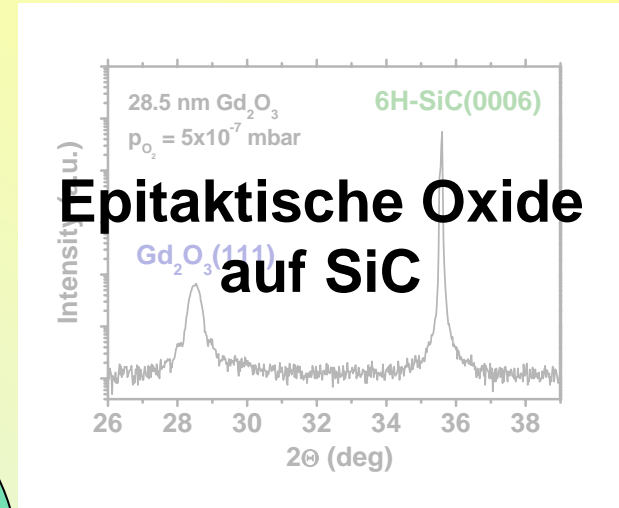
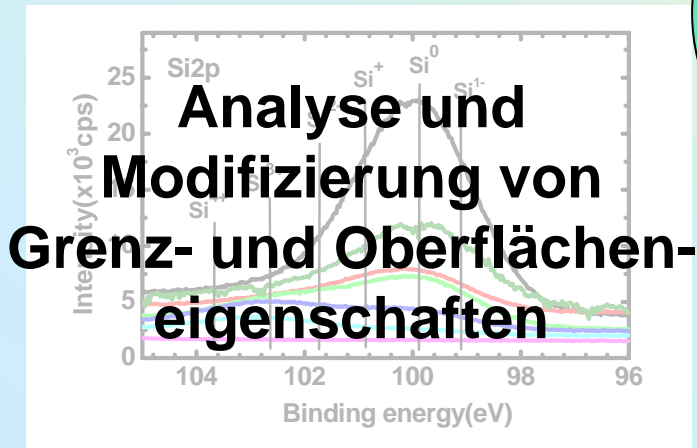


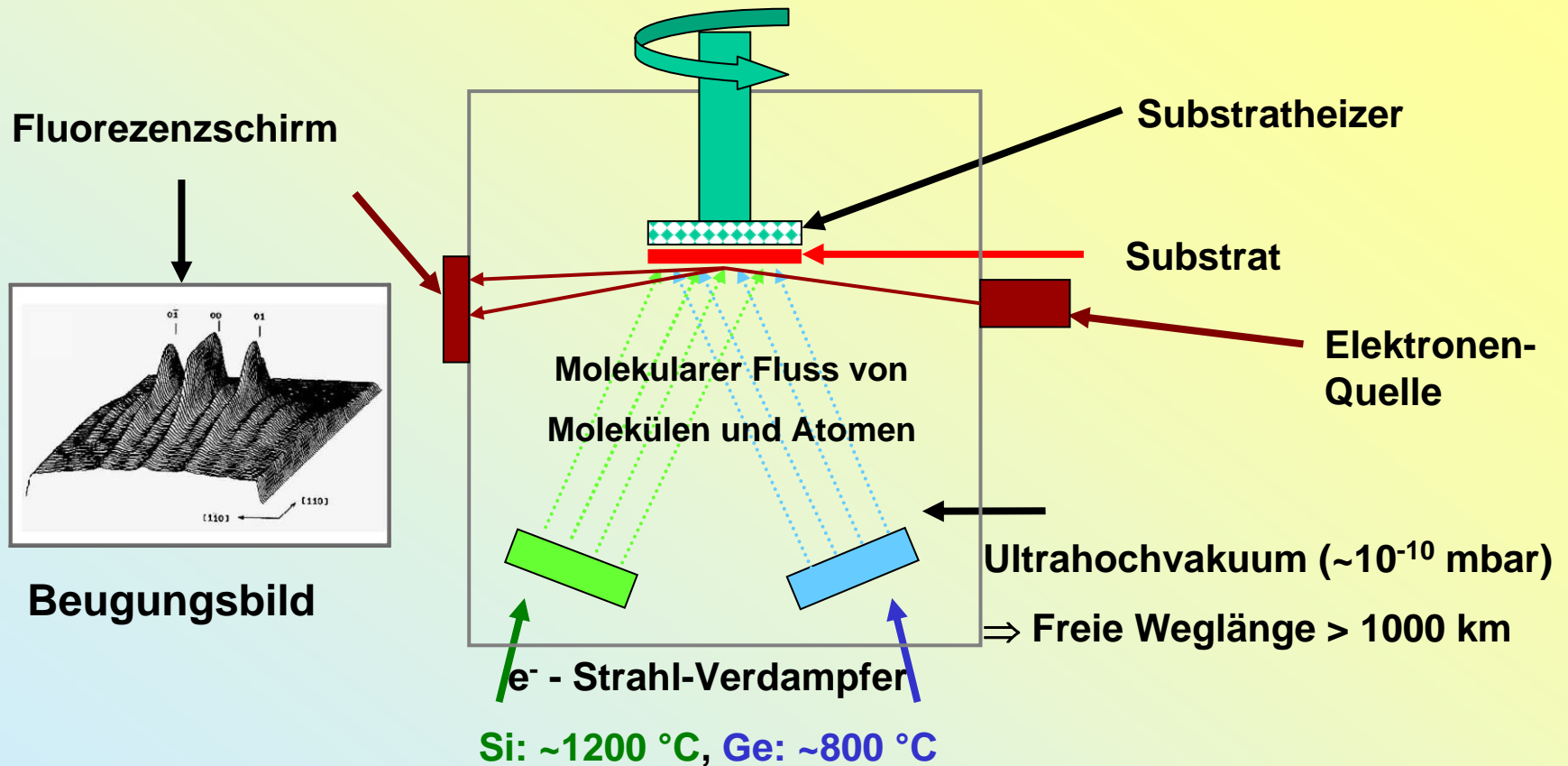
Informationstechnologie



Epitaxie
επι(epi) – auf
ταξιζ(taxis) – anordnen



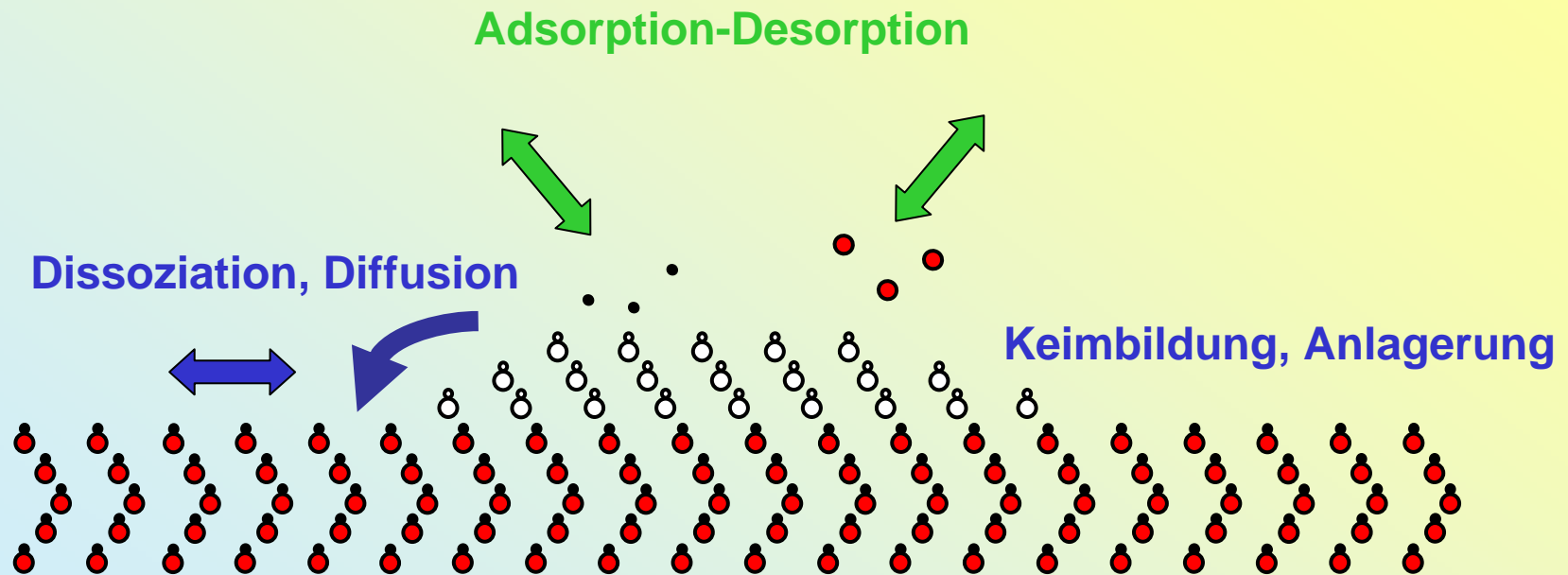
Verfahren: Molecular beam epitaxy (MBE)



