

## Rasterelektronenmikroskop

1

(scanning electron microscopy)



Das Rasterelektronenmikroskop (REM, SEM) unterscheidet sich von herkömmlichen Lichtmikroskopen hinsichtlich der Abbildung von Oberflächen durch folgende Merkmale:

- Höhere Auflösung durch Verwendung von Elektronen statt Photonen
- höhere Schärfentiefe durch das Rasterprinzip
- Farbaufnahmen bleiben dem Lichtmikroskop vorbehalten  
(Falschfarbendarstellungen zeigen Intensitätsvariationen aber keine tatsächlichen Wellenlängen)

Anwendungsgebiete:

Das REM dient zur Abbildung von Oberflächen, Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Elektronen und Materie sowie zur Untersuchung von Oberflächenstrukturen und Zusammensetzung dieser Oberflächen.



Physik, Medizin, Biologie, ...  
Materialuntersuchung (Maschinenbau, Geologie, ...)

apl.Prof. Dr. D.J. As

## Leistungsvergleich

2

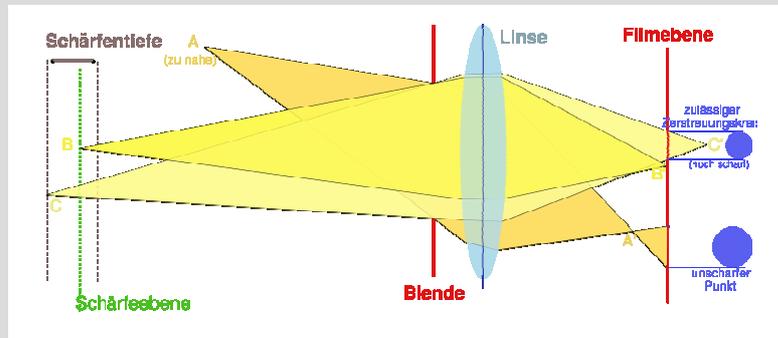
	Auflösung	Vergrößerung	Schärfentiefe
Lichtmikroskop	500 nm	6 – 100 x	bei 100x 2-3 µm
Rasterelektronenmikroskop	10 nm	20 – 20000x	300 mal besser als Lichtmikroskop
Transmissions-elektronenmikroskop	0.5-0.2 nm	50 - 50000x	begrenzt durch Schichtdicke

	<i>Ruhebild-EM</i>	<i>Raster-EM</i>
<i>Transmission</i>	TEM	STEM
<i>Rückstreuung</i>	Reflexionsmikroskop	REM (engl. SEM)

apl.Prof. Dr. D.J. As

## Schärfentiefe

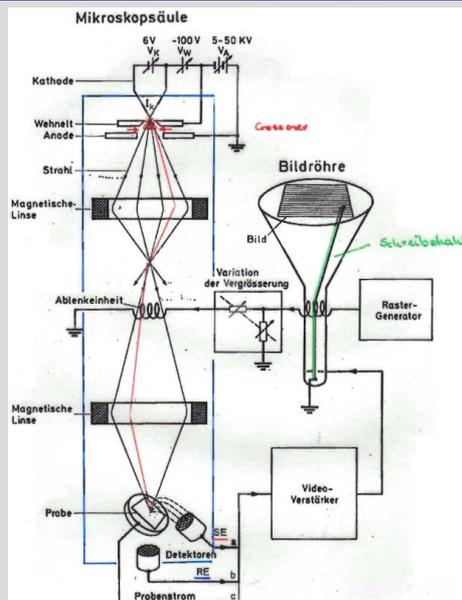
3



apl.Prof. Dr. D.J. As

## Aufbau

4



Das Gerät besteht aus **zwei Hauptteilen**:

- elektronenoptische Säule
- Bedienungskonsole

**Säule** (auf  $10^{-5}$  mbar evakuiert):

- Elektronenquelle
- Linsen zur Bündelung der  $e^-$
- Spulen zur Strahlablenkung
- Objektkammer (Probenbühne und Detektorsystem)
- Objekt ( $< 1 \text{ cm}^2$ )

**Bedienungskonsole** enthält den:

- Leuchtschirm zur Beobachtung oder Photographie,
- die Vakuumsteuerung,
- Raster- und Signalelektronik,
- Steuerungselemente für Linsenströme und Hochspannung

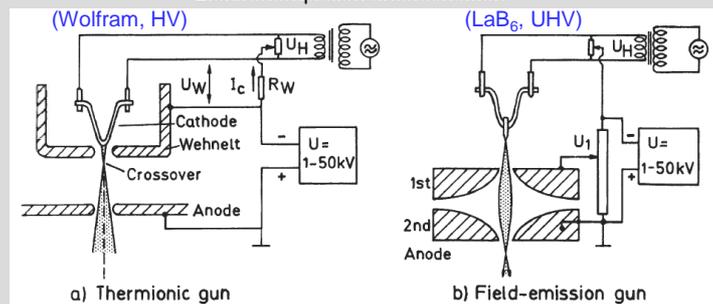
apl.Prof. Dr. D.J. As

Der durch thermische Emission erzeugte Elektronenstrahl wird mit Hilfe elektromagnetischer Linsen auf einen Durchmesser von ca. 10 nm gebündelt. Dieser Primärelektronenstrahl tastet das Objekt zeilenweise ab. Ein zweiter Strahl (Schreibstrahl) zeichnet ebenfalls zeilenweise ein Abbild des Objekts auf den Leuchtschirm. Dabei werden Primär- und Schreibstrahl synchron gesteuert. Das punkt- und zeilenweise zusammengesetzte Bild erfordert einen Bildschirm mit langer Nachleuchtdauer. Die erzielte Vergrößerung ergibt sich aus:

$$\text{Vergrößerung} = \frac{\text{Fläche(Leuchtschirm)}}{\text{Fläche(abgetastetes Objekt)}}$$

Der kleinste Durchmesser der Elektronensonde ergibt sich aus der Abbildung bzw. der Verkleinerung des sogenannten „Crossover“ = Elektronstrahldurchmesser an dem Wehneltzylinder bei der Glühkathode auf die Probe und liegt so bei ca. 20 – 100 Å.

