem neuartigen
Bremslinsensystem**

Zusammenfassung

In diesem Report wird eine Niederenergie-Implantationskammer (NEI-Kammer) beschrieben, die im Forschungszentrum Rossendorf entwickelt und aufgebaut wurde. Die Kammer ermöglicht es, die Implantation von Ionen bei niedrigen Energien (< 30 keV) mit einer Implantationsanlage für mittlere Energien durchzuführen. In der Kammer wird der Ionenstrahl, den der Implanter liefert, auf die erwünschte niedrige Energie abgebremst. Dazu wird ein elektrostatisches Bremslinsensystem eingesetzt, das auf einem neuartigen Prinzip basiert. Das System besteht aus einer Sammellinse und einer Zerstreuungslinse, wobei die Öffnungsfehler beider Linsen entgegengesetzte Vorzeichen besitzen und sich gegenseitig kompensieren. Dadurch ist es möglich, Wafer gebräuchlicher Größe bei geringer Energie mit hoher Dosisinhomogenität zu implantieren. Die NEI-Kammer ist insbesondere für Forschungseinrichtungen eine vorteilhafte Lösung, da sie eine wesentlich kostengünstigere und flexiblere Alternative zur Anschaffung einer Niederenergie-Implantationsanlage darstellt.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	5
2.	Anforderungen und Zielstellung	7
3.	Bremslinsensystem	9
4.	Aufbau der NEI-Kammer	16
5.	Betriebsbedingungen und Testergebnisse	18
6.	Zusammenstellung der Parameter	22
7.	Literaturverzeichnis	23

1. Einführung

In der modernen Silizium-Technologie zur Herstellung mikroelektronischer Schaltkreise gewinnen Verfahren der Niederenergie-Ionenimplantation zunehmend an Bedeutung. So erfordert beispielsweise die stetige Verkleinerung der Bauelemente-Dimension die Erzeugung sehr flacher pn-Übergänge [1-3]. Bei der Ionenstrahlsynthese von Halbleiterclustern in dielektrischen Schichten oder für die Erzeugung oberflächennaher Silizidschichten kommen ebenfalls Ionenstrahlverfahren zum Einsatz, die einen massenselektierten Ionenstrahl geringer Eindringtiefe benötigen. Da das Implantationsprofil (Reichweite, Breite) unmittelbar durch die Energie der Ionen bestimmt wird, ergibt sich daraus die Forderung der Implantation bei niedrigen Ionenenergien.

Für industrielle Zwecke werden gegenwärtig spezielle Implantationsanlagen zur Niederenergie-Implantation (Energiebereich 1 bis 30 keV) entwickelt und eingesetzt. Ein ernsthaftes Problem der Niederenergie-Ionenimplantation stellt die raumladungsbedingte Strahlaufweitung dar, das mit sinkender Ionenergie oder steigender Strahlstromdichte an Bedeutung noch zunimmt. Andererseits müssen Siliziumscheiben immer größeren Durchmessers homogen implantiert werden. Um diese Herausforderungen gleichermaßen zu erfüllen, besitzen diese Anlagen ein sehr kurzes Strahlführungssystem und eine ausgefeilte Ionenoptik.

Bedingt durch die industrielle Relevanz werden die mit der Niederenergie-Ionenimplantation verbundenen wissenschaftlichen Fragestellungen (z.B. Ionenkanalisierung in kristallinen Festkörpern, strahlenbeschleunigte Diffusion, Evolution von Nanoclustern) auch in wissenschaftlichen Einrichtungen zunehmend bearbeitet. Für diese stellt jedoch die Anschaffung einer speziellen Niederenergie-Implantationsanlage zumeist keine günstige Lösung dar. Solche Anlagen sind sehr kostenintensiv und wegen ihrer sehr spezialisierten technischen Auslegung hinsichtlich der Nutzung einer Ionenart und des Waferhandling nicht geeignet, die unterschiedlichen und breitgefächerten Aufgabenstellungen zu erfüllen, wie sie für Forschungseinrichtungen typisch sind.

Für diesen Anwendungsbereich stellt die Erzeugung niederenergetischer Ionen durch einen ionenoptischen Abbremsprozeß eine geeignete Alternative dar. Dabei wird ein Ionenstrahl üblicher Energie (20 - 100 keV) in eine (separate) Implantationskammer eingeführt und die Ionen vor der Probe auf die gewünschte geringe Energie (< 20 keV) abgebremst. Eine derartige Niederenergie-Implantationskammer hat verhältnismäßig geringe Anschaffungskosten und kann an einem vorhandenen Mittelenergie-Implanter betrieben werden, der daneben weiterhin für andere Implantationszwecke genutzt werden kann.

Die Erzeugung niederenergetischer Ionen durch Abbremsen der Ionen infolge eines positiven Hochspannungspotentials am Probenhalter ist eine seit langem bekannte Methode. Jedoch besitzt sie auch eine Reihe von Nachteilen. In der Regel sind derartige Implantationskammern als Einscheiben-Anlagen gestaltet, da die Auslegung eines Probenrades auf Hochspannungspotential den technischen Aufwand beträchtlich erhöht.

Dies begrenzt den Probendurchsatz, was jedoch für Forschungseinrichtungen zumeist von untergeordneter Bedeutung ist. Ein höherer technischer Aufwand wird auch nötig, wenn die zu implantierenden Proben geheizt oder gekühlt werden sollen, und dabei die Temperatur zu erfassen ist. Bei Forschungseinrichtungen tritt dies relativ häufig auf. Andererseits stehen die Kosten für diesen zusätzlichen Aufwand in keinem Verhältnis zu denen eines Niederenergie-Implanters.

Das Hauptproblem der Bremsfeldmethode ist jedoch ionenoptischer Art: Bedingt durch das Bremsfeld vor der Probe werden die Ionenbahnen gekrümmt, das Strahlenbündel weitet sich radial auf und als Folge wird die Probe in Abhängigkeit vom Radius sowohl mit unterschiedlichen Einfallswinkeln (Ionenreichweite) als auch mit unterschiedlicher Dosis implantiert. Für viele Experimente mit kleinen Proben ist dies zu akzeptieren und daher wird die Bremsfeldmethode relativ häufig angewandt. Problematisch wird die Dosisinhomogenität und der divergierende Einfallswinkel der Ionen für Implantationen, die für Forschungsaufgaben auf dem Gebiet der Halbleitertechnologie durchgeführt werden. Hier müssen aus Gründen der Kompatibilität auch in Forschungsanlagen größere Wafer (min. 100 mm) bearbeitet und dabei die in der industriellen Fertigung üblichen Toleranzen eingehalten werden. Diese Anforderungen sind weder mit einem auf Hochspannungspotential befindlichem Probenhalter noch mit den bisher bekannten Bremslinsen erfüllbar.

In dieser Arbeit wird ein neuartiges elektrostatisches Bremslinsensystem vorgestellt, welches das Problem der Dosisinhomogenität bei der Niederenergie-Ionenimplantation löst. In ersten Teil wird das zugrundeliegende Konzept erläutert und die Ergebnisse ionenoptischer Rechnungen vorgestellt. Ausgehend von diesen Überlegungen wird im zweiten Teil der Arbeit die konstruktive Auslegung einer Niederenergie-Implantationskammer beschrieben, wie sie in Rossendorf realisiert wurde. Abschließend werden einige experimentelle Ergebnisse vorgestellt, wie sie bei der Implantation flacher Dotanden-Profile erhalten wurden.