Vorteile der UltrahochVakuum-Bedingungen:

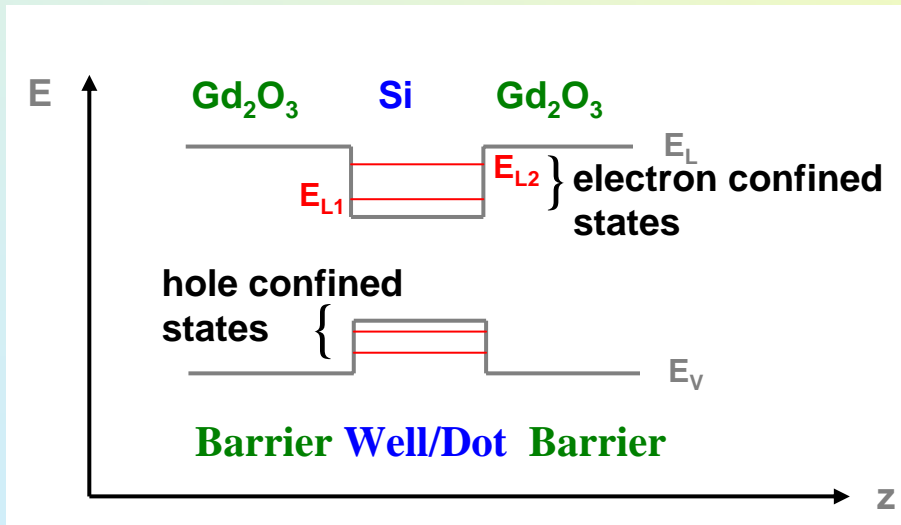
- ⇒ keine gegenseitige Wechselwirkung der Moleküle und Atome in der Kammer
- ⇒ Zeit zum Wachstum einer Atomlage \ll Zeit zur Bedeckung mit Verunreinigungen
- ⇒ In situ Beobachtung des Wachstums durch Elektronenbeugung

Wachstumsbestimmende Schritte bei der Epitaxie



Epitaxie von Strukturen für Si-basierende nanoelektronische Bauelemente

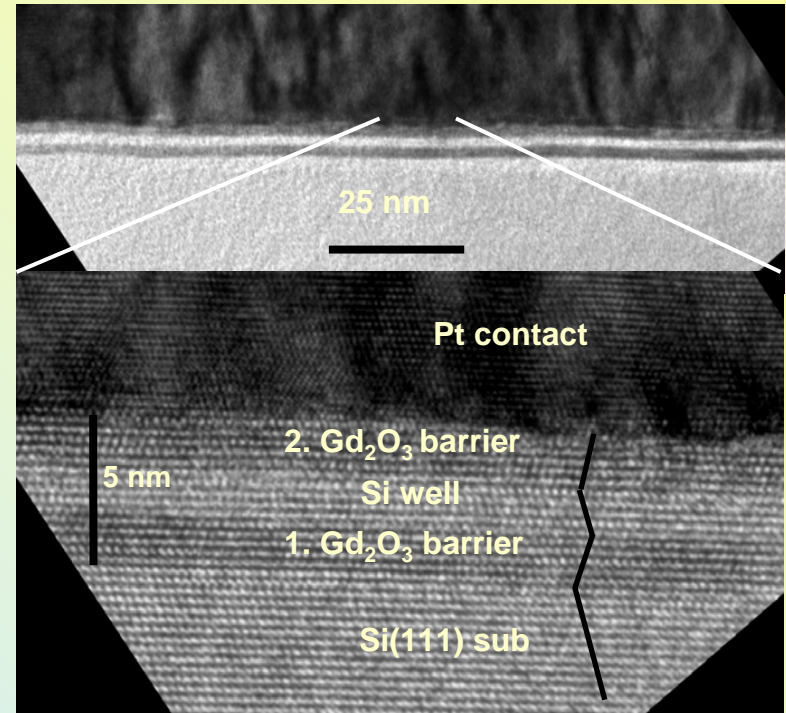
Integration von Si-Nanostrukturen in epitaktische Oxide
für Quanteneffekt-Bauelemente
(z.B. Resonante Tunneldiode, -Transistoren, Speicher)



Type I Doppelheterostruktur

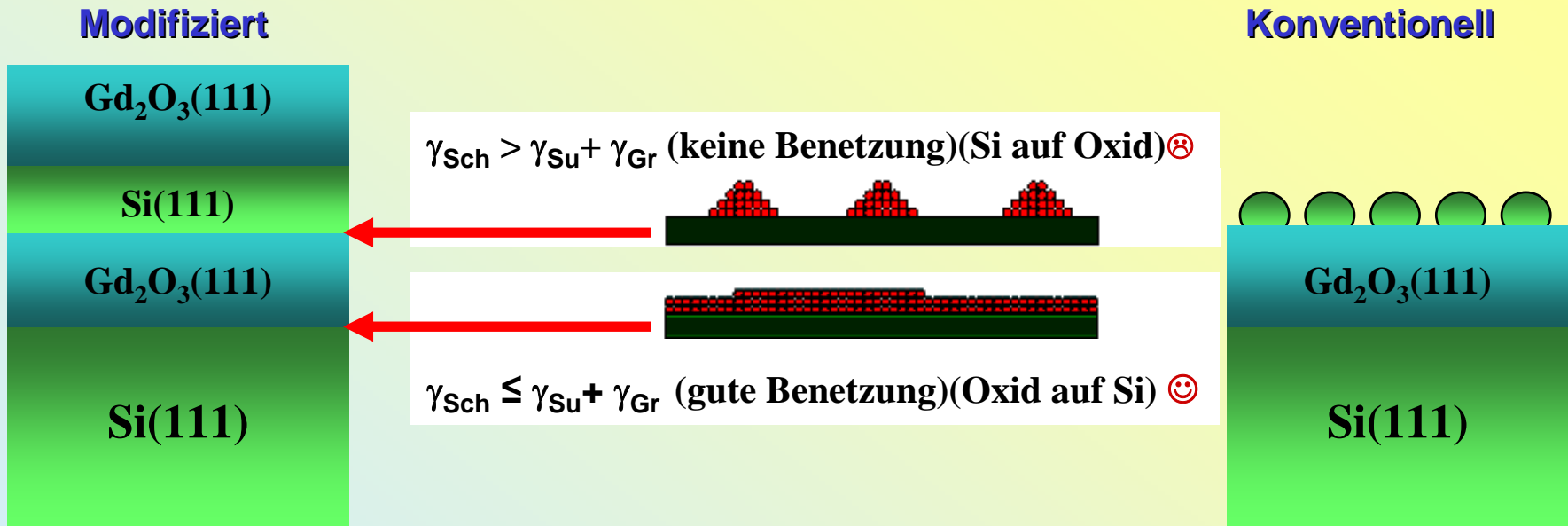
↪ Lokalisierung von Elektronen und Löchern im Si-Quantum-Well

$$\Delta E_c = 2.6, \Delta E_v = 2.2 \text{ eV}$$



A.Fissel, D. Kühne, E. Bugiel, H.J. Osten,
Cooperative solid-vapor-phase epitaxy: An approach for fabrication of single-crystalline insulator/Si/insulator nanostructures,
Appl. Phys. Lett. 88 (2006) 153105.