Transmissions- und Rasterelektronenmikroskope lassen sich auch aufgrund der Art ihrer Elektronenquellen unterscheiden



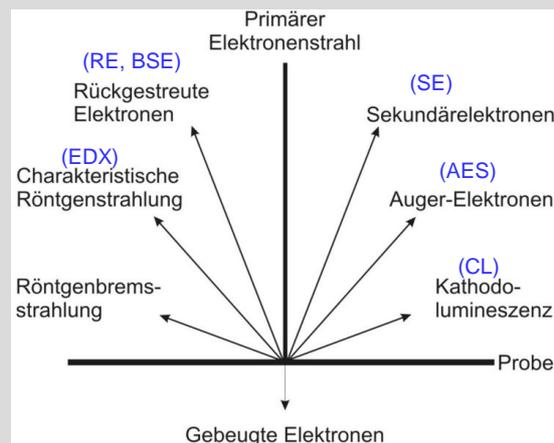
#### Haarnadelkathode

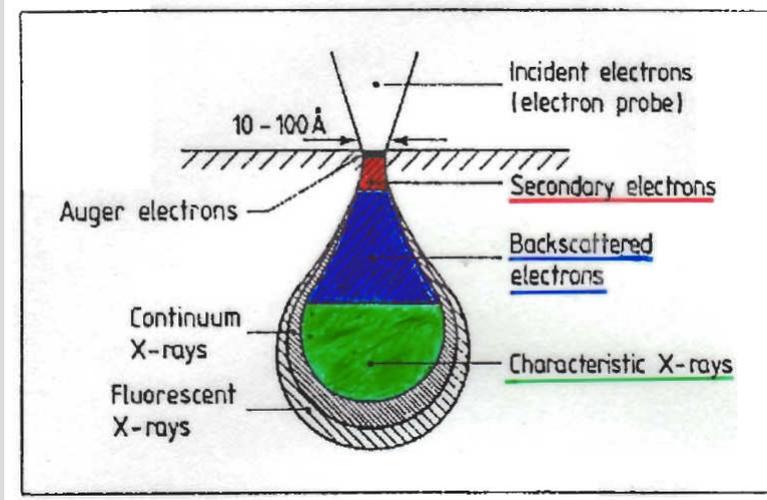
Die meisten Geräte besitzen eine Glühkathode (Filament) aus einer Wolframlegierung. Diese Kathoden - wegen ihrer Form auch Haarnadelkathoden genannt - sind relativ preiswert, einfach zu handhaben und liefern einen hohen Strahlstrom, der z.B. für WDX- und EDX-Analysen nötig ist. Ein Nachteil der Haarnadelkathode ist, dass sie keine punktförmige Elektronenquelle ermöglicht, wodurch auch die Auflösung eingeschränkt wird. Ferner ist diese Elektronenquelle relativ wartungsintensiv, da das Filament bei Gebrauch immer dünner wird und schließlich bricht und ersetzt werden muss. Die Lebensdauer eines Filaments beträgt einige Wochen.

Moderne **Feldemissionselektronenmikroskope (FEM)** kommen für höchste Auflösungen zum Einsatz. Hier werden in der Feldemitter-Kathode durch eine hohe Spannung Elektronen aus einer **feinen monokristallinen Nadelspitze** herausgezogen und in Richtung Anode beschleunigt. Der Vorteil dieser "kalten Kathode" ist ein sehr dünner Primärstrahl, der Nachteil ist der relativ geringe Strahlstrom.

Das ursprüngliche "Feldemissionsmikroskop" ist eine einfache Form eines Elektronenmikroskops, welches auf der bei sehr hohen Feldstärken stattfindenden Feldemission von Elektronen aus einer monokristallinen, feinen, nadelförmigen Probe beruht. Hiermit lässt sich die atomare Struktur der Probe als Projektion der daraus emittierten Elektronen auf einem Szintillatorschirm sichtbar machen. Es wurde von Erwin Wilhelm Müller erfunden.

Seit Anfang der neunziger Jahre sind immer häufiger **Feldemissions-Rasterelektronenmikroskope (FESEM)** (vom engl. *Field Emission Scanning Electron Microscope*) und Transmissionselektronenmikroskope mit Schottky-Feldemitter anzutreffen. Diese stellen einen sinnvollen Kompromiss zwischen hoher Elektronenausbeute einer Glühkathode und Feinheit des Elektronenstrahls der Feldemitter-Kathode dar. Das Resultat ist ein universell einsetzbares Elektronenmikroskop, das sowohl sehr hohe Auflösungen, als auch sehr gute Analysefähigkeiten besitzt. Die Parameter des Elektronenstrahls sind bei diesem Kathodentyp über lange Zeiträume konstant, was der Qualität von Langzeit-Untersuchungen sehr zugute kommt. Ein Nachteil ist der relativ hohe Preis, der jedoch durch die hohe Lebensdauer von 1,5-2 Jahren wieder kompensiert wird.





apl.Prof. Dr. D.J. As

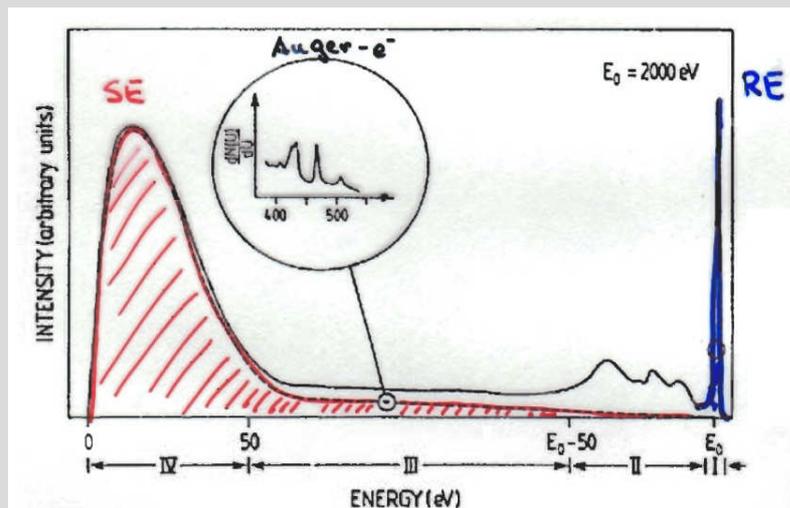


Fig. V.2. Qualitative large-scale overview of the energy distribution of electrons emitted from a surface which is irradiated by an electron beam of primary energy  $E_0$

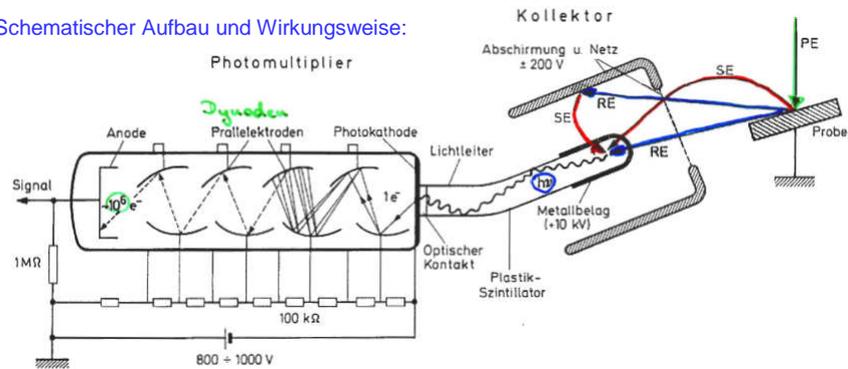
apl.Prof. Dr. D.J. As

## Szintillator – Photomultiplier Kombination

11

(für SE und RE Messungen als Detektor geeignet)