2. Anforderungen und Zielstellung

Die Auslegung der Niederenergie-Implantationskammer (NEI-Kammer) und des ionenoptischen Systems resultieren zum einen aus den geforderten Implantationsparametern und zum anderen aus den technischen Bedingungen bei der Anbindung an die bestehende Implantationsanlage. Hierfür sollte eine einfache, flexible und kostengünstige Lösung gefunden werden. Im FZR wurde unter mehreren Möglichkeiten die Anbindung an die Beamline 2 des Hochstrom-Implanters DANFYSIK 1090 ausgewählt, an dem bereits ein elektrostatisches Scansystem für 100 mm Wafer vorhanden ist. Eine Demontage der an der Beamline befindlichen Implantationskammer war nicht notwendig, da in der Kammer in Strahlrichtung eine Austrittsöffnung (KF 160) vorhanden ist und die NEI-Kammer somit unmittelbar an diese Kammer angesetzt werden kann. Der Aufbau der Anlage ist schematisch in *Abb. 1* dargestellt. Von den verfügbaren Standard-Komponenten der Beamline werden die Strahlrastereinrichtung, das Dosismesssystem (Faraday-Cup) und verschiedene Blenden verwendet. Auf dem Probenrad der Beamline-Implantationskammer können spezielle Si-Blenden montiert werden, um Kontaminationen der Si-Wafer durch Sputtereffekte am Blendenrand zu vermeiden.

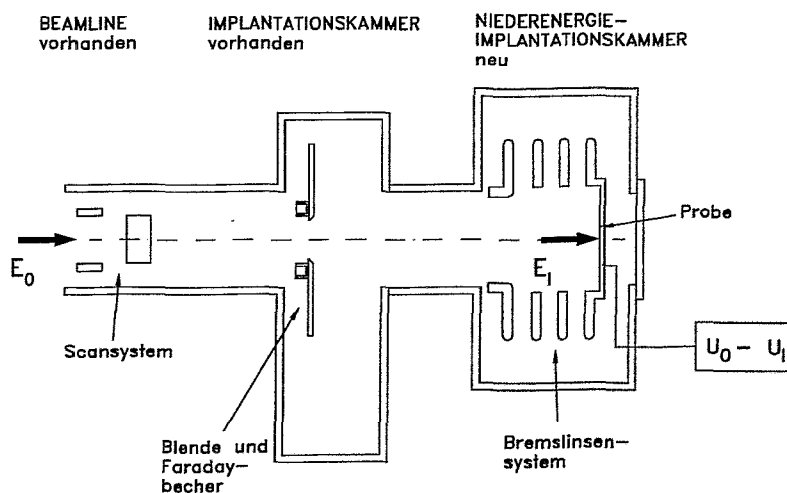


Abb.1: Schematische Darstellung der Komponenten für die Niederenergie-Implantation. Der Ionenimplanter (links) liefert einen Primärstrahl der Energie E_0 . Im Bremslinsensystem der NEI-Kammer (rechts) werden die Ionen auf die Implantationsenergie E_1 abgebremst. Dazu liegt die Probe auf dem Hochspannungsbremspotential $U_B = (E_0 - E_1)/e$.

Die Probleme der Strahlabbremmung verschärfen sich mit zunehmendem Abbremsverhältnis (Primärenergie zu Implantationsenergie). Deshalb ist es günstig, mit einer möglichst kleinen Primär-Ionenenergie des Implanters in die NEI-Kammer einzuschließen. Dabei ist zu beachten, daß die Strahlstromdichte im unteren Energiebereich eines Implanters oft deutlich geringer wird. Im vorliegenden Fall des Implanters DANFYSIK 1090 tritt dieser Fall für Energien unterhalb 30 keV ein (z.B. Stromreduzierung um Faktor 3 bei 20 keV), wobei gleichzeitig die Größe des ungescannten Strahlfleckes infolge der sich verschlechternden Fokussierungseigenschaften des Strahles zunimmt. Beide Effekte verringern die verfügbare Ionenstromdichte und vergrößern damit die Implantationszeit. Daher wurde entschieden, die Niederenergie-Implantation für eine Primär-Ionenenergie von 30 keV auszulegen. Die in der NEI-Kammer für die Abbremsung notwendigen Spannungen bis etwa 30 kV sind ohne große Schwierigkeiten beherrschbar.

Die Anlage wurde primär für die Aufgaben im Rahmen eines laufenden Forschungsprojektes (Ionenstrahlsynthese von Halbleiter-Nanoclustern in dünnen SiO₂-Schichten) aufgebaut. Die Zielstellung dieses Projektes bestimmte auch die Vorgaben hinsichtlich der zu erreichenden Implantationsparameter:

- Energiebereich der Implantation: 2 - 20 keV
- Dosisinhomogenität: < 5%
für Wafergröße Ø100 mm bei E > 5 keV
- Einfallswinkel der Ionen: senkrecht
- Winkelabweichung: < 6°
für Wafergröße Ø100 mm bei E > 5 keV
- Substrate: Si-Wafer, 125 mm Durchmesser

Um eine gewisse Flexibilität hinsichtlich zukünftiger Aufgabenstellungen zu gewährleisten, wurden bei der Entwicklung des Bremslinsensystems darüber hinausgehend folgende Zielparameter angestrebt:

- Abbremsspannung bis 30 keV, d.h. bei reduzierten Anforderungen hinsichtlich der Dosisinhomogenität oder bei kleinen Proben können 30 keV Primärionen auch auf sehr kleine Ionenenergien < 1 keV abgebremst werden,
- Möglichkeit der Implantation von Si-Wafern bis 150 mm Durchmesser,
- kompakter Aufbau des Linsensystems mit kurzem Strahlweg (geringes Kammervolumen),
- einfacher und schneller Probenwechsel, kurze Pumpzeiten,
- optionale Möglichkeiten für Probenheizung oder Kühlung sowie die Temperaturmessung am Probenstisch.

3. Bremslinsensystem

Eine homogene Ionenimplantation wird erreicht, wenn der Strahlfleck mit konstanter Geschwindigkeit in horizontaler und vertikaler Richtung über die Probe geführt wird und der Strahlfleck vollständig jeden Punkt der zu implantierenden Fläche überstreicht. Die konstante Ablenkgeschwindigkeit wird durch entsprechend genau geführte Ablenkpotentiale (zumeist Dreieckimpulse) an den Platten des elektrostatischen Scansystems erreicht. Anhand von vier Faraday-Bechern an den Eckpunkten der Implantationsfläche wird kontrolliert, daß das Implantationsgebiet (begrenzt durch Blenden) vollständig überstrichen wird, und über eine Strommessung gleichzeitig die Implantationsdosis bestimmt.

Ohne Abbremsung bewegen sich die Ionen auf Geraden. Eine zeitlich konstante Änderung des Ablenk winkels $d\alpha_0/dt$ führt zu einer konstanten Rastergeschwindigkeit dr_i/dt des Strahls auf der Probe, da $r_i(\alpha_0) = d \alpha_0$, d.h. r_i proportional zu α_0 ist. Der Proportionalitätsfaktor d ist dabei der Abstand zwischen Ablenkpunkt und Probe (s. *Abb. 2*). Es ist offensichtlich, daß die Dosishomogenität dann gestört wird, wenn bedingt durch das Abbremsfeld, die Proportionalität zwischen r_i und α_0 nicht mehr gilt.