Epitaxie von Heterostrukturen für Si-basierenden Nanostrukturen



Wachstumsmoden durch Grenz- und Oberflächenenergetik bestimmt:

$$\Delta\gamma = \gamma_{Sch} + \gamma_{Gr} - \gamma_{Su}$$

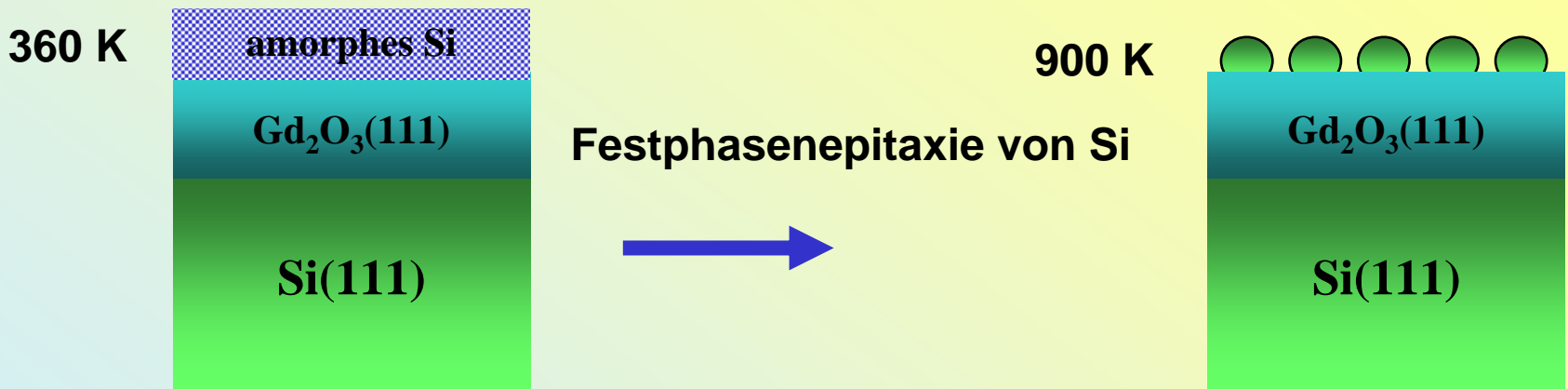
γ_{Sch} – Oberflächenenergie der Schicht

γ_{Gr} – Grenzflächenenergie

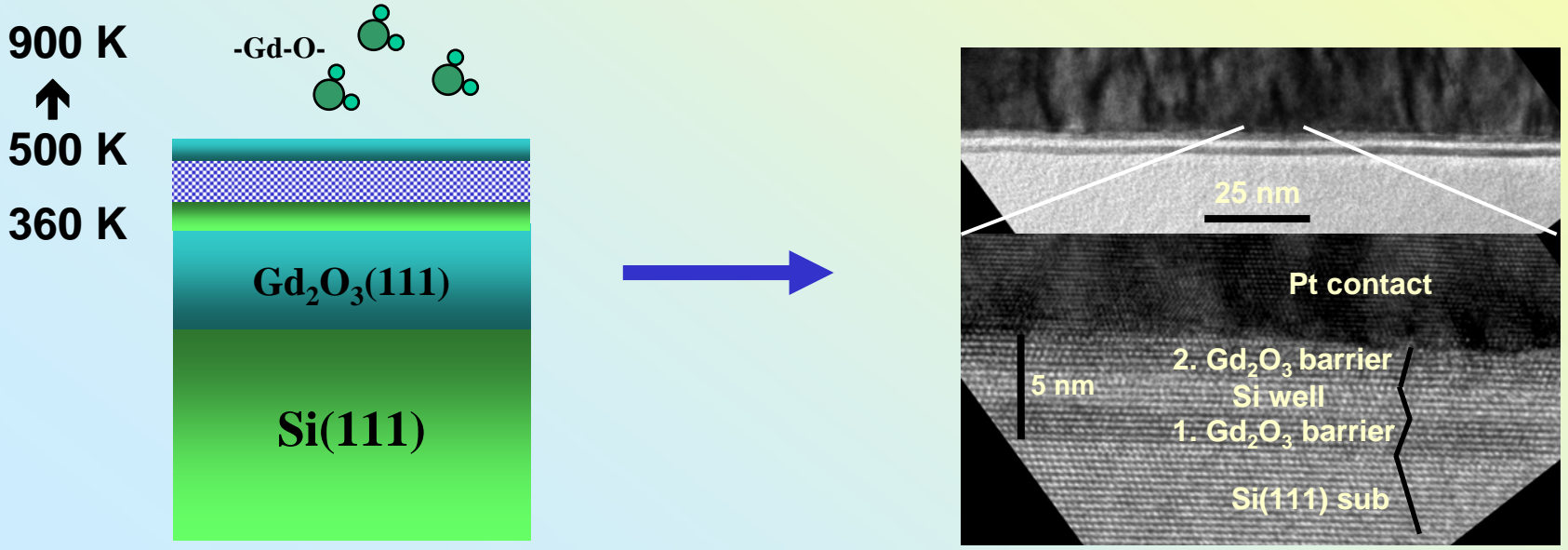
γ_{Su} – Oberflächenenergie des Substrats

Modifikation durch epitaktisch gekapselte Festphasenepitaxie

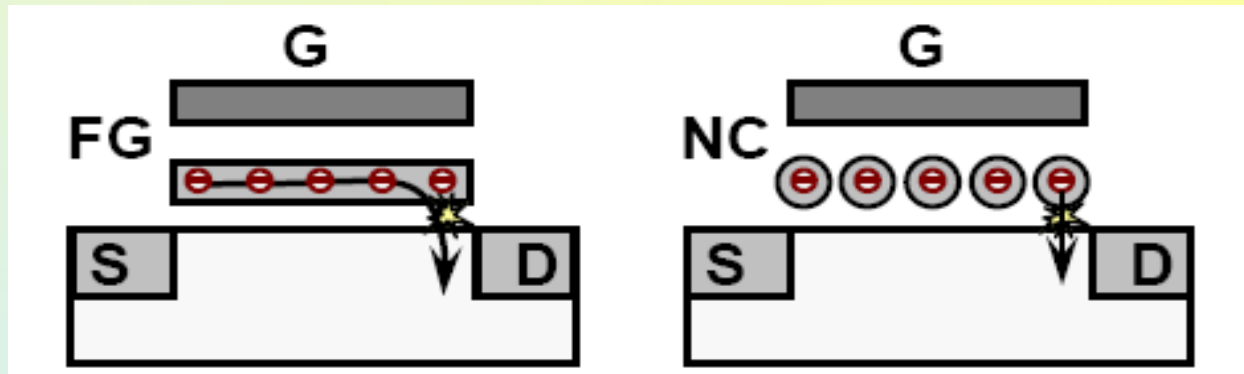
Si-Beschichtung bei tiefen Temperaturen → Inselbildung kinetisch verhindert



Epitaktisch gekapselte Festphasenepitaxie von Si



Herstellung von Strukturen für nichtflüchtige Speicher mit *Nanocluster-„Floating Gate“*



Klassische Struktur mit poly-Si als Ladungsspeichermedium

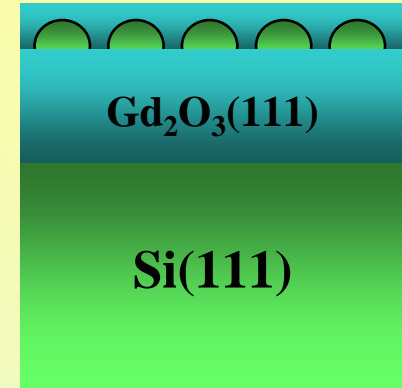
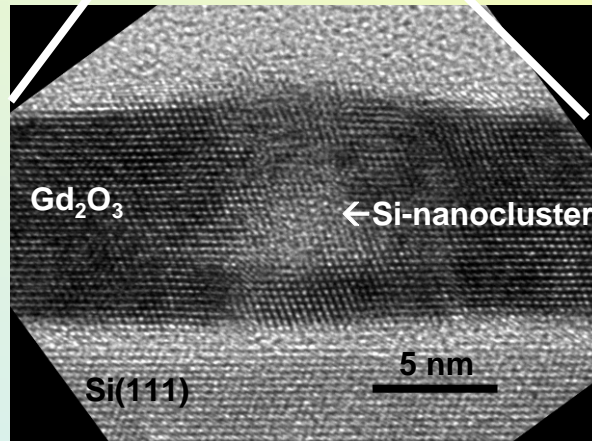
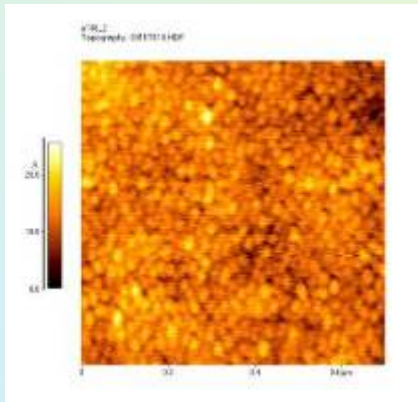
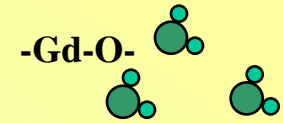
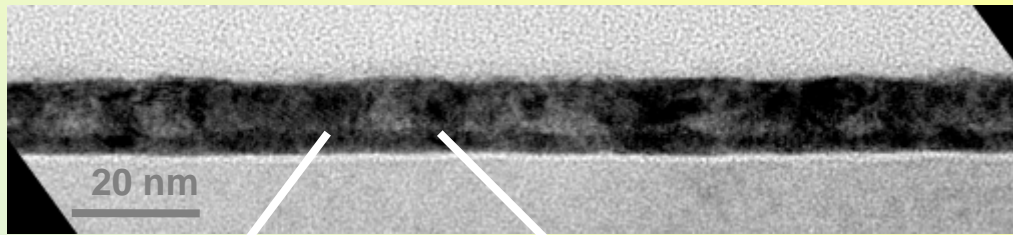
Struktur mit Metall- oder Halbleiter-*Nanoclustern* als Ladungsspeichermedium

Vorteile:

- Reduzierung des defektinduzierten Leckstroms (Entladung) durch das Tunneloxid
- Transfer einzelner Elektronen und Arbeiten mit nur wenigen gespeicherten Elektronen

→ Einwachsen von Si-Nanoinseln in die Oxidschicht

Epitaktisches Überwachsen von Si-Nanoclustern mit Gd_2O_3



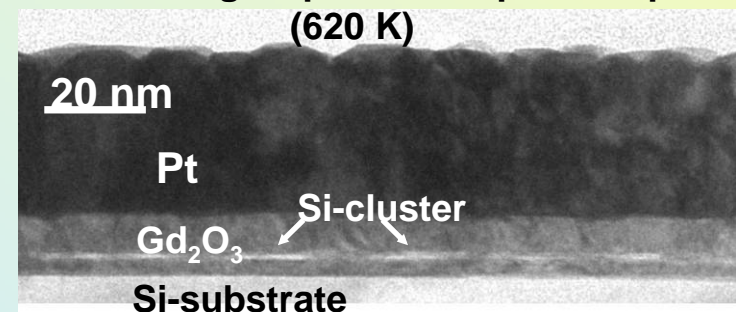
A. Fissel *et al.*, APL 88(2006) 153105

Einbau von kristallinen Si-Nanoinseln in einkristallines Gd_2O_3

Vorteile des epitaktischen Einwachsens:

- Definierte Einstellung der Dicke des Tunneloxids
- Beeinflussung der Inselgröße und der Inseldichte

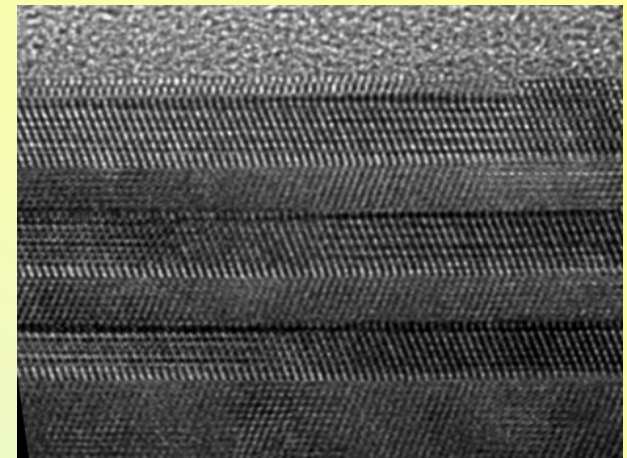
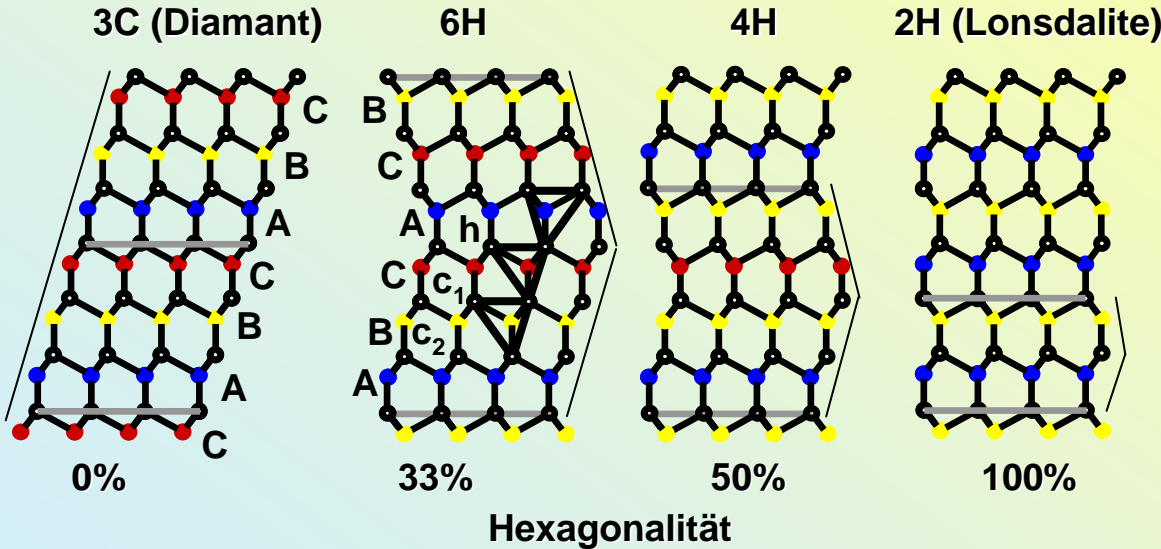
Si-Inseln durch gekapselte Festphasenepitaxie



A. Fissel, A. Laha, E. Bugiel, D. Kühne, M. Czernohorsky, R. Dargis, H.J. Osten, *Silicon in functional epitaxial oxides: A new group of nanostructure*, Microelectronics Journal (in press)

Epitaxie von verschiedenen Strukturtypen des Siliziums (gefördert durch die DFG)

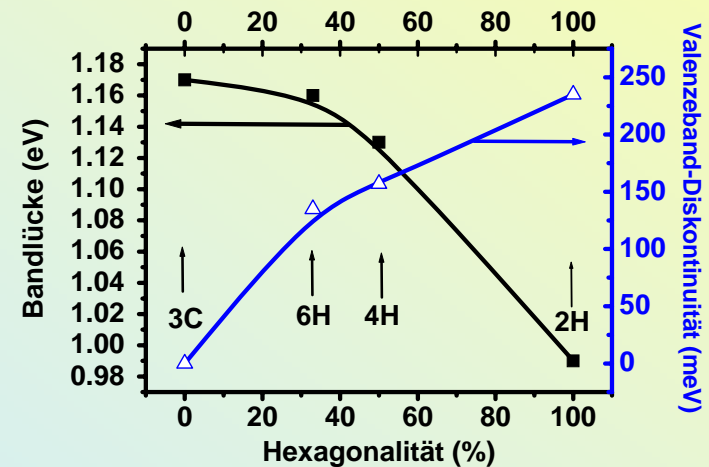
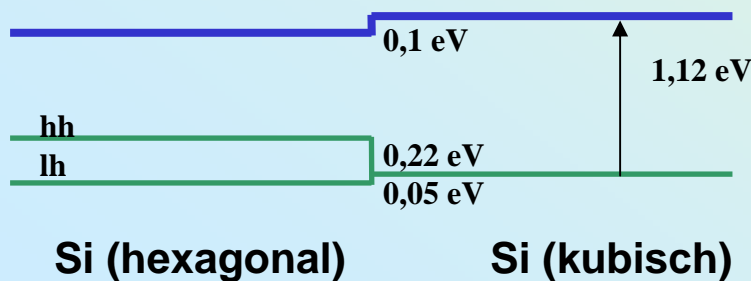
Stapelfolge in [111] bzw. [0001]-Richtung für die häufigsten dicht-gepackten Polytypen



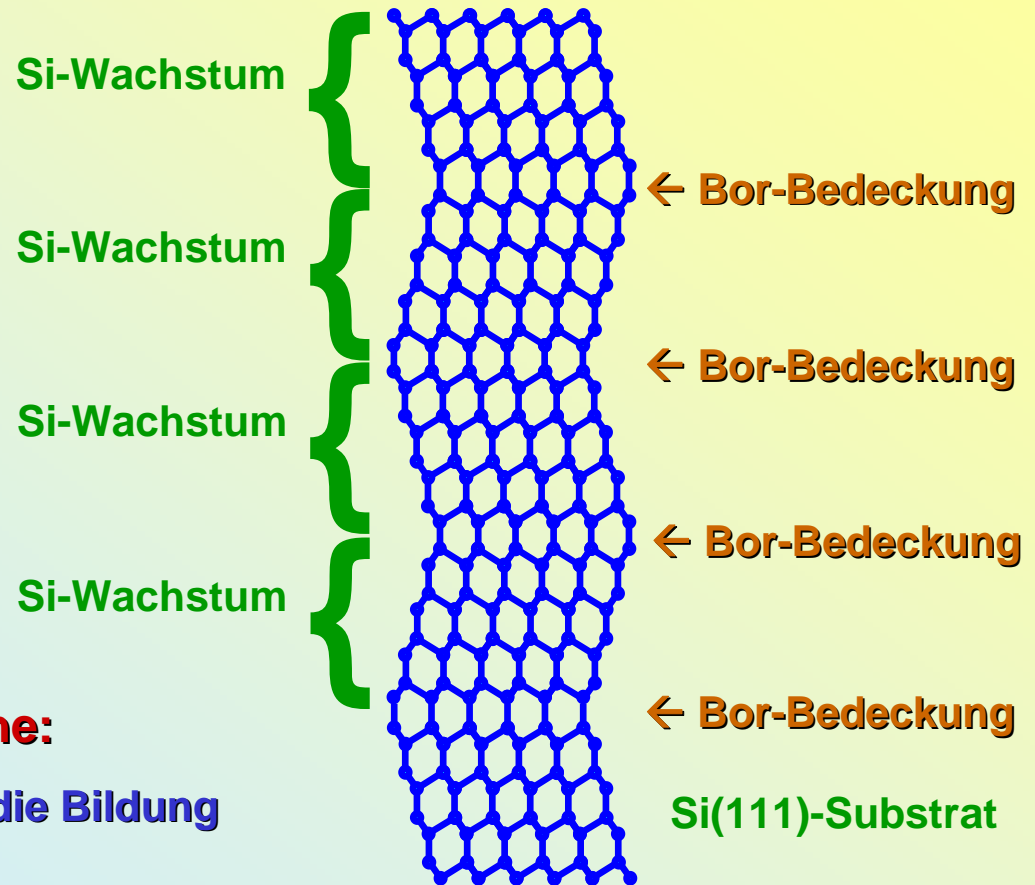
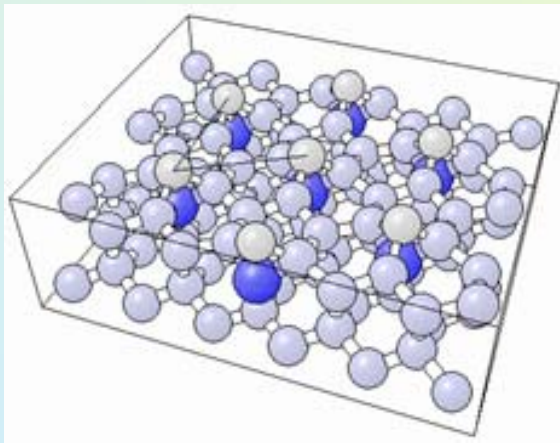
Bandabstand und Valenzband-Diskontinuität als Funktion der Hexagonalität für Si Polytypen

Type I Heterostruktur

Lokalisierung von Elektronen und Löchern im hexagonalen Polytyp



Rotation der atomaren Si-Ebenen durch den periodischen Einbau von $1/3$ ML Bor in spezielle Gitterplätze in der Oberfläche

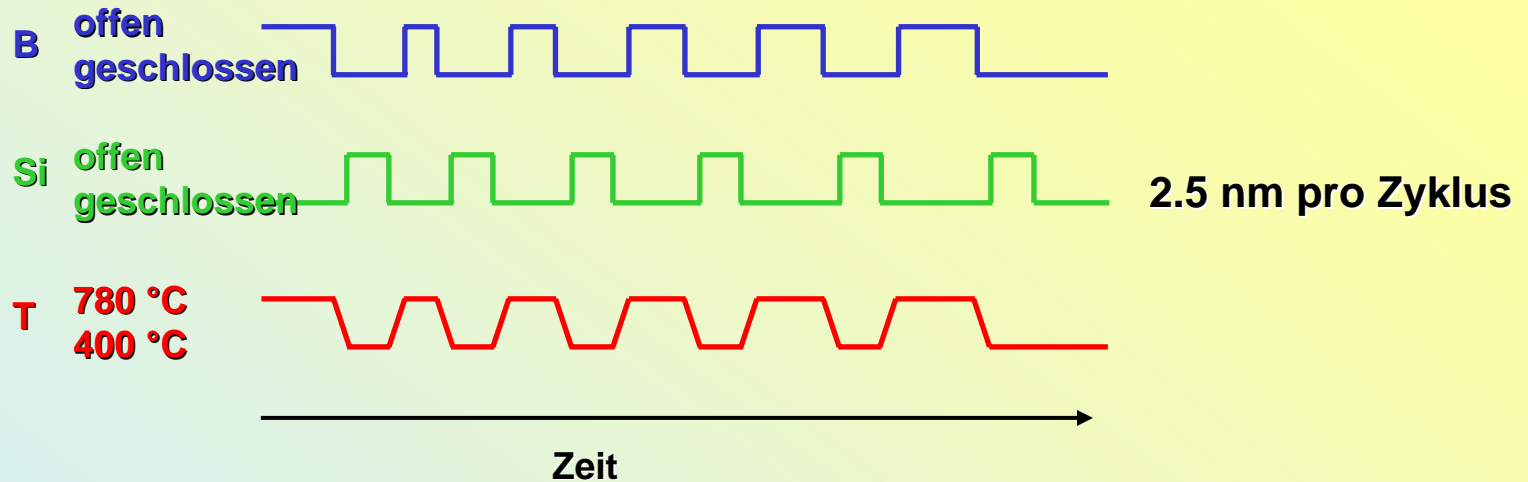


Einfluß von Bor in der Si-Oberfläche:

1. Verspannung der Oberfläche durch die Bildung von Si-B-Bindungen
2. Oberflächenpassivierung durch Si-B-Ladungstransfer

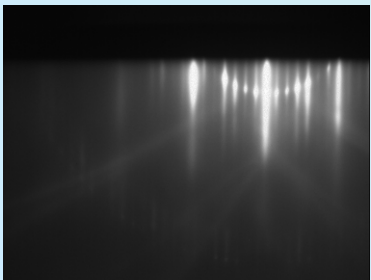
Experiment

Wachstum und Bor-Präparation (Blenden- und Temperatur-Regime)

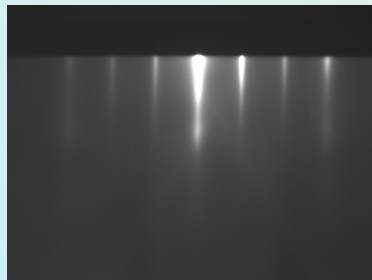


In situ Kontrolle mittels Elektronenbeugung (RHEED)

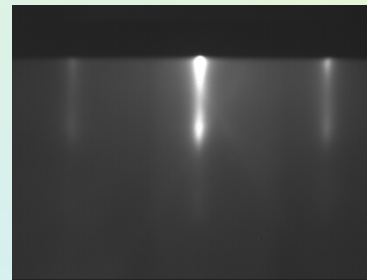
(7x7)-Si(111)
vor Beschichtung



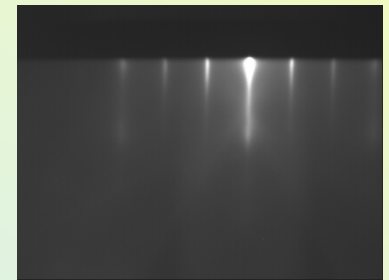
($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$) B-Struktur
nach B-Beschichtung



(1x1)-Si(111)
nach 4 ML Si-Wachstum

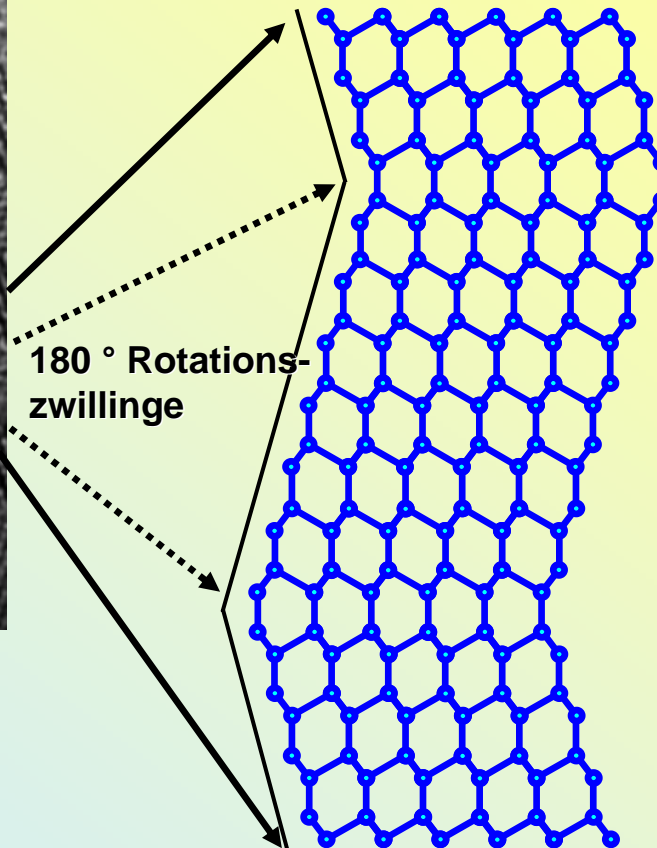
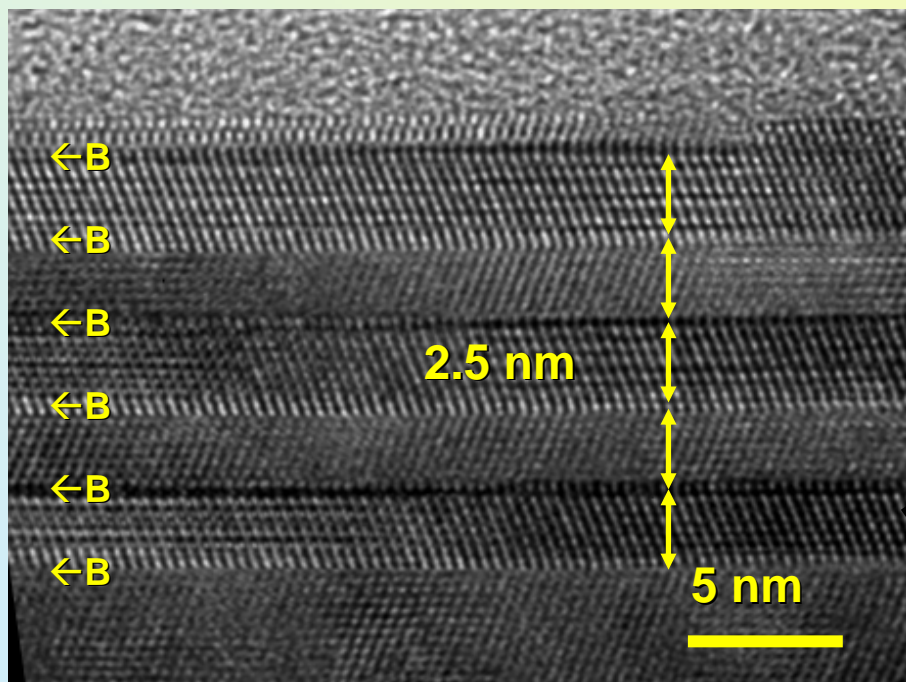


($\sqrt{3}\times\sqrt{3}$)B-Struktur
Nach Temperung



Erste Ergebnisse

Hochaufgelöste TEM-Querschnittsaufnahme eines Zwillingsübergitters mit 8-facher Periodizität entsprechend dem Wachstum von 2,5 nm Si pro Zyklus



Bindungstyp

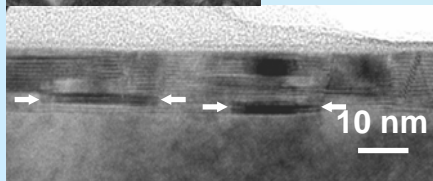
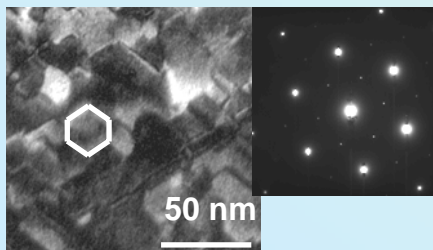
Diamant

Lonsdalite
(Zwillingsgrenze)

Diamant

Lonsdalite
(Zwillingsgrenze)

Diamant



A. Fissel, E. Bugiel, C.R. Wang, H.J. Osten, *Formation of twinning-superlattice regions by artificial stacking of Si layers*, J. Cryst. Growth 290 (2006) 392.

Anwendung von neuen Isolatormaterialien mit höherer dielektrischer Konstante

Si

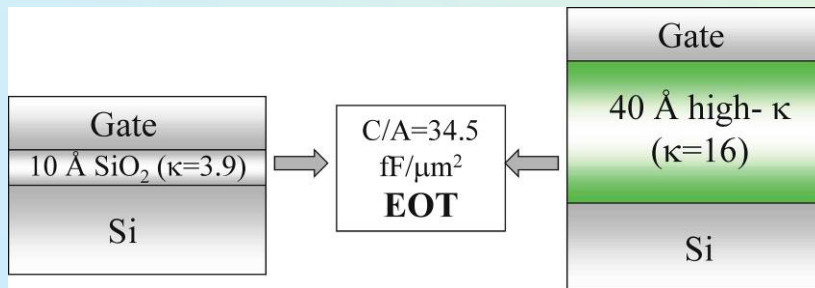
SiO₂ besitzt nur eine kleine dielektrische Konstante, $\kappa = 3.9$.

Ultra-dünnes SiO₂ für die nächste Transistorgeneration (hohe Leckströme, Degradation, Diffusion von Verunreinigungen)

SiC

Defekt-reiche SiO₂/SiC Grenzfläche (Kohlenstoffcluster, Grenzflächendefekte).

SiO₂ Degradation unter hohen elektrischen Feldstärken (geringes κ)



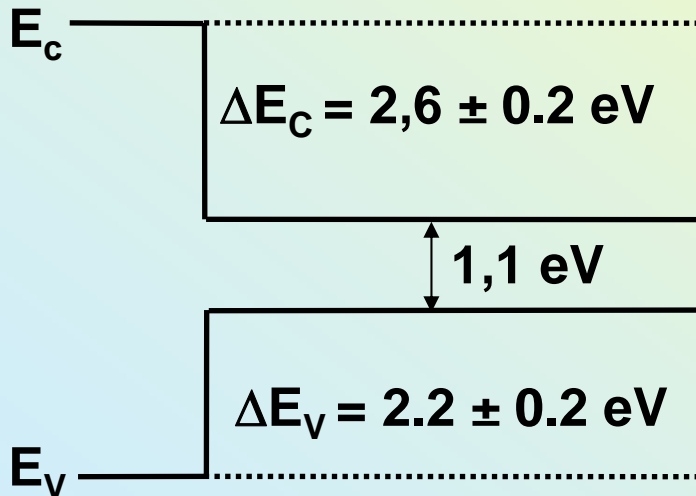
$$\kappa^{\text{SiC}} E_{\text{SiC}} = \kappa^{\text{Oxide}} E_{\text{Oxide}}$$

Anwendung von neuen Isolatormaterialien mit höherer dielektrischer Konstante

Schematischer Bandverlauf
Gd₂O₃/Si (ohne thermisches
Gleichgewicht)

Gd₂O₃

Si

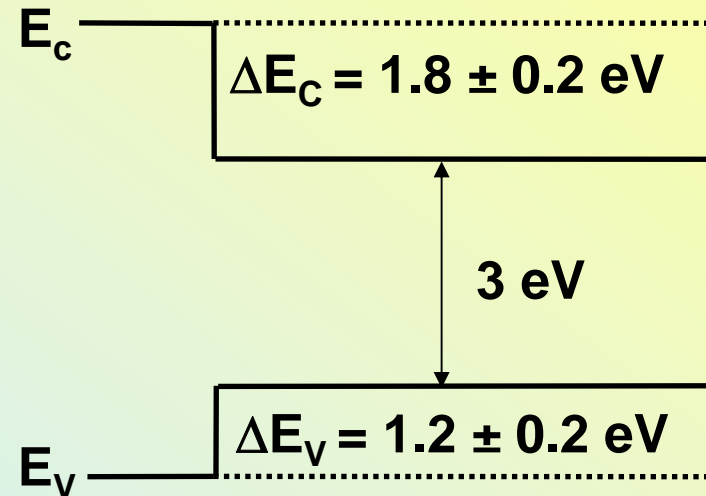


**Geeignete Bandkanten-
Diskontinuitäten**

Schematischer Bandverlauf
Gd₂O₃/6H-SiC (ohne
thermisches Gleichgewicht)

Gd₂O₃

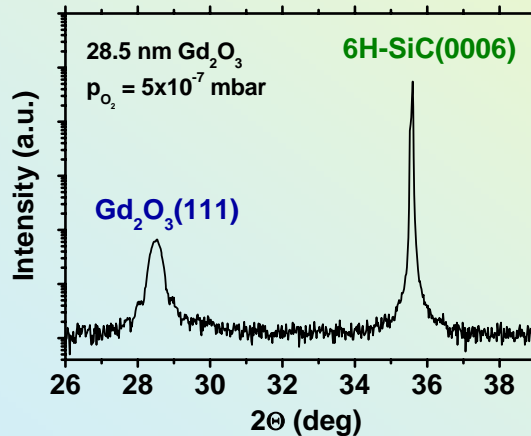
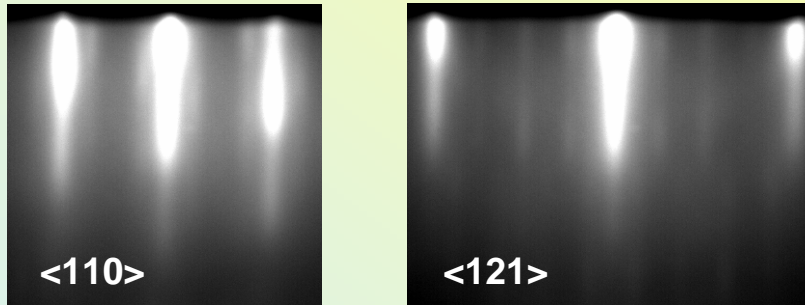
6H-SiC



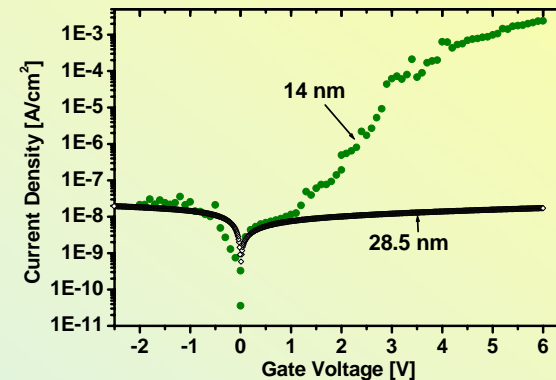
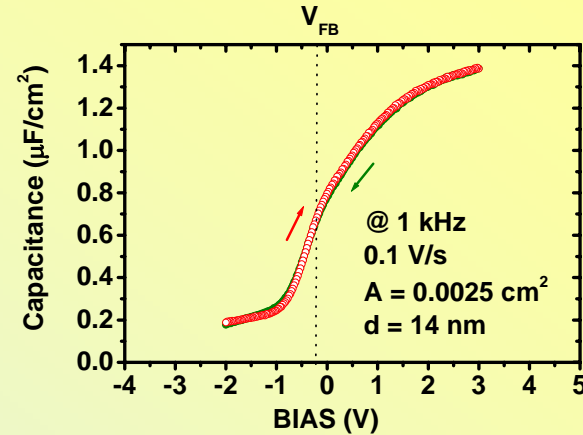
**Geeignete Bandkanten-
Diskontinuitäten**

Eigenschaften von $Gd_2O_3/6H-SiC$ Strukturen

Strukturell



Elektrisch



Epitaktisches Wachstum

κ_{eff} : 16 ± 2 ; Stromdichte = $10^{-8} \text{ A/cm}^2 @ 1V$

Hysterese: $< 0.1 \text{ V} \rightarrow$ Dichte beweglicher Ladungen $< 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