Schematischer Aufbau und Wirkungsweise:



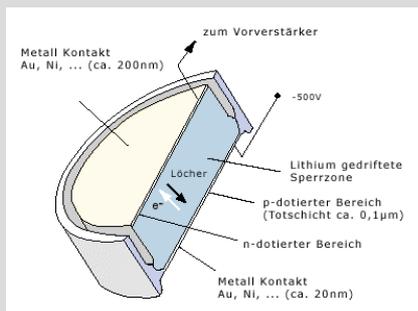
- Ansaugen der SE durch ein positives Potential (+200V)
- Beschleunigung durch ein Potential von + 10 kV am Metallbelag des Plastik-Szintillators und Emission von Photonen  $h\nu$
- Vervielfachung der durch Photonen im Photomultiplier ausgelösten Elektronen

apl.Prof. Dr. D.J. As

## Si:Li Detektor

12

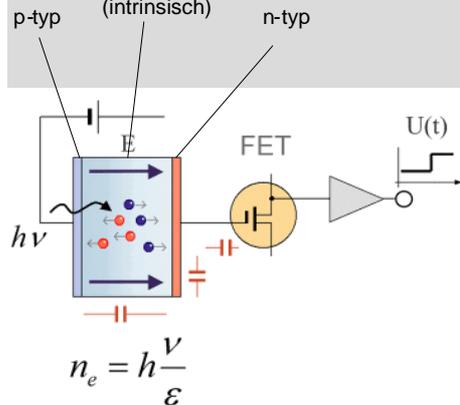
(Li-gedriftingeter Röntgenstrahlendetektor)



P-i-n Detektor

V ~ 500-1000V

Li dotiertes Si (intrinsisch)



$$n_e = h \frac{V}{\epsilon}$$

Bem.: da Li sehr leicht diffundiert muss der Detektor ständig gekühlt werden (LN<sub>2</sub>)!

apl.Prof. Dr. D.J. As

## Betriebsart des REM

13

Tabelle 1.1. Betriebsarten des Raster-Elektronenmikroskopes

Betriebsart	Zugrundeliegender physikalischer Effekt	Information	Auflösungs-grenze
<b>Sekundär-elektronen-(SE)-Bild</b>	Abhängigkeit der SE-Ausbeute von der Flächenneigung Materialabhängigkeit	Oberflächen-topographie	(20) 50–200 Å
<b>Rückstreu-elektronen-(RE)-Bild</b>	Abhängigkeit des Rückstreu-koeff. von der Flächenneigung Stärkere Schatteneffekte als im SE-Bild Erhöhte Rückstreuung an Kanten	Oberflächen-topographie	0,1–1 µm stärkeres Rauschen bei hohen Vergr.
	Materialabhängigkeit Eindringtiefe $\approx \frac{1}{2}$ Reichweite Energiefilterung „Low-Loss electrons“	Materialkontrast Tiefeninformation Höhere Auflösung	0,1–1 µm 1 µm 20 Å–0,1 µm
<b>Probenstrom-bild</b>	Veränderungen des Probenstromes durch Variation der SE-Ausbeute und des Rückstreu-koeffizienten	Oberflächen-topographie Materialkontrast	0,1–1 µm
<b>Channelling-Diagramme</b>	Abhängigkeit des Rückstreu-coeff. und der SE-Ausbeute von der Kristallorientierung zum einfallenden Strahl	Kristallstruktur-analyse und Orientierungsbest. Kristallschäden in dünnen Oberfl.-Schichten	1–10 µm Winkelaufw. einige $10^{-4}$ rad Tiefe: einige 100 Å
<b>SE- und RE-Bild</b>		Kristall-orientierungs-kontrast	500–1000 Å

<b>Potential-Kontrast</b>	Beeinflussung des SE-Signals durch das Probenpotential und der SE-Bahnen durch die Proben-Kollektor-Geometrie	Abb. elektr. Potentiale in Form von Helligkeitsänderungen. Funktionstest bei integrierten Halbleiterschaltungen. Piezoelektrika Ferroelektrika	1–10 µm 0,1–0,01 V
<b>Magnetischer Kontrast Typ I</b>	Ablenkung der SE durch magnetische Streufelder an der Oberfläche	Abb. des magnetischen Streufeldes in Form von Helligkeitsänderungen (Tonbänder, Ferromagnetika)	1–10 µm $\int B ds = 10^{-8}$ Vs m <sup>-1</sup>
<b>Typ II</b>	Beeinflussung der RE-Bahnen im Innern der Probe	Abb. der Magnetisierung in Ferro-magnetika	1–10 µm
<b>Elektromotorische Kraft (EMK)</b>	Auftreten einer EMK bei der Bestrahlung von pn-Übergängen	Abb. von pn-Übergängen (auch unterhalb von Aufdampf- u. Oxidschichten) Breite des Überganges Messung von Halbleiterkonstanten	0,1 µm
	Reichweite der Elektronen	Tiefe der pn-Übergänge und Dicke der Aufdampfschichten	
	Rekombination der Minoritätsträger an Gitterfehlern	Abb. von Ver-setzungen	
	Lawinendurchbruch an Fehlern in pn-Übergängen	Lokalisation der Mikroplasmaen	
	Potentialdifferenzen bei Benutzung des Elektronenstrahles als Sonde	Widerstandshomogenitäten, Messung von Diffusionslängen	

apl.Prof. Dr. D.J. As

## Betriebsart des REM II

14

Betriebsart	Zugrundeliegender physikalischer Effekt	Information	Auflösungs-grenze
<b>Kathodolumineszenz</b>	Emission von Lichtquanten (Infrarot bis UV) durch Elektronenbeschuß	Leuchtverteilung in Phosphoren und Halbleitern, Fluoreszenzmikroskopie an biol. Objekten (z. B. Dünnschnitten). Lokale Messung des Emissionsspektrums	1–10 µm
<b>Röntgenmikroanalyse</b>	Emission der charakteristischen Strahlung. Nachweis mit energie-dispersiven Halbleiterdetektoren oder wellenlängendispersiv (Kristallmonochromator)	Qualitative und simultane Elementanalyse. Elementverteilung in der Probe	(500 Å) 0,1–1 µm
<b>Röntgenprojektionsmikroskopie</b>	Vergrößerte Abb. des Objektes durch Schattenprojektion	Innenstruktur biol. u. metallogr. Proben	0,5–1 µm
<b>Röntgenfluoreszenz</b>	Ionisation durch Röntgenquanten	Spurenanalyse	ca. 0,5–1 nm
<b>Röntgen-Kossel-Diagramme</b>	Erzeugung eines Beugungsdiagrammes mit Kossel-Linien (Aufnahme mit Film in Rückstreuung)	Kristallstruktur- und Orientierungsbest.	10 µm
<b>Sekundärionenmassenspektroskopie (SIMS)</b>	Zerstäubung durch Ionenbeschuß	Elementanalyse	20–100 µm
<b>Auger-Elektronen</b>	Registrierung der Augerelektronen (100–1000 eV) mit einem Spektrometer  Verschiebung des Auger-Peaks durch Probenpotentiale	Materialanalyse (Ultrahochvakuum)  Lokale Messung des Probenpotentials	Tiefe: 2–10 Å  0,1 µm

