

Themenpitch

**Ersatz für SF6 bei CVD-basierten
Reinigungsprozessen und beim
Si-Tiefenätzen –
Stand der Technik heute**

Dipl.-Ing. Robert Wieland

Fraunhofer EMFT



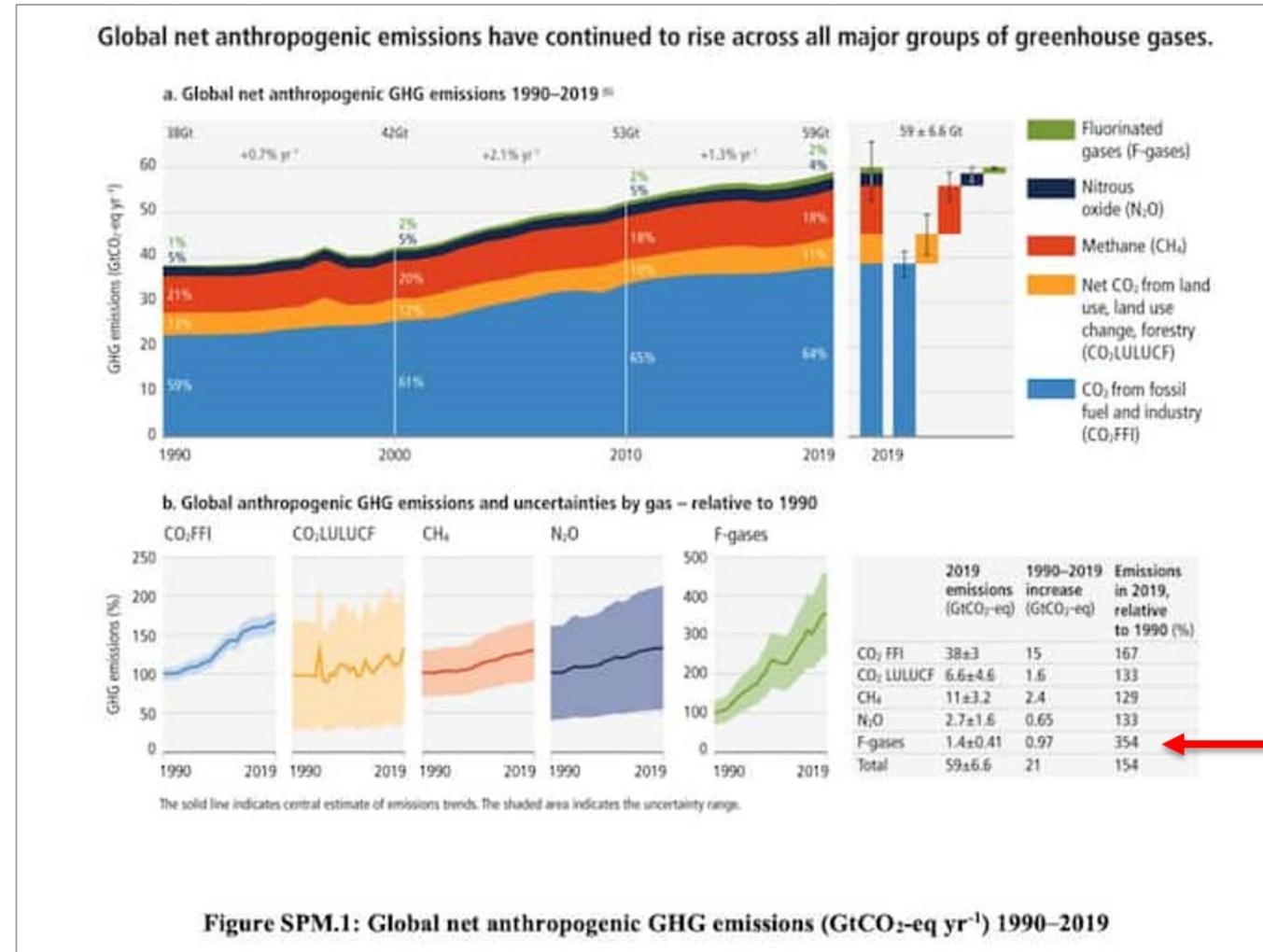
- Ersatz für SF_6 bei CVD-basierten Reinigungsprozessen und beim Si-Tiefenätzen –
Stand der Technik heute

Übersicht

- Umweltaspekte
- SF₆-Ersatz – welche Gase?
- FAN-Gasmischung – Eigenschaften
- PECVD Reinigung - FAN-Gasmischung als Ersatz für SF₆
- Boschprozess – eine SF₆ Erfolgs-Story
- Projekt SumSi – Erste Schritte ohne SF₆
- Ausblick – Neue Plasmaquellen mit FAN-Gas

