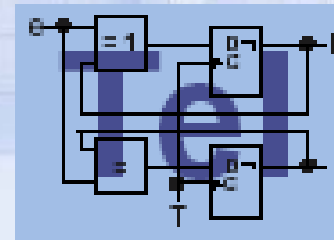


# Technologieoptimierung der selektiven Siliziumepitaxie auf 300mm-Wafern für Strukturgrößen $\leq 90\text{nm}$

28.02.2006

Verteidigung der Diplomarbeit:  
Ronny Schomacker

mail: [rs086821@inf.tu-dresden.de](mailto:rs086821@inf.tu-dresden.de)



  
Never stop thinking

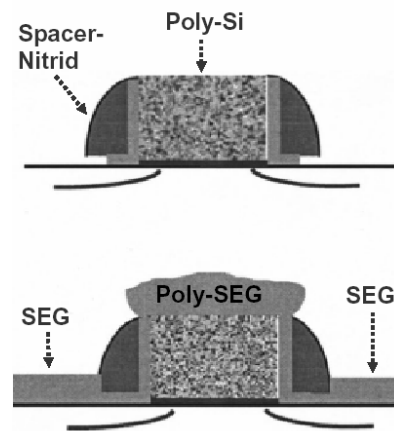
# Gliederung

---

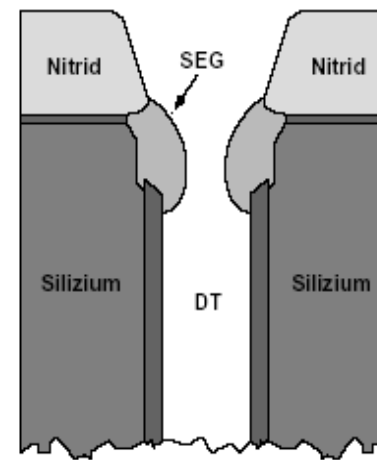
- Motivation und Aufgabenstellung
- Grundlagen
  - CVD-Schichtabscheidung
  - Epitaxie
  - Loading-Effekt
  - Prozesssimulation mit DUPSIM
- Messreihen zur selektiven Siliziumepitaxie
  - Versuchsaufbau und –durchführung
  - Ergebnisse
- Das Simulationsmodell der Epitaxie
  - Bisheriger Stand
  - DUPSIM-Modellerweiterung
- Zusammenfassung und Ausblick

# Motivation

- Einsatz der selektiven Epitaxie in Bauelementen über mehrere Technologieknoten hinweg
- Verschiedene SEG-Konzepte (selective epitaxial growth)