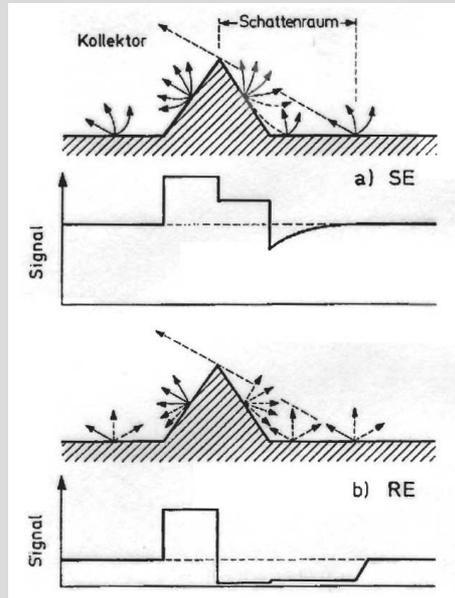
<b>Transmissionsbild</b>	Abb. der Winkelverteilung transmittierter Elektronen von Schichtdicke und Material	Massendickeverteilung in der Schicht	2–100 Å
	Materialabhängigkeit der Energieverluste	Materialdifferenzierung	
	Feldemissionskathode, Ultrahochvakuum, Strahldurchmesser einige Å, elektronische Signalverarbeitung	Höchstauflösung	2–5 Å
	Elektronenbeugung	Abb. kristalliner Objekte u. Gitterfehler	
<b>Beugung in Transmission</b>	Klassische Elektronenbeugungsdiagramme in dicken Schichten (Kikuchi-Diagramme), Beugung im konvergenten Bündel	Kristallstruktur- und Orientierungsbest.	
<b>Mikroschreiber</b>	Vernetzung von Photo-lack durch Elektronenbeschuß	u. a. Mikrominiaturisierung integrierter Halbleiterschaltungen	0,1–1 µm

Elektronen-Strahl Lithographie:

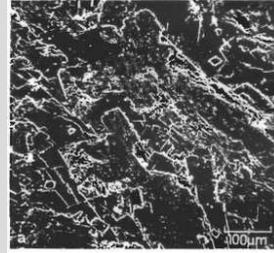
→ Nanostrukturierung

z.B. von Photonischen Kristallen

apl.Prof. Dr. D.J. As



SE-Bild



RE-Bild



apl.Prof. Dr. D.J. As

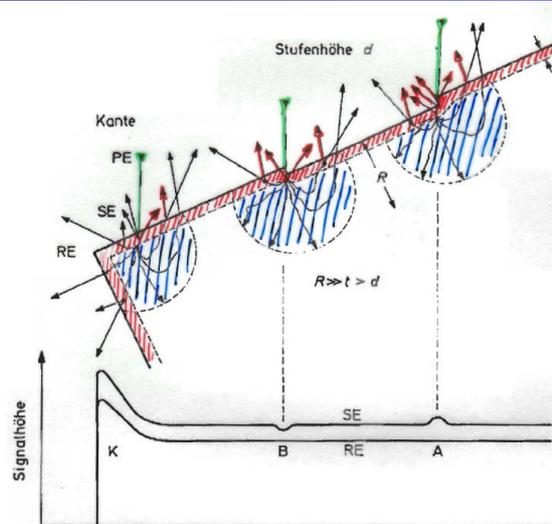
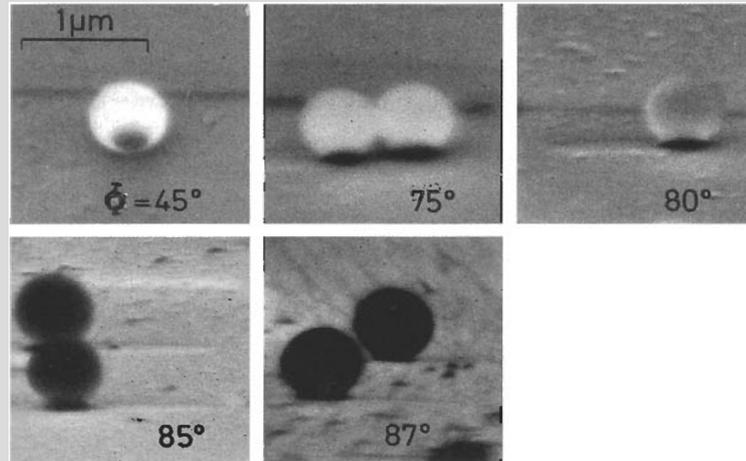


Abb. 4.8. Schematischer Intensitätsverlauf des SE- und RE-Signals bei der Beobachtung einer Kante K (Signalüberhöhung durch den Kanteneffekt) und des SE-Signals bei der Abbildung kleiner Oberflächenstufen in den Anordnungen A und B

apl.Prof. Dr. D.J. As

## Winkelabhängigkeit

17

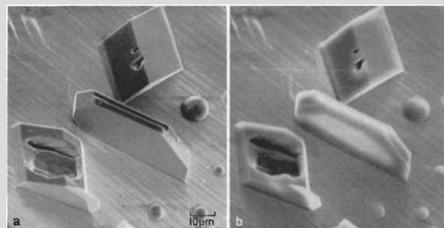


Änderung der SE Bildintensität von kleinen Polystyrenkugeln relative zur Substratebene bei Vergrößerung des Neigungswinkel. Zwischen 85° und 87° tritt eine Kontrastumkehr auf.

apl.Prof. Dr. D.J. As

## Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung

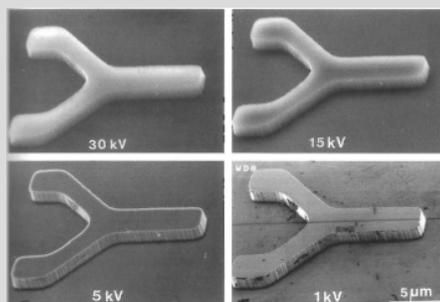
18



SE Bild von Tridymitkristallen und Hyalitkugeln auf einen Goldsubstrat bei:

- a) 10 keV
- b) 30 keV

→ **Kanteneffekt**



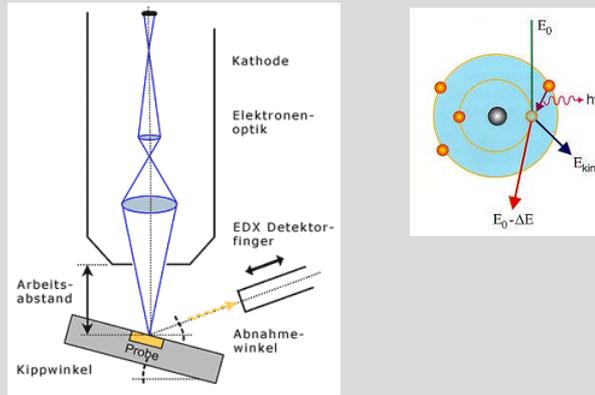
SE-Bild eines Y-förmigen Si-Barrens mit Primärenergien von