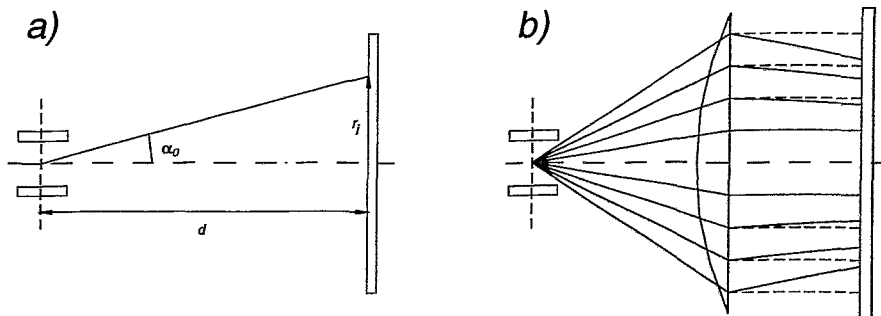


Abb.2: Strahlrasterung bei normaler Implantation (a) und bei der Abbremsung (b). Das Bremspotential wirkt für die Ionenstrahlen als Linse. Infolge des Abbildungsfehlers der Linse wird die Proportionalität zwischen dem Ablenk Winkel α_0 und dem Auftreffpunkt auf der Probe gestört (durchgezogene Trajektorien). Die für eine homogene Implantation idealen Ionentrajektorien (äquidistante Bahnen) sind gestrichelt eingezeichnet.

Als Beispiel sind die in den *Abb. 3a und 3b* berechneten Ionentrajektorien dargestellt. Die Startwinkel sind dabei jeweils so gewählt worden, daß sich die Bahnen in ihrer rückwärtigen Verlängerung im Ablenkpunkt mit konstanter Winkelgeschwindigkeit

schneiden. In **Abb. 3a** ist der Targethalter einfach auf Hochspannungspotential gelegt worden: die Aufweitung der Ionenbahnen ist deutlich zu erkennen. Mit wachsendem Probenradius vergrößert sich der Abstand zwischen den auftreffenden Bahnen, was einer Abnahme der Implantationsdosis in radialer Richtung entspricht. Das umgekehrte Verhalten zeigt **Abb. 3b**. Hier sind Bahnen dargestellt, wie sie sich unter Verwendung einer Bremslinse ergeben, in der eine zusätzliche Fokussierungs-Elektrode vor dem Substrathalter angeordnet wurde. Die Ionenbahnen werden mit zunehmendem Radius dichter, d.h. die Implantationsdosis nimmt zu.

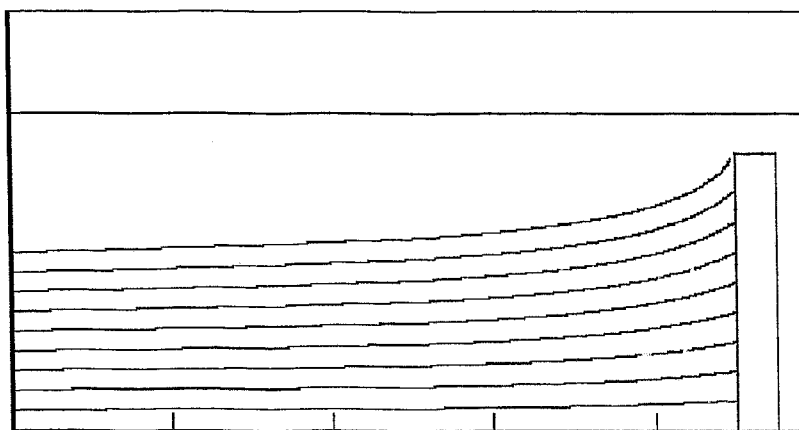


Abb. 3a: Berechnete Ionenbahnen für eine Abbremsung auf 5 keV. Das Strahlrohr befindet sich auf dem Potential $U = 0$ (oben) und der Probenhalter auf einem Potential von 25 kV. Die Ionen werden mit 30 keV eingeschossen.

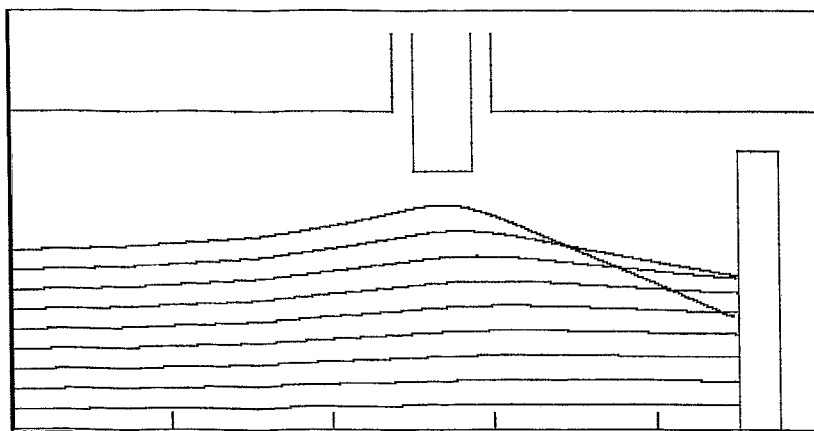


Abb. 3b: Berechnete Ionenbahnen bei einer Abbremsung auf 5 keV mit einer zusätzlichen Linse. Das Strahlrohr (links oben) befindet sich auf Masse, die Linsenelektrode (Mitte oben) auf 30 kV, das folgende Rohr (rechts oben) und der Probenhalter (rechts) auf 25 kV. Die Ionen werden mit 30 keV eingeschossen.

Betrachtet man den Sachverhalt vom Standpunkt der Aberrationstheorie der Teilchenoptik und berücksichtigt die Rotationssymmetrie der Anordnung, so gilt

$$r_i = M \alpha_0 + c_s \alpha_0^3 \quad (1)$$

wobei der 1. Term der rechten Seite den erwünschten proportionalen Zusammenhang zwischen r_i und α_0 darstellt (ohne Bremsfeld ist $M = d$) und der 2. Term die unerwünschte Nichtlinearität in dritter Potenz von α_0 auftritt. Die Größe c_s ist dabei der Öffnungsfehler (sphärischer Aberrationskoeffizient). Es ist bekannt, daß im Falle rotationssymmetrischer magnetischer und elektrostatischer Linsen *Scherzers Theorem* [4] gilt, nachdem achsenferne Strahlen stärker gebrochen werden ($c_s < 0$). In der Teilchenoptik ist daher - im Gegensatz zur Lichthoptik - eine Kompensation des Öffnungsfehlers nicht möglich. Es gibt jedoch eine Ausnahme: Scherzers Theorem gilt nicht, wenn sich Objekt oder Bild (hier die Probe) im Feld befinden. Das Beispiel in *Abb. 3a* zeigt den in diesem Fall möglichen positiven Öffnungsfehler ($c_s > 0$).

