

Vorstellung der Diplomarbeit

Monte-Carlo-Simulation von selbstorganisierten nanometrischen
 SiC_x -Ausscheidungen in C^+ -implantierten Silizium

Frank Zirkelbach

`frank.zirkelbach@physik.uni-augsburg.de`

Institut für Physik
Lehrstuhl für Experimentalphysik IV
Universität Augsburg

10. November 2005

Überblick

- 1 Einführung und Grundlagen
 - Einführung
 - Ion-Festkörper-Wechselwirkung
 - Die Monte-Carlo-Simulation TRIM
- 2 Experimentelle Befunde und Modell
 - Experimentelle Befunde
 - Modell
- 3 Simulation und Ergebnisse
 - Simulation
 - Simulation bis 300 *nm* Tiefe
 - Simulation über den gesamten Implantationsbereich
 - Herstellung breiter Bereiche mit lamellarer Struktur
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Zusammenfassung
 - Ausblick

Überblick

- 1 Einführung und Grundlagen
 - Einführung
 - Ion-Festkörper-Wechselwirkung
 - Die Monte-Carlo-Simulation TRIM
- 2 Experimentelle Befunde und Modell
 - Experimentelle Befunde
 - Modell
- 3 Simulation und Ergebnisse
 - Simulation
 - Simulation bis 300 *nm* Tiefe
 - Simulation über den gesamten Implantationsbereich
 - Herstellung breiter Bereiche mit lamellarer Struktur
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Zusammenfassung
 - Ausblick

Einführung

Ionenimplantation

Funktionsweise

- Ionisation des Atoms/Moleküls
- Beschleunigung im elektrischen Feld ($10^2 \text{ eV} - \text{GeV}$)
- Bestrahlung eines Festkörpers

⇒ Modifikation oberflächennaher Schichten

Anwendung

Dotierung von Halbleiterkristallen

Einführung

Ionenimplantation

Funktionsweise

- Ionisation des Atoms/Moleküls
- Beschleunigung im elektrischen Feld ($10^2 \text{ eV} - \text{GeV}$)
- Bestrahlung eines Festkörpers

⇒ Modifikation oberflächennaher Schichten

Anwendung

Dotierung von Halbleiterkristallen

Einführung

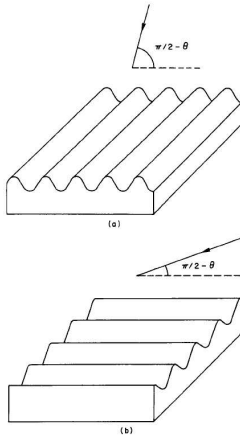
Ionimplantation

Vorteile

- exakte Kontrollierbarkeit der implantierten Menge
- Reproduzierbarkeit
- Homogenität
- Schnelligkeit
- frei wählbare Implantationstemperatur
- unabhängig von der chemischen Löslichkeitsgrenze

Einführung

Selbstorganisation

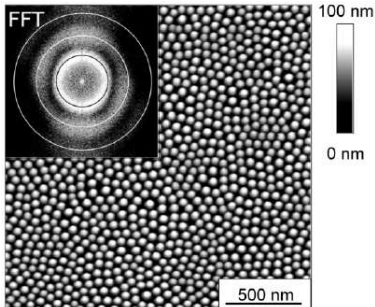


- 1 Riffelformation auf der Targetoberfläche
- 2 selbstorganisierte Nanostrukturen durch Sputtererosion
- 3 separierte Phasen bei der Bestrahlung binärer Legierungen
- 4 periodische Rissbildung bei der Bestrahlung mit schnellen und schweren Ionen

R. M. Bradley, J. M. E. Harper.
J. Vac. Sci. Technol. A 6 (1988) 2390.

Einführung

Selbstorganisation



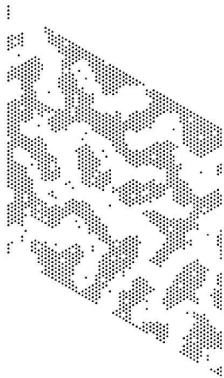
1000 eV $Ar^+ \rightarrow InAs$,
 rotierendes Target,
 $T = 285\text{ K}$, $\dot{D} = 270\ \mu A\ cm^{-2}$,
 $t = 60\ min.$, $\alpha = 30^\circ$.

B. Ziberi, F. Frost, M. Tartz, H. Neumann,
 B. Rauschenbach.
 Thin Solid Films 459 (2004) 106.

- 1 Riffelformation auf der Targetoberfläche
- 2 selbstorganisierte Nanostrukturen durch Sputtererosion
- 3 separierte Phasen bei der Bestrahlung binärer Legierungen
- 4 periodische Rissbildung bei der Bestrahlung mit schnellen und schweren Ionen

Einführung

Selbstorganisation

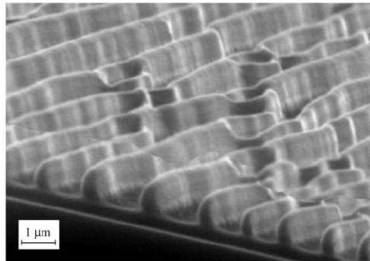


R. A. Enrique, P. Bellon.
Phys. Rev. B 60 (1999) 14649.

- 1 Riffelformation auf der Targetoberfläche
- 2 selbstorganisierte Nanostrukturen durch Sputtererosion
- 3 separierte Phasen bei der Bestrahlung binärer Legierungen
- 4 periodische Rissbildung bei der Bestrahlung mit schnellen und schweren Ionen

Einführung

Selbstorganisation



$230 \text{ MeV Kr}^+ \rightarrow \text{NiO/SiO}_2$,
 $D = 1.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, $\theta = 75^\circ$.

W. Bolse, A. Schattat, A. Feyh.
Appl. Phys. A 77 (2003) 11.

- 1 Riffelformation auf der Targetoberfläche
- 2 selbstorganisierte Nanostrukturen durch Sputtererosion
- 3 separierte Phasen bei der Bestrahlung binärer Legierungen
- 4 periodische Rissbildung bei der Bestrahlung mit schnellen und schweren Ionen

Überblick

- 1 Einführung und Grundlagen
 - Einführung
 - Ion-Festkörper-Wechselwirkung
 - Die Monte-Carlo-Simulation TRIM
- 2 Experimentelle Befunde und Modell
 - Experimentelle Befunde
 - Modell
- 3 Simulation und Ergebnisse
 - Simulation
 - Simulation bis 300 *nm* Tiefe
 - Simulation über den gesamten Implantationsbereich
 - Herstellung breiter Bereiche mit lamellarer Struktur
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Zusammenfassung
 - Ausblick

Grundlagen

Abbremsung der Ionen

nuklearer Bremsquerschnitt

elastischer Stoß mit Atomkernen des Targets

$$S_n(E) = \int_0^{T_{max}} T d\sigma$$

elektronischer Bremsquerschnitt

inelastischer Stoß mit Elektronen des Targets

$$S_e(E) = k_L \sqrt{E}$$

Bremskraft

$$-\frac{\partial E}{\partial x} = N \left(S_n(E) + S_e(E) \right)$$

Grundlagen

Abbremsung der Ionen

nuklearer Bremsquerschnitt

elastischer Stoß mit Atomkernen des Targets

$$S_n(E) = \int_0^{T_{max}} T d\sigma$$

elektronischer Bremsquerschnitt

inelastischer Stoß mit Elektronen des Targets

$$S_e(E) = k_L \sqrt{E}$$

Bremskraft

$$-\frac{\partial E}{\partial x} = N \left(S_n(E) + S_e(E) \right)$$

Grundlagen

Abbremsung der Ionen

nuklearer Bremsquerschnitt

elastischer Stoß mit Atomkernen des Targets

$$S_n(E) = \int_0^{T_{max}} T d\sigma$$

elektronischer Bremsquerschnitt

inelastischer Stoß mit Elektronen des Targets

$$S_e(E) = k_L \sqrt{E}$$

Bremskraft

$$-\frac{\partial E}{\partial x} = N \left(S_n(E) + S_e(E) \right)$$

Grundlagen

Abbremsung der Ionen

nuklearer Bremsquerschnitt

elastischer Stoß mit Atomkernen des Targets

$$S_n(E) = \int_0^{T_{max}} T d\sigma$$

elektronischer Bremsquerschnitt

inelastischer Stoß mit Elektronen des Targets

$$S_e(E) = k_L \sqrt{E}$$

Bremskraft

$$-\frac{\partial E}{\partial x} = N \left(S_n(E) + S_e(E) \right)$$

Überblick

- 1 Einführung und Grundlagen
 - Einführung
 - Ion-Festkörper-Wechselwirkung
 - Die Monte-Carlo-Simulation TRIM
- 2 Experimentelle Befunde und Modell
 - Experimentelle Befunde
 - Modell
- 3 Simulation und Ergebnisse
 - Simulation
 - Simulation bis 300 *nm* Tiefe
 - Simulation über den gesamten Implantationsbereich
 - Herstellung breiter Bereiche mit lamellarer Struktur
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Zusammenfassung
 - Ausblick

Grundlagen

Die Monte-Carlo-Simulation TRIM

Monte-Carlo-Methode

Abbildung von Zufallszahlen auf physikalische Größen

Das Prinzip von TRIM

- Verfolgung einer Vielzahl von Teilchenbahnen
- Start mit gegebener Energie, Position und Richtung
- Geradlinige Bewegung innerhalb freier Weglänge
- Energieverlust durch Stöße
- Terminiert wenn $E_{Ion} < E_k$

Grundlagen

Die Monte-Carlo-Simulation TRIM

Monte-Carlo-Methode

Abbildung von Zufallszahlen auf physikalische Größen

Das Prinzip von TRIM

- Verfolgung einer Vielzahl von Teilchenbahnen
- Start mit gegebener Energie, Position und Richtung
- Geradlinige Bewegung innerhalb freier Weglänge
- Energieverlust durch Stöße
- Terminiert wenn $E_{Ion} < E_k$