- a) 30 keV
- b) 15 keV
- c) 5 keV
- d) 1 keV

(Oberflächenneigung  $\Phi=45^\circ$ )

apl.Prof. Dr. D.J. As

Bei der EDX-Analyse werden die Röntgenstrahlen detektiert, die bei der Wechselwirkung zwischen Elektronen und Probe freigesetzt werden. Die elementspezifischen Banden werden zur Elementanalyse verwendet.



apl.Prof. Dr. D.J. As

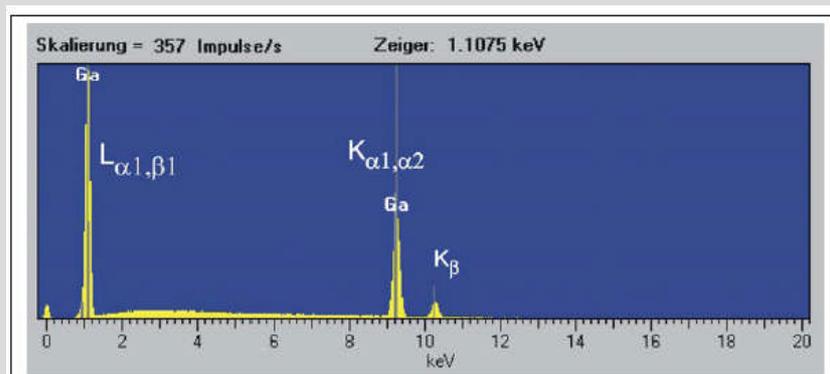
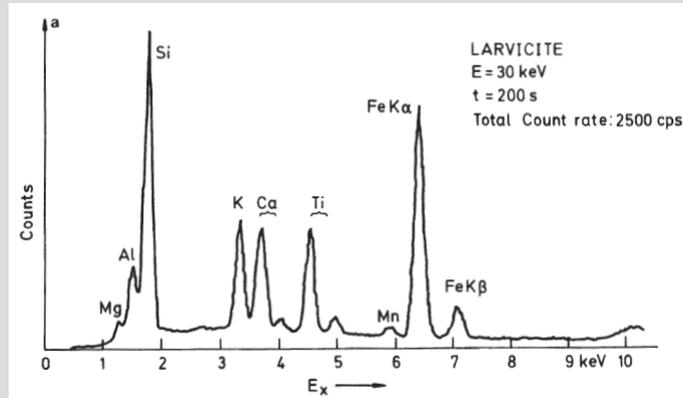


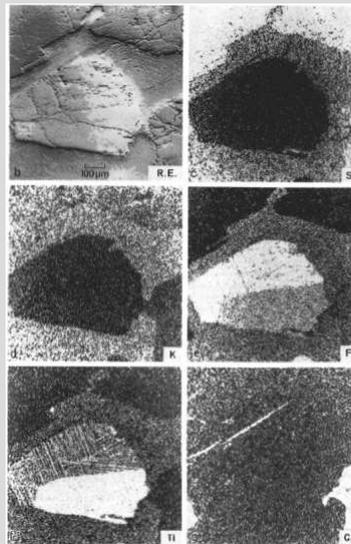
Abb. 7: EDX-Spektrum von Ga

apl.Prof. Dr. D.J. As



**Fig. 10.40.** X-ray microanalysis of larvicite with Fe-Ti oxide inclusions. (a) Total x-ray spectrum of the specimen. (b) BSE micrograph of an oxide grain surrounded by feldspath and mica. Elemental distribution maps recorded with the (c) Si, (d) K, (e) Fe, (f) Ti and (g) Ca  $K\alpha$  lines. Lamellar structure of the Fe-Ti phase with superposed x-ray linescans of (h) Fe and (i) Ti  $K\alpha$  [10.174]

apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As



Beim **Transmissionselektronenmikroskop (TEM)** durchstrahlen die Elektronen das Probenmaterial, das zu diesem Zweck entsprechend dünn sein muss. Je nach Ordnungszahl der Atome, aus denen die Probe besteht, der Höhe der Beschleunigungsspannung und der gewünschten Auflösung kann die sinnvolle Probendicke von wenigen Nanometern bis zu einigen Mikrometern reichen. Je höher die Ordnungszahl und je niedriger die  $V_B$  sind, desto dünner die Probe sein.

Wird der Primärelektronenstrahl über die Probe gerastert, und die durchgelassenen Elektronen detektiert und einem Punkt auf der Probenoberfläche zugeordnet, so bezeichnet man dieses Verfahren als **Raster-Transmissionselektronenmikroskopie (STEM)** vom engl. *Scanning Transmission Electron Microscope*.

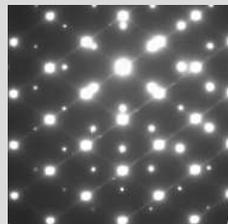
Durch eine Änderung des Projektiv-Linsensystems kann anstatt des Zwischenbildes auch die Fokusebene der Objektiv-Linse vergrößert abgebildet werden (siehe Abbildung). Man erhält so wie beim EBSD-Verfahren im REM ein **Elektronenbeugungsbild** mit dessen Hilfe sich die Kristallstruktur der Probe bestimmen lässt.

Das Transmissionselektronenmikroskop kann sinnvoll mit verschiedenen Analysemethoden erweitert werden, besonders verbreitet sind EDX sowie Elektronen-Energieverlust-Spektroskopie (EELS). Beide Verfahren können zur Bestimmung der Konzentration und Verteilung chemischer Elemente in der Probe benutzt werden. Man spricht beim Einsatz dieser Methoden oft von analytischer Transmissionselektronenmikroskopie.

apl.Prof. Dr. D.J. As



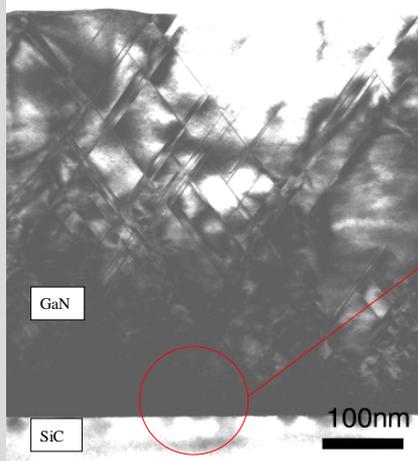
Lattice parameters  
 $a_{\text{GaN}}=4.50 \text{ \AA}$   
 $a_{\text{GaAs}}=5.653 \text{ \AA}$   
 lattice mismatch: 20%



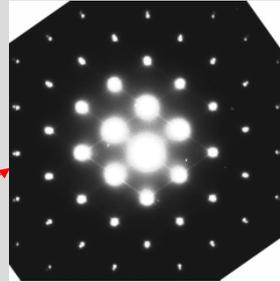
Intrinsic stacking faults are the dominant defects in the GaN epilayer, as shown in the lattice image. The streaky lines in the electron diffraction patterns are evidence of a high density of stacking faults.

apl.Prof. Dr. D.J. As

Cross-section TEM image taken along <110> zone axis. The dominant defects in the film are stacking faults.