Das entwickelte Bremslinsensystem nutzt diesen Sachverhalt der möglichen Kompensation des Öffnungsfehlers aus. Wie in *Abb. 4* dargestellt, wird eine Kombination aus einer zerstreuenen Bremslinse (gebildet von Probenhalter und Probe sowie einer zusätzlichen Elektrode) mit positiven Öffnungsfehler-Koeffizienten und einer Sammellinse mit negativem Öffnungsfehler-Koeffizienten angewandt. Bei geeigneter Wahl heben sich die beiden Fehlerkoeffizienten auf und der Öffnungsfehler des gesamten Linsensystems c_s in Gl. (1) wird nahezu Null. Für diesen Fall sollte eine homogene Implantation über große Scheibendurchmesser auch für kleine Ionenenergien möglich sein.

Die konkrete Auslegung des Linsensystems hinsichtlich der Anzahl und Form der Elektroden sowie deren Potentialen erfolgte im Ergebnis detaillierter ionenoptischer Berechnungen. Für die Simulation der elektrischen Feldverteilung und der Ionentrajektorien wurde das Programm SAM/P [5] angewandt. Die in den Berechnungen untersuchten Varianten und durchgeführten Parametervariationen wurden hinsichtlich der Zielkriterien (vgl. Abschnitt 2) bewertet. Die Optimierung hinsichtlich eines kompakten und kurzen Aufbaus führte letztendlich zu einer Lösung, bei der sich die elektrischen Feldverteilungen beider Linsen überlagern, wobei eine Elektrode gemeinsam für beide Linsen verwendet wird. *Abb. 5* zeigt das Schnittbild der Elektroden des Bremslinsensystems. Das Linsensystem besteht aus vier Elektroden. Die in Strahlrichtung vorn liegende Sammellinse besteht aus der Masseelektrode, der Fokussierungselektrode und der Steuerelektrode. Die Steuerelektrode bildet zusammen mit der Bremsselektrode die defokussierende Bremslinse. Der Innendurchmesser der Elektroden beträgt 200 mm und der Abstand von der ersten Elektrode bis zur Probe 180 mm.

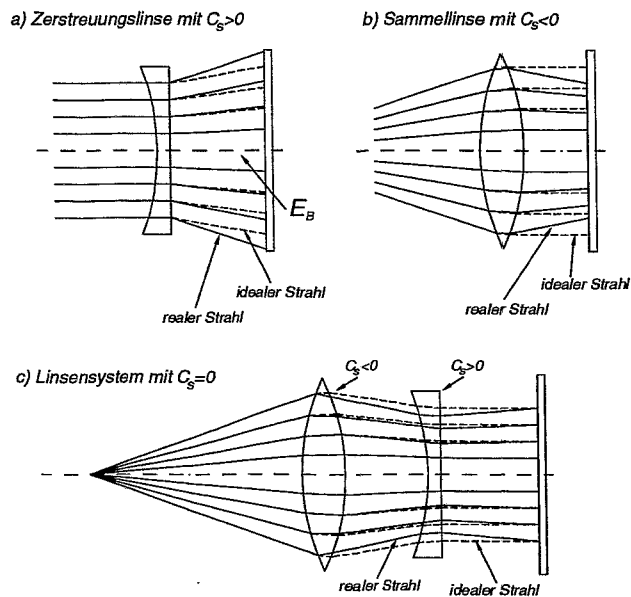


Abb. 4: Schematische Darstellung der Abbildungsfehler bei einer Zerstreuungslinse mit negativen Öffnungsfehler c_s (a), wobei diese Linse durch das Bremsfeld vor der Probe gebildet wird, bei einer Sammellinse mit positiven Öffnungsfehler (b), und der Kompensation des Öffnungsfehler durch die Kombination beider Linsen (c).

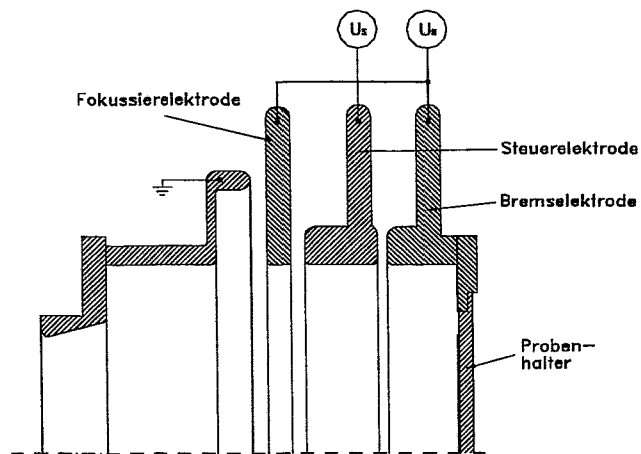


Abb. 5: Formgebung und Anordnung der Elektroden des Bremslinsensystems.

Das Linsensystem erfordert zwei Hochspannungen positiver Polarität für die Bremsspannung (Brems- und Fokussierungs-Elektrode) und die Steuerspannung (Steuer-Elektrode). Entsprechend der angestrebten Implantationsenergie muß das Linsensystem mit unterschiedlichen Bremsspannungen betrieben werden. Um dabei die Bedingung eines vernachlässigbar kleinen Öffnungsfehler-Koeffizienten einhalten zu können, muß die Steuerspannung in Abhängigkeit vom Bremspotential definiert nachgeführt werden. In *Abb. 6* ist der berechnete Öffnungsfehler-Koeffizient $c' = c_s/d$ als Funktion der Steuerspannung für unterschiedliche Implantationsenergien dargestellt. Der Nulldurchgang dieser Kurven entspricht der optimalen Steuerspannung

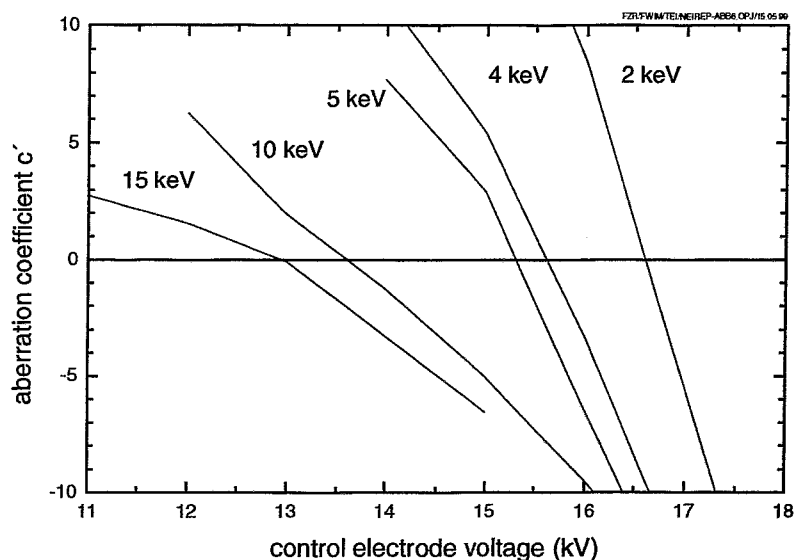


Abb. 6: Graphische Darstellung des berechneten Öffnungsfehler-Koeffizienten als Funktion der Spannung an der Steuerelektrode für den Fall, daß die Ionen von 30 keV auf Energiewerte zwischen 15 und 2 keV abgebremst werden.

