

Effiziente Analyse von Filmeigenschaften in komplexen 3D Strukturen

Thomas Werner, Chipmetrics GmbH



CHIPMETRICS

- ✓ Chipmetrics ist ein führender Anbieter auf dem Gebiet der 3D Film Konformalitätsmessungen.
- ✓ Hauptprodukt: Innovative Messchips und Wafer .
- ✓ Spezialisierung auf neue Materialien und Prozesse in der Mikroelektronik.
- ✓ Einsatzbereich; Prozess- und Anlagenentwicklung, Prozessüberwachung, Qualitätskontrolle und Anlagenqualifikation.

Gegründet: 2019

Hauptquartier: Joensuu, Finnland

Tochtergesellschaft in Dresden

Mitarbeiter: 10

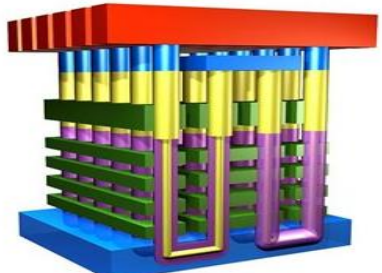
Weltweite Kunden: 40

Lokale Vertretungen in Japan, Korea, USA, Taiwan

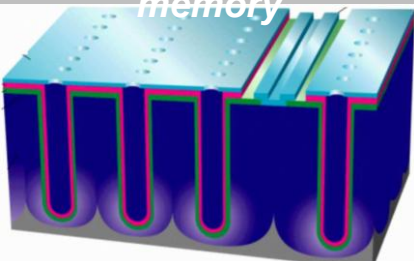


Herausforderungen in modernen Halbleitern

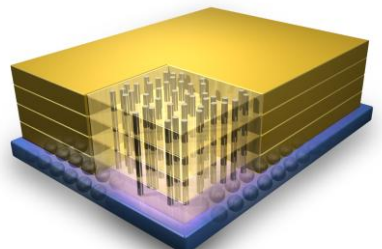
Moderne Halbleiterstrukturen



**3D NAND flash
memory**



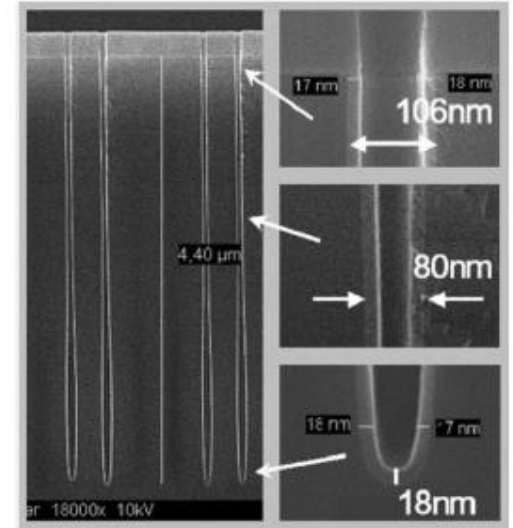
3D silicon capacitor



Through-silicon vias

- Die anhaltende Nachfrage nach Rechenleistung treibt den Trend zu vertikalen Strukturen voran.
- Vertikale Strukturen müssen mit konformen Dünnschichten beschichtet werden.
- Für diese Filme wird zunehmend die Atomlagenabscheidung (Atomic Layer Deposition, ALD) verwendet.
- Typische Analysemethoden für vertikale Strukturen sind zeitaufwendig und kostspielig und wirken sich stark auf die Produktivität aus.
- Alternative Methoden zur Prozessüberwachung sind erforderlich, um hohe Ausbeuten und Produktqualität sicherzustellen.

