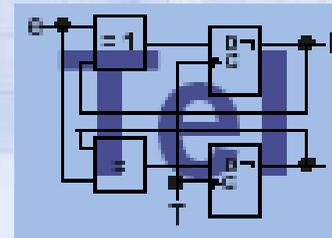


Technologieoptimierung der selektiven Siliziumepitaxie auf 300mm-Wafern für Strukturgrößen $\leq 90\text{nm}$

28.02.2006

Verteidigung der Diplomarbeit:
Ronny Schomacker

mail: rs086821@inf.tu-dresden.de



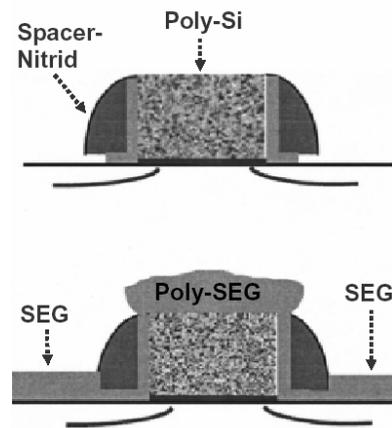
Never stop thinking

Gliederung

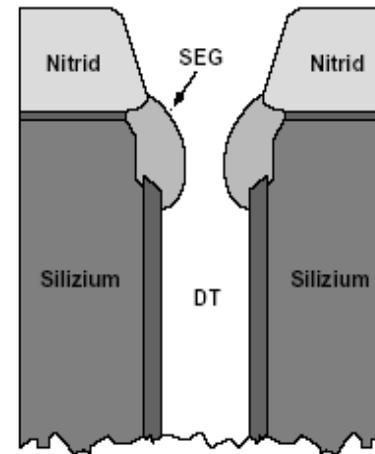
- Motivation und Aufgabenstellung
- Grundlagen
 - CVD-Schichtabscheidung
 - Epitaxie
 - Loading-Effekt
 - Prozesssimulation mit DUPSIM
- Messreihen zur selektiven Siliziumepitaxie
 - Versuchsaufbau und –durchführung
 - Ergebnisse
- Das Simulationsmodell der Epitaxie
 - Bisheriger Stand
 - DUPSIM-Modellerweiterung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

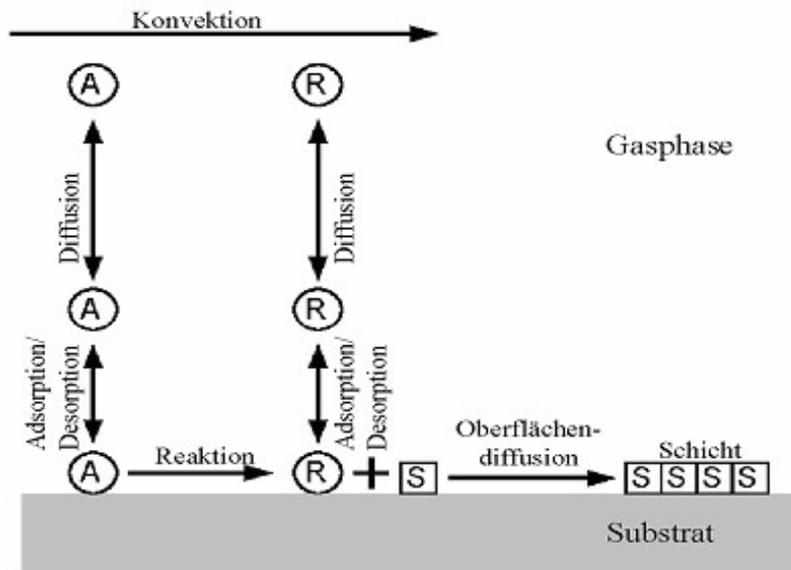
- Notwendig: Modellierung und Simulation der Epitaxie