Grundlagen

Die Monte-Carlo-Simulation TRIM

Monte-Carlo-Methode

Abbildung von Zufallszahlen auf physikalische Größen

Das Prinzip von TRIM

- Verfolgung einer Vielzahl von Teilchenbahnen
- Start mit gegebener Energie, Position und Richtung
- Geradlinige Bewegung innerhalb freier Weglänge
- Energieverlust durch Stöße
- Terminiert wenn $E_{Ion} < E_k$

Grundlagen

Die Monte-Carlo-Simulation TRIM

Monte-Carlo-Methode

Abbildung von Zufallszahlen auf physikalische Größen

Das Prinzip von TRIM

- Verfolgung einer Vielzahl von Teilchenbahnen
- Start mit gegebener Energie, Position und Richtung
- Geradlinige Bewegung innerhalb freier Weglänge
- Energieverlust durch Stöße
- Terminiert wenn $E_{Ion} < E_k$

Grundlagen

Die Monte-Carlo-Simulation TRIM

Monte-Carlo-Methode

Abbildung von Zufallszahlen auf physikalische Größen

Das Prinzip von TRIM

- Verfolgung einer Vielzahl von Teilchenbahnen
- Start mit gegebener Energie, Position und Richtung
- Geradlinige Bewegung innerhalb freier Weglänge
- Energieverlust durch Stöße
- Terminiert wenn $E_{Ion} < E_k$

Grundlagen

Die Monte-Carlo-Simulation TRIM

Monte-Carlo-Methode

Abbildung von Zufallszahlen auf physikalische Größen

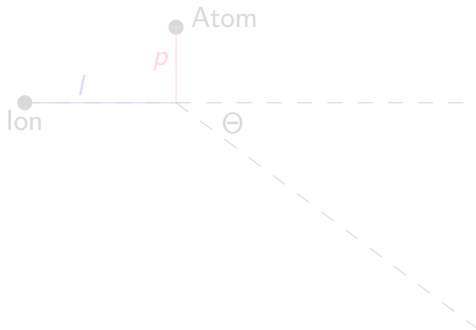
Das Prinzip von TRIM

- Verfolgung einer Vielzahl von Teilchenbahnen
- Start mit gegebener Energie, Position und Richtung
- Geradlinige Bewegung innerhalb freier Weglänge
- Energieverlust durch Stöße
- Terminiert wenn $E_{Ion} < E_k$

Grundlagen

Die Monte-Carlo-Simulation TRIM

Abbildung der Zufallszahlen auf die physikalischen Größen

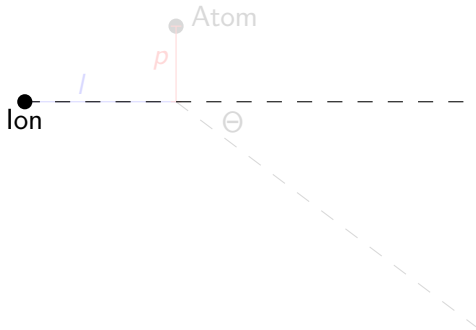


- mittlere freie Weglänge l
- Stoßparameter p
 $\Rightarrow \Theta, \Delta E$
- Azimutwinkel Φ

Grundlagen

Die Monte-Carlo-Simulation TRIM

Abbildung der Zufallszahlen auf die physikalischen Größen

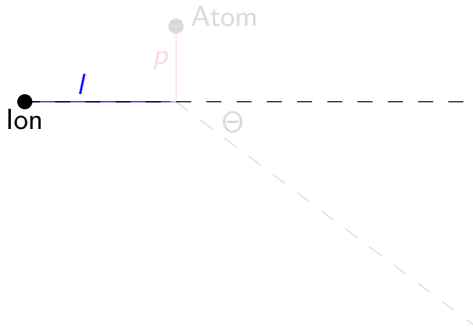


- mittlere freie Weglänge l
- Stoßparameter p
 $\Rightarrow \Theta, \Delta E$
- Azimutwinkel Φ

Grundlagen

Die Monte-Carlo-Simulation TRIM

Abbildung der Zufallszahlen auf die physikalischen Größen

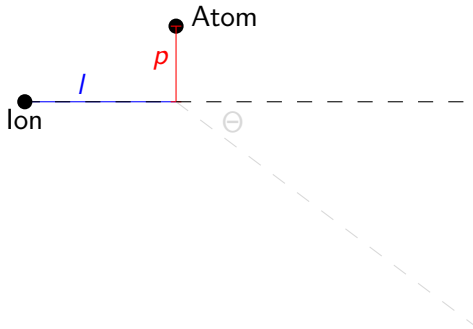


- mittlere freie Weglänge l
- Stoßparameter p
 $\Rightarrow \Theta, \Delta E$
- Azimutwinkel Φ

Grundlagen

Die Monte-Carlo-Simulation TRIM

Abbildung der Zufallszahlen auf die physikalischen Größen

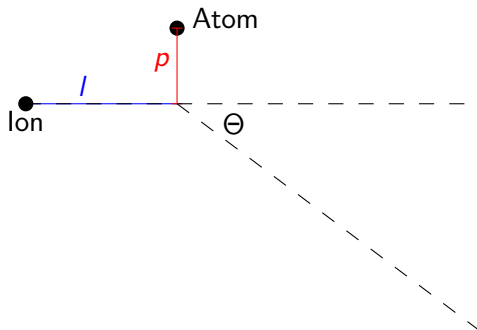


- mittlere freie Weglänge l
- Stoßparameter p
 $\Rightarrow \Theta, \Delta E$
- Azimutwinkel Φ

Grundlagen

Die Monte-Carlo-Simulation TRIM

Abbildung der Zufallszahlen auf die physikalischen Größen

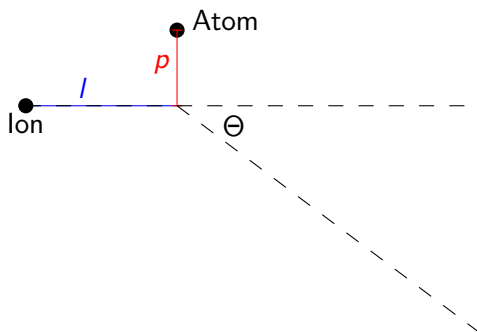


- mittlere freie Weglänge l
- Stoßparameter p
 $\Rightarrow \Theta, \Delta E$
- Azimutwinkel Φ

Grundlagen

Die Monte-Carlo-Simulation TRIM

Abbildung der Zufallszahlen auf die physikalischen Größen



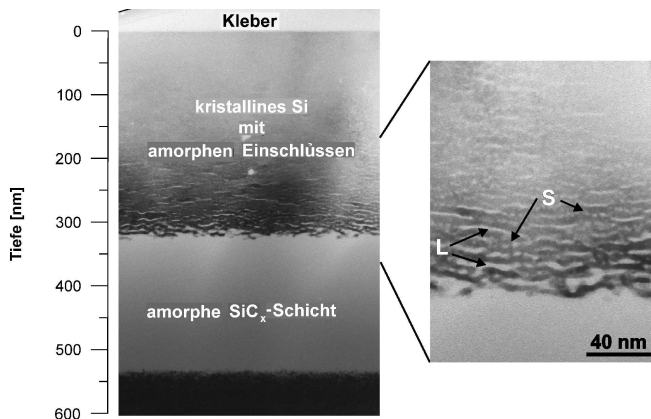
- mittlere freie Weglänge l
- Stoßparameter p
 $\Rightarrow \Theta, \Delta E$
- Azimutwinkel Φ

Überblick

- 1 Einführung und Grundlagen
 - Einführung
 - Ion-Festkörper-Wechselwirkung
 - Die Monte-Carlo-Simulation TRIM
- 2 Experimentelle Befunde und Modell
 - Experimentelle Befunde
 - Modell
- 3 Simulation und Ergebnisse
 - Simulation
 - Simulation bis 300 *nm* Tiefe
 - Simulation über den gesamten Implantationsbereich
 - Herstellung breiter Bereiche mit lamellarer Struktur
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Zusammenfassung
 - Ausblick

Experimentelle Befunde

Lage und Ausdehnung amorpher Phasen

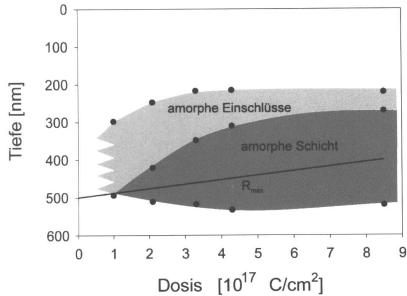


Hellfeld-XTEM-Abbildung: 180 keV C⁺ → (100)Si, T = 150 °C,

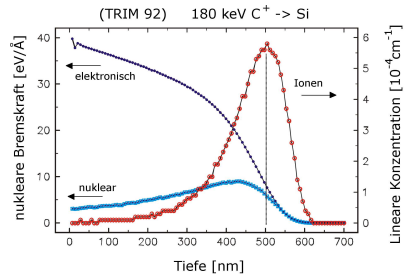
$$D = 4.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$$

Experimentelle Befunde

Lage und Ausdehnung amorpher Phasen



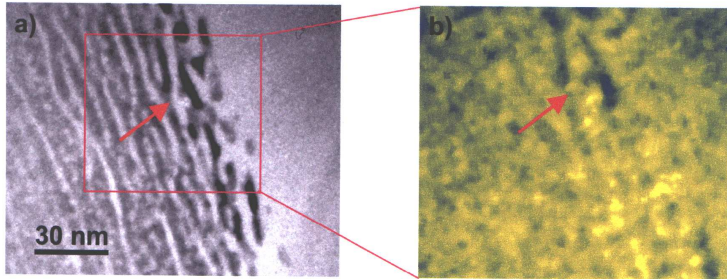
Amorphe Phasen in Abhängigkeit der Dosis
bei $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$



TRIM 92: Nukleares/Elektronisches
Bremskraft- und Implantationsprofil für
 $180 \text{ keV } \text{C}^+ \rightarrow \text{Si}$

Experimentelle Befunde

Kohlenstoffsegregation

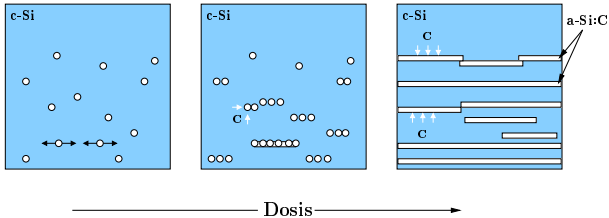


Hellfeld-XTEM- und Kohlenstoffverteilungsaufnahme. $D = 4.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$,
 $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Überblick