ALD Abscheidung



Gutsche, Future Fab Intl. Issue 14
George, plenary talk, AVS-ALD 2013

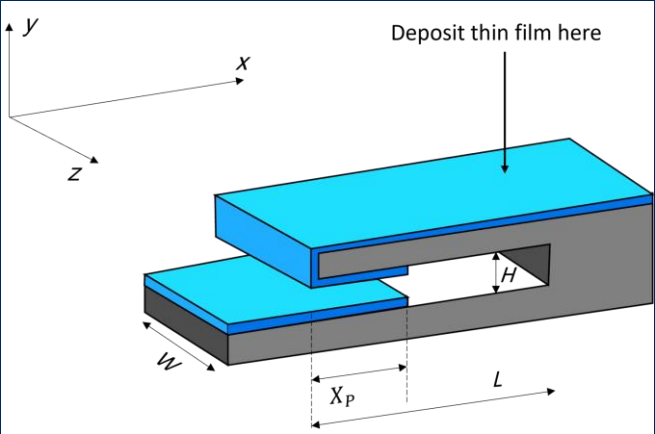
Das PillarHall Prinzip

Das PillarHall Prinzip

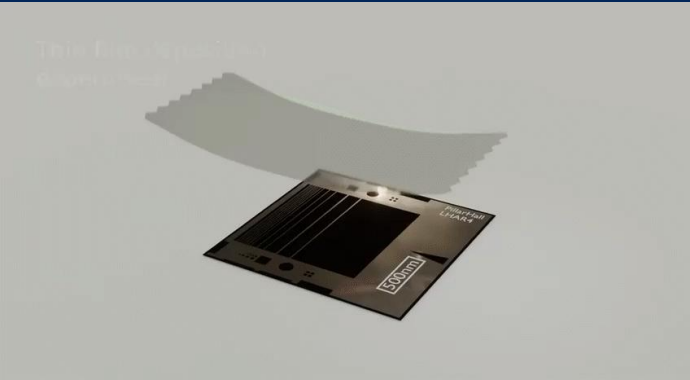


Das PillarHall Prinzip

1. Filmabscheidung

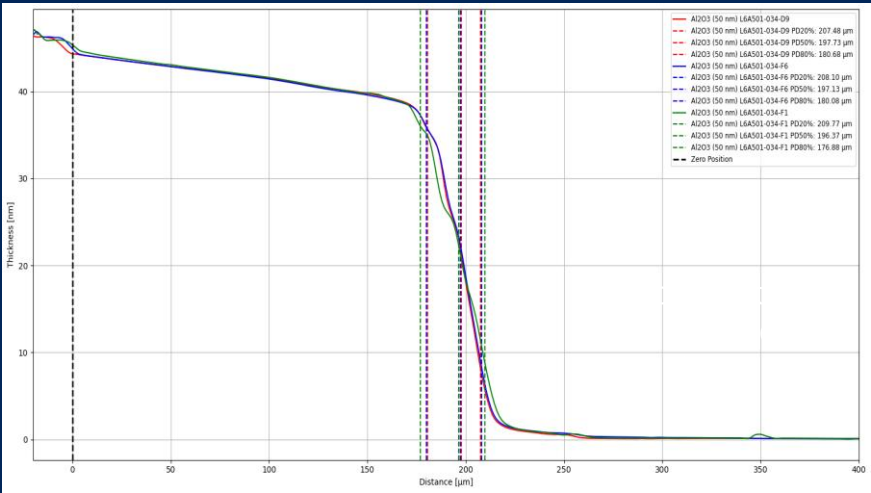
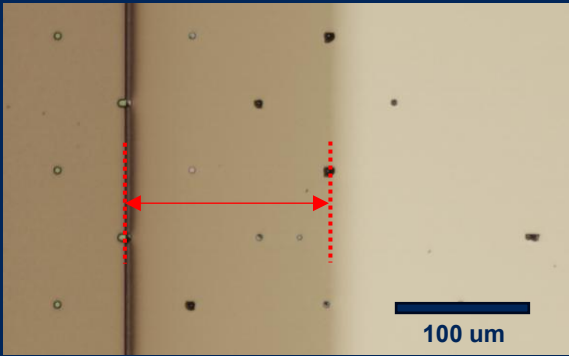


2. Membranentfernung



3. Messung

Kann im einfachsten Fall mit Mikroskop erfolgen



PD%	Depth (μm)
90	96
80	138
50	151
10	166
1	188

Schichtdicke vs. Eindringtiefe

Vorteile der PillarHall Technologie

PillarHall®

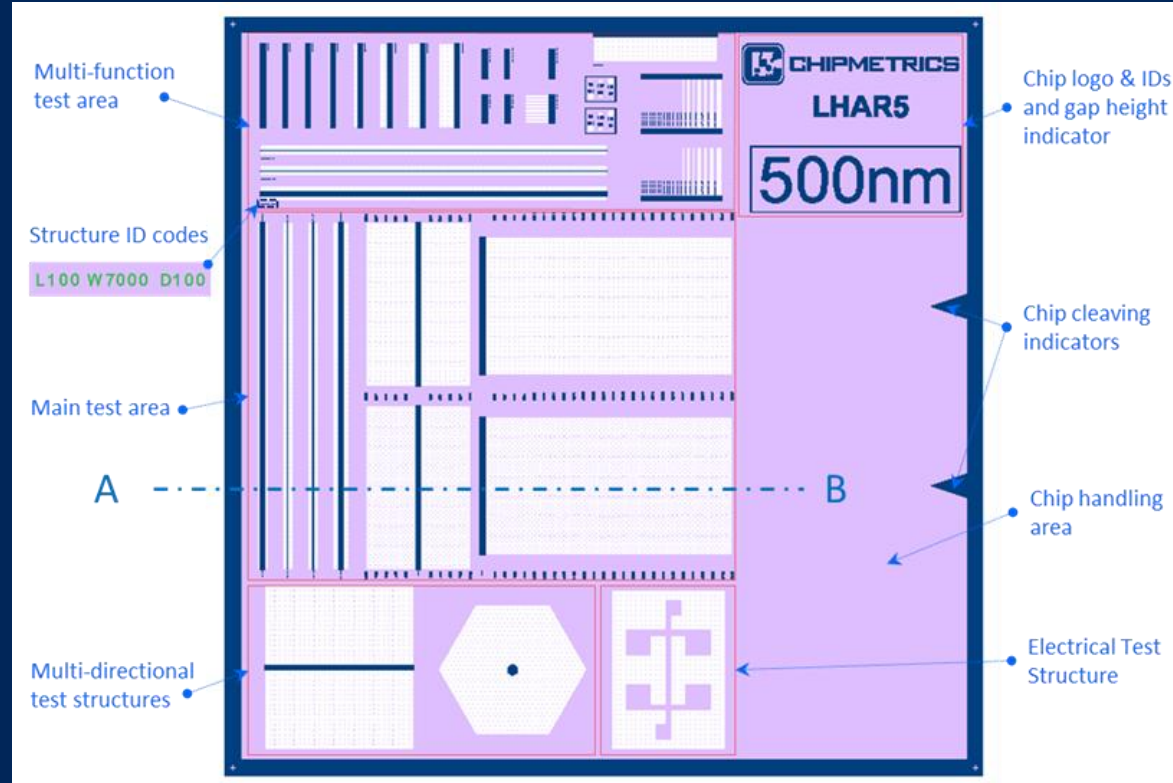
- 100-1000 x schneller
- 2-10x niedrigere Kosten
- Höhere Genauigkeit



	Querschnitt an Testwafern	Pillarhall Chip
Kosten pro Probe	1000-5000 €	<1000€
Equipment	5-20 M€ (FIB+STEM/HRSEM)	Mikroskop ausreichend
Qualifikation	Spezialisiertes SEM /TEM Labor	Techniker
Zeitaufwand	>1 Tag	< 30 min
Genauigkeit	Aspektverhältnis begrenzt durch Testwafer	Aspektverhältnis bis 10000