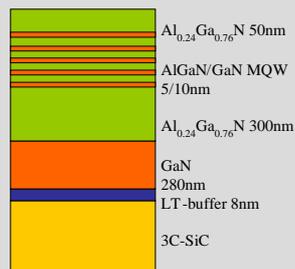
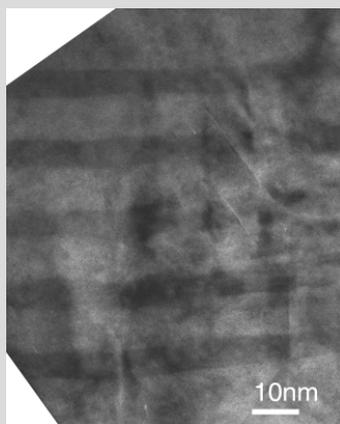


Diffraction pattern taken at the interface of GaN/SiC. The streak lines between diffraction spots are caused by a high density of stacking faults. Two sets of patterns can be identified for higher index spots.



$a_{\text{GaN}} = 4.50 \text{ \AA}$   
 $a_{\text{3C-SiC}} = 4.36 \text{ \AA}$   
 lattice mismatch: 3.2%

apl.Prof. Dr. D.J. As



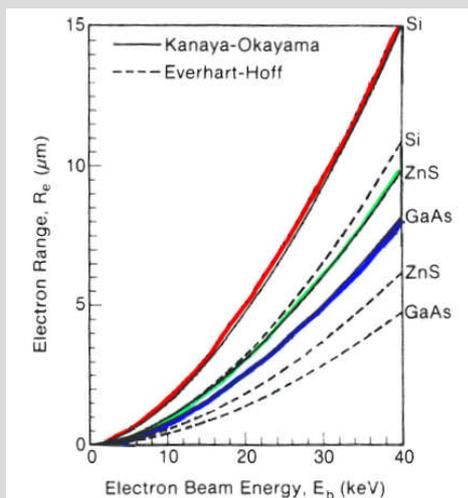
GaN/AlGaN MQW

- Thickness: 5.5/8.5nm
- Calibrated with lattice fringes
- The quantum well structure follows the wavy growth front.
- Stacking faults are present in the MQW region.

apl.Prof. Dr. D.J. As

Hierbei werden Valenzelektronen der Rumpfatome durch Stöße mit den Primärelektronen in angeregte Zustände gebracht. Bei der Rückkehr in den Grundzustand geben sie ihre Überschussenergie in Form eines Photons ab. Die Energie des Photons entspricht genau der Energiedifferenz des Übergangs.

Im Bändermodell des Halbleiters wird derselbe Vorgang als die Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren bezeichnet, die nach einer bestimmten Lebensdauer wieder rekombinieren. Die Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren ist von allen hier aufgeführten Dispersionsmechanismen der der am wenigsten Energie erfordert, und der daher auch noch in relativ großer Entfernung vom Auftreffpunkt des Primärstrahls auftritt. Gleichzeitig können die Elektron-Loch-Paare diffundieren, wodurch sich der Ort der Rekombination noch weiter vom Anregungsort entfernt. Lumineszenz kann - abhängig von der Energie des Primärstrahls - noch aus Bereichen beobachtet werden, die bis zu 2 Mikrometer vom Auftreffpunkt des Strahls entfernt sind.



Die Reichweite  $R_e$  der Elektronen nach Kanaya und Okayama ist:

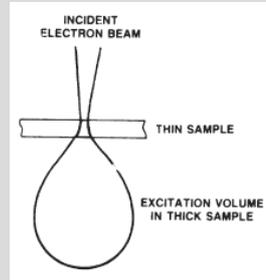
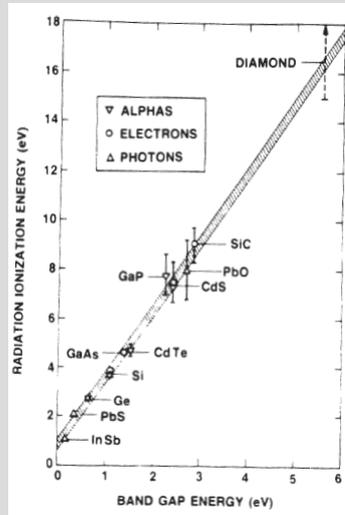
$$R_e = \frac{0.0276 \cdot A}{\rho \cdot Z^{0.889}} \cdot E_b^{1.67} \quad (\mu\text{m})$$

- $E_b$  ... Beschleunigungsenergie der Primärelektronen in keV
- $A$  .... Atomgewicht in g/mol
- $\rho$  .... Materialdichte in  $\text{g/cm}^3$
- $Z$  .... Atomzahl

Der Generationsfaktor  $G$ , d.h. die Anzahl der e-h-Paare die pro einfallendes Elektron erzeugt werden ist:

$$G = \frac{E_b \cdot (1 - \gamma)}{E_i}$$

- $E_i$  ... Ionisationsenergie (Energie zur Bildung eines e-h Paares)
- $\gamma$ .... Repräsentiert den Elektronenstrahlenergieverlust aufgrund rückgestreuter Elektronen



Ionisationsenergie  $E_i$ :

$$E_i = 2.8 \cdot E_{gap} + M$$

mit

$$0 < M \leq 1eV$$

Die lokale Erzeugungsrate von Ladungsträgern ist:

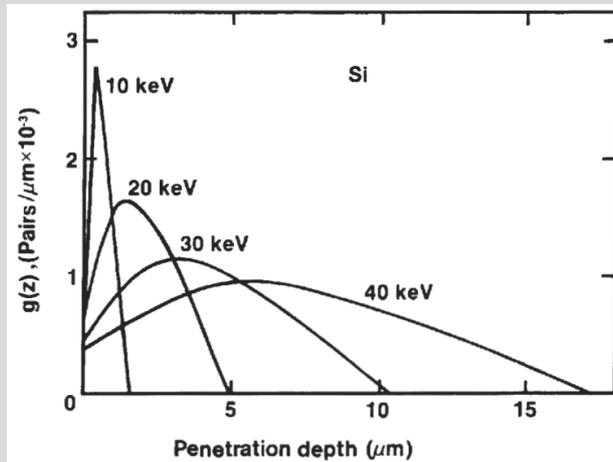
$$g(r, z) = \langle g \rangle \cdot \frac{G \cdot I_b}{q}$$

wobei  $I_b$  .... Elektronenstrahlstrom  
 $G$  .... Generationsfaktor  
 $q$  .... Elementarladung  
 und  $\langle g \rangle$  ... normierte Verteilung der Ionisationsenergie