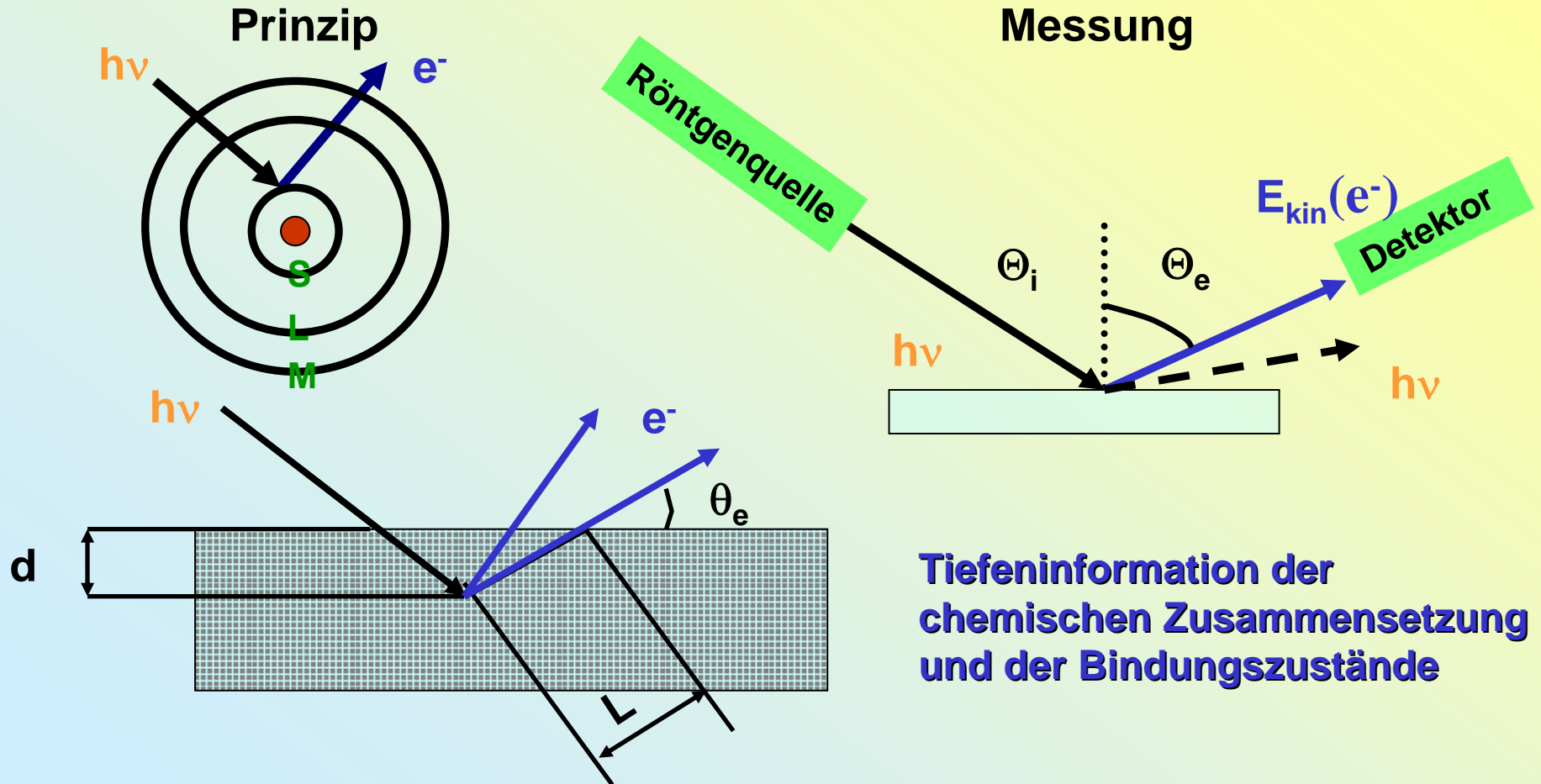
Flachbandspannung: $-0.2 \text{ V} \rightarrow$ Dichte der festen Ladungen: $\sim 1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

(Eigenschaften vergleichbar mit Gd_2O_3/Si)

A.Fissel, M. Czernohorsky, H.J. Osten,
*Characterization of crystalline rare-earth oxide
high-k dielectrics grown by molecular beam
epitaxy on silicon carbide,*
Journal Vacuum Sci. Technol. B 24 (2006) 2115

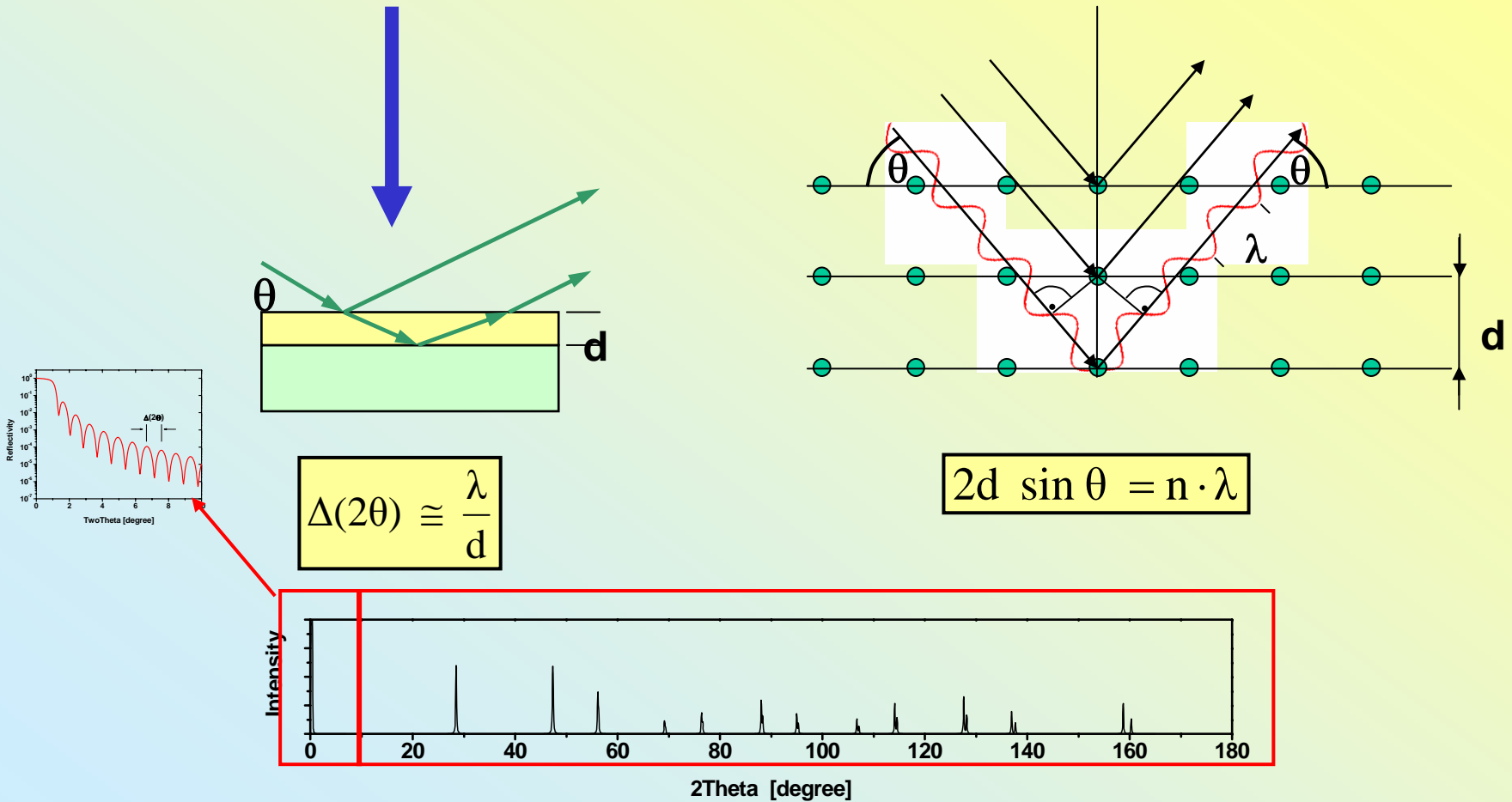
Untersuchung und Modifizierung der Grenz- und Oberflächeneigenschaften

Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie X-ray photo-electron spectroscopy (XPS)



Untersuchung der Schichtmorphologie, Schichtdicke, Grenz- und Oberfläche

Röntgenreflektometrie & Röntgendiffraktometrie



Kooperationen im LNQE

Nanostrukturen (Prof. Pfnür)

Spintronik (Prof. Oestreich)

**Heterostrukturen für Si-Photovoltaik
(Prof. Brendel, Dr. Harder)**