Die Auswahl der geeigneten Elektrodenkonfiguration und ihre Optimierung wurde durch numerische Berechnungen auf der Basis der Bildfehlertheorie 3. Ordnung, wie sie Gl. (1) repräsentiert, durchgeführt. Diese Theorie verwendet eine Potenzentwicklung und ist gültig, solange der Abstand der Ionenbahnen zu optischen Achse wesentlich kleiner als der Bohrungsradius der Elektroden ist. Diese Voraussetzung ist nur bedingt erfüllt. Deshalb wurden als Test und um die Dosisinhomogenität genau zu bestimmen, Rechnungen mit vollständiger Bahnsimulation durchgeführt. Aus den ermittelten Trajektorien ist die radiale Verteilung der Ionenflußdichte $I(r_i)$ in der Targetebene mittels

$$I(r_i) = I_0 \frac{r_0}{r_i} \left(\frac{\partial r_i}{\partial r_0} \right)^{-1} \quad (2)$$

berechenbar. Dabei ist I_0 die Ionenflußdichte auf der optischen Achse, r_i ist der Radius des Auftreffpunkts auf das Target der Ionenbahn, die am Eingang des Linsensystems den Radius r_0 hat. Berechnet werden eine große Anzahl Bahnen, so daß die Funktion $r_i = f(r_0)$ ermittelt werden kann. In Gl.(2) wird die Ableitung $\partial r_i / \partial r_0$ dieser Funktion benötigt. Die berechnete Ionenflußdichte über dem Probenradius ist in *Abb. 7* für eine Abbremsung der Ionen von 30 keV auf 5 keV dargestellt. Das Resultat bestätigt das Konzept, auf dem das entwickelte Bremslinsensystem basiert, und die Gültigkeit der Ansätze der Optimierungsstrategie. Die Zielstellung einer Dosisinhomogenität von $< 5\%$ für 100 mm Implantationsfläche kann erfüllt werden.

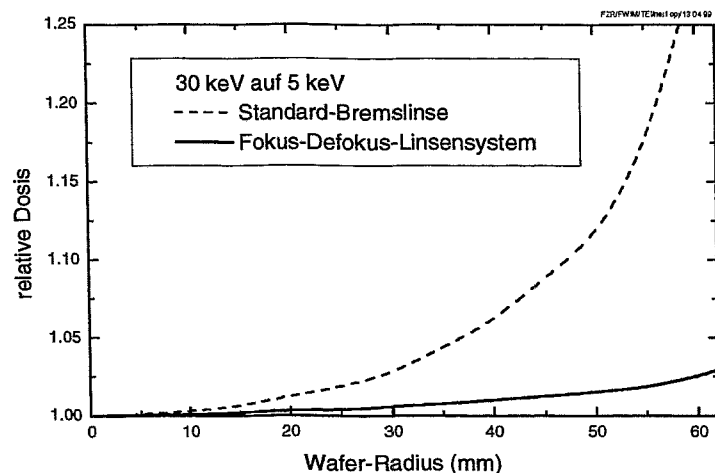


Abb. 7: Berechnete Implantationsdosis bezüglich des Werts auf der Wafermitte für eine Abbremsung der Ionen von 30 keV auf 5 keV bei optimal gewählter Spannung an der Steuerelektrode. Zum Vergleich ist die Kurve für eine Standard-Bremslinse dargestellt, bei welcher der Öffnungsfehler nicht kompensiert ist.

Im folgenden soll ein weiterer wesentlicher Vorteil des entwickelten Systems genannt werden. In herkömmlichen Bremslinsensystemen mit negativen Öffnungsfehler-Koeffizienten besteht die Gefahr, daß $\partial r_i / \partial r_0$ negativ werden kann (s. Gl. (1)). Wird die Eintrittsblende nicht hinreichend klein gewählt, tritt nicht nur eine Dosiszunahme mit wachsendem Radius auf dem Wafer auf, sondern die starke Brechung achsenferner Strahlen führt zu einer Fokussierung außen liegender Ionentrajektorien auf die Scheibenmitte und damit zu einer wesentlich größeren Implantationsdosis in diesem Bereich. Entsprechende Effekte sind in Ref. [6] publiziert worden. Dieser Effekt tritt bei der hier vorgestellten Ionenoptik nicht auf.

Eine 3D-Darstellung der Konstruktion des Linsensystems zeigt die *Abb. 8*. Die Ansicht ist von hinten entgegen der Ionenstrahlrichtung gezeichnet. Der äußere Durchmesser der Elektroden beträgt 370 mm, so daß das Linsensystem in eine Vakuumkammer mit Durchmesser DN 400 eingebaut werden kann. Die Elektroden sind untereinander über Stützisolatoren oder Stehbolzen verbunden. Das Linsensystem wird mit der Masselektrode am Kammerdeckel befestigt. Die Bremslektrode ist ohne Probenhalter gezeichnet. Nur die Öffnung mit dem Bajonettverschluß zur Befestigung des Probenhalters ist sichtbar.

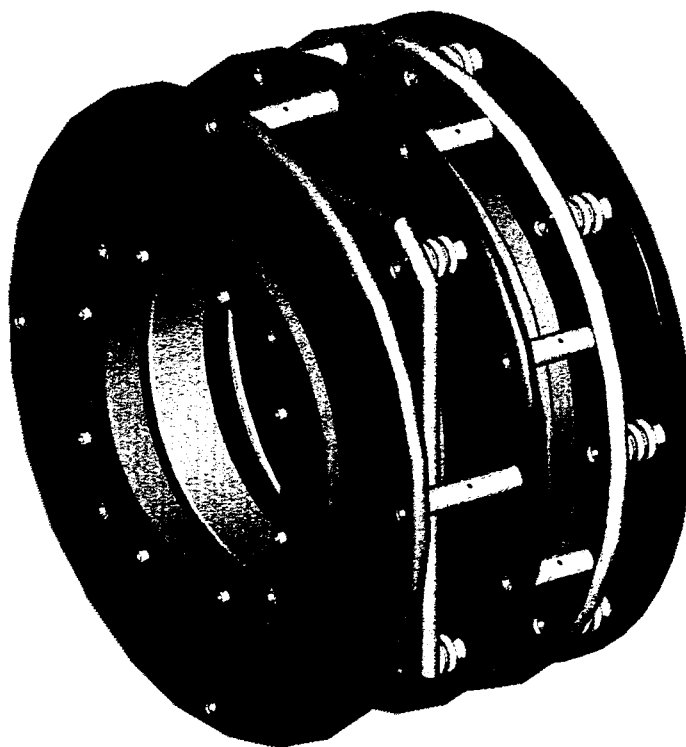


Abb. 8: Dreidimensionale Ansicht des Bremslinsensystems.

4. Aufbau der NEI-Kammer

Die NEI-Kammer wurde zusammen mit allen Versorgungseinrichtungen auf einem fahrbaren Gestell montiert, was einerseits einen vakuumtechnisch autarken Betrieb der Kammer und andererseits einen schnellen An- und Abbau an die Beamline ermöglicht. Die Hauptkomponenten des Implantationsstandes sind:

- die Hochvakuumkammer,
- die Komponenten zur Vakuumerzeugung und Messung,
- das elektrostatische Bremslinsensystem mit Probenhalter,
- die Hochspannungsversorgung.

Zusätzlich existiert ein spezieller Probenhaltertisch, der einen schnellen Probenwechsel ermöglicht. Das Vakuumsystem arbeitet unabhängig von dem des Ionenimplanters. Die Kammer besteht aus einem zylindrischen Grundkörper von 400 mm Außendurchmesser und etwa 300 mm Länge. Die Verbindung mit der Implantations-Beamline erfolgt über einen Faltenbalg mit Flansch der Größe DN 160. Die NEI-Kammer kann vakuumtechnisch über einen Schieber von der restlichen Beamline getrennt werden. Im rückwärtigen Kammerdeckel befindet sich eine Schnellverschlusstür. Für die Erzeugung der Brems- und Steuerspannung werden zwei 35 kV Hochspannungsgeräte genutzt.