Die lokale Erzeugungsrate wurde für Silizium experimentell bestimmt, wobei eine universell gültige Tiefen-Dosis Funktion  $g(z)$  vorgeschlagen wurde mit:

$$g(z) = 0.60 + 6.21 \cdot z - 12.40 \cdot z^2 + 5.67 \cdot z^3$$

Wobei:  $z = y \cdot R_e$  ist (bzw.  $y = \frac{z}{R_e}$  .... normalisierte Tiefe)



Universelle Tiefen-Dosis-Funktion g(z):

$$g(z) = 0.60 + 6.21 \cdot z - 12.40 \cdot z^2 + 5.67 \cdot z^3$$

Wobei:  $z = y \cdot R_e$  ist (bzw.  $y = \frac{z}{R_e}$  .... normalisierte Tiefe)

apl.Prof. Dr. D.J. As

3 Näherungen:

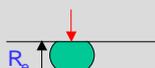
- a) Punktquelle
- b) einheitliche Kugel
- c) gaußförmige Verteilungsfunktion

Einfallender Elektronenstrahl

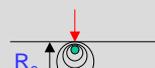
a) Punktquelle



b) Kugelförmige Quelle



b) gaußförmige Quelle



Die tatsächlich birnenförmige Verteilung wie sie experimentell in Gasen und Photolacken beobachtet wird sind in guter Übereinstimmung mit Monte-Carlo Berechnungen der Energie-dissipation in Festkörpern. Das gaußförmige Modell liefert eine gute Näherung und wird

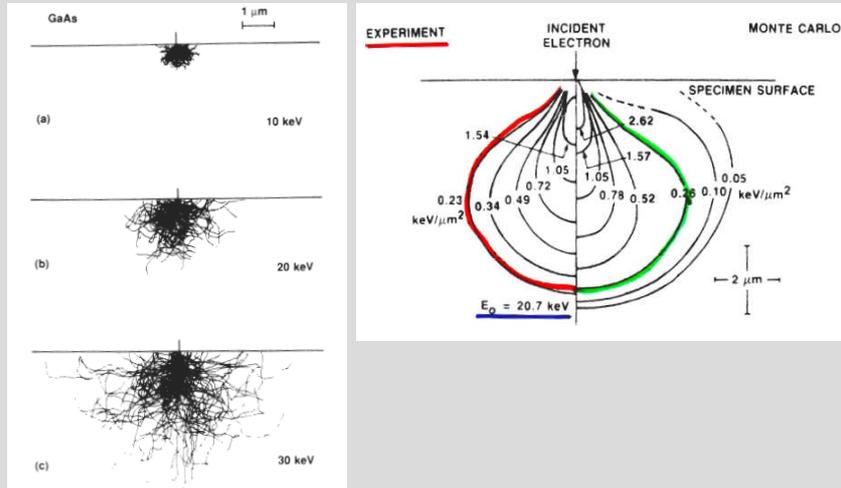
$$F(z) = F_0 \cdot \exp(-a^2 \cdot (z - z_0)^2)$$

eine nahezu gaußförmige Darstellung des Typs:

$$g(r, \Theta) \sim \exp\left(-\frac{r^2}{a^2}\right) \cdot \cos(\Theta)$$

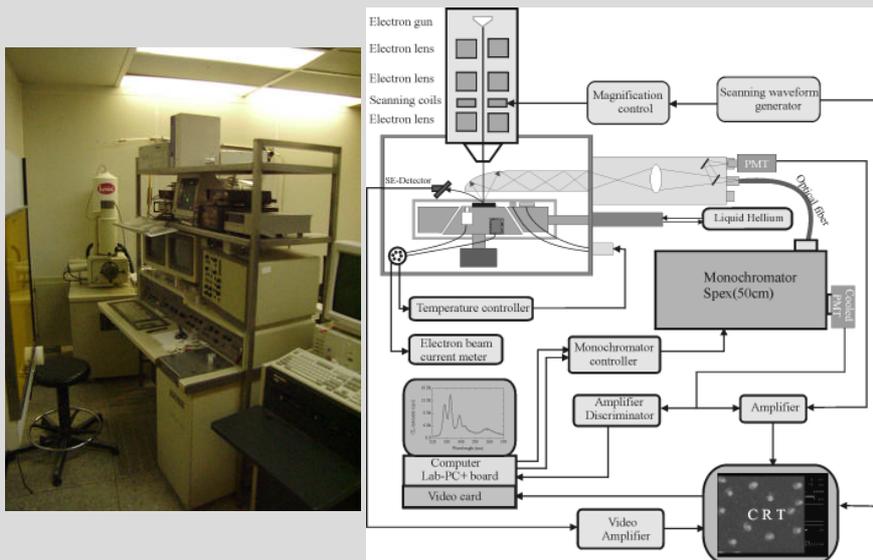
Eine weit verbreitete und effektive Methode zur Berechnung der Elektronenflugbahn ist die Monte-Carlo Methode.

apl.Prof. Dr. D.J. As

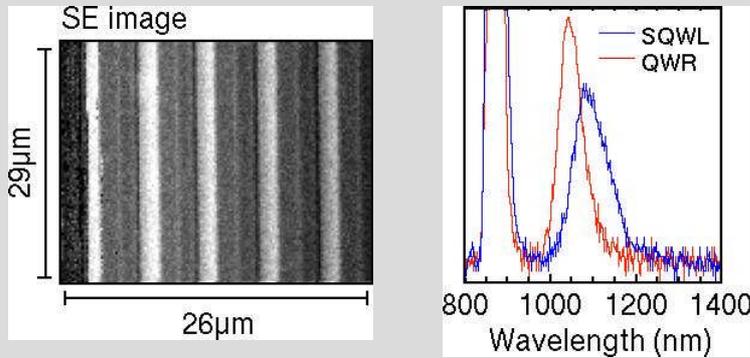


**Figure 4.9.** Energy dissipation profiles for a low-atomic-number solid ( polymethylmethacrylate) as a function of depth, as obtained experimentally by the etching technique and as calculated by Monte Carlo simulation. (After Shimizu *et al.*, 1975.)