Der PillarHall Chip

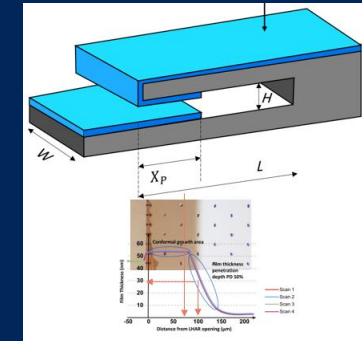
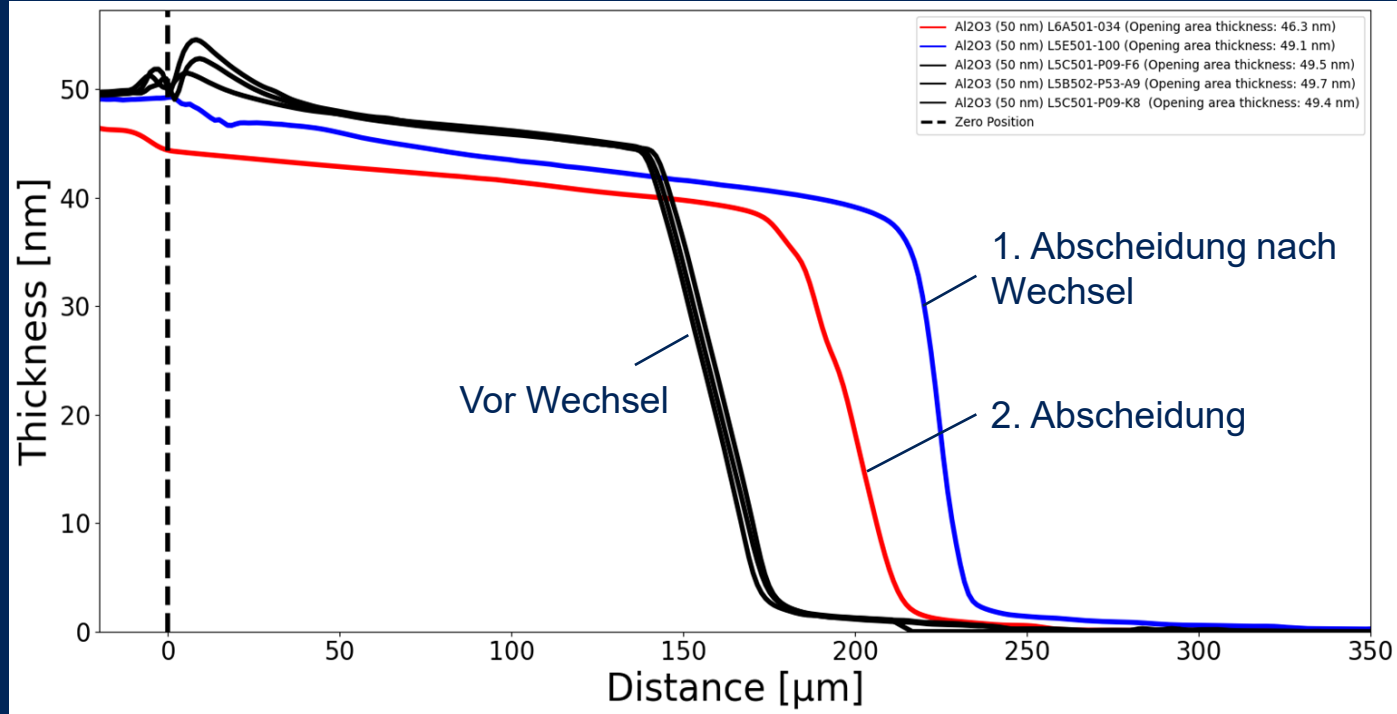
- PillarHall Strukturen mit einseitiger oder beidseitiger Membranöffnung
- Spalthöhen: 500nm und 100nm
- Aspektverhältnis bis 50000 bei 100nm Spalt
- Elektrische Teststruktur