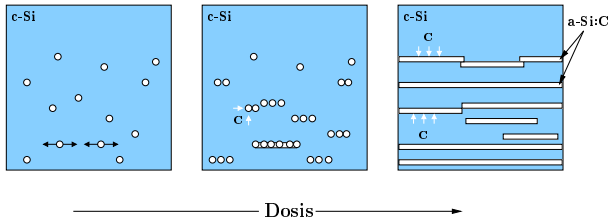
- 1 Einführung und Grundlagen
 - Einführung
 - Ion-Festkörper-Wechselwirkung
 - Die Monte-Carlo-Simulation TRIM
- 2 Experimentelle Befunde und Modell
 - Experimentelle Befunde
 - Modell
- 3 Simulation und Ergebnisse
 - Simulation
 - Simulation bis 300 *nm* Tiefe
 - Simulation über den gesamten Implantationsbereich
 - Herstellung breiter Bereiche mit lamellarer Struktur
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Zusammenfassung
 - Ausblick

Modell



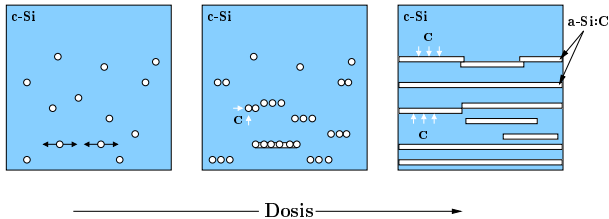
- Überschreitung der Sättigungsgrenze von C in $c-Si$
→ kohlenstoffinduzierte Nukleation sphärischer SiC_x -Ausscheidungen
- hohe Grenzflächenenergie zwischen $3C-SiC$ und $c-Si$
→ Ausscheidungen sind amorph
- 20 – 30 % geringere Si -Dichte des amorphen SiC_x im Vergleich zu $c-Si$
→ laterale Druckspannungen auf Umgebung (Relaxation in vertikaler Richtung)
- Abbau der Kohlenstoffübersättigung in kristallinen Gebieten
→ Diffusion von Kohlenstoff in amorphe Gebiete
- Druckspannungen
→ spannungsunterstützte Amorphisierung zwischen zwei amorphen Ausscheidungen

Modell



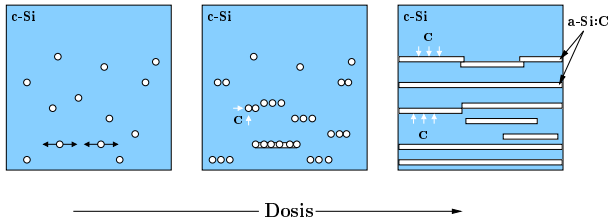
- **Überschreitung der Sättigungsgrenze von C in c-Si**
→ **kohlenstoffinduzierte Nukleation** sphärischer SiC_x-Ausscheidungen
- hohe Grenzflächenenergie zwischen 3C-SiC und c-Si
→ Ausscheidungen sind **amorph**
- 20 – 30 % geringere Si-Dichte des amorphen SiC_x im Vergleich zu c-Si
→ **laterale Druckspannungen** auf Umgebung (Relaxation in vertikaler Richtung)
- Abbau der Kohlenstoffübersättigung in kristallinen Gebieten
→ **Diffusion** von Kohlenstoff in amorphe Gebiete
- Druckspannungen
→ **spannungsunterstützte Amorphisierung** zwischen zwei amorphen Ausscheidungen

Modell



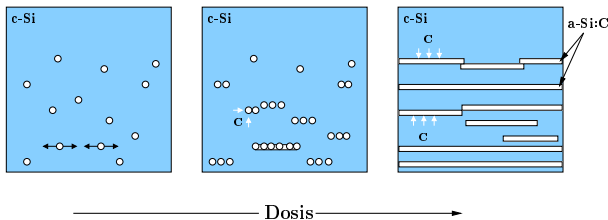
- Überschreitung der Sättigungsgrenze von C in $c-Si$
→ **kohlenstoffinduzierte Nukleation** sphärischer SiC_x -Ausscheidungen
- **hohe Grenzflächenenergie zwischen $3C-SiC$ und $c-Si$**
→ **Ausscheidungen sind amorph**
- 20 – 30 % geringere Si -Dichte des amorphen SiC_x im Vergleich zu $c-Si$
→ **laterale Druckspannungen** auf Umgebung (Relaxation in vertikaler Richtung)
- Abbau der Kohlenstoffübersättigung in kristallinen Gebieten
→ **Diffusion** von Kohlenstoff in amorphe Gebiete
- Druckspannungen
→ **spannungsunterstützte Amorphisierung** zwischen zwei amorphen Ausscheidungen

Modell



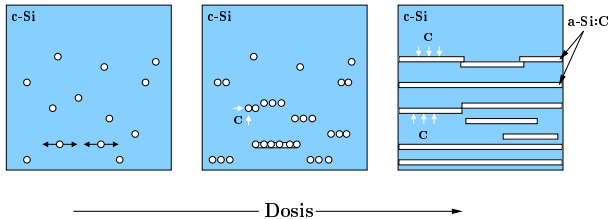
- Überschreitung der Sättigungsgrenze von C in $c-Si$
→ **kohlenstoffinduzierte Nukleation** sphärischer SiC_x -Ausscheidungen
- hohe Grenzflächenenergie zwischen $3C-SiC$ und $c-Si$
→ Ausscheidungen sind **amorph**
- 20 – 30 % geringere Si -Dichte des amorphen SiC_x im Vergleich zu $c-Si$
→ **laterale Druckspannungen** auf Umgebung (Relaxation in vertikaler Richtung)
- Abbau der Kohlenstoffübersättigung in kristallinen Gebieten
→ **Diffusion** von Kohlenstoff in amorphe Gebiete
- Druckspannungen
→ **spannungsunterstützte Amorphisierung** zwischen zwei amorphen Ausscheidungen

Modell



- Überschreitung der Sättigungsgrenze von C in $c-Si$
→ **kohlenstoffinduzierte Nukleation** sphärischer SiC_x -Ausscheidungen
- hohe Grenzflächenenergie zwischen $3C-SiC$ und $c-Si$
→ Ausscheidungen sind **amorph**
- 20 – 30 % geringere Si -Dichte des amorphen SiC_x im Vergleich zu $c-Si$
→ **laterale Druckspannungen** auf Umgebung (Relaxation in vertikaler Richtung)
- **Abbau der Kohlenstoffübersättigung in kristallinen Gebieten**
→ **Diffusion** von Kohlenstoff in amorphe Gebiete
- Druckspannungen
→ **spannungsunterstützte Amorphisierung** zwischen zwei amorphen Ausscheidungen

Modell



- Überschreitung der Sättigungsgrenze von C in $c-Si$
→ **kohlenstoffinduzierte Nukleation** sphärischer SiC_x -Ausscheidungen
- hohe Grenzflächenenergie zwischen $3C-SiC$ und $c-Si$
→ Ausscheidungen sind **amorph**
- 20 – 30 % geringere Si -Dichte des amorphen SiC_x im Vergleich zu $c-Si$
→ **laterale Druckspannungen** auf Umgebung (Relaxation in vertikaler Richtung)
- Abbau der Kohlenstoffübersättigung in kristallinen Gebieten
→ **Diffusion** von Kohlenstoff in amorphe Gebiete
- **Druckspannungen**
→ **spannungsunterstützte Amorphisierung** zwischen zwei amorphen Ausscheidungen

Überblick

- 1 Einführung und Grundlagen
 - Einführung
 - Ion-Festkörper-Wechselwirkung
 - Die Monte-Carlo-Simulation TRIM
- 2 Experimentelle Befunde und Modell
 - Experimentelle Befunde
 - Modell
- 3 Simulation und Ergebnisse
 - **Simulation**
 - Simulation bis 300 nm Tiefe
 - Simulation über den gesamten Implantationsbereich
 - Herstellung breiter Bereiche mit lamellarer Struktur
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Zusammenfassung
 - Ausblick

Simulation

Name

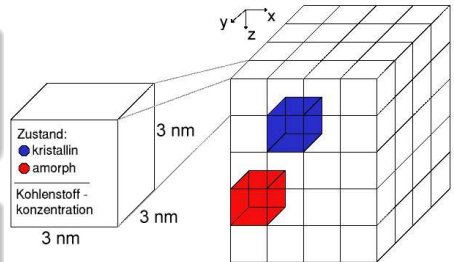
Nano Lamellar Selbstorganisationsprozess

Grober Ablauf

- Amorphisierung/Rekristallisation
- Kohlenstoffeinbau
- Diffusion/Sputtern

Versionen

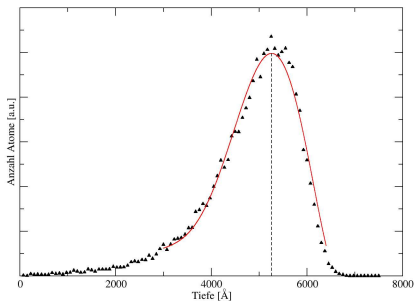
- Version 1 - Simulation bis 300 nm Tiefe
- Version 2 - Simulation über den gesamten Implantationsbereich



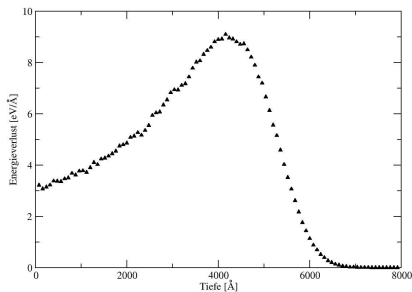
Unterteilung des Targets

Simulation

Statistik von Stoßprozessen



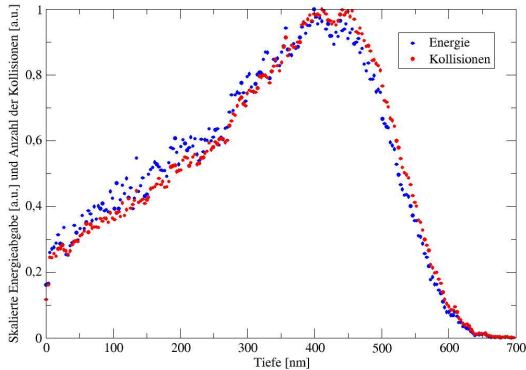
SRIM 2003.26, Implantationsprofil,
 $180 \text{ keV } C^+ \rightarrow Si$.