apl.Prof. Dr. D.J. As



apl.Prof. Dr. D.J. As

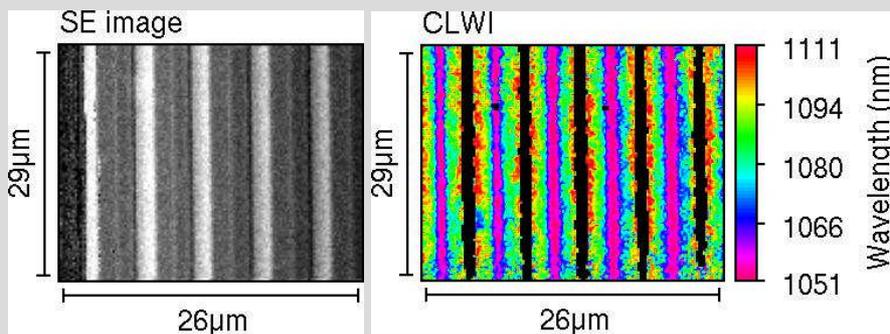


CL-Spot-Spektren, die an zwei verschiedenen Probenstellen gemessen wurden. Die rote Kurve wurde bei Anregung direkt auf dem Quantenfaden (quantum wire - QWR) gemessen, die blaue Kurve bei Anregung neben dem Quantenfaden (ca. 1µm seitlich versetzt). In diesem Bereich, der der Seitenschräge des V-Grabens entspricht, gibt es einen Quantum Well (der side quantum well - SQWL) mit einer Emissionswellenlänge, die größer ist als die des Quantenfadens. Dieses Verhalten ist an sich untypisch für diese Arten von Quantenfäden. Das starke Signal um 870 nm stammt vom Substrat, auf dem die Probe hergestellt wurde.

Quelle: TU Berlin, AG Birnberg

apl.Prof. Dr. D.J. As

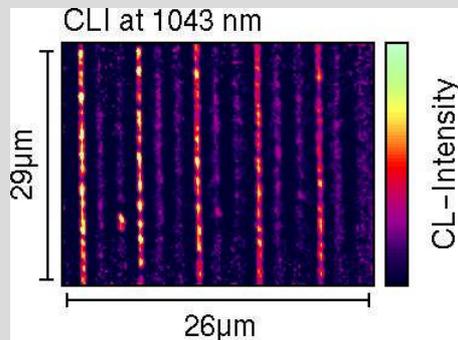
Untersuchung einer Struktur mit selbstorganisierten Quantenfäden in V-Gräben



**Monochromatisches CL-Verteilungsbild:** Bei dieser Meßmethode wird die Ortsauflösung der CL genutzt. Der Primärstrahl wird über die Probenoberfläche gerastert. An jedem Rasterpunkt wird die Lumineszenzintensität auf einer vor eingestellten Wellenlänge gemessen. Das aufgenommene Verteilungsbild gibt (zusammen mit dem SE-Image) Informationen über die räumliche Struktur der Probe

Quelle: TU Berlin, AG Birnberg

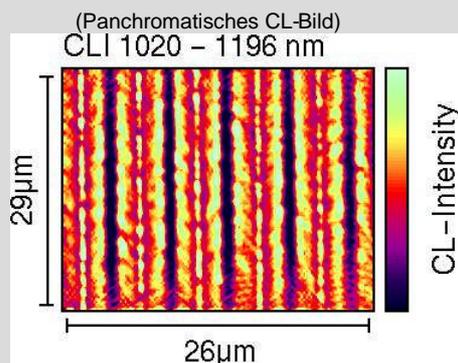
apl.Prof. Dr. D.J. As



Oben ist das Lumineszenzverteilungsbild der Probe bei einer Wellenlänge von 1043 nm dargestellt. Der Bildausschnitt ist identisch mit dem des SE-Bildes. Die Lumineszenzintensität ist in einem Falschfarbenkeil codiert. Eine helle Farbe entspricht einer starken Lumineszenz, eine dunkle Farbe einer schwachen. Es ist leicht zu erkennen, daß das stärkste Signal von einigen sehr schmalen Streifen stammt, die an Hand des SE-Bildes als der Bereich der V-Grabenspitze identifiziert werden können. Die Lumineszenz auf dieser Wellenlänge kann dem im Graben lokalisierten Quantenfaden zugeordnet werden.

Quelle: TU Berlin, AG Birnberg

apl.Prof. Dr. D.J. As

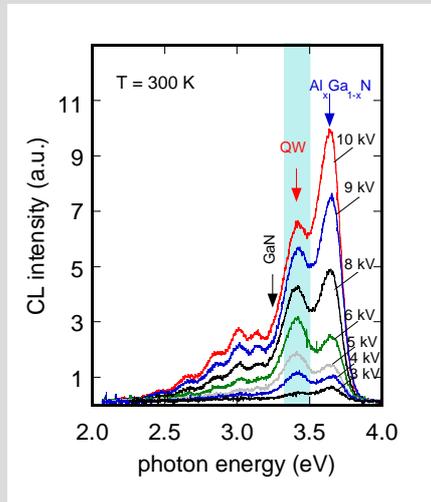
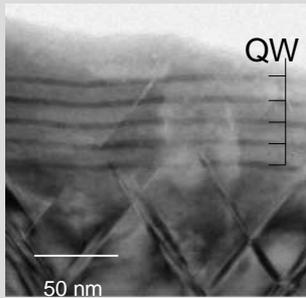


Oben ist die Lumineszenzverteilung dargestellt, die sich ergibt, wenn nicht nur eine einzige Wellenlänge betrachtet wird, sondern ein ganzer Wellenlängenbereich. Der dargestellte Bereich schließt sowohl die Lumineszenz des Quantenfadens als auch die des Seitenflächen Quantumwells mit ein (siehe obiges Spot-Spektrum). Das Bild läßt zum einen über die Inhomogenitäten der Lumineszenzverteilung Rückschlüsse auf die strukturelle Qualität der Probe zu, zeigt aber andererseits auch, daß der Quantenfaden und der Seitenflächen Quantumwell nicht oder kaum miteinander verbunden sind (sog. Pinch-off)

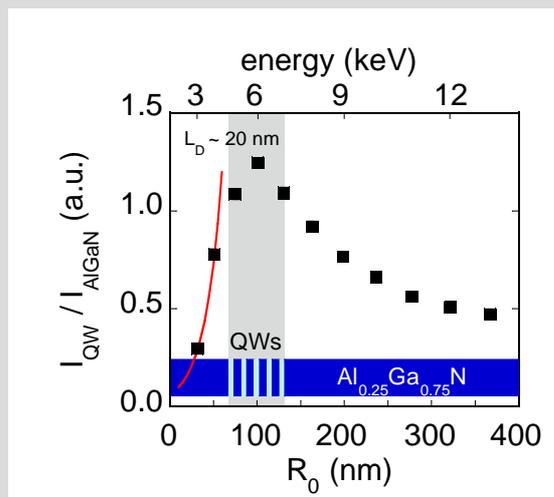
Quelle: TU Berlin, AG Birnberg

apl.Prof. Dr. D.J. As

(Tiefenaufgelöste Messungen)



apl.Prof. Dr. D.J. As



Diffusion length  $L_D$ :

$$I_{QW} \approx \exp\left(-\frac{(x-x_{max})}{L_D}\right)$$

apl.Prof. Dr. D.J. As