Aufgabenstellung

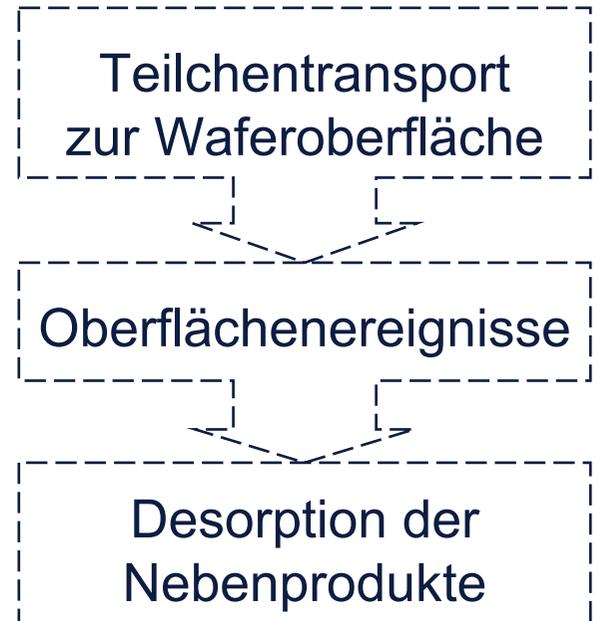
- Literaturstudium (Halbleiterprozesse, Epitaxie, Simulation)
- Erstellen von Anlagenkurzdurchläufern (AKUs)
- Aufstellung eines Versuchsplanes zur Untersuchung der selektiven Siliziumepitaxie
- Durchführung und Auswertung der Experimente
- Modellierung und Implementierung gewonnener Erkenntnisse in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

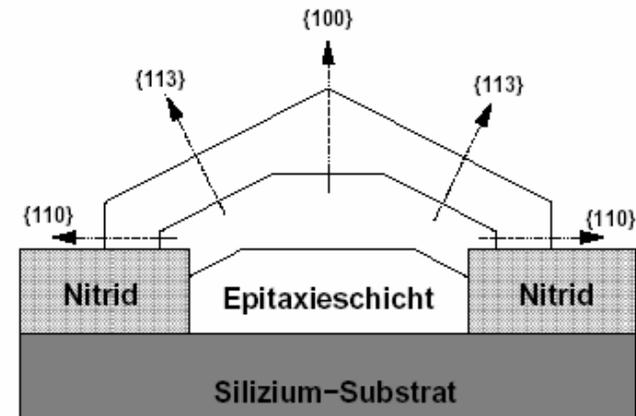
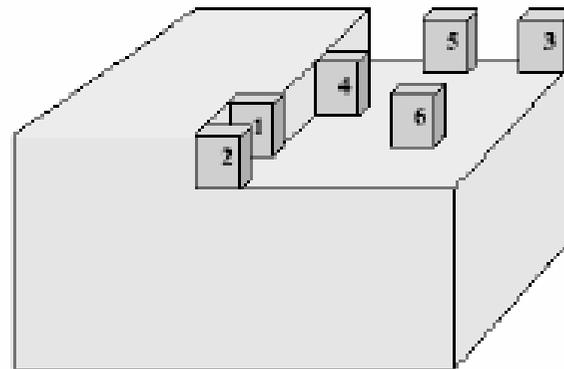


Teilprozesse:



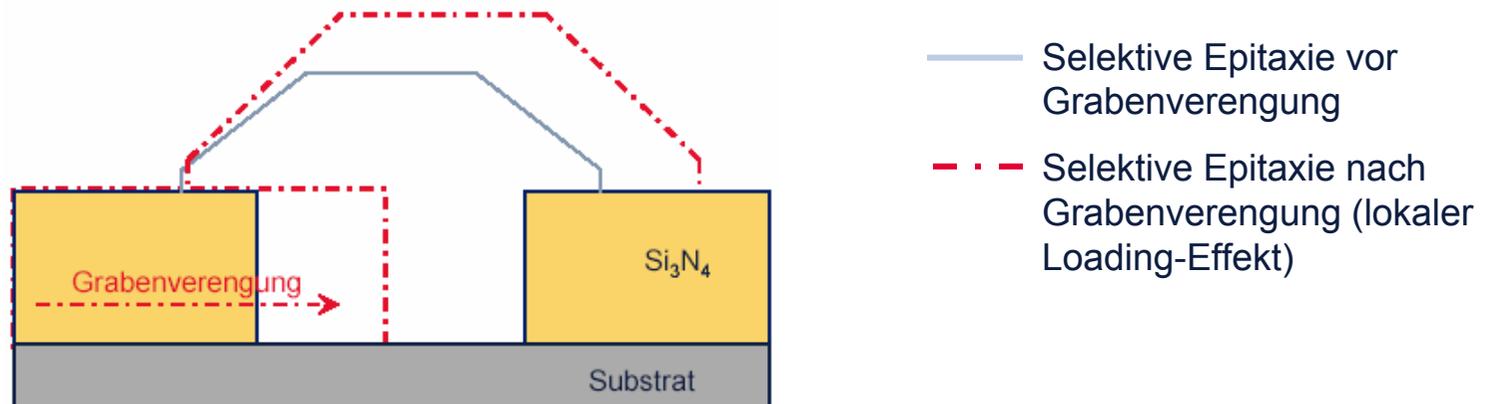
Grundlagen – CVD-Epitaxie (griech: epi taxis)

- 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



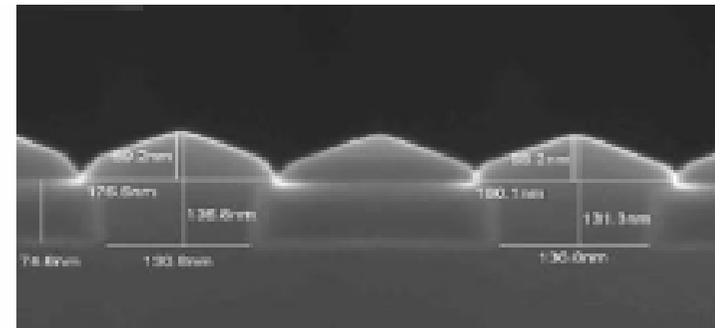
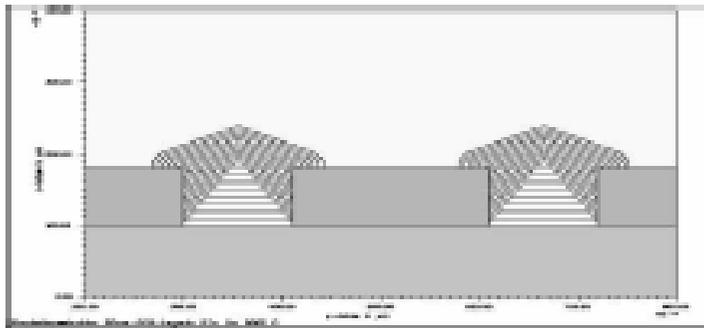
Grundlagen – Loading-Effekt (LE)

- 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



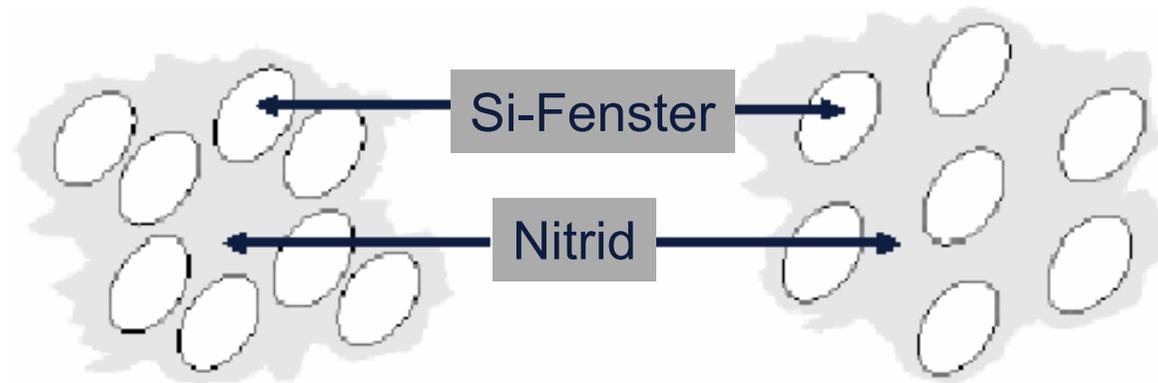
Grundlagen – Prozesssimulation mit DUPSIM

- 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



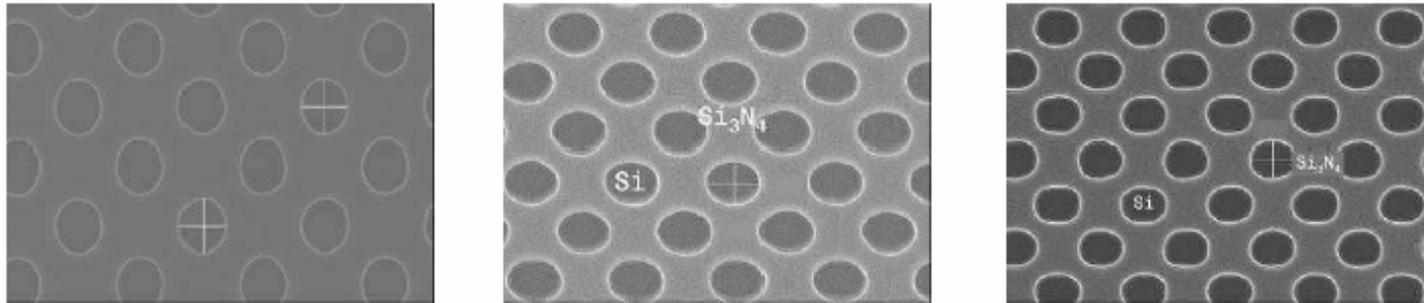
Messreihen zur Epitaxie – bisheriger Stand

- 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)

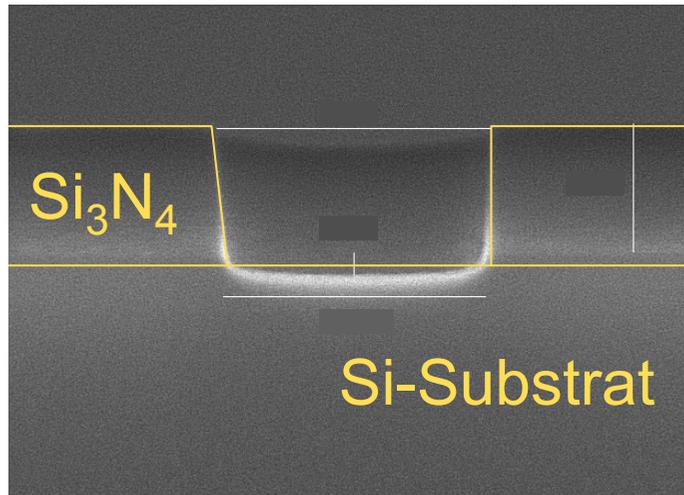


- **CVD-Prozess:** Dichlorsilan-basierte Epitaxie
 - Trägergas: H_2 , Prozessgase: SiH_2Cl_2 (Dichlorsilan - DCS) und HCl
- **Versuchsraum:** SEG-Rezepte mit veränderlichen Parametern
 - Temperatur: 850, 870, 900°C
 - Druck: 15, 23, 31, 39, 50 Torr
 - DCS/HCl: je nach gewählter Temperatur bzw. Druck

Messreihen zur Epitaxie – Versuchsaufbau

- Die zwei genutzten Modellstrukturen

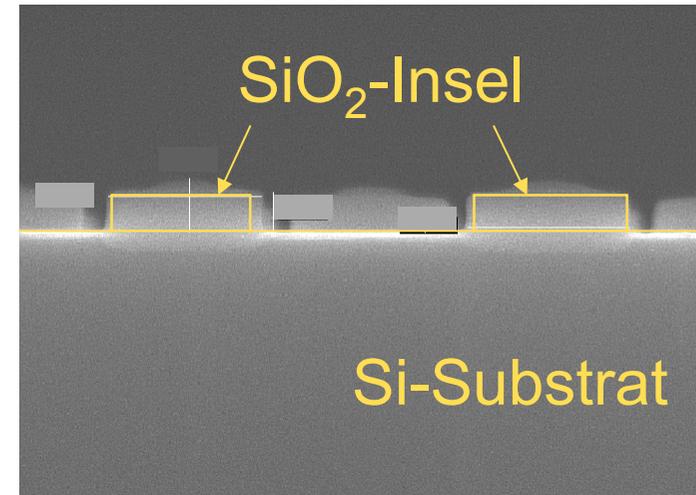
Siliziumfenster



Herstellung:

1. Trockenoxidation ($d = 3\text{nm}$)
2. Abscheidung von Si_3N_4 ($d = 80\text{nm}$)
3. Lithographie
4. RIE-Ätzen + Resist stripping

Oxidinsel



Herstellung:

- Prozessschritte 1 – 4 (Si-Fenster)
5. CVD-Abscheidung von SiO_2
 6. CMP (Stopp auf Si_3N_4)
 7. Nasschemisches Ätzen von Si_3N_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

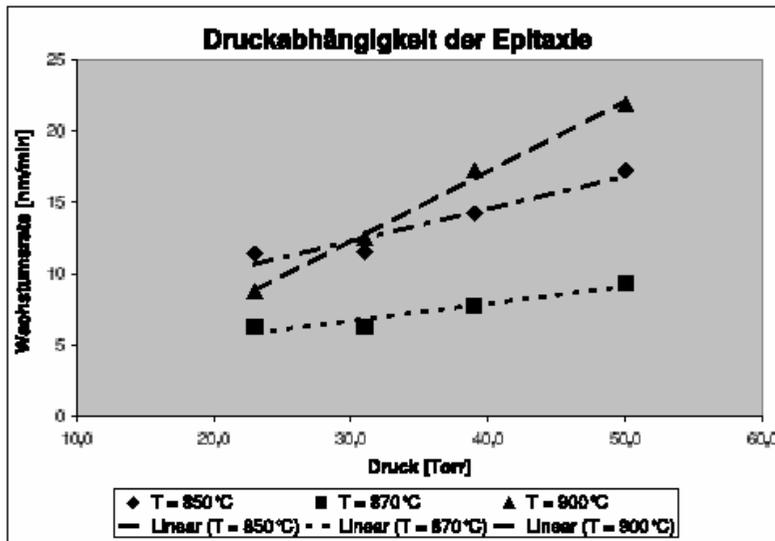
- Unterschiedliche Aktivierungsenergien: 1,3 eV (200mm), 3,95 eV (300mm)
- Grund: SEG-Rezepte (sinkende Gasflussverhältnisse bei steigender Temp.)

	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

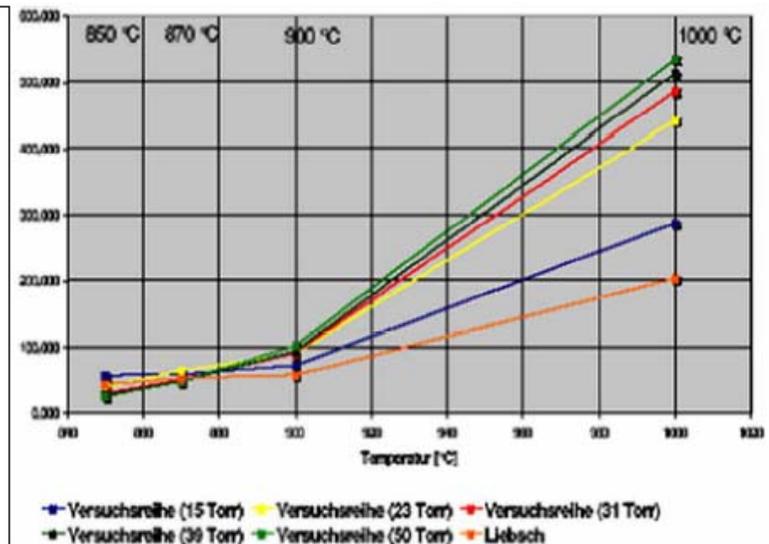


Diagramm aus Diplomarbeit S.Ulbrich

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		
Temp. [$^{\circ}\text{C}$]	850	870	900	850	870	900
DCS [slm]	0,26	0,24	0,2	0,22	0,18	0,14
HCl [slm]	0,16	0,18	0,29	0,22	0,26	0,30
DCS/HCl	1,63	1,33	0,67	1	0,7	0,47

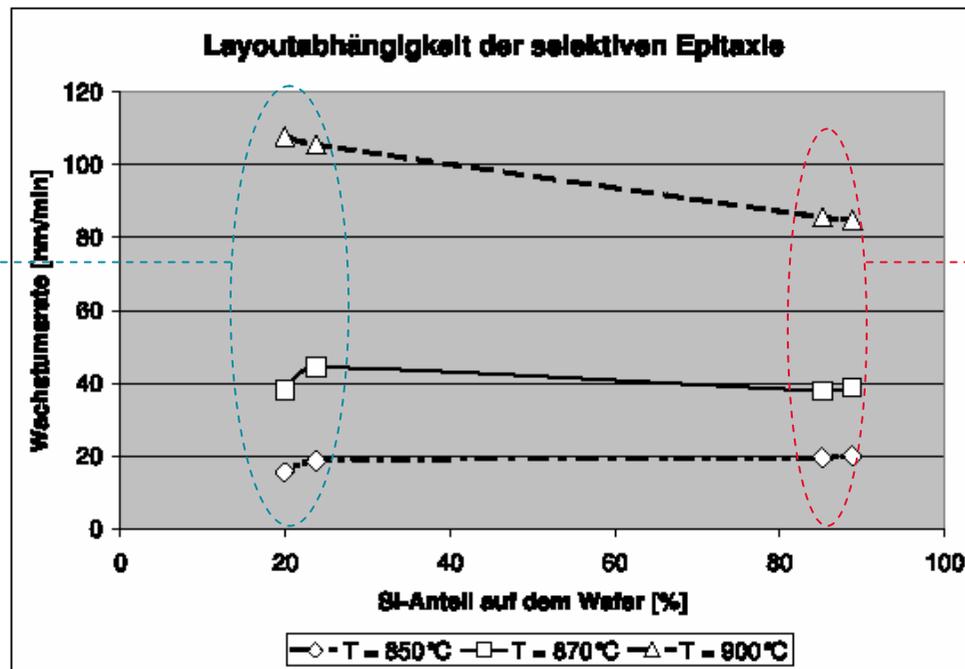
- Vermutung: es existiert ein Grenzwert an reaktiven Teilchen (DCS und HCl) auf der Substratoberfläche

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 !