Anwendungsbeispiele

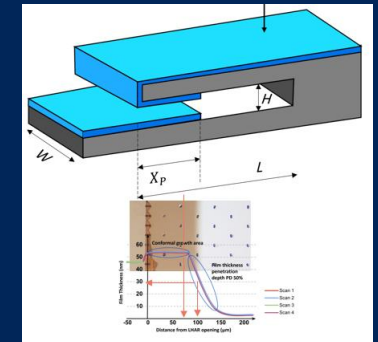
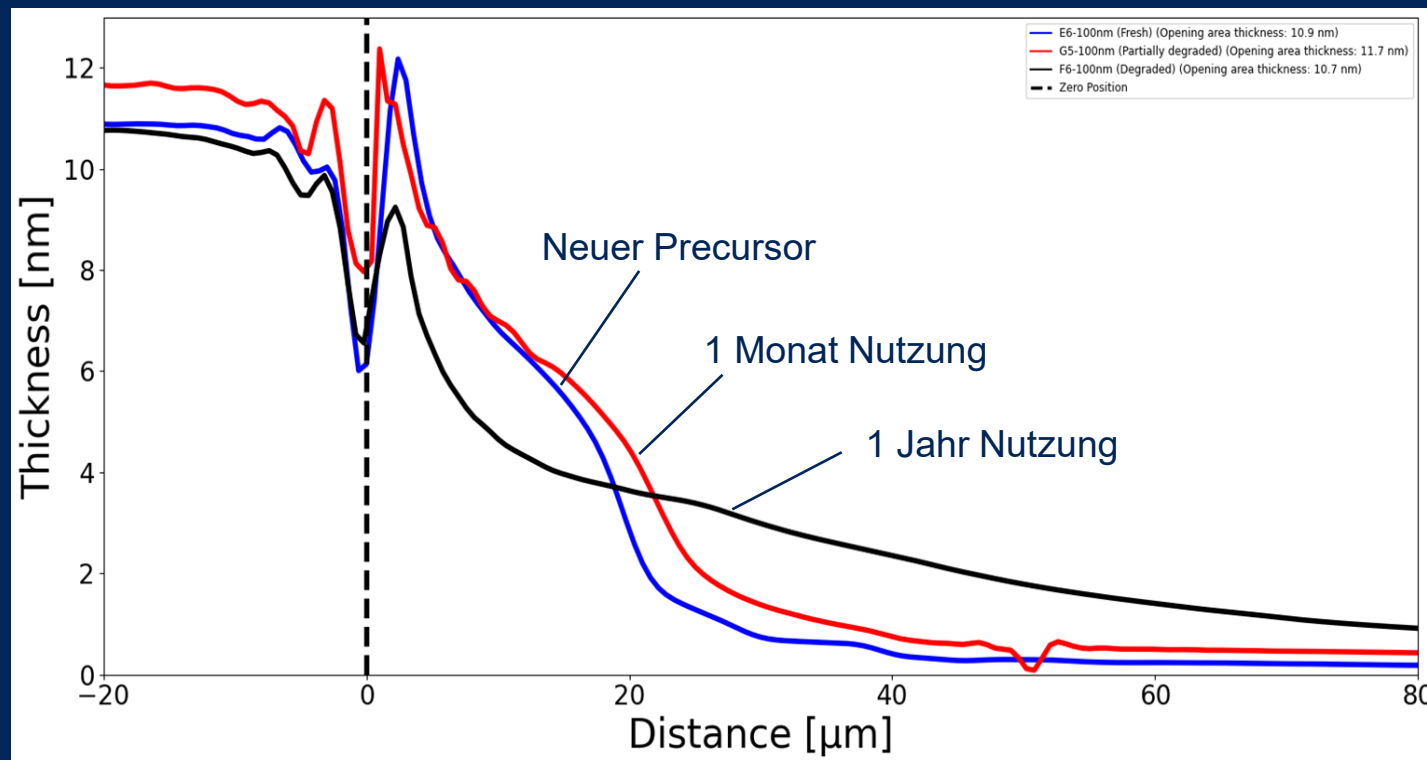
Prozessstudie zur Precursorstabilität

- Prozess: ALD Al₂O₃; TMA+H₂O bei 300°C
- Beobachtung: Eindringtiefe des Films ändert sich nach neuer Befüllung mit Precursor



Prozessstudie zur Precursoralterung

- Prozess: ALD TiO_2 ; $\text{Ti}(\text{OPr})_4$
- Beobachtung: Alterung des $\text{Ti}(\text{OPr})_4$ Precursors beeinflusst Filmprofil

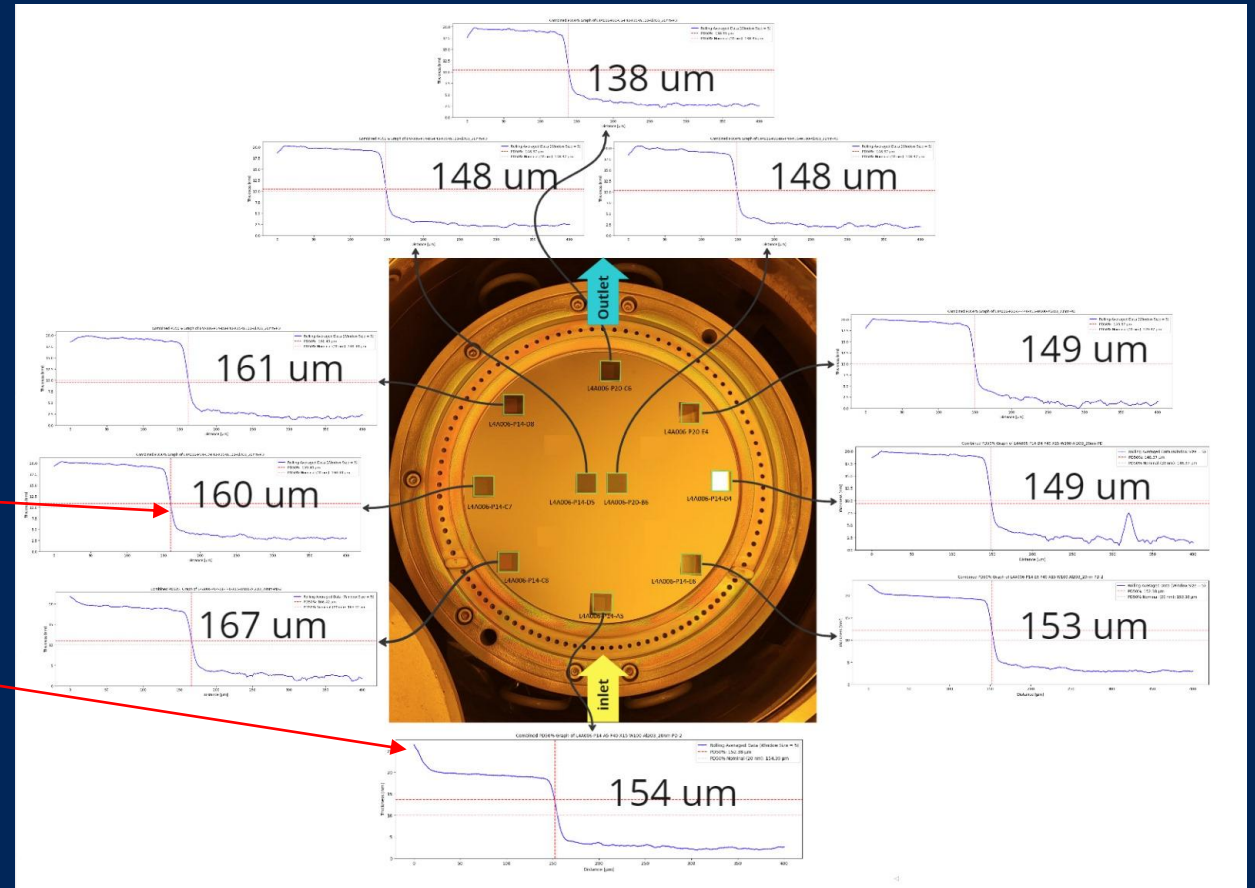


200mm Prozesskammerstudie

- Prozess: AL₂O₃ Film: 300°C, TMA + H₂O, 20nm Zieldicke
- 200mm cross-flow reactor,

Beobachtungen:

1. Eindringtiefe variiert über Wafer
2. Steile Filmfronten >130µm, Filmdicke sinkt jedoch nicht auf Null ab
3. Anderer Abscheidemechanismus im Einlassbereich (CVD?)

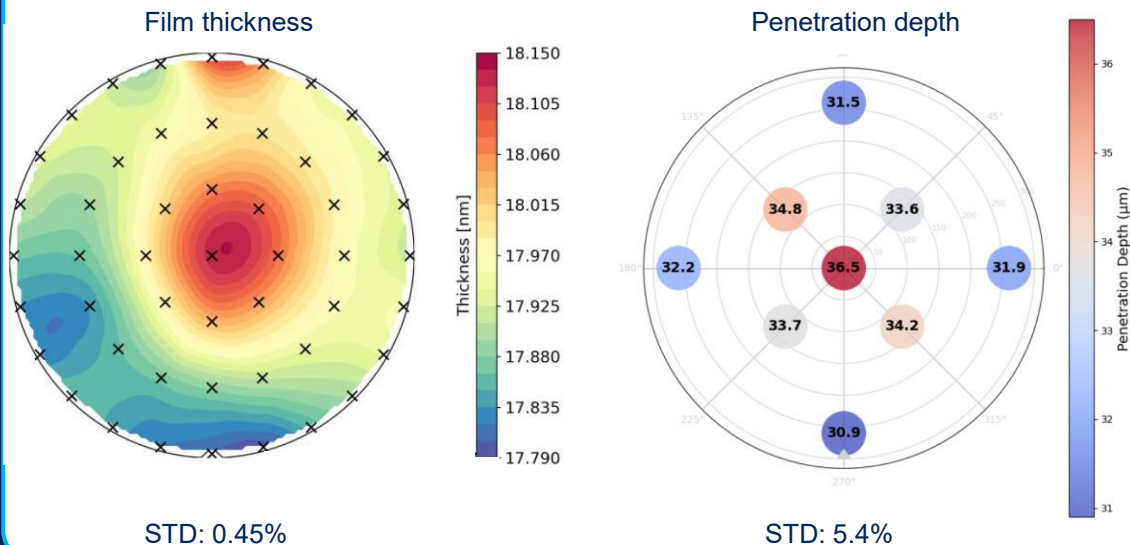


300mm Prozesskammervergleich

- Vergleich zweier 300mm ALD Kammern mit Showerhead Design
- Prozess: HfO_2 , 300°C TEMA Hf + O_3
- Beobachtung: Eindringtiefe schwankt variiert stark über Wafer und korreliert nicht immer mit Filmdicke!

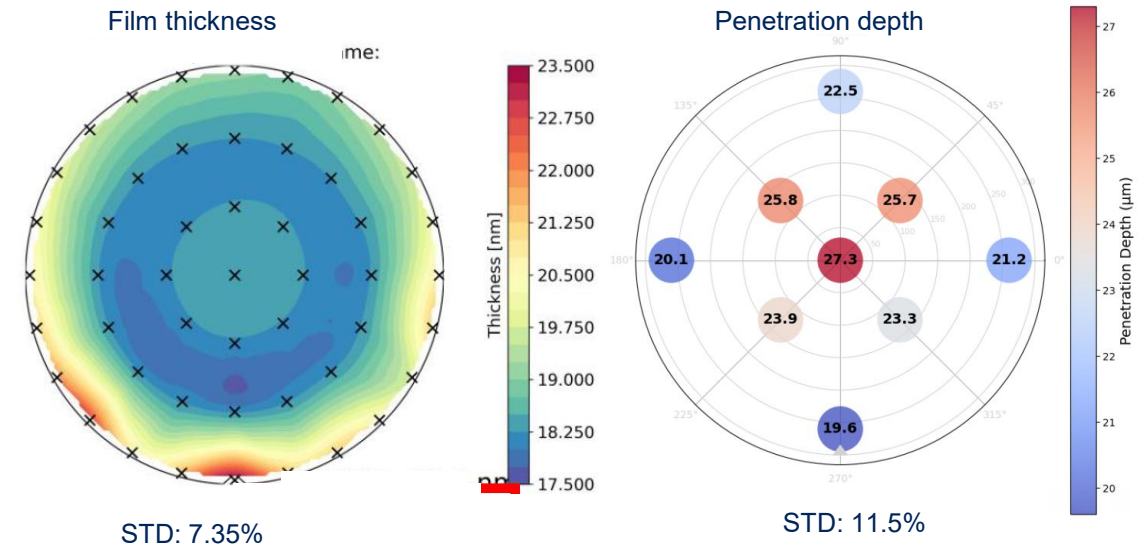
Process chamber 1: good across wafer uniformity

- Thickness and penetration depth profiles partially match
- PD shows higher variation than film thickness



Process chamber 2: poor across wafer uniformity

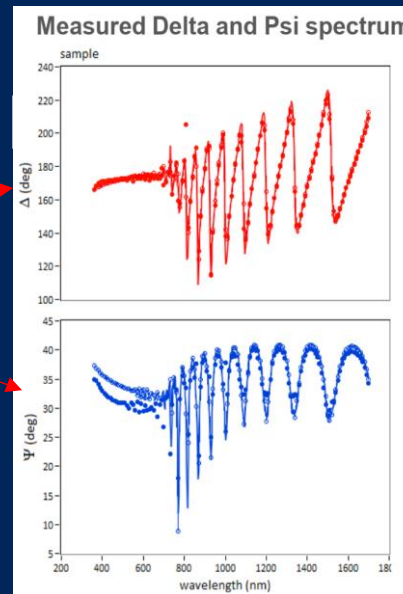
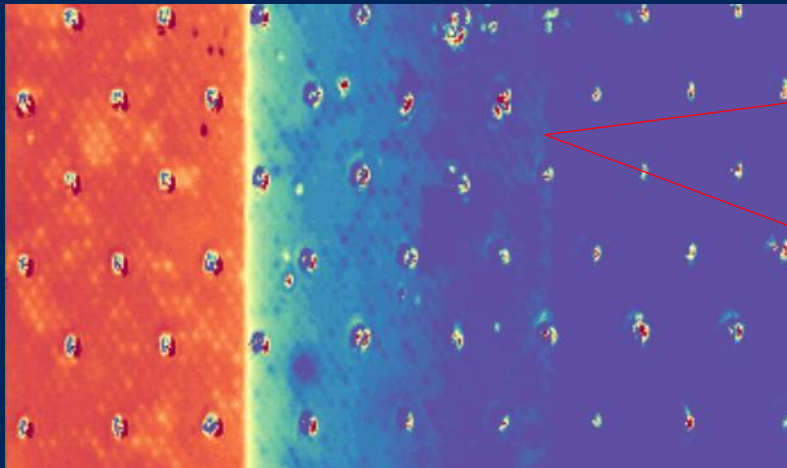
- Thickness and penetration depth profiles do not match
- PD shows higher variation than film thickness



Messung mit Imaging Ellipsometer

Imaging Spectroskopische Ellipsometrie kombiniert die besten Eigenschaften von Ellipsometers und Mikroskop

- Minimum Pixelgröße 1 μm
- Dickenauflösung 0.1 nm
- Wellenlänge 360-1700 nm
- Kann vergrabene Schichten messen
- Messung durch Membran möglich

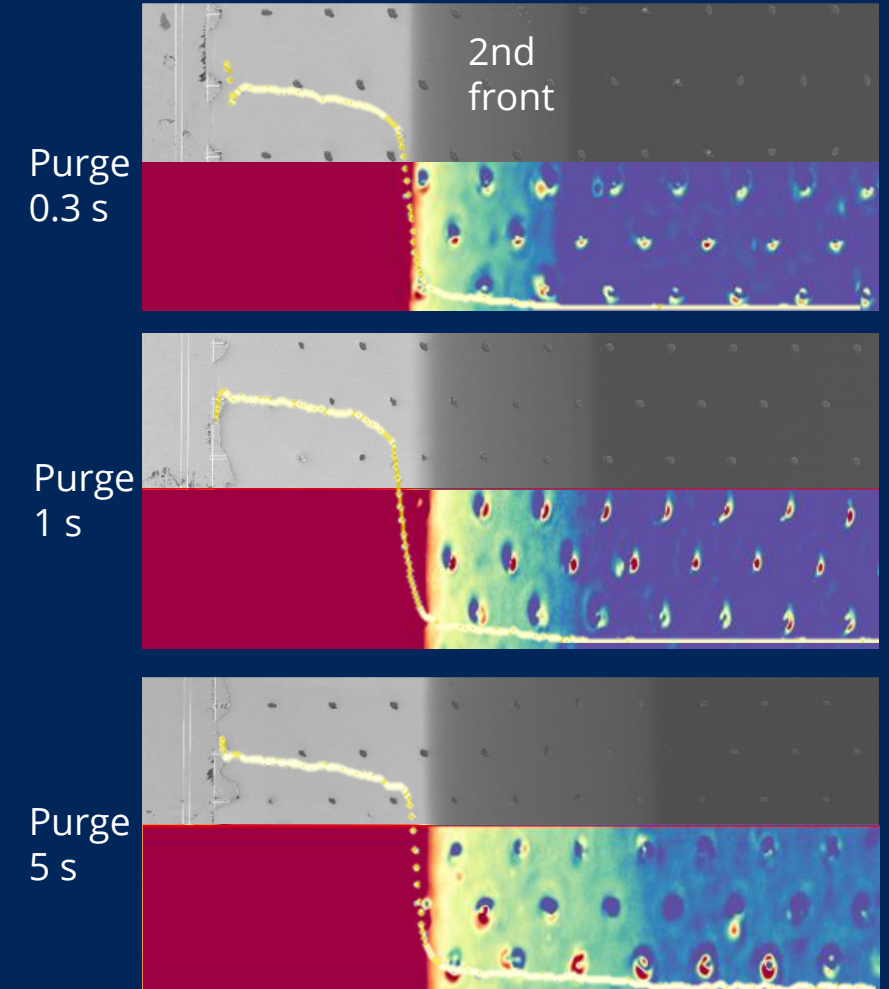
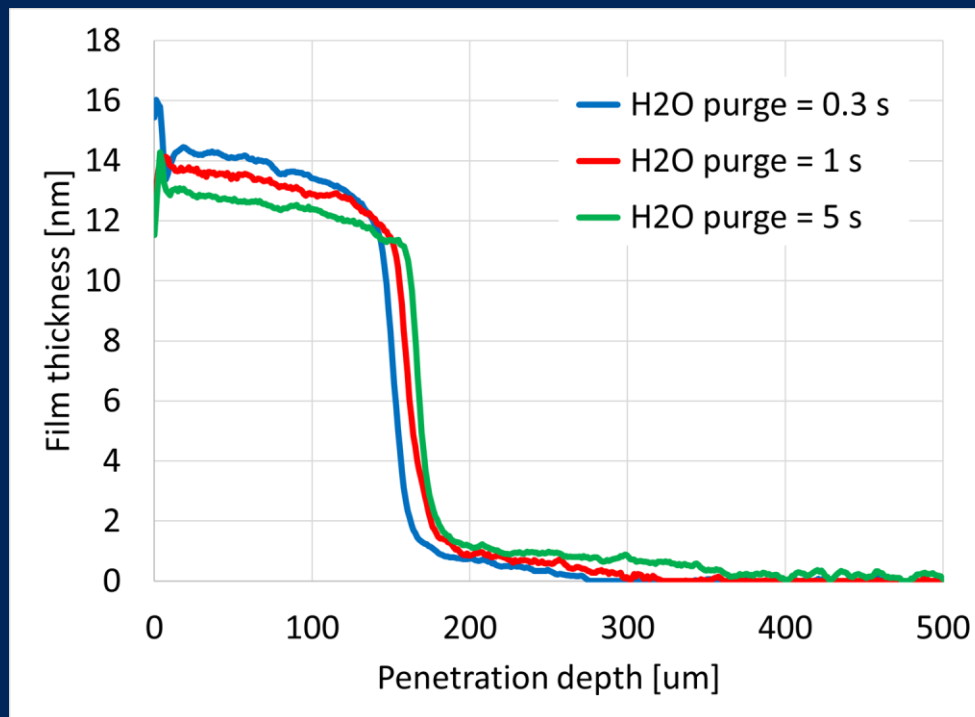


Layer Stack	Thickness [nm]
sample	
Air	
layerstack	
SiO2-Silicon Dioxide_163	#0
thickness	9.451
PolySi	#1
thickness	1508.183
SiO2-Silicon Dioxide_163	#2
thickness	1.500
Air	#3
thickness	510.406
SiO2-Silicon Dioxide_163	#4
thickness	3.500
Si-Crystalline Silicon_163-24	

 Komplette Filmmap mit
pixelfeiner Auflösung der
Schichtdicke

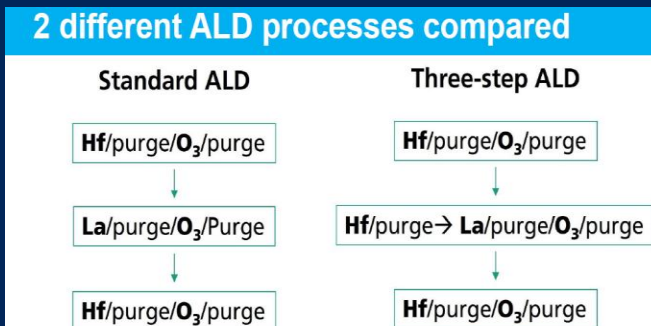
Messung mit Imaging Ellipsometer

- Prozess: ALD Al_2O_3 ; TMA+ H_2O at 300C
- Wachstum per Zyklus verlangsamt sich und Eindringtiefe erhöht sich mit zunehmender H_2O Spülzeit.
- Zweite Filmfront beobachtbar.



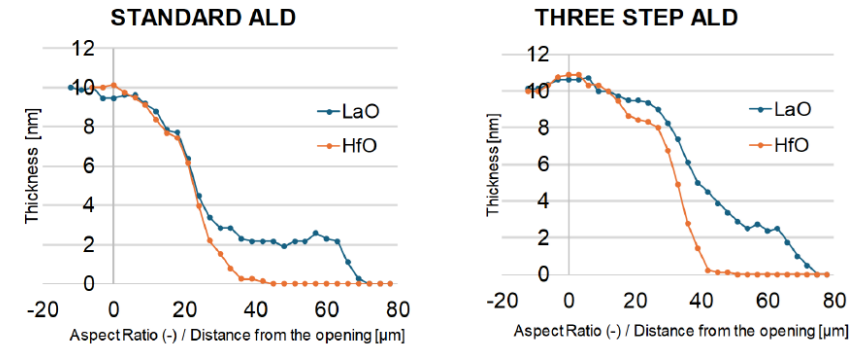
Elementanalyse

- ALD Abscheidung ferrolelektrischen HfO₂, La-dotiert
- Vergleich zweier Abscheideprozesse
- Beobachtung: Deutliche Unterschiede in der La Konzentration als Funktion der Eindringtiefe.

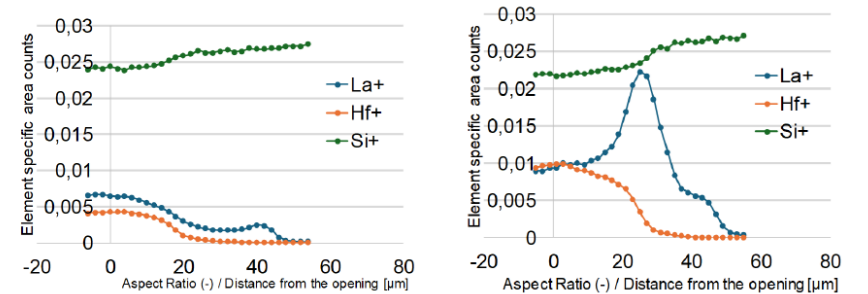


REF: J. Emara et al, Applied Surface Science 680 (2025) 161408, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161408>