In das Probenrad der Standard-DANFYSIK-Implantationskammer können zusätzliche Blenden unterschiedlicher Größe eingesetzt werden. Vorteile sind die Möglichkeit des Blendenwechsels bei angeflanschter NEI-Kammer und die Verwendung von Si-Blenden, um Kontaminationen der Wafer durch Sputtereffekte an den Blendenrändern zu vermeiden. Die NEI-Kammer ist für eine Einzelscheiben-Bearbeitung ausgelegt. Zum Probenwechsel muß daher die Kammer belüftet werden (N_2 trocken, $T > 300$ K). Durch das separate Pumpsystem der Kammer und die Unterstützung der Kryo-Pumpsystems der Beamline für Drücke unterhalb 3×10^{-5} mbar kann eine Zykluszeit zwischen zwei Implantationen von etwa 20 min erreicht werden. Der Basisdruck in der NEI-Kammer bei der Implantation beträgt $< 5 \times 10^{-6}$ mbar, als Kammer-Enddruck kann ein Wert von 2×10^{-7} mbar erreicht werden. *Abb. 9* zeigt die NEI-Kammer während des Implantationsbetriebs an der Beamline 2 des DANFYSIK 1090 Implanters im FZ Rossendorf.

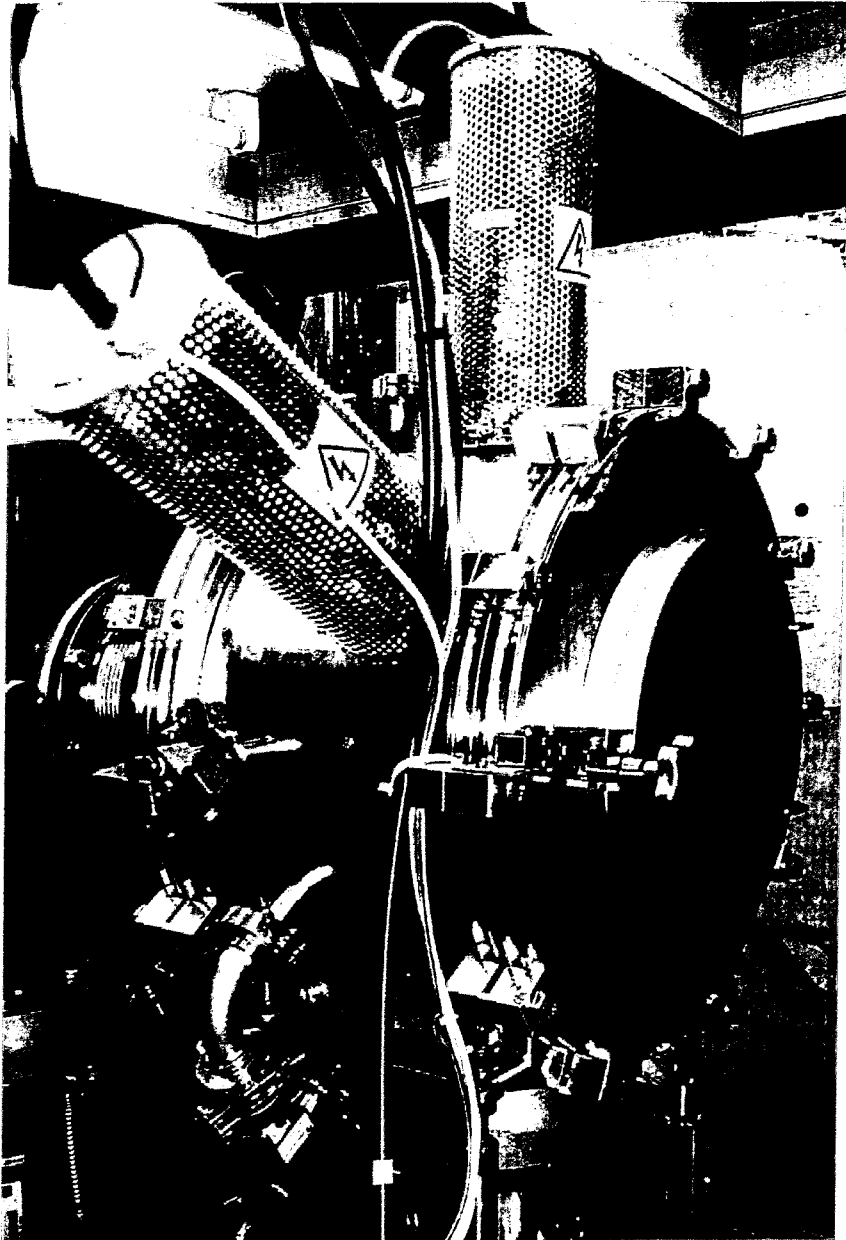


Abb. 9: Photo der Niederenergie-Implantationskammer.

5. Betriebsbedingungen und Testergebnisse

Beim Betrieb der Implantationskammer ist zu beachten, daß die Blenden-Öffnungsgröße und die Größe des Implantationsgebietes auf der Probe nicht übereinstimmen. Ursache ist zum einen der relativ große Abstand zwischen Blende und Probe (ca. 400 mm) und zum anderen die Aufweitung der Ionenstrahls infolge der Abbremsung. Die notwendige Größe der Blenden in Abhängigkeit von der gewünschten Implantationsfläche und der Implantationsenergie wurden aus Berechnungen der Trajektorien ermittelt. Die Aufweitung des Strahlbündels führt auch dazu, daß die mit den Faradaybechern in der Ebene des Probenrades der DANFYSIK-Kammer bestimmte Ionendosis mit der realen Implantationsdosis am Probenort nicht übereinstimmt. Hierzu ist in Abhängigkeit von der Implantationsenergie eine Umrechnung notwendig, die durch den Blendenfaktor charakterisiert wird. Somit sind für jede Implantationsenergie spezifische Werte der Bremsspannung, der Steuerspannung und des Blendenfaktors zur Dosiskorrektur einzustellen. Diese Angaben sind in graphischer und Tabellenform im Betriebsmanual enthalten. Die Werte wurden für den gesamten Energiebereich durch ionenoptische Berechnungen ermittelt und bisher vorwiegend im Bereich um 5 keV durch experimentelle Ergebnisse bestätigt. Im Bereich anderer Energien sind diese Werte im Verlaufe weiterer Experimente sukzessive zu ergänzen.