SRIM 2003.26, nukleare Bremskraft,
 $180 \text{ keV } C^+ \rightarrow Si$.

Simulation

Statistik von Stoßprozessen



⇒ Durchschnittliche Anzahl der Stöße der Ionen und Energieabgabe

⇒ Mittlere Würfel-Trefferzahl eines Ions

Simulation

Algorithmus - Amorphisierung/Rekristallisation

Amorphisierungswahrscheinlichkeit

$$p_{c \rightarrow a}(\vec{r}) = p_b + p_c c_C(\vec{r}) + \sum_{\text{amorphe Nachbarn}} \frac{p_s c_C(\vec{r}')}{(r - r')^2}$$

- ballistische Amorphisierung
- kohlenstoffinduzierte Amorphisierung
- spannungsunterstützte Amorphisierung

Simulation

Algorithmus - Amorphisierung/Rekristallisation

Amorphisierungswahrscheinlichkeit

$$p_{c \rightarrow a}(\vec{r}) = p_b + p_{cCC}(\vec{r}) + \sum_{\text{amorphe Nachbarn}} \frac{p_{sCC}(\vec{r}')}{(r - r')^2}$$

- ballistische Amorphisierung
- kohlenstoffinduzierte Amorphisierung
- spannungsunterstützte Amorphisierung

Simulation

Algorithmus - Amorphisierung/Rekristallisation

Amorphisierungswahrscheinlichkeit

$$p_{c \rightarrow a}(\vec{r}) = p_b + p_c c_C(\vec{r}) + \sum_{\text{amorphe Nachbarn}} \frac{p_s c_C(\vec{r}')}{(r - r')^2}$$

- ballistische Amorphisierung
- kohlenstoffinduzierte Amorphisierung
- spannungsunterstützte Amorphisierung

Simulation

Algorithmus - Amorphisierung/Rekristallisation

Amorphisierungswahrscheinlichkeit

$$p_{c \rightarrow a}(\vec{r}) = p_b + p_c c_c(\vec{r}) + \sum_{\text{amorphe Nachbarn}} \frac{p_s c_c(\vec{r}')}{(r - r')^2}$$

- ballistische Amorphisierung
- kohlenstoffinduzierte Amorphisierung
- spannungsunterstützte Amorphisierung

Simulation

Algorithmus - Amorphisierung/Rekristallisation

Rekristallisationswahrscheinlichkeit

$$p_{a \rightarrow c}(\vec{r}) = (1 - p_{c \rightarrow a}(\vec{r})) \left(1 - \frac{\sum_{\text{direkte Nachbarn}} \delta(\vec{r}')}{6} \right)$$

mit

$$\delta(\vec{r}) = \begin{cases} 1 & \text{wenn Gebiet bei } \vec{r} \text{ amorph} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Simulation

Algorithmus - Amorphisierung/Rekristallisation

Rekristallisationswahrscheinlichkeit

$$p_{a \rightarrow c}(\vec{r}) = (1 - p_{c \rightarrow a}(\vec{r})) \left(1 - \frac{\sum_{\text{direkte Nachbarn}} \delta(\vec{r}^i)}{6} \right)$$

mit

$$\delta(\vec{r}) = \begin{cases} 1 & \text{wenn Gebiet bei } \vec{r} \text{ amorph} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Simulation

Algorithmus - Amorphisierung/Rekristallisation

Rekristallisationswahrscheinlichkeit

$$p_{a \rightarrow c}(\vec{r}) = (1 - p_{c \rightarrow a}(\vec{r})) \left(1 - \frac{\sum_{\text{direkte Nachbarn}} \delta(\vec{r}')}{6} \right)$$

mit

$$\delta(\vec{r}) = \begin{cases} 1 & \text{wenn Gebiet bei } \vec{r} \text{ amorph} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Simulation

Algorithmus - Amorphisierung/Rekristallisation

Stoßkoordinaten

- x, y gleichverteilt
- z entsprechend nuklearer Bremskraft

Ablauf

- Auswürfeln der Stoßkoordinaten
- Berechnung von $p_{c \rightarrow a}$ bzw. $p_{a \rightarrow c}$
- Zufallszahl \rightarrow Amorphisierung/Rekristallisation
- Wiederholung für mittlere Anzahl der Treffer des Ions

Simulation

Algorithmus - Amorphisierung/Rekristallisation

Stoßkoordinaten

- x, y gleichverteilt
- z entsprechend nuklearer Bremskraft

Ablauf

- Auswürfeln der Stoßkoordinaten
- Berechnung von $p_{c \rightarrow a}$ bzw. $p_{a \rightarrow c}$
- Zufallszahl \rightarrow Amorphisierung/Rekristallisation
- Wiederholung für mittlere Anzahl der Treffer des Ions

Simulation

Algorithmus - Amorphisierung/Rekristallisation

Stoßkoordinaten

- x, y gleichverteilt
- z entsprechend nuklearer Bremskraft

Ablauf

- Auswürfeln der Stoßkoordinaten
- Berechnung von $p_{c \rightarrow a}$ bzw. $p_{a \rightarrow c}$
- Zufallszahl \rightarrow Amorphisierung/Rekristallisation
- Wiederholung für mittlere Anzahl der Treffer des Ions

Simulation

Algorithmus - Amorphisierung/Rekristallisation

Stoßkoordinaten

- x, y gleichverteilt
- z entsprechend nuklearer Bremskraft

Ablauf

- Auswürfeln der Stoßkoordinaten
- Berechnung von $p_{c \rightarrow a}$ bzw. $p_{a \rightarrow c}$
- Zufallszahl \rightarrow Amorphisierung/Rekristallisation
- Wiederholung für mittlere Anzahl der Treffer des Ions

Simulation

Algorithmus - Amorphisierung/Rekristallisation

Stoßkoordinaten

- x, y gleichverteilt
- z entsprechend nuklearer Bremskraft

Ablauf

- Auswürfeln der Stoßkoordinaten
- Berechnung von $p_{c \rightarrow a}$ bzw. $p_{a \rightarrow c}$
- Zufallszahl \rightarrow Amorphisierung/Rekristallisation
- Wiederholung für mittlere Anzahl der Treffer des Ions

Simulation

Algorithmus - Kohlenstoffeinbau

Koordinaten für Kohlenstoffeinbau

- x, y gleichverteilt
- z entsprechend Implantationsprofil

Ablauf

- Auswürfeln der Koordinaten für Kohlenstoffeinbau
- Lokale Erhöhung der Anzahl der Kohlenstoffatome

Simulation

Algorithmus - Kohlenstoffeinbau

Koordinaten für Kohlenstoffeinbau

- x, y gleichverteilt
- z entsprechend Implantationsprofil

Ablauf

- Auswürfeln der Koordinaten für Kohlenstoffeinbau
- Lokale Erhöhung der Anzahl der Kohlenstoffatome

Simulation

Algorithmus - Kohlenstoffeinbau

Koordinaten für Kohlenstoffeinbau

- x, y gleichverteilt
- z entsprechend Implantationsprofil

Ablauf

- Auswürfeln der Koordinaten für Kohlenstoffeinbau
- Lokale Erhöhung der Anzahl der Kohlenstoffatome

Simulation

Algorithmus - Diffusion/Sputtern

Ablauf der Diffusion alle d_v Schritte

- Gehe alle Zellen durch
- Wenn Zelle amorph
 - Gehe alle Nachbarzellen durch
 - Wenn Nachbarzelle kristallin
 - ⇒ Transferiere den Anteil d_r des Kohlenstoffs

Sputterablauf alle S Schritte

- Kopiere Inhalt von Ebene i nach Ebene $i - 1$
 $i = 2, 3, \dots, Z - 1, Z$
- Setze Status jedes Volumens in Ebene Z kristallin
- Setze den Kohlenstoff jedes Volumens in Ebene Z auf Null

Simulation

Algorithmus - Diffusion/Sputtern

Ablauf der Diffusion alle d_v Schritte

- Gehe alle Zellen durch
- Wenn Zelle amorph
 - Gehe alle Nachbarzellen durch
 - Wenn Nachbarzelle kristallin
 - ⇒ Transferiere den Anteil d_r des Kohlenstoffs

Sputterablauf alle S Schritte

- Kopiere Inhalt von Ebene i nach Ebene $i - 1$
 $i = 2, 3, \dots, Z - 1, Z$
- Setze Status jedes Volumens in Ebene Z kristallin
- Setze den Kohlenstoff jedes Volumens in Ebene Z auf Null

Simulation

Algorithmus - Diffusion/Sputtern

Ablauf der Diffusion alle d_v Schritte

- Gehe alle Zellen durch
- Wenn Zelle amorph
 - Gehe alle Nachbarzellen durch
 - Wenn Nachbarzelle kristallin
 - ⇒ Transferiere den Anteil d_r des Kohlenstoffs

Sputterablauf alle S Schritte

- Kopiere Inhalt von Ebene i nach Ebene $i - 1$
 $i = 2, 3, \dots, Z - 1, Z$
- Setze Status jedes Volumens in Ebene Z kristallin
- Setze den Kohlenstoff jedes Volumens in Ebene Z auf Null

Simulation

Algorithmus - Diffusion/Sputtern

Ablauf der Diffusion alle d_v Schritte

- Gehe alle Zellen durch
- Wenn Zelle amorph
 - Gehe alle Nachbarzellen durch
 - Wenn Nachbarzelle kristallin
 - ⇒ Transferiere den Anteil d_r des Kohlenstoffs

Sputterablauf alle S Schritte

- Kopiere Inhalt von Ebene i nach Ebene $i - 1$
 $i = 2, 3, \dots, Z - 1, Z$
- Setze Status jedes Volumens in Ebene Z kristallin
- Setze den Kohlenstoff jedes Volumens in Ebene Z auf Null

Simulation

Algorithmus - Diffusion/Sputtern

Ablauf der Diffusion alle d_v Schritte

- Gehe alle Zellen durch
- Wenn Zelle amorph
 - Gehe alle Nachbarzellen durch
 - Wenn Nachbarzelle kristallin
 - ⇒ Transferiere den Anteil d_r des Kohlenstoffs

Sputterablauf alle S Schritte

- Kopiere Inhalt von Ebene i nach Ebene $i - 1$
 $i = 2, 3, \dots, Z - 1, Z$
- Setze Status jedes Volumens in Ebene Z kristallin
- Setze den Kohlenstoff jedes Volumens in Ebene Z auf Null

Simulation

Algorithmus - Diffusion/Sputtern

Ablauf der Diffusion alle d_v Schritte

- Gehe alle Zellen durch
- Wenn Zelle amorph
 - Gehe alle Nachbarzellen durch
 - Wenn Nachbarzelle kristallin
 - ⇒ Transferiere den Anteil d_r des Kohlenstoffs

Sputterablauf alle S Schritte

- Kopiere Inhalt von Ebene i nach Ebene $i - 1$
 $i = 2, 3, \dots, Z - 1, Z$
- Setze Status jedes Volumens in Ebene Z kristallin
- Setze den Kohlenstoff jedes Volumens in Ebene Z auf Null

Simulation

Algorithmus - Diffusion/Sputtern

Ablauf der Diffusion alle d_v Schritte

- Gehe alle Zellen durch
- Wenn Zelle amorph
 - Gehe alle Nachbarzellen durch
 - Wenn Nachbarzelle kristallin
 - ⇒ Transferiere den Anteil d_r des Kohlenstoffs

Sputterablauf alle S Schritte

- Kopiere Inhalt von Ebene i nach Ebene $i - 1$
 $i = 2, 3, \dots, Z - 1, Z$
- Setze Status jedes Volumens in Ebene Z kristallin
- Setze den Kohlenstoff jedes Volumens in Ebene Z auf Null

Simulation

Algorithmus - Diffusion/Sputtern

Ablauf der Diffusion alle d_v Schritte

- Gehe alle Zellen durch
- Wenn Zelle amorph
 - Gehe alle Nachbarzellen durch
 - Wenn Nachbarzelle kristallin
 - ⇒ Transferiere den Anteil d_r des Kohlenstoffs

Sputterablauf alle S Schritte

- Kopiere Inhalt von Ebene i nach Ebene $i - 1$
 $i = 2, 3, \dots, Z - 1, Z$
- Setze Status jedes Volumens in Ebene Z kristallin
- Setze den Kohlenstoff jedes Volumens in Ebene Z auf Null

Simulation

Algorithmus - Diffusion/Sputtern

Ablauf der Diffusion alle d_v Schritte

- Gehe alle Zellen durch
- Wenn Zelle amorph
 - Gehe alle Nachbarzellen durch
 - Wenn Nachbarzelle kristallin
 - ⇒ Transferiere den Anteil d_r des Kohlenstoffs

Sputterablauf alle S Schritte

- Kopiere Inhalt von Ebene i nach Ebene $i - 1$
 $i = 2, 3, \dots, Z - 1, Z$
- Setze Status jedes Volumens in Ebene Z kristallin
- Setze den Kohlenstoff jedes Volumens in Ebene Z auf Null

Simulation

Algorithmus - Diffusion/Sputtern

Ablauf der Diffusion alle d_v Schritte

- Gehe alle Zellen durch
- Wenn Zelle amorph
 - Gehe alle Nachbarzellen durch
 - Wenn Nachbarzelle kristallin
 - ⇒ Transferiere den Anteil d_r des Kohlenstoffs

Sputterablauf alle S Schritte

- Kopiere Inhalt von Ebene i nach Ebene $i - 1$
 $i = 2, 3, \dots, Z - 1, Z$
- Setze Status jedes Volumens in Ebene Z kristallin
- Setze den Kohlenstoff jedes Volumens in Ebene Z auf Null

Überblick

- 1 Einführung und Grundlagen
 - Einführung
 - Ion-Festkörper-Wechselwirkung
 - Die Monte-Carlo-Simulation TRIM
- 2 Experimentelle Befunde und Modell
 - Experimentelle Befunde
 - Modell
- 3 Simulation und Ergebnisse
 - Simulation
 - **Simulation bis 300 nm Tiefe**
 - Simulation über den gesamten Implantationsbereich
 - Herstellung breiter Bereiche mit lamellarer Struktur
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Zusammenfassung
 - Ausblick

Ergebnisse

Simulation, Version 1

Eigenschaften

- Tiefenbereich 0 – 300 nm
- Linear genähertes Implantations- und Bremskraftprofil
- Ein Würfel-Treffer pro Ion
- Rekristallisationswahrscheinlichkeit unabhängig von direkter Nachbarschaft
- Kein Sputtervorgang

Ergebnisse

Simulation, Version 1

Eigenschaften

- **Tiefenbereich 0 – 300 nm**
- Linear genähertes Implantations- und Bremskraftprofil
- Ein Würfel-Treffer pro Ion
- Rekristallisationswahrscheinlichkeit unabhängig von direkter Nachbarschaft
- Kein Sputtervorgang

Ergebnisse

Simulation, Version 1

Eigenschaften

- Tiefenbereich 0 – 300 nm
- **Linear genähertes Implantations- und Bremskraftprofil**
- Ein Würfel-Treffer pro Ion
- Rekristallisationswahrscheinlichkeit unabhängig von direkter Nachbarschaft
- Kein Sputtervorgang

Ergebnisse

Simulation, Version 1

Eigenschaften

- Tiefenbereich 0 – 300 nm
- Linear genähertes Implantations- und Bremskraftprofil
- **Ein Würfel-Treffer pro Ion**
- Rekristallisationswahrscheinlichkeit unabhängig von direkter Nachbarschaft
- Kein Sputtervorgang

Ergebnisse

Simulation, Version 1

Eigenschaften

- Tiefenbereich 0 – 300 nm
- Linear genähertes Implantations- und Bremskraftprofil
- Ein Würfel-Treffer pro Ion
- **Rekristallisationswahrscheinlichkeit unabhängig von direkter Nachbarschaft**
- Kein Sputtervorgang

Ergebnisse

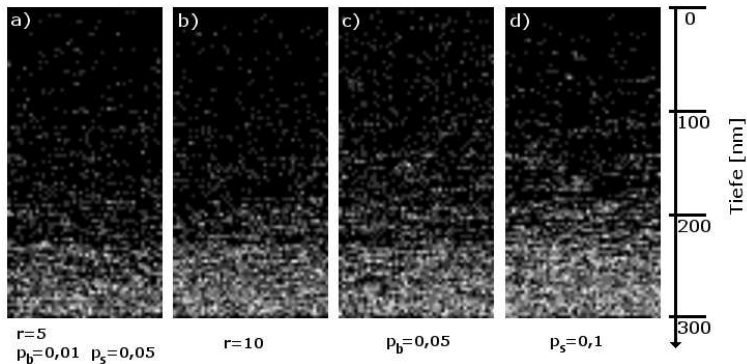
Simulation, Version 1

Eigenschaften

- Tiefenbereich 0 – 300 nm
- Linear genähertes Implantations- und Bremskraftprofil
- Ein Würfel-Treffer pro Ion
- Rekristallisationswahrscheinlichkeit unabhängig von direkter Nachbarschaft
- **Kein Sputtervorgang**

Ergebnisse

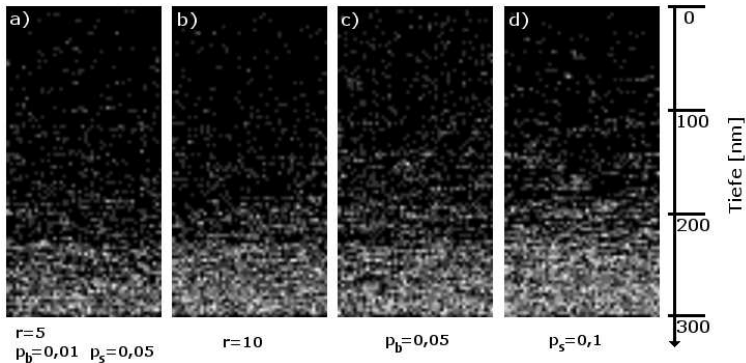
Erste Simulationen, $s = 3 \times 10^5$, $p_c = 0$



- ⇒ Abbruchradius $r = 5$
- ⇒ große Anzahl an Durchläufen $\rightarrow 2$ bzw. 3×10^7
- ⇒ kleinere Simulationsparameter p_b , p_c und p_s

Ergebnisse

Erste Simulationen, $s = 3 \times 10^5$, $p_c = 0$



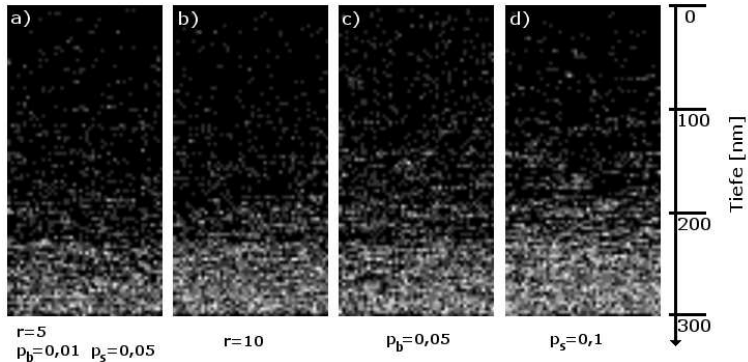
⇒ Abbruchradius $r = 5$

⇒ große Anzahl an Durchläufen $\rightarrow 2$ bzw. 3×10^7

⇒ kleinere Simulationsparameter p_b , p_c und p_s

Ergebnisse

Erste Simulationen, $s = 3 \times 10^5$, $p_c = 0$

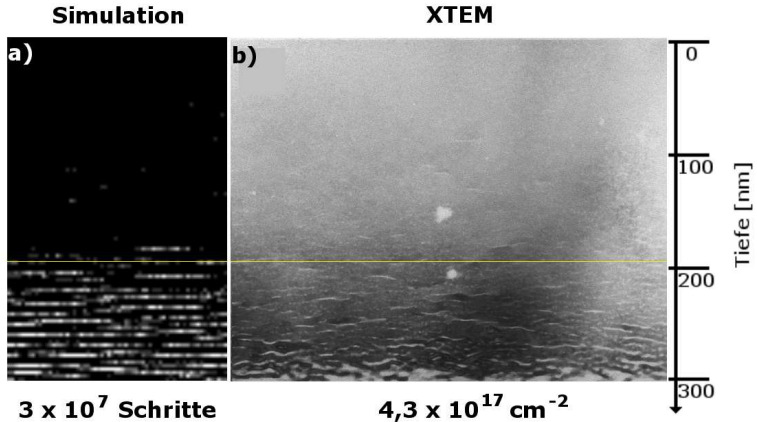


- ⇒ Abbruchradius $r = 5$
- ⇒ große Anzahl an Durchläufen $\rightarrow 2$ bzw. 3×10^7
- ⇒ kleinere Simulationsparameter p_b , p_c und p_s

Ergebnisse

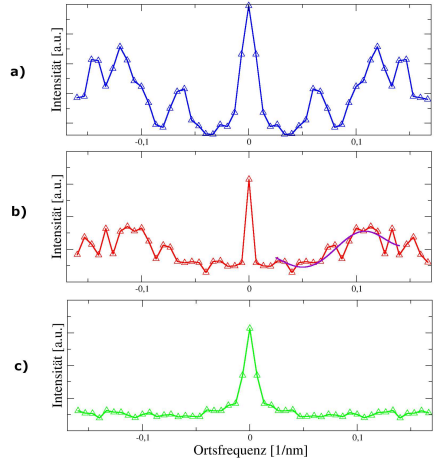
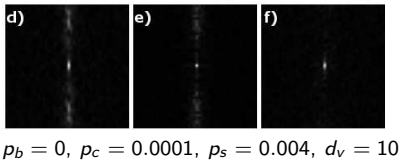
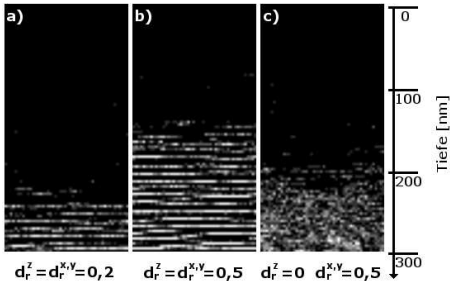
Vergleich mit TEM-Aufnahme, $p_b = 0$, $p_c = 0.0001$, $p_s = 0.003$, $d_v = 10$, $d_r = 0.5$

Lamellare Strukturen



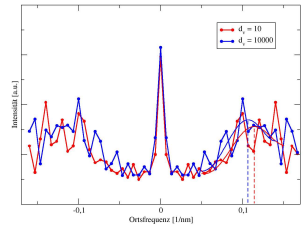
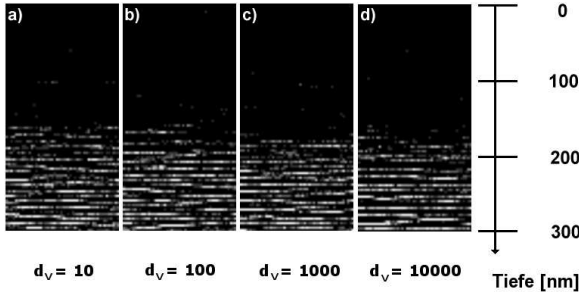
Ergebnisse

Einfluss der Diffusionsrate d_r



Ergebnisse

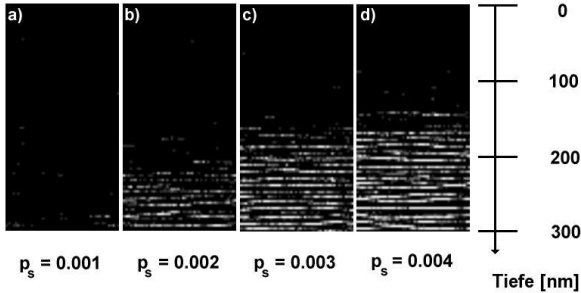
Einfluss der Diffusionsgeschwindigkeit d_v



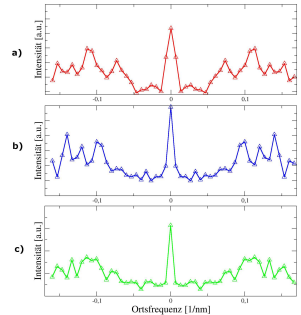
$$p_b = 0, p_c = 0.0001, p_s = 0.003, d_r = 0.5$$

Ergebnisse

Einfluss der Druckspannung



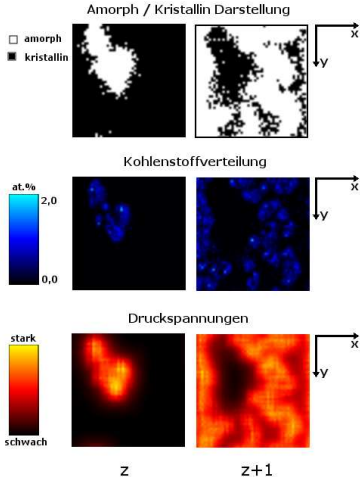
$p_b = 0$, $p_c = 0.0001$, $d_v = 10$, $d_r = 0.5$



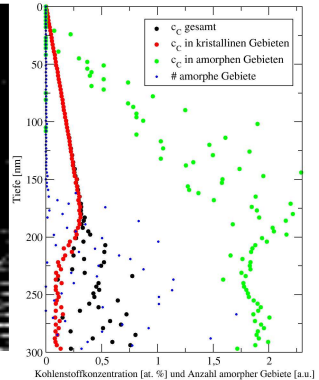
- a) $p_s = 0.002$
- b) $p_s = 0.003$
- c) $p_s = 0.004$

Ergebnisse

Kohlenstoffverteilung



□ amorph
■ kristallin



Ergebnisse

Zusammenfassung, Version 1

- Modell/Simulation reproduziert die Bildung geordneter Lamellenstrukturen
- Bildungsprozess nachvollziehbar durch die Simulation
- hohe Anzahl an Simulationsdurchläufen, kleine Amorphisierungswahrscheinlichkeiten
- Diffusion essentiell, insbesondere die Diffusion in z-Richtung
- hoher Beitrag durch kohlenstoffinduzierte Amorphisierung
- Kohlenstoffverteilung im Einklang mit EFTEM-Aufnahme

Überblick

- 1 Einführung und Grundlagen
 - Einführung
 - Ion-Festkörper-Wechselwirkung
 - Die Monte-Carlo-Simulation TRIM
- 2 Experimentelle Befunde und Modell
 - Experimentelle Befunde
 - Modell
- 3 Simulation und Ergebnisse
 - Simulation
 - Simulation bis 300 nm Tiefe
 - **Simulation über den gesamten Implantationsbereich**
 - Herstellung breiter Bereiche mit lamellarer Struktur
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Zusammenfassung
 - Ausblick

Ergebnisse

Simulation, Version 2

Eigenschaften

- exaktes TRIM Implantations- und Bremskraftprofil
- mittlere Anzahl Würfel-Treffer pro Ion aus TRIM
- Rekristallisationswahrscheinlichkeit abhängig von direkter Nachbarschaft
- Tiefenbereich 0 – 700 nm
- Sputtervorgang

Ergebnisse

Simulation, Version 2

Eigenschaften

- **exaktes TRIM Implantations- und Bremskraftprofil**
- mittlere Anzahl Würfel-Treffer pro Ion aus TRIM
- Rekristallisationswahrscheinlichkeit abhängig von direkter Nachbarschaft
- Tiefenbereich 0 – 700 nm
- Sputtervorgang

Ergebnisse

Simulation, Version 2

Eigenschaften

- exaktes TRIM Implantations- und Bremskraftprofil
- **mittlere Anzahl Würfel-Treffer pro Ion aus TRIM**
- Rekristallisationswahrscheinlichkeit abhängig von direkter Nachbarschaft
- Tiefenbereich 0 – 700 nm
- Sputtervorgang

Ergebnisse

Simulation, Version 2

Eigenschaften

- exaktes TRIM Implantations- und Bremskraftprofil
- mittlere Anzahl Würfel-Treffer pro Ion aus TRIM
- **Rekristallisationswahrscheinlichkeit abhängig von direkter Nachbarschaft**
- Tiefenbereich 0 – 700 nm
- Sputtervorgang

Ergebnisse

Simulation, Version 2

Eigenschaften

- exaktes TRIM Implantations- und Bremskraftprofil
- mittlere Anzahl Würfel-Treffer pro Ion aus TRIM
- Rekristallisationswahrscheinlichkeit abhängig von direkter Nachbarschaft
- **Tiefenbereich 0 – 700 nm**
- Sputtervorgang

Ergebnisse

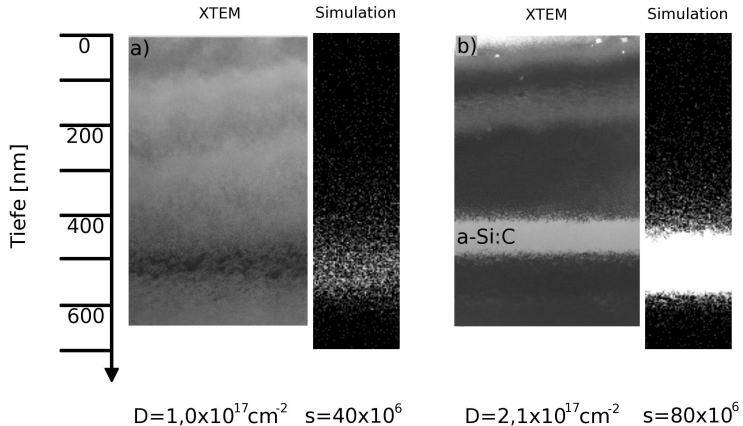
Simulation, Version 2

Eigenschaften

- exaktes TRIM Implantations- und Bremskraftprofil
- mittlere Anzahl Würfel-Treffer pro Ion aus TRIM
- Rekristallisationswahrscheinlichkeit abhängig von direkter Nachbarschaft
- Tiefenbereich 0 – 700 nm
- **Sputtervorgang**

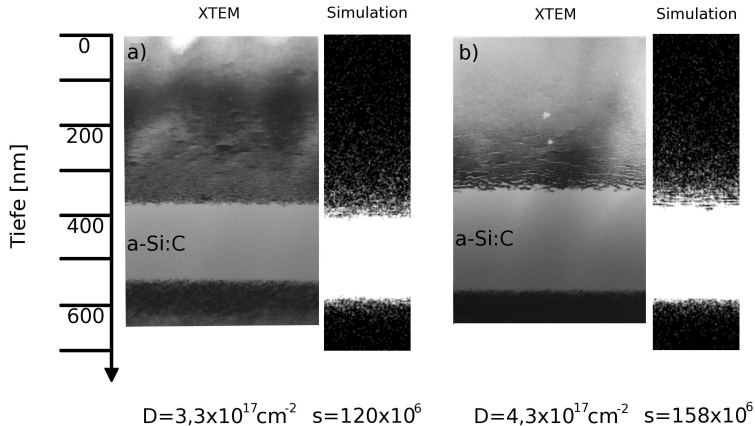
Ergebnisse

amorphe Phasen in Abhängigkeit der Dosis



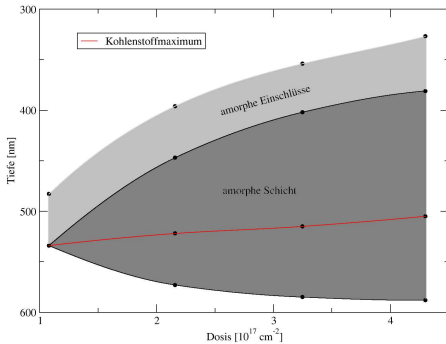
Ergebnisse

amorphe Phasen in Abhängigkeit der Dosis

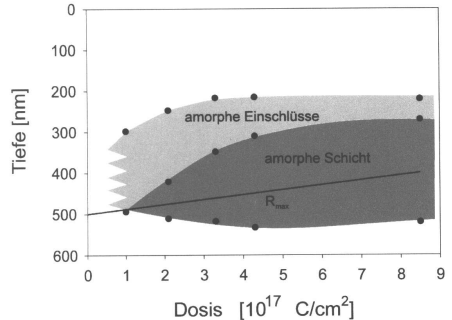


Ergebnisse

amorphe Phasen in Abhängigkeit der Dosis



Simulation



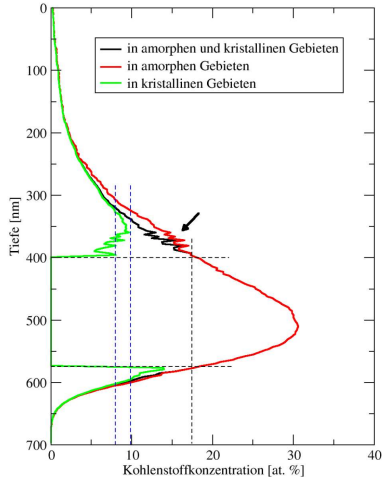
Experiment

Ergebnisse

Kohlenstoffverteilung



- amorphe Gebiete
- kristalline Gebiete



Ergebnisse

Kohlenstoffverteilung an den Grenzflächen zur amorphen Schicht

Experiment

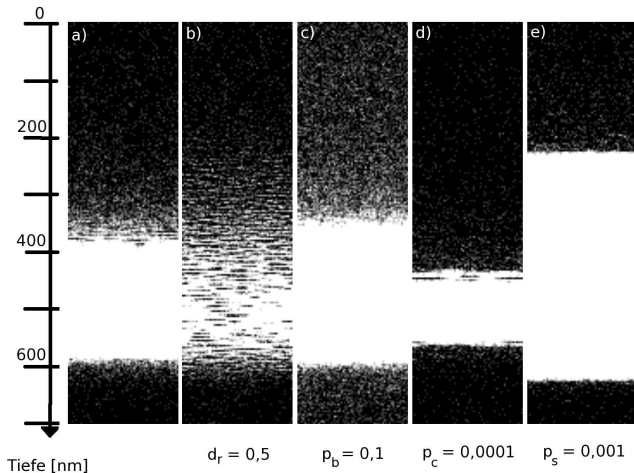
Dosis	C-Konzentration an vorderer Grenzfläche	C-Konzentration an hinterer Grenzfläche
$2,1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	16 at.%	13 at.%
$3,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	13 at.%	14 at.%
$3,4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	14 at.%	12 at.%

Simulation

Durchläufe	äquivalente Dosis	C-Konzentration an vorderer Grenzfläche	C-Konzentration an hinterer Grenzfläche
80×10^6	$2,16 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	15,21 at.%	16,62 at.%
120×10^6	$3,25 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	15,80 at.%	17,67 at.%
159×10^6	$4,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	17,28 at.%	17,73 at.%

Ergebnisse

Variation der Simulationsparameter



$$\begin{aligned} p_b &= 0.01 \\ p_c &= 0.001 \\ p_s &= 0.0001 \\ d_r &= 0.05 \\ d_v &= 10^6 \\ s &= 158 \times 10^6 \end{aligned}$$

Ergebnisse

Zusammenfassung, Version 2

- Modell/Simulation reproduziert die dosisabhängige Bildung der amorphen Phasen
- Gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation (bis auf 30 nm-Shift)
- Entwicklung der Grenzflächen und lamellaren Ausscheidungen reproduzierbar
- Übereinstimmung der Kohlenstoffkonzentration an den Grenzflächen
- Detaillierte Untersuchungen zur Kohlenstoffkonzentration und zur genauen Struktur der Ausscheidungen
- Variation der Simulationparameter
⇒ Bildungsprozess der amorphen Phasen nachvollziehbar

Überblick

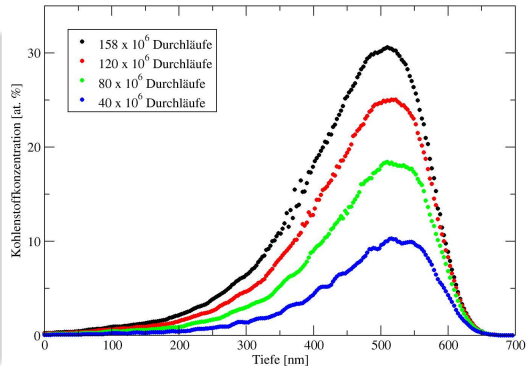
- 1 Einführung und Grundlagen
 - Einführung
 - Ion-Festkörper-Wechselwirkung
 - Die Monte-Carlo-Simulation TRIM
- 2 Experimentelle Befunde und Modell
 - Experimentelle Befunde
 - Modell
- 3 Simulation und Ergebnisse
 - Simulation
 - Simulation bis 300 nm Tiefe
 - Simulation über den gesamten Implantationsbereich
 - Herstellung breiter Bereiche mit lamellarer Struktur
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Zusammenfassung
 - Ausblick

Ergebnisse

Herstellung breiter lamellarer Bereiche durch einen zweiten Implantationsschritt

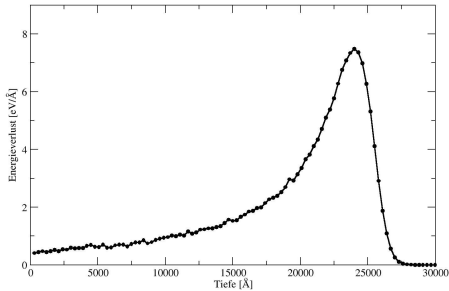
Idee

- Grundlage: 180 keV C^+ -implantiertes Si-Target
- Target durchgehend kristallin (Implantation bei höherer Temperatur)
- Bestrahlung mit 2 MeV C^+ -Ionen bei $T = 150^\circ C$

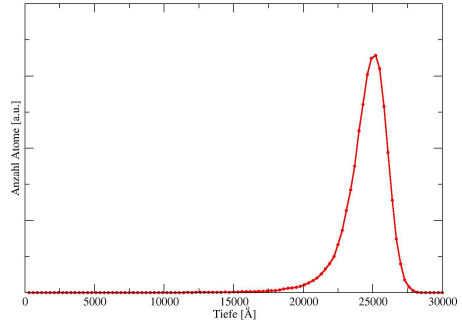


Ergebnisse

Nukleares Bremskraft- und Implantationsprofil von $2\text{ MeV } C^+ \rightarrow Si$



Nukleare Bremskraft 2 MeV
 $C^+ \rightarrow Si$

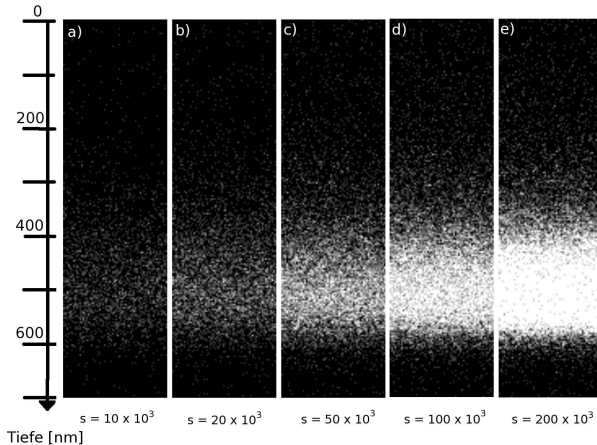


Implantationsprofil 2 MeV $C^+ \rightarrow Si$

Ergebnisse

Ergebnisse des zweiten Implantationsschrittes mit 2 MeV C⁺-Ionen

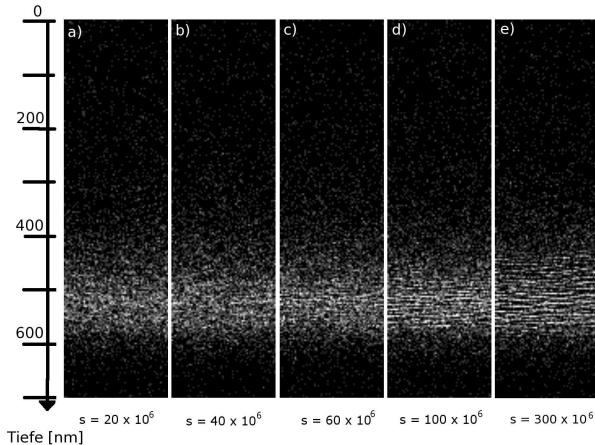
Grundlage: $4.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 180 keV C⁺-Implantation



Ergebnisse

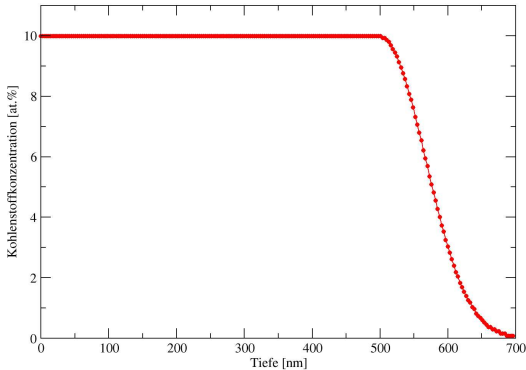
Ergebnisse des zweiten Implantationsschrittes mit 2 MeV C⁺-Ionen

Grundlage: $1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 180 keV C⁺-Implantation



Ergebnisse

Herstellung noch breiterer lamellarer Bereiche durch Mehrfachimplantation

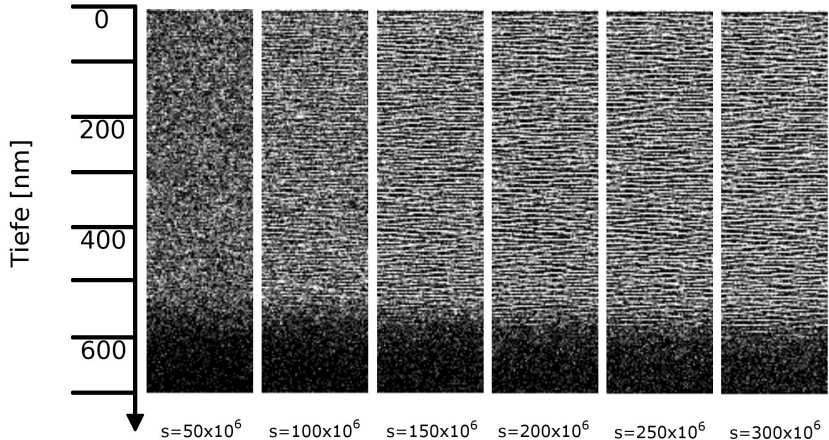


Idee

- breite, konstante, kastenförmige Verteilung des Kohlenstoffs
- Mehrfachimplantation, Energien zwischen 180 und 10 keV
- Konzentrationsmaximum: 10 at.-%
- Bestrahlung mit 2 MeV C⁺-Ionen

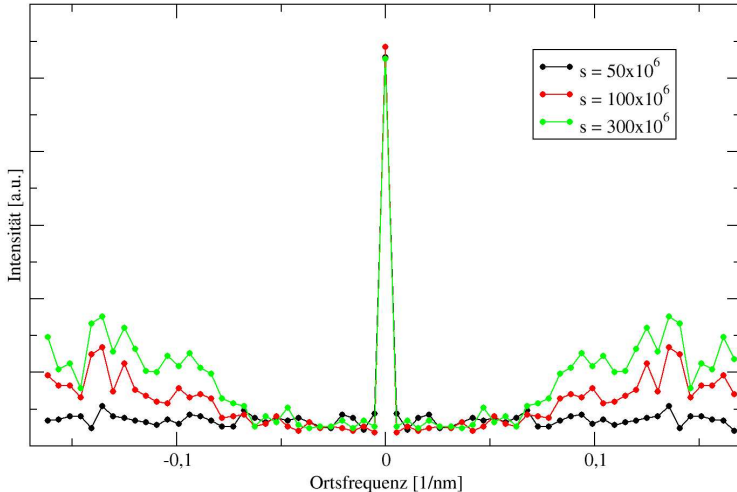
Ergebnisse

Ergebniss der 2 MeV C⁺-Bestrahlung



Ergebnisse

Ergebniss der 2 MeV C⁺-Bestrahlung



Überblick

- 1 Einführung und Grundlagen
 - Einführung
 - Ion-Festkörper-Wechselwirkung
 - Die Monte-Carlo-Simulation TRIM
- 2 Experimentelle Befunde und Modell
 - Experimentelle Befunde
 - Modell
- 3 Simulation und Ergebnisse
 - Simulation
 - Simulation bis 300 *nm* Tiefe
 - Simulation über den gesamten Implantationsbereich
 - Herstellung breiter Bereiche mit lamellarer Struktur
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Zusammenfassung
 - Ausblick

Zusammenfassung

- Experimentell beobachtete selbstorganisierte Anordnung amorpher SiC_x -Ausscheidungen
- Modell zur Beschreibung des Selbstorganisationsvorganges
- Implementierung in einen Monte-Carlo-Simulationscode
- Ergebnisse der Simulation reproduzieren die experimentellen Befunde
- Detaillierte Untersuchungen zur Kohlenstoffkonzentration und zur Struktur der Ausscheidungen möglich
- Vorhersage zur Herstellung großer Bereiche lamellar geordneter Strukturen

Zusammenfassung

- Experimentell beobachtete selbstorganisierte Anordnung amorpher SiC_x -Ausscheidungen
- Modell zur Beschreibung des Selbstorganisationsvorganges
- Implementierung in einen Monte-Carlo-Simulationscode
- Ergebnisse der Simulation reproduzieren die experimentellen Befunde
- Detaillierte Untersuchungen zur Kohlenstoffkonzentration und zur Struktur der Ausscheidungen möglich
- Vorhersage zur Herstellung großer Bereiche lamellar geordneter Strukturen

Zusammenfassung

- Experimentell beobachtete selbstorganisierte Anordnung amorpher SiC_x -Ausscheidungen
- Modell zur Beschreibung des Selbstorganisationsvorganges
- Implementierung in einen Monte-Carlo-Simulationscode
- Ergebnisse der Simulation reproduzieren die experimentellen Befunde
- Detaillierte Untersuchungen zur Kohlenstoffkonzentration und zur Struktur der Ausscheidungen möglich
- Vorhersage zur Herstellung großer Bereiche lamellar geordneter Strukturen

Zusammenfassung

- Experimentell beobachtete selbstorganisierte Anordnung amorpher SiC_x -Ausscheidungen
- Modell zur Beschreibung des Selbstorganisationsvorganges
- Implementierung in einen Monte-Carlo-Simulationscode
- Ergebnisse der Simulation reproduzieren die experimentellen Befunde
- Detaillierte Untersuchungen zur Kohlenstoffkonzentration und zur Struktur der Ausscheidungen möglich
- Vorhersage zur Herstellung großer Bereiche lamellar geordneter Strukturen

Zusammenfassung

- Experimentell beobachtete selbstorganisierte Anordnung amorpher SiC_x -Ausscheidungen
- Modell zur Beschreibung des Selbstorganisationsvorganges
- Implementierung in einen Monte-Carlo-Simulationscode
- Ergebnisse der Simulation reproduzieren die experimentellen Befunde
- Detaillierte Untersuchungen zur Kohlenstoffkonzentration und zur Struktur der Ausscheidungen möglich
- Vorhersage zur Herstellung großer Bereiche lamellar geordneter Strukturen

Zusammenfassung

- Experimentell beobachtete selbstorganisierte Anordnung amorpher SiC_x -Ausscheidungen
- Modell zur Beschreibung des Selbstorganisationsvorganges
- Implementierung in einen Monte-Carlo-Simulationscode
- Ergebnisse der Simulation reproduzieren die experimentellen Befunde
- Detaillierte Untersuchungen zur Kohlenstoffkonzentration und zur Struktur der Ausscheidungen möglich
- Vorhersage zur Herstellung großer Bereiche lamellar geordneter Strukturen

Zusammenfassung

- Experimentell beobachtete selbstorganisierte Anordnung amorpher SiC_x -Ausscheidungen
- Modell zur Beschreibung des Selbstorganisationsvorganges
- Implementierung in einen Monte-Carlo-Simulationscode
- Ergebnisse der Simulation reproduzieren die experimentellen Befunde
- Detaillierte Untersuchungen zur Kohlenstoffkonzentration und zur Struktur der Ausscheidungen möglich
- Vorhersage zur Herstellung großer Bereiche lamellar geordneter Strukturen

Überblick

- 1 Einführung und Grundlagen
 - Einführung
 - Ion-Festkörper-Wechselwirkung
 - Die Monte-Carlo-Simulation TRIM
- 2 Experimentelle Befunde und Modell
 - Experimentelle Befunde
 - Modell
- 3 Simulation und Ergebnisse
 - Simulation
 - Simulation bis 300 *nm* Tiefe
 - Simulation über den gesamten Implantationsbereich
 - Herstellung breiter Bereiche mit lamellarer Struktur
- 4 Zusammenfassung und Ausblick
 - Zusammenfassung
 - Ausblick

Ausblick

- Simulation: Variation der Ionensorte/Temperatur
 - Abhängigkeit der Simulationsparameter vom Materialsystem
 - Abhängigkeit der Simulationsparameter von der Temperatur
- Experimentell: Überprüfung der Vorhersage

Ausblick

- Simulation: Variation der Ionensorte/Temperatur
 - Abhängigkeit der Simulationsparameter vom Materialsystem
 - Abhängigkeit der Simulationsparameter von der Temperatur
- Experimentell: Überprüfung der Vorhersage

Ausblick

- Simulation: Variation der Ionensorte/Temperatur
 - Abhängigkeit der Simulationsparameter vom Materialsystem
 - Abhängigkeit der Simulationsparameter von der Temperatur
- Experimentell: Überprüfung der Vorhersage

Danksagung

- Prof. Dr. Bernd Stritzker
- PD Volker Eyert
- PD Jörg Lindner
- Dipl. Phys. Maik Häberlen
- Dipl. Phys. Ralf Utermann
- EP4 + Diplomanden