

FP-2024 - Versuch V44

Röntgenreflektometrie

Martin Boussard
Jan Oppoli

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	2
2	Theorie	2
2.1	Röntgenstrahlung	2
2.1.1	Erzeugung von Röntgenstrahlung	2
2.1.2	Eigenschaften von Röntgenstrahlung	3
2.1.3	Röntgenstrahlung an Grenzflächen	3
2.2	Fresnelsche Formeln	4
3	Auswertung	4
4	Diskussion	4
5	Literaturverzeichnis	4
6	Anhang	5

1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuchs ist es, verschiedene physikalische bzw. geometrische Eigenschaften wie Elektronendichte, Schichtdicke oder Rauigkeit eines Polysterolfilms auf einem Siliziumwafer mittels der Röntgen-reflektometrie zu bestimmen. Die Untersuchung/ Kontrolle solcher Schichten im Nanometerbereich ist insbesondere innerhalb der Halbleiterelektronik von Bedeutung und besitzt eine hohe Relevanz für die Industrie. Durch Analyse des Resultierenden Streubildes unter Verwendung problemangepasster Algorithmen können charakteristische Strukturinformationen der Probe gewonnen werden.

2 Theorie

Als Grundlage für eine effiziente Auswertung der Daten müssen zunächst einige wichtige physikalische Phänomene bzw. Modelle erläutert werden.

2.1 Röntgenstrahlung

Aufgrund ihrer relativ zum sichtbaren Licht vergleichsweise kleine Wellenlänge

$$\lambda_{\text{Röntgen}} < 10 \text{ nm} < 400 \text{ nm} < \lambda_{\text{Sichtbar}}$$

eignet sich Röntgenstrahlung ideal zur Untersuchung von Strukturen der selben Größenordnung.

2.1.1 Erzeugung von Röntgenstrahlung

Nachdem mithilfe des Glühelektrischen Effekts aus der Kathode herausgelöste Elektronen innerhalb der Röntgenröhre in Richtung der Anode beschleunigt werden, wird bei dem Auftreffen Röntgenstrahlung erzeugt. Hierbei ist zwischen Bremsstrahlung und dem charakteristischen Röntgenspektrum zu unterscheiden, wie in Abbildung 1 veranschaulicht ist.

- **Bremsstrahlung:**
Die durch Coulombwechselwirkung zwischen Elektron und Atomrumpf des Targets verkleinerte kinetische Energie des Elektrons wird teilweise in Röntgenstrahlung mit kontinuierlichem Spektrum umgewandelt und emittiert.
- **Charakteristische Röntgenstrahlung:**
Treffen die beschleunigten Elektronen auf das Target und lösen dort Elektronen aus inneren Schalen des Atoms heraus, werden diese Leerstellen durch nachrückende Elektronen aus höheren Schalen gefüllt und die resultierende Energiedifferenz spiegelt sich in der Emission von Röntgenstrahlung diskreter Frequenzen wieder, da die Übergangsenergien im Atom quantisiert sind.

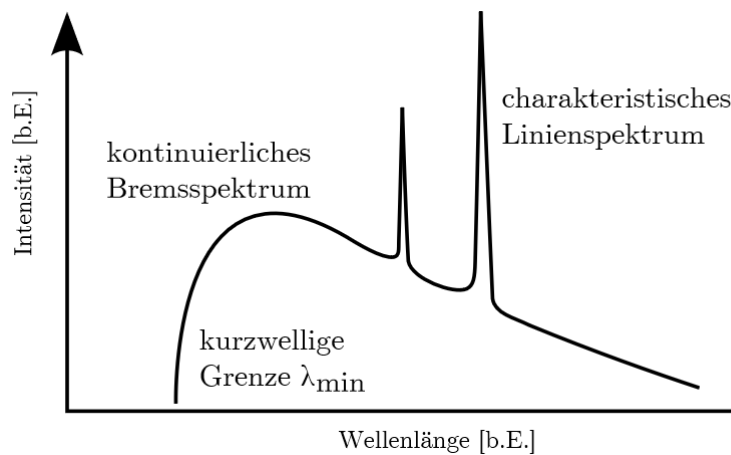


Abbildung 1: Schematisches Emissionsspektrum einer Kupferanode, wie auch in diesem Versuch verwendet. [ROEDresden]

2.1.2 Eigenschaften von Röntgenstrahlung

Die in diesem Versuch relevanteste Frequenz ist die sog. K_α -Linie, welche einem Übergang eines Elektrons von der zweiten (M) in die erste (K) Schale und der Wellenlänge $\lambda_{K_\alpha} = 0.1514 \text{ nm}$ entspricht [ekabs]. Die zugehörige Frequenz ω liegt weit über jeglichen Resonanzfrequenzen ω_1 der betrachteten Materialien, was für weitere theoretische Betrachtungen von Bedeutung ist.

2.1.3 Röntgenstrahlung an Grenzflächen

Das Verhalten von Röntgenstrahlung an Grenzflächen von Medien unterschiedlichem Brechungsindex wird gemäß des Snellius'schen Brechungsgesetzes

$$n_1 \cos(\alpha) = n_2 \cos(\alpha_t) \quad (1)$$

entsprechend der Winkel in Abbildung 2 dargestellt, wobei nach dem Reflexionsgesetz Einfallswinkel = Ausfallswinkel gilt.

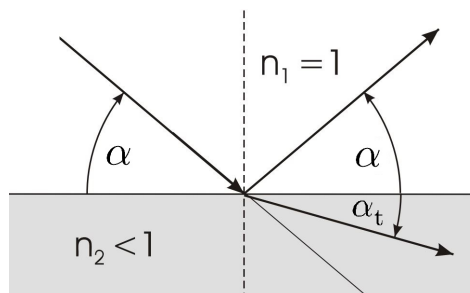


Abbildung 2: Skizze der Winkel des einfallenden, ausfallenden und gebrochenen Strahls and einer Grenzfläche. [uni'giessen]

Der komplexe Brechungsindex n von verschiedenen Medien rührt von Lorentz-Oszillator-Modell für Festkörper her, bei welchem sich im hochfrequenten Näherungsfall der Röntgenstrahlung

die folgende Formel für nicht-ferromagnetische Materialien

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = 1 - \frac{\rho r_0}{2\pi} \lambda^2 + i \frac{\gamma}{4\pi} \lambda := 1 - \delta + i\beta \quad (2)$$

mit Elektronenradius r_0 , Elektronendichte N , Wellenlänge λ und linearem Absorptionskoeffizient γ zusammengefasst in Kenngrößen der Dispersion δ und dem Absorption β , ergibt.

Besonderheit der Röntgenstrahlung ist, dass für sie jedes Medium geringfügig optisch dünner als das Vakuum erscheint, womit im Gegensatz zu sichtbarem Licht Totalreflexion im Übergang von Vakuum zu Medium auftreten kann. Dies tritt gemäß Gleichung 1, 2 für Winkel

$$\alpha_{\text{Krit}} < \sqrt{2\delta} = \lambda \sqrt{\frac{\rho r_0}{\pi}} \quad (3)$$

auf, da der Cosinus für derart kleine betrachtete Winkel mithilfe seiner Taylorreihe angenähert werden kann.

2.2 Fresnelsche Formeln

Hergeleitet mithilfe der Maxwell-Gleichungen an Grenzschichten ergeben sich für das Amplitudenverhältnisses von einfallender und reflektierter Welle die Formeln

$$r_s = \frac{n_1 \sin \alpha - \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} n_2 \sin \alpha_t}{n_1 \sin \alpha + \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} n_2 \sin \alpha_t} \quad (4)$$

$$r_p = \frac{2n_1 \sin \alpha}{\frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} n_2 \sin \alpha + n_1 \sin \alpha_t}, \quad (5)$$

wobei zwischen parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisierter Strahlung unterschieden wird. Die verwendeten Winkel sind die selben wie oben in Gleichung 1. Im konkreten Fall der hochfrequenten Röntgenstrahlung mit streifendem Einfall vereinfachen sich die Formeln enorm zu

$$r = r_{s,p} = \frac{\alpha - \alpha_t}{\alpha + \alpha_t} \quad (6)$$

3 Auswertung

4 Diskussion

5 Literaturverzeichnis

6 Anhang