Zum Test der Anlage wurden 125 mm Si-Wafer mit Bor und Phosphor implantiert. Ausgehend von einer Primärenergie von 30 keV der Ionen vom DANFYSIK 1090 erfolgte die Implantation bei 5 keV mit Dosen zwischen $1 - 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Variiert wurde dabei die Spannung der Steuerelektrode. Die implantierten Scheiben wurden anschließend getempert (RTA, 950°C, 30 sec, N₂). Die Dosisinhomogenität wird mittels Messung des Ausbreitungswiderstandes als Funktion des Waferradius an den mit Phosphor implantierten Scheiben bewertet. Die Ergebnisse der Messungen sind in *Abb. 10* dargestellt. Hinsichtlich der Absolutwerte sind die Ergebnisse untereinander nur bedingt vergleichbar, da in diesen Wert auch der Übergangswiderstand zwischen den Meßspitzen und dem Substratmaterial eingeht. Von stärkerem Interesse ist die Änderung des Widerstandes über den Scheibenradius. Der Ausbreitungswiderstand verhält sich dabei indirekt proportional zur Phosphorkonzentration, d.h. zur Implantationsdosis. Die vier dargestellten Kurven entsprechen den ionenoptischen Voraussagen (vgl. *Abb. 6*). Für eine Steuerspannung von 14 keV ist der Öffnungsfehler positiv, die Ionenflußdichte (Dosis) nimmt mit dem Radius ab, und dementsprechend der Widerstand in radialer Richtung zu. Für 17 kV bzw. 17,7 kV ist der Öffnungsfehler nahezu kompensiert und der Widerstand ist (bis ca. 45 mm Radius) weitgehend konstant. Wird die Steuerspannung weiter erhöht (19 kV), so wird der Öffnungsfehler negativ, d.h. die Implantationsdosis nimmt in radialer Richtung zu und damit der Widerstand ab.

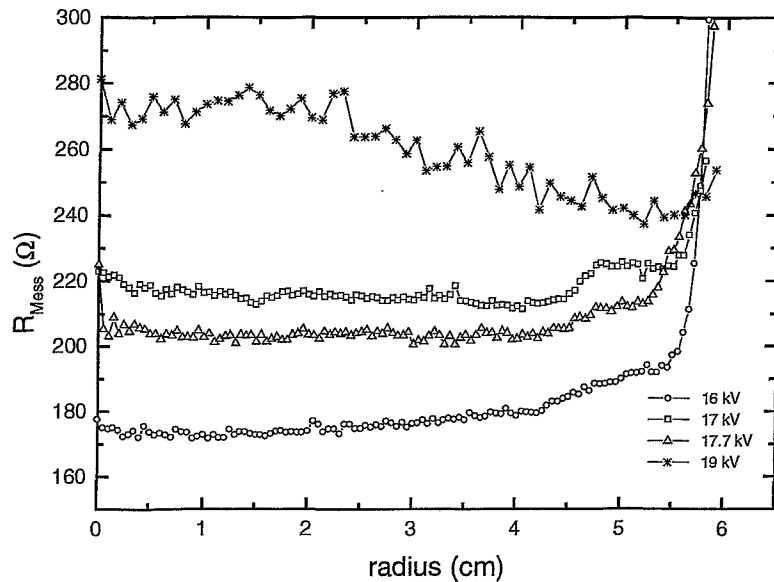


Abb. 10: Gemessener Ausbreitungswiderstand als Funktion des Abstands von der Wafermitte für Phosphor-Implantation mit 5 keV (Abbremsung von 30 keV auf 5 keV). Die Kurven sind für unterschiedliche Spannungen an der Steuerelektrode zwischen 16 und 19 kV.

Auffallend ist die Dosisabnahme (höherer Widerstand) im Bereich ab circa 45 mm Radius bis zum Rand des Implantationsbereichs von etwa 55 mm Radius. Die Ursache ist noch nicht ganz klar. Sie könnte aber darin bestehen, daß der Strahldurchmesser auf der Probe wesentlich größer als in der Ebene ist, in der sich die Faradaybecher befinden. Der Scanbereich war in üblicher Weise eingestellt. Dadurch wurde der Randbereich der Probe nicht vollständig von dem größeren Strahlfleck überstrichen. Stimmt diese Aussage, kann durch einen entsprechend vergrößerten Scanbereich diese Dosisabnahme im Randbereich vermieden werden.

Hinsichtlich der Tiefenverteilung der Dotanden wurden an einzelnen Proben die Profile für die Bor-Implantation bei 5 keV (sowohl im as-implanted als auch nach einer Temperung) mittels Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS) aufgenommen. Die gemessenen Profile sind in den **Abb. 11** dargestellt. Neben der erwarteten, flach liegenden Borverteilung mit einem Peakmaximum bei etwa 20 nm Tiefe, die durch die Implantation bei 5 keV entsteht, wurde Bor mit einer Konzentration von $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ bis zu einer Tiefe von ca. 350 nm gefunden. Dieser Anteil kann Folge einer Energiekontamination sein, d.h. durch Bor-Implantation mit höherer Energie verursacht werden. Boratome, die innerhalb der Beamline durch Ladungsneutralisation aus Strahlionen entstanden sind, behalten in der Bremslinse ihre Energie von 30 keV.

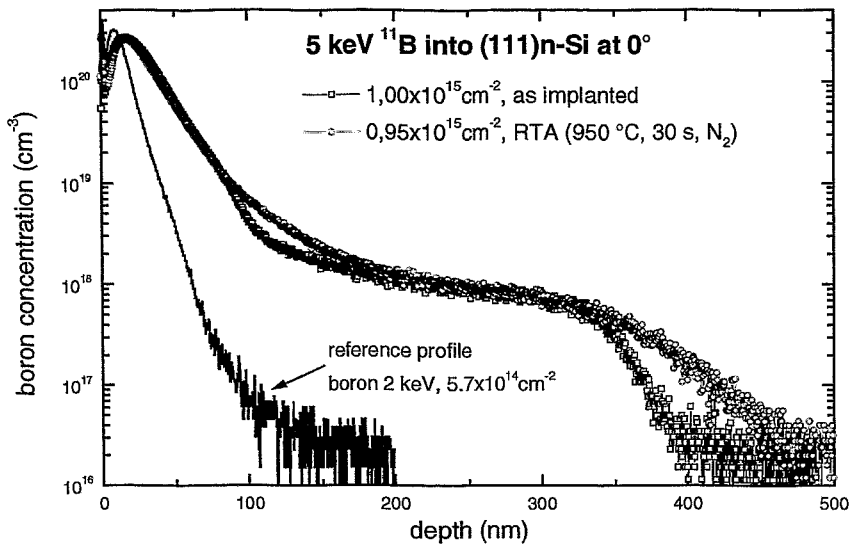


Abb. 11: Ergebnisse der Tiefenprofile der Bor-Implantation bei 5 keV, die mit SIMS gemessen wurden. Dargestellt sind die Profile direkt nach der Implantation und nach einer RTA-Temperung bei 950 °C. Zum Vergleich ist ein 2 keV Bor-Tiefenprofil bei 0° (channeling Implantation) gezeigt, das von einer Niederenergie-Implantation mit Neutralteilchenfalle stammt.

Hierzu erfolgten Reichweiteberechnungen mit Simulationsprogrammen, deren Ergebnisse in *Abb. 12* mit den Messwerten verglichen werden. Da die Implantation senkrecht zur Siliciumoberfläche erfolgte, tritt channeling ein, und die Simulation mußte mit einem Code, z.B. Crystal-TRIM [7] erfolgen, der diesen Effekt berücksichtigt. Die gemessene Tiefenverteilung läßt sich gut durch die Simulation reproduzieren, wenn man zur Implantation bei 5 keV mit der Dosis $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ zusätzlich eine Implantation bei 30 keV mit der Dosis von $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ annimmt. Dies entspricht einer Energiekontamination von 2 %. Im normalen Implanterbetrieb verursachen die Neutralteilchen einen Fehler in der Implantationsdosis. Bei Verwendung einer Bremslinse tritt zusätzlich die nachteilige Energiekontamination auf. Die Neutralteilchen entstehen im Wesentlichen durch Stöße mit Restgasatomen im Strahlrohr und der Implantationskammer. Der DANFYSIK-Implanter besitzt eine Neutralteilchenunterdrückung in Form einer elektrostatischen Ablenkung etwa 2 m vor der Targetposition in der NEI-Kammer. Neutralteilchen, die danach entstehen, tragen zur Energiekontamination bei. Die Testimplantationen wurden bei einem Druck von einigen 10^{-6} mbar durchgeführt. Mit einem geringeren Druck in Beamline und Kammer (etwa 5×10^{-7} mbar sind möglich) läßt sich der Anteil der Neutralteilchen noch wesentlich verringern.