Elevated-Source-Drain



Epi-Buried-Strap

- Notwendig: Modellierung und Simulation der Epitaxie

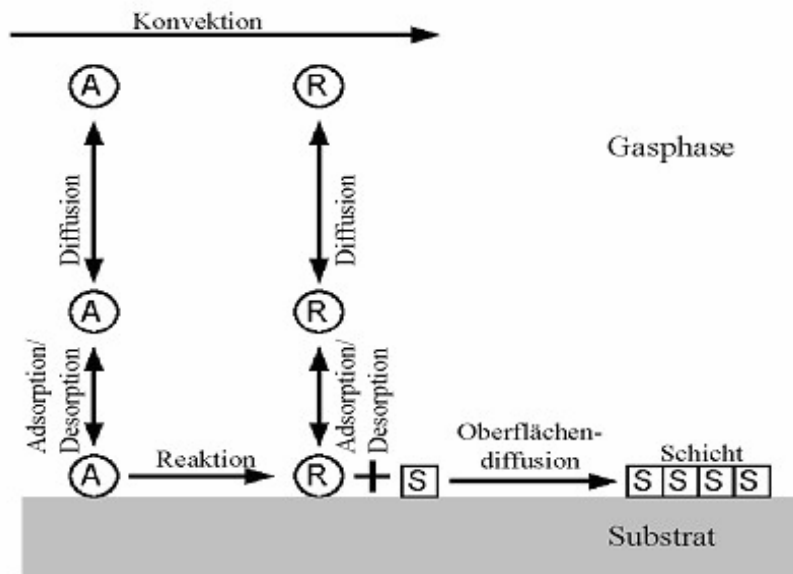
# Aufgabenstellung

---

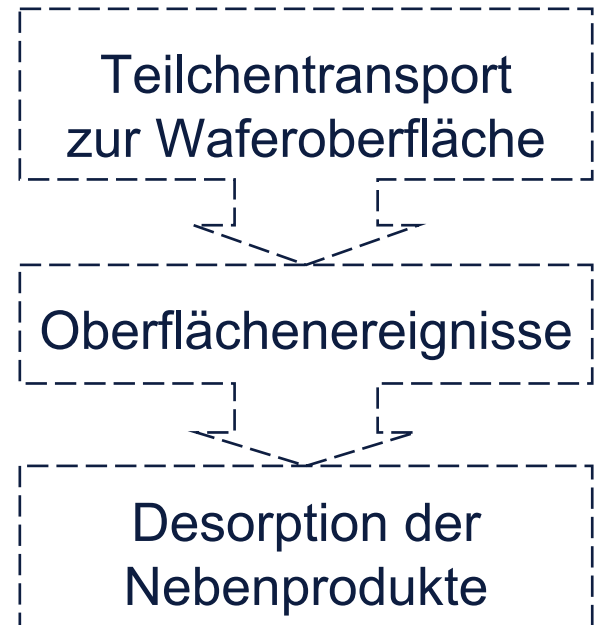
- Literaturstudium (Halbleiterprozesse, Epitaxie, Simulation)
- Erstellen von Anlagenkurzdurchläufern (AKUs)
- Aufstellung eines Versuchsplanes zur Untersuchung der selektiven Siliziumepitaxie
- Durchführung und Auswertung der Experimente
- Modellierung und Implementierung gewonnener Erkenntnisse in DUPSIM
- Pflege der Epitaxiedatenbank
- Zusammenfassung und Dokumentation

# Physikalische Grundlagen – der CVD-Prozess

- Durch chemische Reaktionen von reaktiven gasförmigen Ausgangsstoffen (sog. Precursoren) fällt das Hauptprodukt als Feststoff an

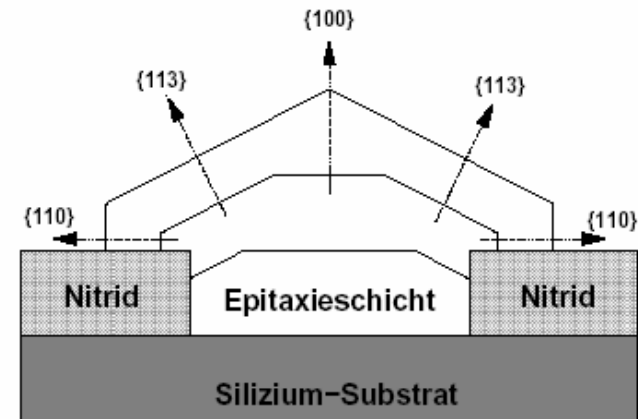
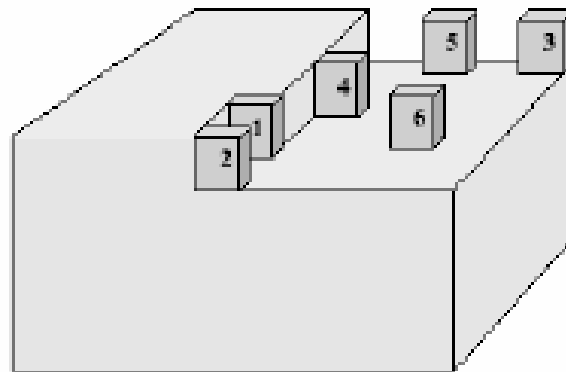


## Teilprozesse:



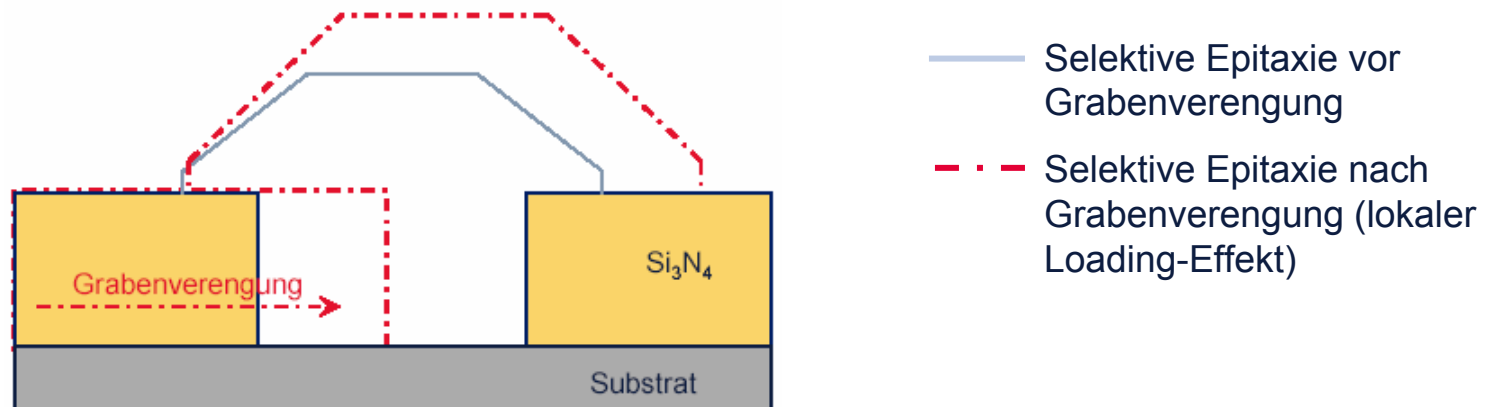
# Grundlagen – CVD-Epitaxie (griech: epi taxis)

- Def: Geordnetes Wachstum einer monokristallinen Schicht auf einem monokristallinen Substrat
  - Übernahme der vorgegebenen Substratorientierung während des Wachstums
  - Homoepitaxie (Si auf Si), Heteroepitaxie (SOS-Technik)
  - Selektive Abscheidung über strukturierten Substraten
    - Grund: unterschiedliche Nukleationsraten
    - Facettenbildung (energetisch stabile Kristallebenen) – abhängig von der Prozesstemperatur



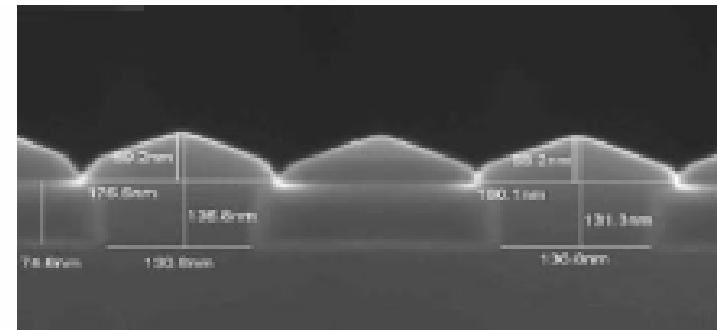
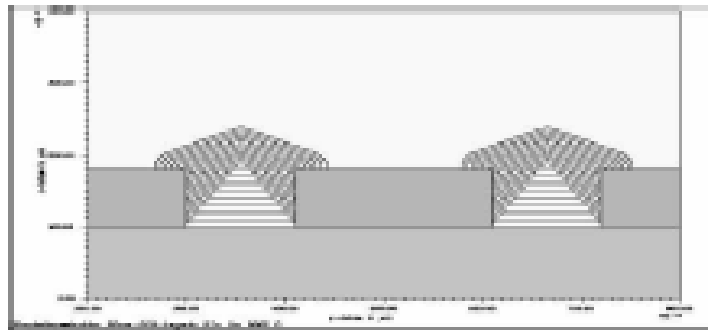
# Grundlagen – Loading-Effekt (LE)

- Def: Änderung der epitaktischen Wachstumsrate aufgrund eines sich ändernden Flächenanteils des freigelegten Siliziums
  - Tendenz: je mehr freie Siliziumfläche, desto geringere Epitaxie-Wachstumsrate
  - Globaler LE: Abhängigkeit der Wachstumsrate vom Si-Anteil auf dem gesamten Wafer
  - Lokaler LE: Abhängigkeit der Wachstumsrate von der Fenstergröße des freigelegten Siliziums



# Grundlagen – Prozesssimulation mit DUPSIM

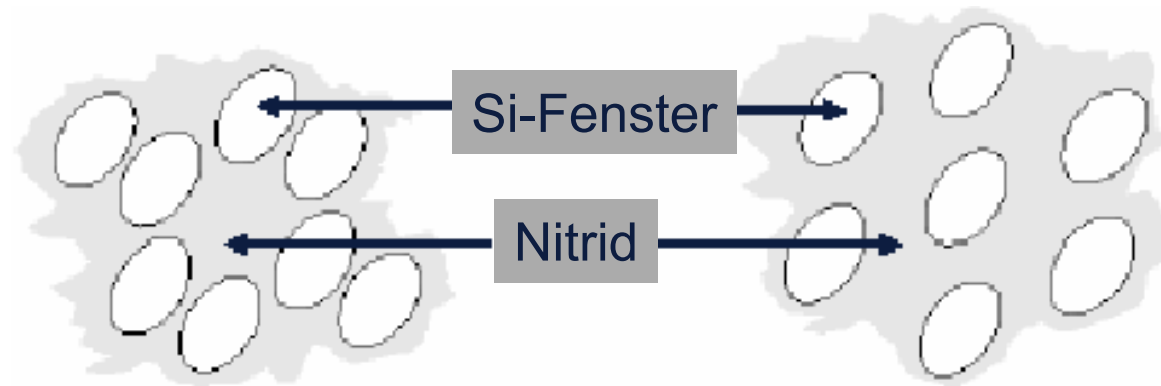
- 2D-Simulator zur Nachbildung, Analyse, Darstellung von Halbleiterprozessen
- Teil eines Simulationstools (ANJA, ZANAM, DEGRAF)
- Vor ca. 20 Jahren entwickelt, seitdem ständige Erweiterung um aktuelle Halbleiterprozesse
- Gliederung einer Simulation: Eingabe der Technologieschritte → Diskretisierung → Abarbeitung → Ausgabe





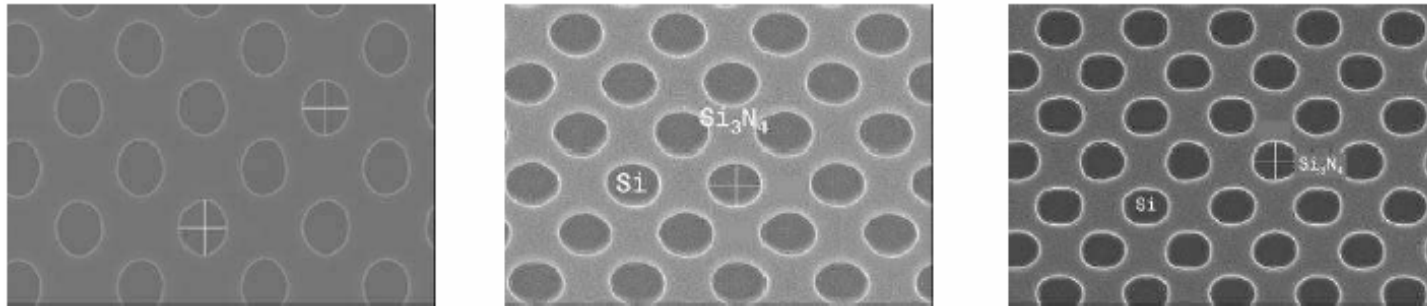
# Messreihen zur Epitaxie – bisheriger Stand

- Untersuchungen zur Temperatur-, Druck- und Layoutabhängigkeit auf 200mm-Wafern
  - Exponentielle Temperaturabhängigkeit der Epi-Wachstumsrate
  - Exponentielle Druckabhängigkeit im transportlimitierten Prozessbereich ( $T \geq 1000^{\circ}\text{C}$ )
  - Loading-Effekt nachgewiesen (zw. 140nm- und 90nm-Technologie)



# Messreihen zur Epitaxie – Versuchsaufbau

- **Ofenanlage:** Single-Wafer-Anlage EPI-Centura-300
- **Wafervorbereitung:** Strukturierte Substrate: Modellstrukturen „Siliziumfenster“ und „Oxidinsel“ auf drei Technologiestufen (drei unterschiedliche Lithographiemasken)

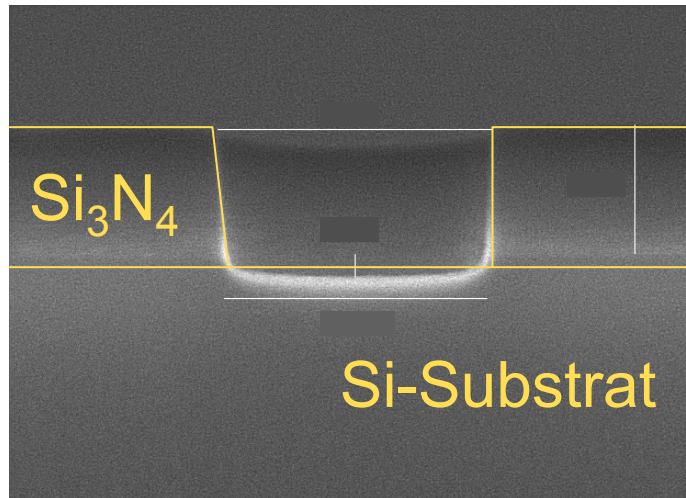


- **CVD-Prozess:** Dichlorsilan-basierte Epitaxie
  - Trägergas:  $H_2$ , Prozessgase:  $SiH_2Cl_2$  (Dichlorsilan - DCS) und  $HCl$
- **Versuchsraum:** SEG-Rezepte mit veränderlichen Parametern
  - Temperatur: 850, 870, 900°C
  - Druck: 15, 23, 31, 39, 50 Torr
  - DCS/HCl: je nach gewählter Temperatur bzw. Druck

# Messreihen zur Epitaxie – Versuchsaufbau

- Die zwei genutzten Modellstrukturen

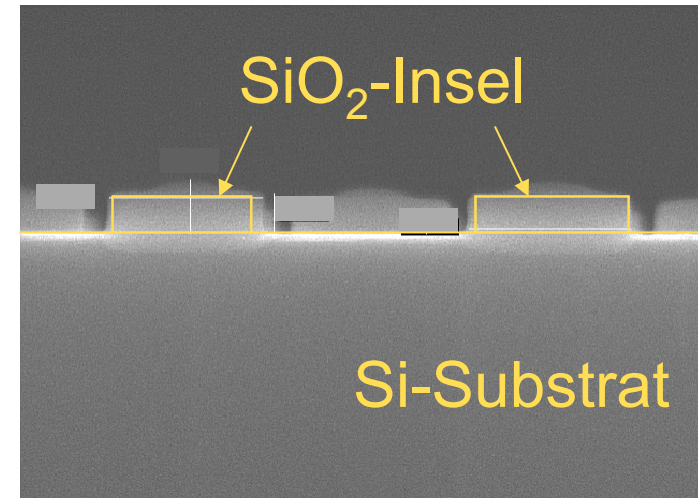
## Siliziumfenster



### Herstellung:

1. Trockenoxidation ( $d = 3\text{nm}$ )
2. Abscheidung von  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $d = 80\text{nm}$ )
3. Lithographie
4. RIE-Ätzen + Resist stripping

## Oxidinsel



### Herstellung:

Prozessschritte 1 – 4 (Si-Fenster)

5. CVD-Abscheidung von  $\text{SiO}_2$
6. CMP (Stopp auf  $\text{Si}_3\text{N}_4$ )
7. Nasschemisches Ätzen von  $\text{Si}_3\text{N}_4$

# Messreihen zur Epitaxie – Ergebnisse

## ■ Temperaturabhängigkeit

- Epi-Wachstumsrate steigt exponentiell mit der Prozesstemperatur
- Ermittelte Aktivierungsenergie  $E_A = 3,95 \text{ eV}$  nach Arrheniusgleichung:

$$R = A \cdot e^{-\frac{E_A}{k \cdot T}}$$

*R ... Epi-Wachstumsrate [nm/min]*

*A ... Arrhenius-Vorfaktor*

*k ... Boltzmannkonstante*

*T ... Temperatur [K]*

## ■ Vergleich mit Experimenten auf 200mm-Wafern

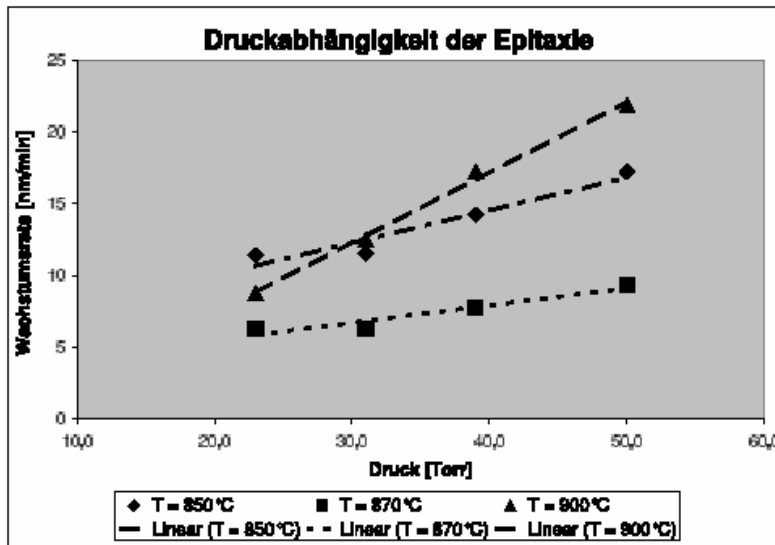
- Unterschiedliche Aktivierungsenergien: 1,3 eV (200mm), 3,95 eV (300mm)
- Grund: SEG-Rezepte (sinkende Gasflussverhältnisse bei steigender Temp.)

	200mm-Wafer			300mm-Wafer		
Temp. [°C]	850	870	900	850	870	900
DCS [slm]	0,26	0,24	0,2	0,26		
HCl [slm]	0,16	0,18	0,29	0,18		
DCS/HCl	1,63	1,33	0,67	1,44		

# Messreihen zur Epitaxie – Ergebnisse

## ■ Druckabhängigkeit

- Epi-Wachstumsrate steigt linear mit dem gewählten Druck im reaktionslimitierten Bereich ( $T < 1000^{\circ}\text{C}$ )
- widersprüchliche Aussage zur Diplomarbeit S. Ulbrich (exponentielle Druckabhängigkeit nur im transportlimitierten Bereich)



Aktuelle Messergebnisse zur Druckabhängigkeit

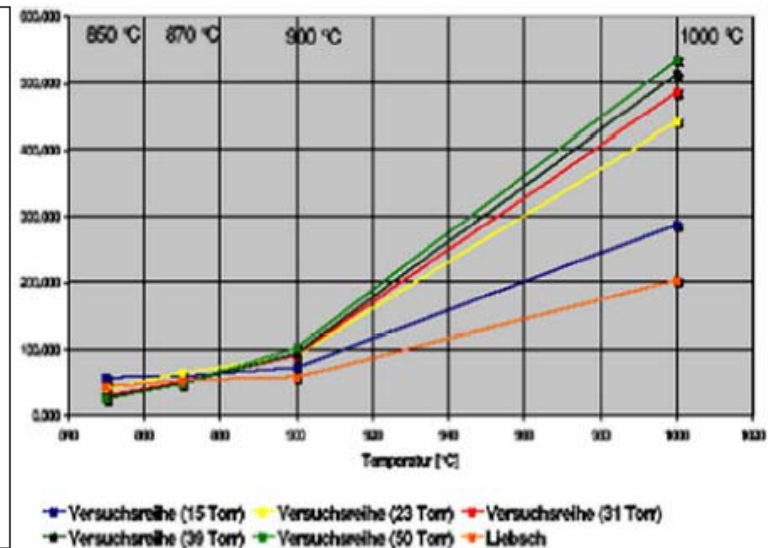


Diagramm aus Diplomarbeit S. Ulbrich

# Messreihen zur Epitaxie – Ergebnisse

## ■ Vergleich mit Experimenten auf 200mm-Wafern

– Aus Ulbrich (Diagramm Folie 13):

- bei  $T = 850^{\circ}\text{C}$  sinkt die Epi-Wachstumsrate mit größerem Druck
- Bei  $T = 870^{\circ}\text{C}$  Epi-Wachstumsrate gleich bleibend
- Bei  $T = 900^{\circ}\text{C}$  steigt Epi-Wachstumsrate mit größerem Druck

– Vergleich der verwendeten SEG-Rezepte:

	200mm-Wafer			300mm-Wafer		
<b>Temp. [<math>^{\circ}\text{C}</math>]</b>	850	870	900	850	870	900
<b>DCS [slm]</b>	0,26	0,24	0,2	0,22	0,18	0,14
<b>HCl [slm]</b>	0,16	0,18	0,29	0,22	0,26	0,30
<b>DCS/HCl</b>	1,63	1,33	0,67	1	0,7	0,47

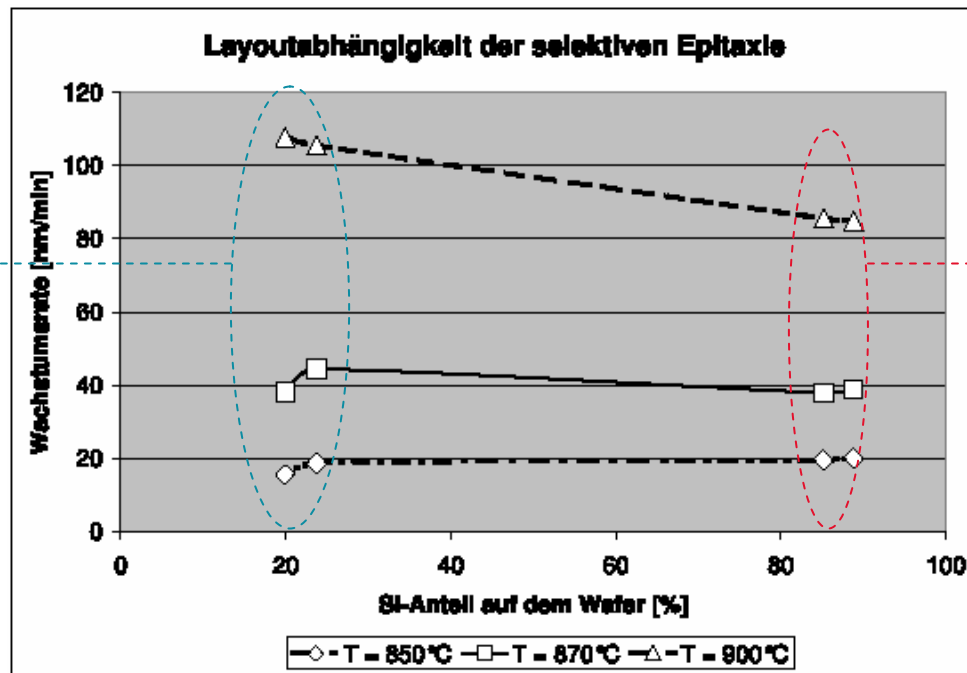
- Vermutung: es existiert ein Grenzwert an reaktiven Teilchen (DCS und HCl) auf der Substratoberfläche

# Messreihen zur Epitaxie – Ergebnisse

## ■ Layoutabhängigkeit (globaler Loading-Effekt (LE))

- Nachgewiesen zwischen den Modellstrukturen Si-Fenster und Oxidinsel

$$LE = \frac{R_{Si-Fenster}}{R_{Oxidinsel}} = 1,23$$



Struktur „Si-Fenster“

Struktur „Oxidinsel“

# Messreihen zur Epitaxie – Ergebnisse

## ■ Vergleich zu Experimenten auf 200mm-Wafern

- Globaler Loading-Effekt trat stärker auf als bei den aktuellen Experimenten auf 300mm-Wafern
- Damals: nur Experimente mit Modellstruktur Si-Fenster

$$LE_{200mm} = \frac{R_{90nm}}{R_{140nm}} = 1,16$$

- Vergleich der SEG-Rezepte:

	200mm-Wafer			300mm-Wafer		
Temp. [°C]	850	870	900	850	870	900
DCS [slm]	0,26	0,24	0,2	0,26		
HCl [slm]	0,16	0,18	0,29	0,18		
DCS/HCl	1,63	1,33	0,67	1,44		

- Vermutung: Intensität des globalen Loading-Effekts ist abhängig vom HCl-Anteil in der Gasphase



# Simulationsmodell der Epitaxie – bisheriger Stand

- Geradenmodell, dass die Facettenbildung während des Wachstums berücksichtigt
- Bestimmung der Epi-Wachstumsrate durch die Arrheniusgleichung
- Modellanpassungen zur Druck-  $f_p(P)$  und Layoutabhängigkeit  $f_s(S)$
- Zwei Prozessbereiche: reaktionslimitiert – transportlimitiert

$$T < 1000^\circ C : R = f(T, S) = A \cdot e^{-\frac{E_A}{k \cdot T}} \cdot f_s(S)$$

$$T \geq 1000^\circ C : R = f(T, P, S) = A \cdot e^{-\frac{E_A}{k \cdot T}} \cdot f_p(P) \cdot f_s(S)$$

$$\text{mit : } f_p(P) = 1,86 - 4,75 \cdot e^{-0,11 \cdot P}$$

$$\text{und : } f_s(S) = -2,75 \cdot S + 1,55$$

# Simulationsmodell der Epitaxie – Modellerweiterung

- Idee: Erweiterung durch Korrekturfaktoren (reaktionslimitierter Prozessbereich  $T < 1000^\circ\text{C}$ )

$$R = A \cdot e^{-\frac{E_A}{k \cdot T}} \cdot f_p(P) \cdot f_s(S)$$

mit:  $f_p(P) = m(T) \cdot P + n(T)$

und:  $f_s(S) = f(S, X)$  *X ... Gasflussverhältnis DCS/HCl*

- Drei Nachteile:
  - Sehr unübersichtlich
  - Keine Gasflussabhängigkeit im Modell enthalten
  - Keine Berücksichtigung des Ätzbereichs ( $R < 0 \text{ nm/min}$ )

# Simulationsmodell der Epitaxie – Modellerweiterung

- Idee: getrennte Betrachtung des Abscheide- (Prozess A) und Abtrageprozesses (Prozess B) während der Epitaxie
- Berechnung der Epi-Wachstumsrate nach *Kongeteira*:

$$R = \frac{A \cdot e^{-\frac{E_A}{k \cdot T}} \cdot (P_{DCS})^z \cdot (P_{H_2})^x - B \cdot e^{-\frac{E_B}{k \cdot T}} \cdot (P_{HCl})^y}{m \cdot P + C}$$

- Vorteile:
  - Durch die Verwendung der Partialdrücke ( $P_{DCS}$ ,  $P_{H_2}$ ,  $P_{HCl}$ ) sind auch die Gasflussabhängigkeiten berücksichtigt
  - Modell ist auch für den Ätzbereich gültig
- Die Gleichung wurde durch *Long Yan* (Großer Beleg) anhand von Experimenten von *Alexander Rabe* angepasst.
  - aber: beobachteter Raten-Offset zwischen den Experimenten von *Alexander Rabe* und den aktuellen

# Simulationsmodell der Epitaxie – Modellerweiterung

- Erweiterung des Modells um den Raten-Offset ( $RO$ )

$$R = \frac{A \cdot e^{-\frac{E_A}{k \cdot T}} \cdot (P_{DCS})^z \cdot (P_{H_2})^x - B \cdot e^{-\frac{E_B}{k \cdot T}} \cdot (P_{HCl})^y}{m \cdot P + C} + RO$$

mit :  $RO = -26,69 \text{ nm/min}$

- Nachteil: eingeschränkte Gültigkeit des Modells
  - Bei  $p = 0 \text{ Torr} \rightarrow$  physikalisch kein Wachstum
- Die Layoutabhängigkeit wurde hier noch nicht berücksichtigt, da der Loading-Effekt zu schwach aufgetreten ist.
- Der Vergleich der berechneten Werte mit den experimentellen zeigte eine zufrieden stellende Annäherung an den realen Epitaxieprozess.

# Zusammenfassung und Ausblick

---

- Untersuchung der selektiven Siliziumepitaxie anhand der Prozessparameter Temperatur, Druck und Layout (globaler Loading-Effekt) im reaktionslimitierten Bereich
  - Exponentielle Temperaturabhängigkeit
  - Lineare Druckabhängigkeit
  - Loading-Effekt nachgewiesen
- Epitaxiemodell in DUPSIM
  - Getrennte Betrachtung des Abscheide- und Ätzprozesses
- Ausblick für zukünftige Arbeiten
  - Druckabhängigkeit bei hohen Gasflussverhältnissen DCS/HCl
  - Intensität des Loading-Effekts in Abhängigkeit des HCl-Anteils in der Gasphase

---

**DANKE !**