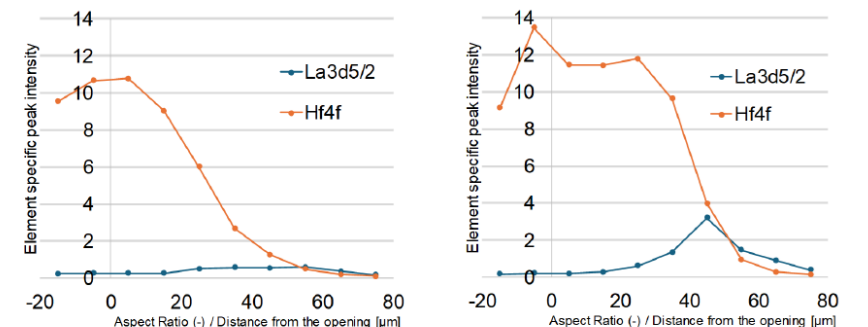
1) Thickness profile



2) ToFSIMS



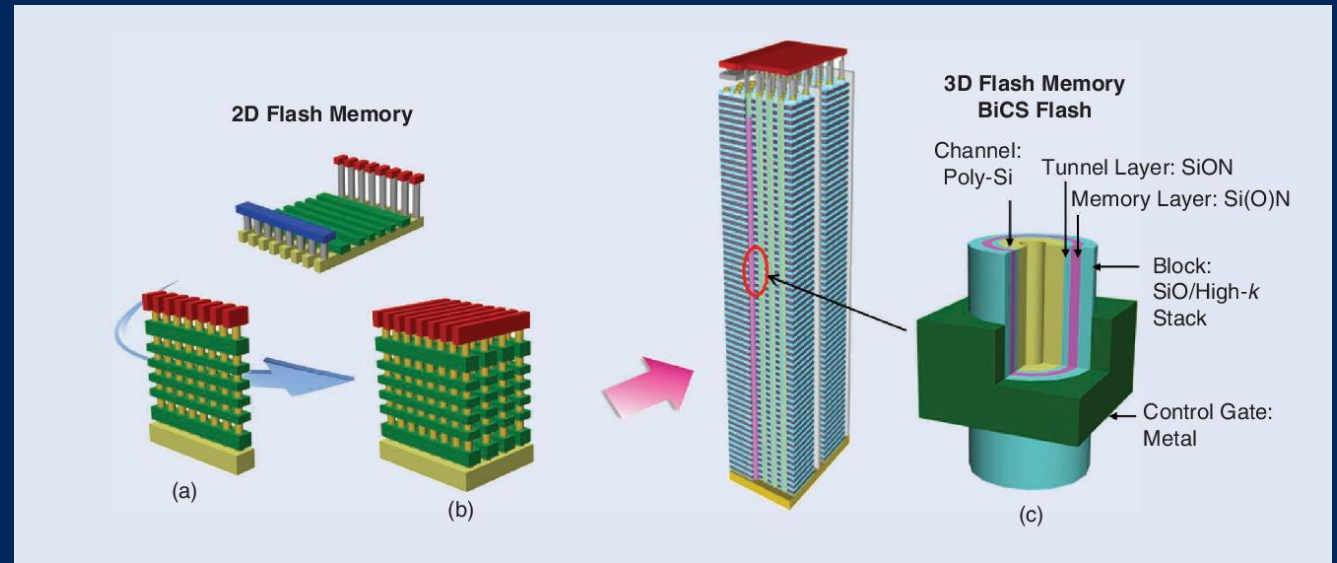
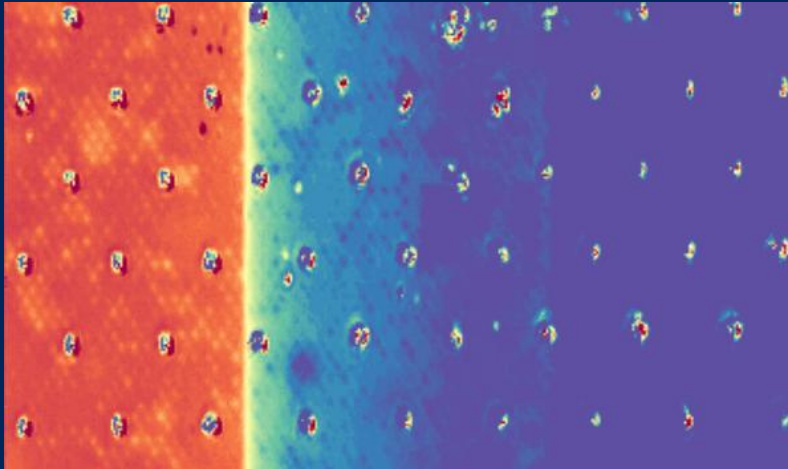
3) XPS



>Aspect Ratio (AR) is defined as hole geometry equivalent AR, which is $AR=L/2w$, for trench geometry.

Ausblick: Elektrische Messung

- Elektrische Eigenschaften einer Schicht können in Abhängigkeit von der Eindringtiefe variieren.
- Elektrische Messungen dünner Schichten in Querschnitten ist schwer möglich.
- Ziel: Elektrische Charakterisierung eines ferroelektrischen Films in PillarHall Strukturen mittels AFM.



Li, Yan. "3D NAND Memory and Its Application in Solid-State Drives: Architecture, Reliability, Flash Management Techniques, and Current Trends." IEEE Solid-State Circuits Magazine 12 (2020): 56-65.

Zusammenfassung

- PillarHall Strukturen ermöglichen kostengünstige und schnelle Analysen der Filmkonformalität.
- Die horizontalen Strukturen erlauben den Einsatz von flächigen Verfahren zur Filmanalyse.
- Elektrische 3D Charakterisierung von dünnen Filmen möglich.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Thomas Werner, Head of Metrology Wafer Business

Maria – Reiche Str. 1

01109 Dresden

Email: thomas.werner@chipmetrics.com

Tel +49 15906812225



CHIPMETRICS