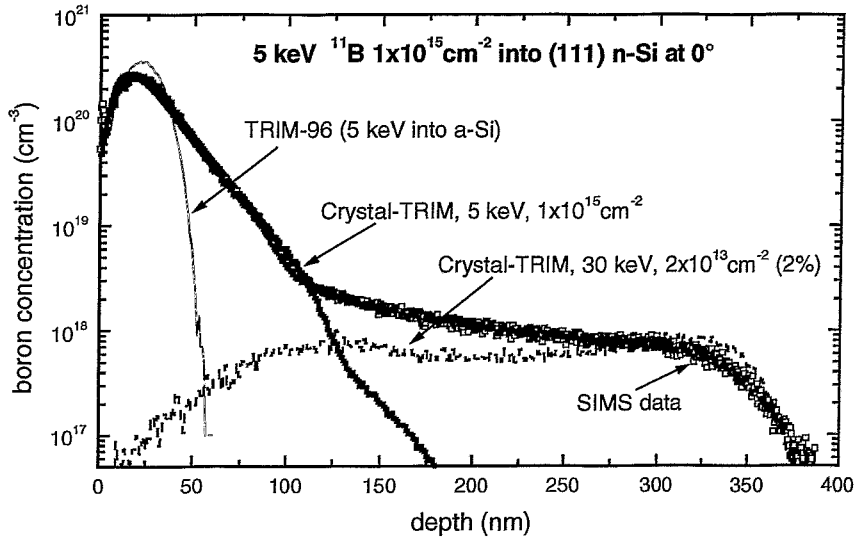


Abb. 12: Vergleich der Tiefenprofile aus den Simulationrechnungen mit den experimentellen Ergebnissen (SIMS data) für eine 5 keV Bor-Implantation mit einer Dosis von $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Die Rechnung mit TRIM-96 liefert ein zu oberflächennahes Profil, da in ihr ein amorphes Target angenommen wird, d.h. kein channeling Effekt berücksichtigt ist. Der flachliegende Bereich mit hoher Bor-Konzentration stimmt sehr gut mit der Crystal-TRIM-Simulation für 5 keV überein. Eine zweite Simulation mit Crystal-TRIM für 30 keV und einer Dosis von $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, d.h. 2% der eingebrachten Dosis, reproduziert den tiefer liegenden Anteil des gemessenen Profils.

6. Zusammenstellung der Parameter

Vakuumkammer

- Größe: 400 mm Durchmesser, 300 mm Länge,
- Verbindung zur Beamline: KF Flansch NW 160 mm,
- Schnellverschlusstür an der Kammerrückseite zum Probenwechsel.

Vakuumsystem

- Kombination von zweistufiger Drehschieberpumpe 8m³/h + Turbomolekularpumpe 150 l/s,
- Messung: Vorvakuum: Pirani, Hochvakuum: Penning.

Linsensystem

- elektrostatisches Doppellinsensystem mit korrigiertem Öffnungsfehler
- Kombination von Fokussier- und Bremslinse,
- 4 Elektroden: Masselektrode, Fokussierelektrode, Steuerelektrode, Bremslektrode
- Innendurchmesser der Elektroden: 200 mm,
- Außendurchmesser der Elektroden: 370 mm,
- Gesamtlänge des Linsensystems: ca. 250 mm

Hochspannungsversorgung

- 2 Geräte: 35 kV (1 mA) für Bremsspannung und Steuerspannung,

Probenhalter

- Einzelscheibenhalter
- Wafergröße: 125 mm, Probenhalter für kleiner Größen geeignet,
- Bearbeitung von 150 mm mit modifizierten Probenhalter möglich,
- Optionale Möglichkeiten: Kühlung, Heizung, Temperaturmessung.

Implantationsparameter

- Optimale Ionenenergie des Primärstrahls: 30 keV
- Minimale Implantationsenergie für Scheiben 100 mm: 2 keV
- Minimale Implantationsenergie für kleine Proben: ca. 200 eV
- Dosisinhomogenität über Implantationsfläche 100 mm: < 5%
- Einfallswinkel der Ionen über Implantationsfläche 100 mm: < 6°

7. Literaturverzeichnis

1. The National Technology Roadmap for Semiconductors, Semiconductor Industry Association, San Jose, USA, 1997.
2. S.Moffatt et al. , Ion Implantation Technology 98, Kyoto, Japan, 1998.
3. M.I. Current et al., J. Vac. Sci. Technol. B16 (1998) 327.
4. O. Scherzer, in „Beiträge zur Elektronenoptik“, (Hrs. H. Busch und E. Brüche), S. 33-41, Barth, Leipzig 1936.
5. M.A. Tiunov, B.M. Fomel, and B.P. Jakovlev, Report 87-35, Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, 1987.
6. R. Gwilliam, A. Nejm, A. Knights, and B. Sealy, Ion Implantation Technology 98, Kyoto, Japan, 1998.
7. M. Posselt, Nucl. Instrum. Methods B 80/81 (1993) 28

Danksagung

Die Entwicklung und Realisierung der Niederenergie-Implantationskammer wurde durch ein aktuelles Forschungsprojekt auf dem Gebiet der Ionenstrahlsynthese von Nanoclustern initiiert. Dem Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK) sind wir für die Bereitstellung der entsprechenden Mittel zu Dank verpflichtet.

Die Konstruktion und Fertigung der Vakuumkammer und des Probenhalters erfolgte durch die Firma FMB Feinwerk- und Meßtechnik GmbH Berlin. Den Mitarbeitern der Außenstelle Dresden, Herrn Jähnigen und Herrn Müller danken wir für die gute und zügige Bearbeitung des Auftrages und die Bereitschaft, auf alle Sonderwünsche einzugehen. Die Konstruktionszeichnungen des Linsensystems wurden zum größten Teil von Frau Felsmann angefertigt. Für die in kürzester Zeit erfolgte Fertigung des Linsensystems danken wir Herrn Riedel des Bereiches Technik des FZR. Herr Grunert übernahm die „undankbare“ Aufgabe der Linsenpolitur und gemeinsam mit Herrn Grahl die Montage des Linsensystems sowie den Aufbau des Implantationsstandes. Die Inbetriebnahme der Niederenergie-Implantationsregimes am DANFYSIK 1090 Implanter des FZ Rossendorf erfolgte zusammen mit den Operatoren Herrn I. Winkler und G. Winkler. Die Auswertung der Testexperimente wurde durch Herrn T. Gebel (SR-Messungen) und Herrn B. Schmidt (Crystal-TRIM-Simulationen) wesentlich unterstützt.

Die Autoren danken allen Genannten (und noch mehr den an dieser Stelle vielleicht Vergessenen) für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung.