
Herstellung und Untersuchung von Metall-Isolator- Halbleiter(MIS)-Kondensatoren mit hoch-epsilon Isolatorschichten auf Germanium



1. Bayerischer FORNEL-Workshop
München, 12. April 2005

- Motivation
- Prozessfolge und Schichtaufbau der MIS-Kondensatoren
- Charakterisierung der MIS-Kondensatoren
 - Zusammensetzung der dielektrischen Schicht
 - Strom-Spannungsmessungen
 - Kapazitäts-Spannungsmessungen
 - Auswertung der elektrischen Messungen
- Zusammenfassung und Ausblick

Motivation

Warum Germanium als Grundmaterial interessant?

Parameter	Silicium	Germanium	Auswirkungen
Ladungsträgerbeweglichkeit			Schnellere Schaltungen
• Elektronen: μ_n (cm ² /Vs)	1500	3900	$(f_T = \frac{\mu_n(U_G - U_{Th})}{2\pi L^2})$ Höhere Ströme bei gleicher Spannung
• Löcher: μ_p (cm ² /Vs)	450	1900	
Bandabstand E_g (eV)	1,124	0,67	Verringerung der Versorgungsspannung

Warum Germanium bisher nicht als Grundmaterial für MOS-Bauelemente?

- Herausragende Eigenschaften von Siliciumdioxid bei Silicium
- Fehlen eines stabilen Oxids auf Germanium

Welche Rahmenbedingungen haben sich geändert?

- Entwicklung von Prozessen für die Abscheidung von dielektrischen Schichten mit hoher Dielektrizitätskonstante (z.B. HfO₂, Hf_xSi_yO_z)

⇒ (einige) Vorteile von Silicium gegenüber Germanium gehen verloren



Prozessfolge und Schichtaufbau der MIS-Kondensatoren

Prozessfolge

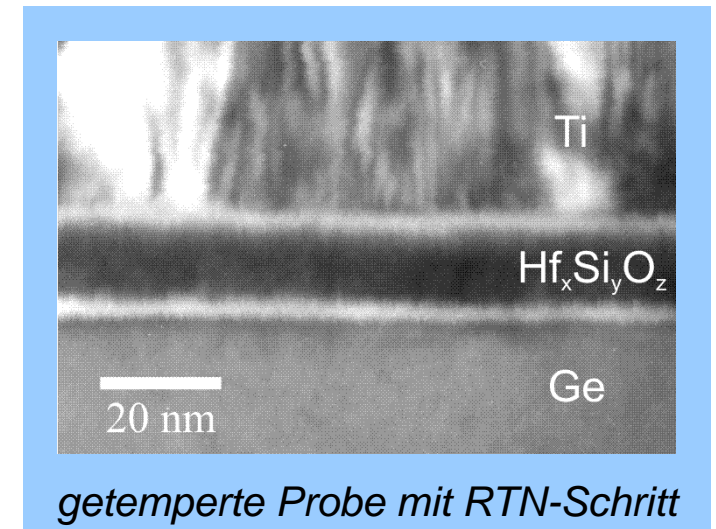
- Ausgangsmaterial: 30 mm <111>-Germanium, p-dotiert, 1 Ωcm
- Reinigung (Aceton, Ethanol)
- Schnelle thermische Nitridierung RTN (600 °C, 120 s, NH_3) *optional*
- Metall-Organische-Gasphasenabscheidung von $\text{Hf}_x\text{Si}_y\text{O}_z$ ($\text{Hf}(\text{acac})_2(\text{OSi}^t\text{BuMe}_2)_2$, 550 °C)
- Temperung (700 °C, 10 s, O_2) *optional*
- Aufdampfen der Metallelektrode durch Schattenwurfmaske (20 nm Ti, 700 nm Al)

Schichtaufbau

- TEM-Aufnahme von Probe mit RTN-Schritt und O_2 -Temperung

⇒ 3-Schichtstruktur des Dielektrikums

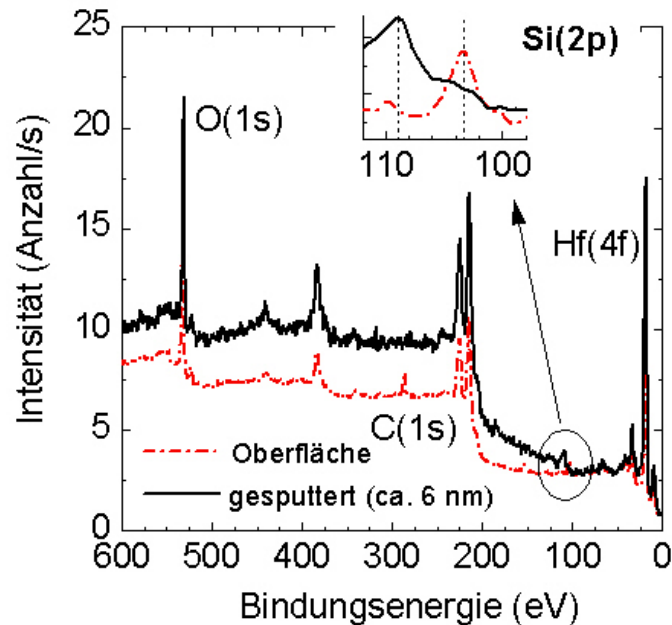
- 2 nm Zwischenschicht (GeON)
- 15 nm Dielektrikum ($\text{Hf}_x\text{Si}_y\text{O}_z$)
- 2 nm Zwischenschicht (?)



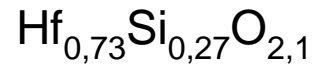
Zusammensetzung der dielektrischen Schicht

Schichtzusammensetzung

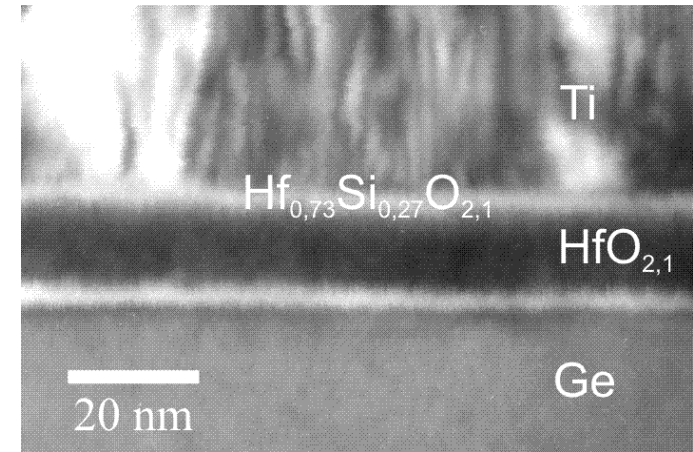
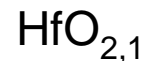
- Röntgen-Photoelektronen(XPS)-Analyse des Dielektrikums (getemperte Probe)



■ oberflächennah:



■ in 6 nm Tiefe:



Silicium wird nur an der Oberfläche der dielektrischen Schicht eingebaut

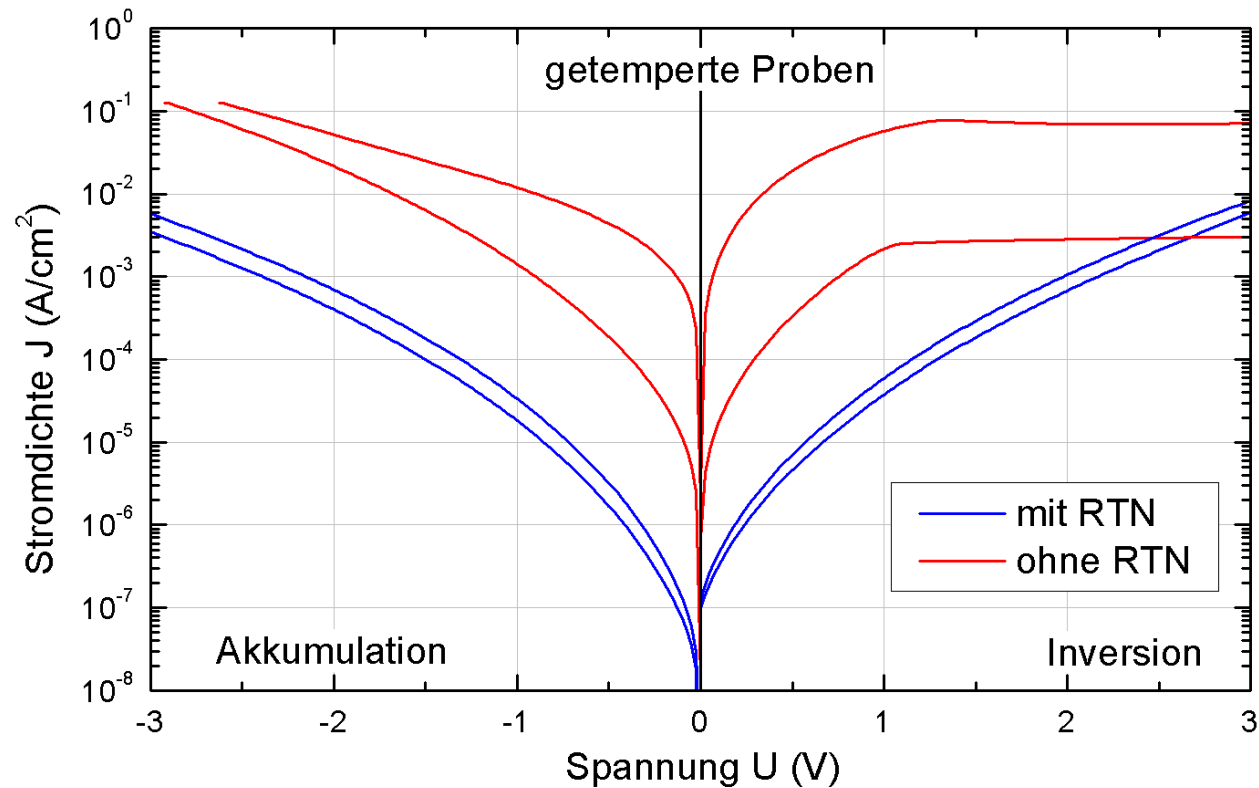
- Diffusion von Silicium in Germanium \Rightarrow unwahrscheinlich, da GeON als Diffusionsbarriere, zudem kein Germanium im Dielektrikum nachweisbar
- Abdampfen von Silicium in die Gasphase \Rightarrow bei Siliciumsubstrat nicht der Fall



Elektrisches Verhalten der MIS-Kondensatoren

Strom-Spannungsmessungen

- Messkurven in Akkumulation und Inversion von jeweils 2 Strukturen



Höhere Leckströme (ca. Faktor 100) für Proben ohne schnelle thermische Nitridierung
⇒ Verbesserung der Grenzflächeneigenschaften zwischen Germanium und Dielektrikum

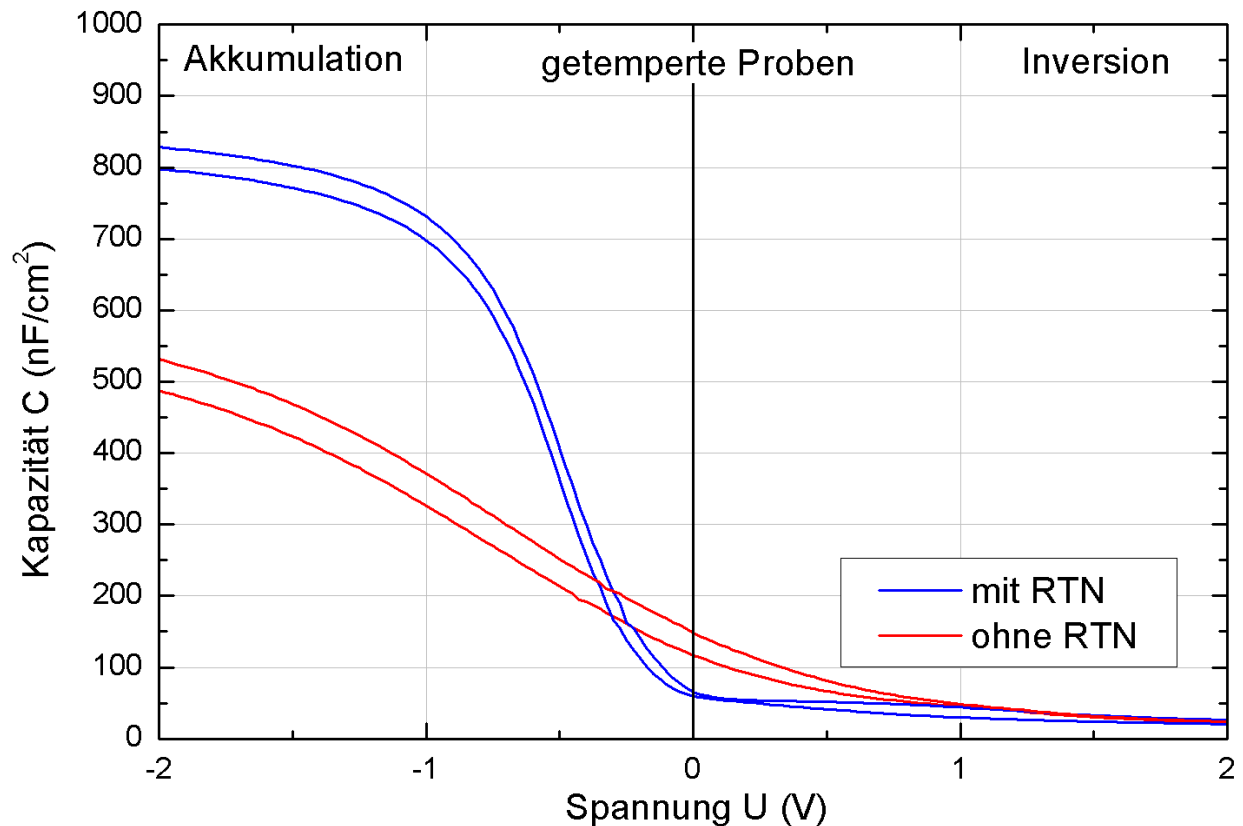
Elektrisches Verhalten der MIS-Kondensatoren

Kapazitäts-Spannungsmessungen

- Messkurven von jeweils 2 Strukturen

ohne RTN: hohe Dichte an Grenzflächenzuständen

mit RTN: Verringerung der Grenzflächenzustandsdichte

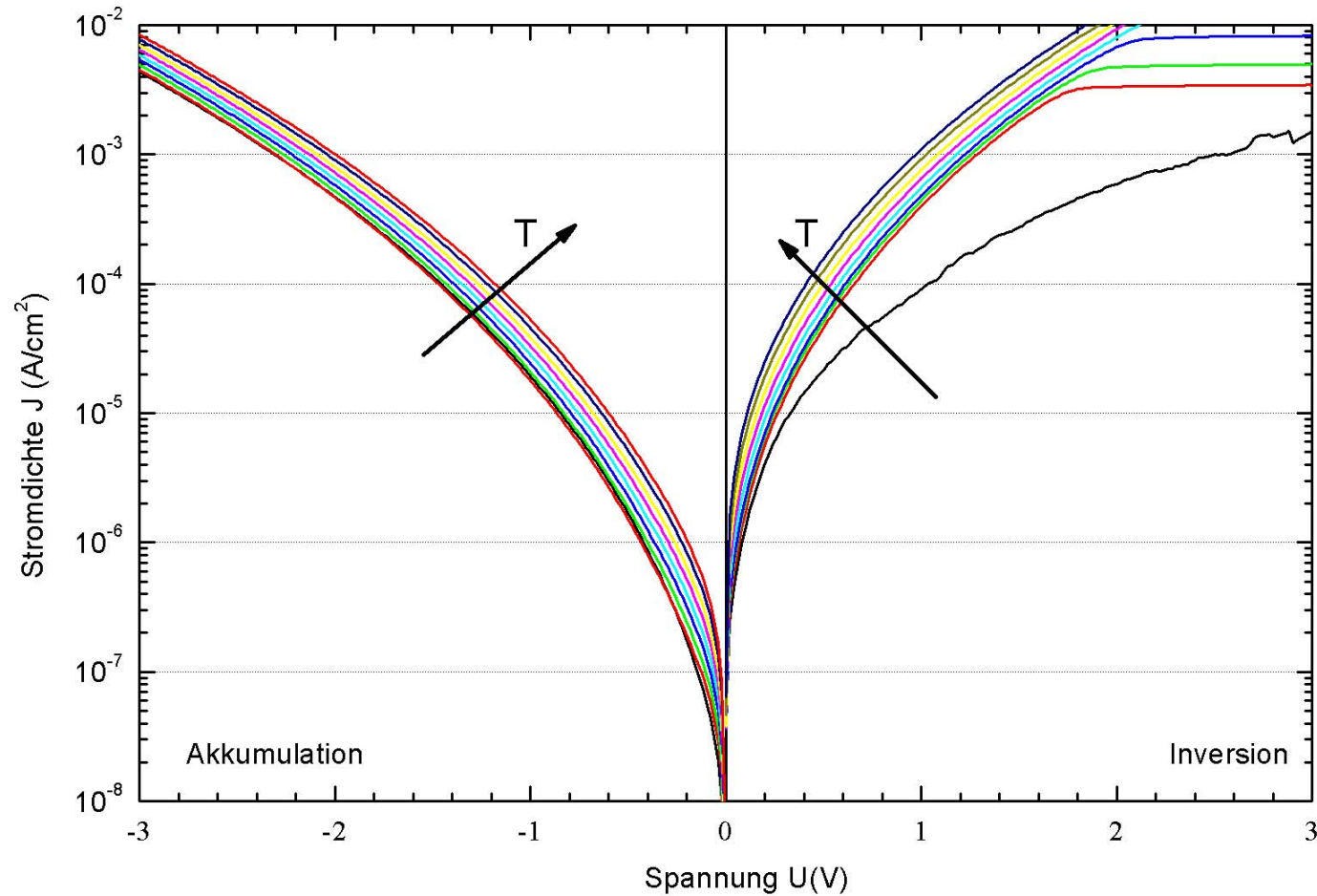


⇒ Auswertung der elektrischen Messungen nur für Proben mit schneller thermischer Nitridierung

Elektrisches Verhalten der MIS-Kondensatoren

Strom-Spannungsmessungen

- Temperaturabhängigkeit der Stromdichte (25 -100 °C)



Elektrisches Verhalten der MIS-Kondensatoren

Leitungsmechanismus

- Fowler-Nordheim $J_{FN} \sim E^2 \exp\left(\frac{-8\pi\sqrt{2m^*q\phi_B^3}}{3hE}\right)$

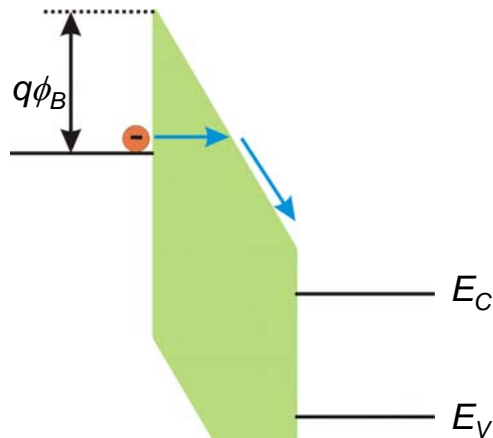
J_{FN} : Fowler-Nordheim-Stromdichte

E : elektrisches Feld

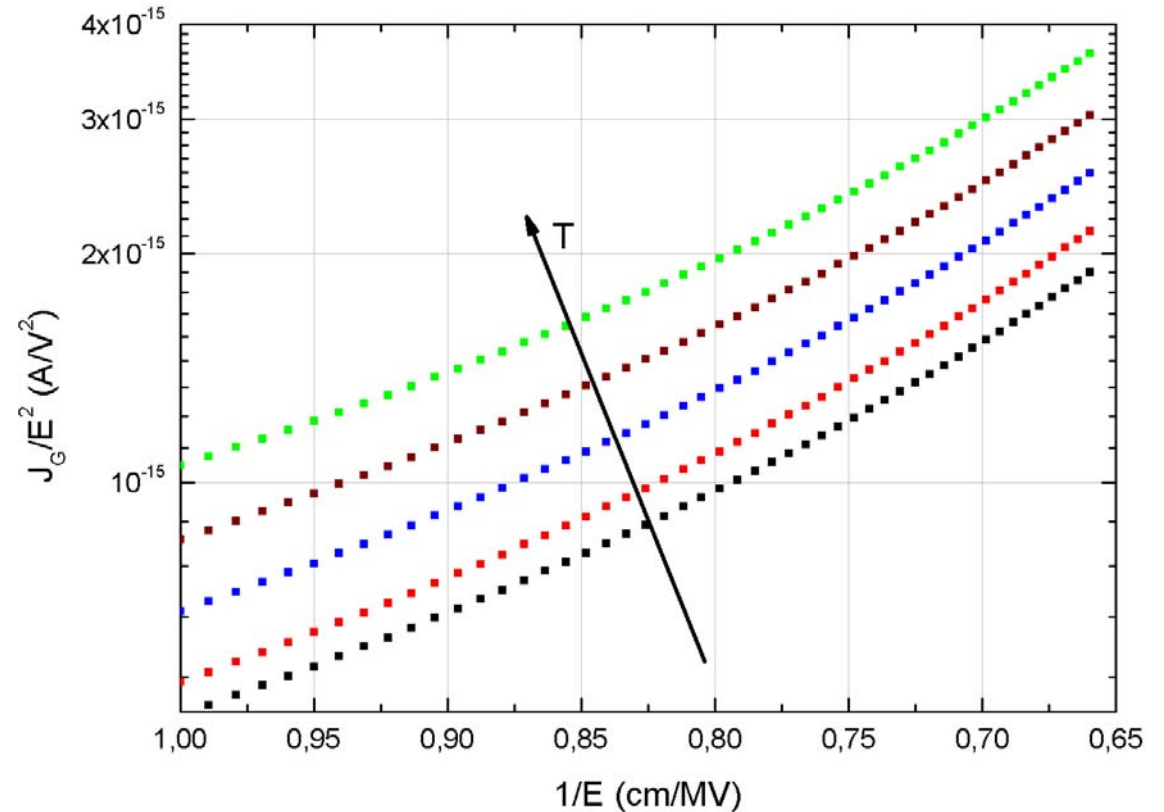
ϕ_B : Barrierenhöhe

m^* : effektive Masse der Ladungsträger

Gateelektrode dielektrische Halbleiter
Schicht



Skizze für
Fowler-Nordheim-Tunneln



⇒ Stromfluss durch dielektrische Schicht wird nicht von Fowler-Nordheim-Tunneln bestimmt

Elektrisches Verhalten der MIS-Kondensatoren

Leitungsmechanismus

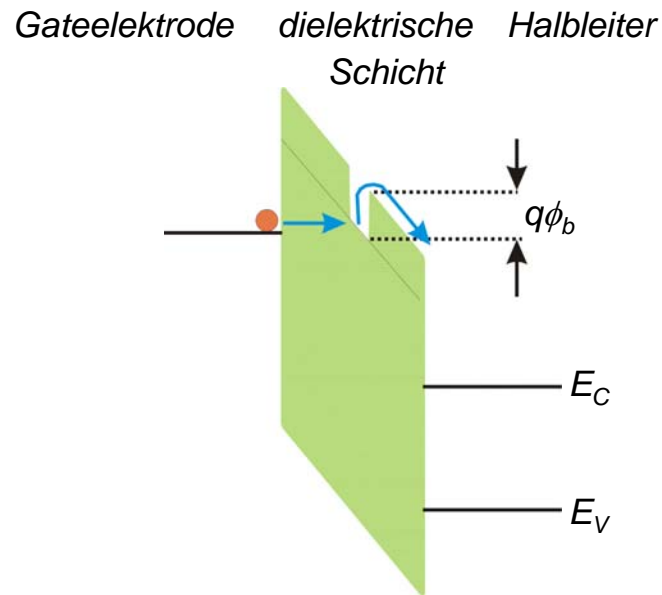
- Poole-Frenkel $J_{PF} \sim E \exp\left(\frac{-q(\phi_b - \sqrt{qE / \pi\epsilon_\infty})}{kT}\right)$

J : Stromdichte

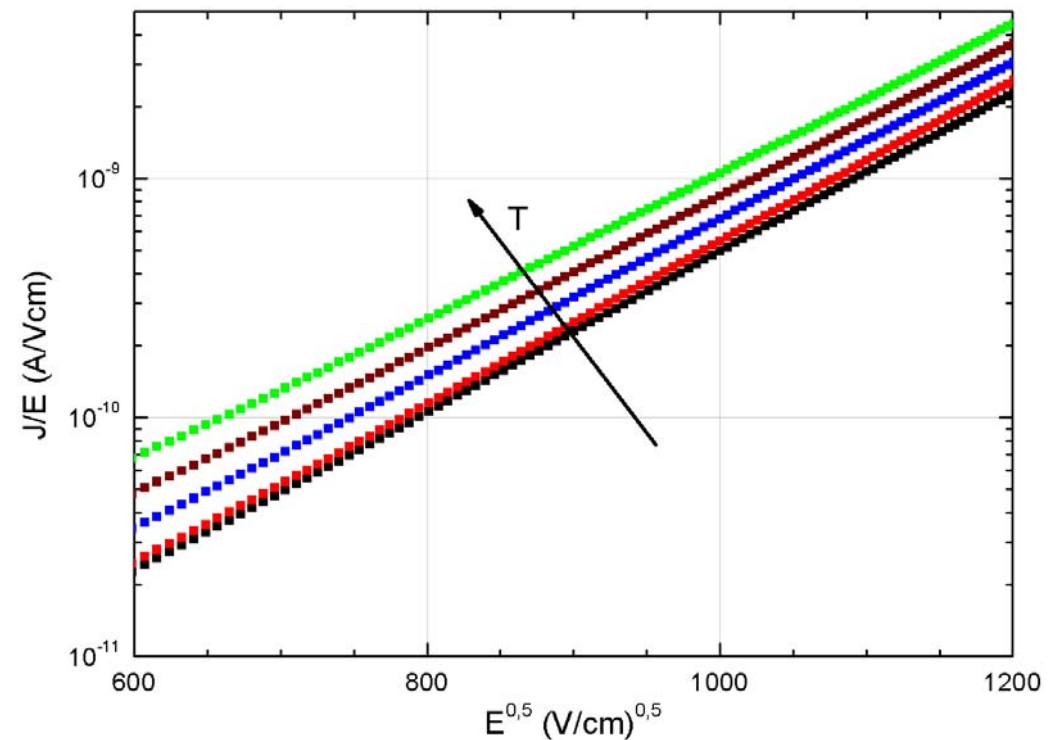
E : elektrisches Feld

ϕ_b : Traptiefe

ϵ_∞ : dynamische Dielektrizitätskonstante



Skizze für
Poole-Frenkel-Mechanismus



⇒ Poole-Frenkel-Leitungsmechanismus dominierend, weitere Untersuchungen ergeben temperaturabhängige Traptiefen von 0,4 und 0,5 eV

Elektrisches Verhalten der MIS-Kondensatoren auf Germanium

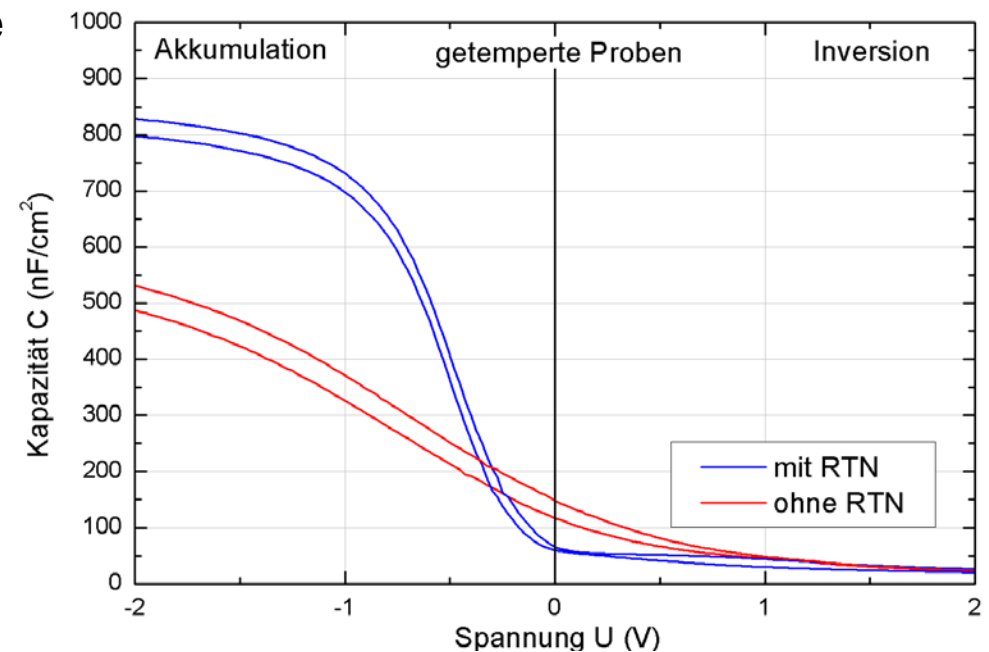
Auswertung der C(U)-Messungen an Strukturen mit RTN-Schritt

- Effektive Oxiddicke (bei physikalischer Dicke von 20 nm): 4,2 nm
- Mittlere effektive relative Dielektrizitätskonstante: 18,6
- Dielektrizitätskonstante plausibel mit Literaturwerten:

$$\epsilon_{r,HfSiO} = 12$$

$$\epsilon_{r,HfO_2} = 25$$

$$\epsilon_{r,GeON} = 5$$



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Schnelle thermische Nitridierung verbessert die elektrischen Eigenschaften wesentlich, d.h. geringere Leckstromdichten, geringere Dichte an Grenzflächenzuständen
- Ladungstransport für Spannungen bis ca. 3 V: Poole-Frenkel-Mechanismus
- erzielte mittlere relative Dielektrizitätskonstante: 18,6
- Silicium wird nur oberflächennah in dielektrische Schicht eingebaut

Weiteres Vorgehen

- Nähere Untersuchung des Abscheidevorganges
 - Herstellung weiterer MIS-Proben mit variierender Dicke der dielektrischen Schicht
 - XPS-Messungen an ungetemperten Proben
- Untersuchungen zur Herstellung von Transistoren
 - Dotierung von Germanium
 - Ätzversuche
 - Musterprozess



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Die Ergebnisse wurden im Rahmen der Studienarbeit von Florian Schön erzielt

Dank an Martin Lemberger für die Durchführung der Abscheideprozesse und für die Unterstützung bei der Diskussion der Ergebnisse



Elektrisches Verhalten der MIS-Kondensatoren

Leitungsmechanismus

- Poole-Frenkel

$$J_{PF} \sim E \exp\left(\frac{-q(\phi_b - \sqrt{qE / \pi\epsilon_\infty})}{kT}\right)$$

J : Stromdichte

E : elektrisches Feld

ϕ_b : Traptiefe

ϵ_∞ : dynamische Dielektrizitätskonstante