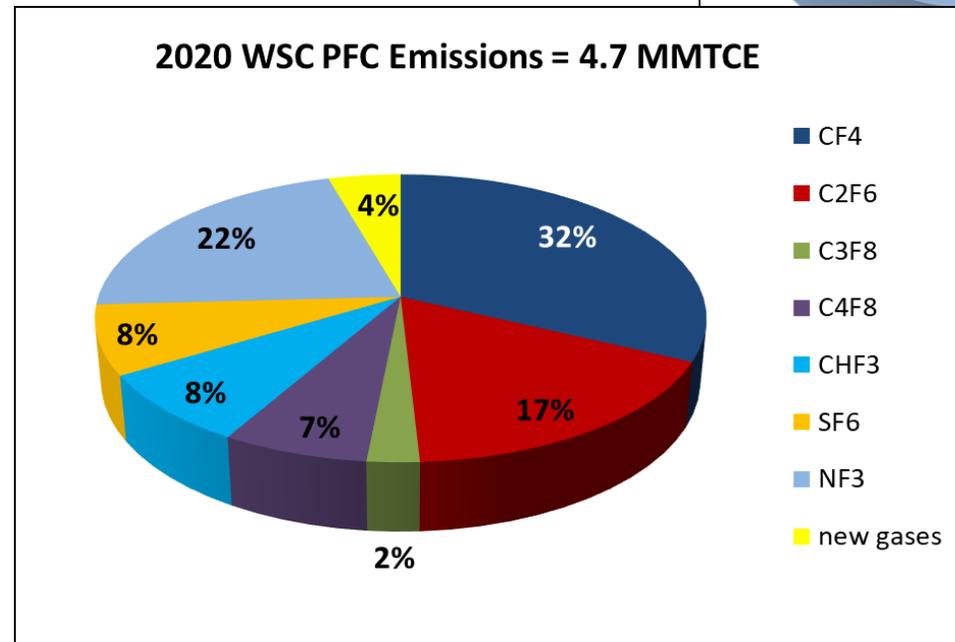
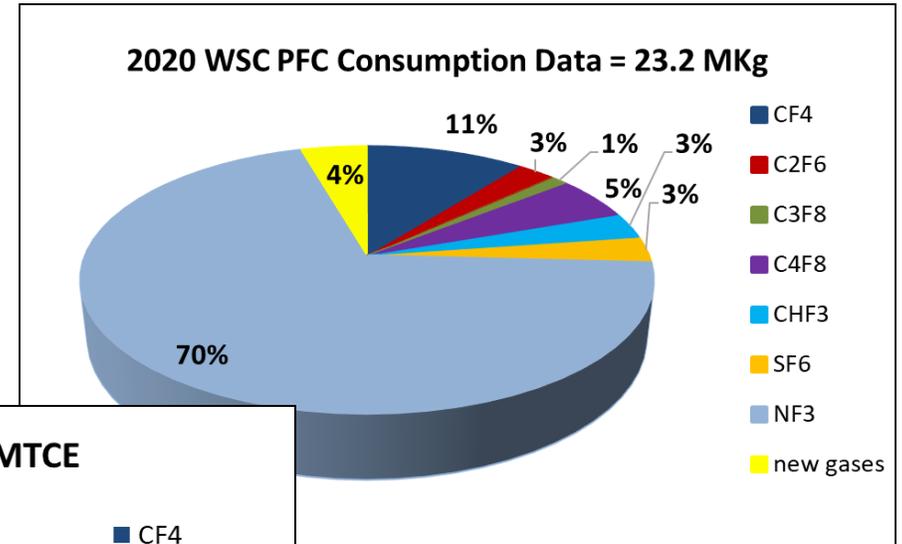
Umweltaspekte

- Höchster Anstieg 1990 - 2019: F-Gase
- F-Gase (NF_3 , SF_6 , C_4F_8 ,...) werden vorwiegend in der Halbleiter/Photovoltaik-Produktion verwendet



Umweltaspekte

- SF₆: 3% Verbrauch, 8% Emissionen; **GWP 22800**
- NF₃: 70% Verbrauch, 22% Emissionen; **GWP 17200**



Quelle: WSC, "joint statement of the 25th meeting of the WSC, June 2nd, 2021, virtual"

MMTCE:
"Metric Million Tons of CO₂ Equivalent"

Umweltaspekte - SF₆ Verbot im Mittelspannungsbereich

- „Keine Chance für schädliche Gase! SF₆-Verbot auf Bundesebene: Ein Schritt in die richtige Richtung.“
- Ab 1. Januar 2022 werden SF₆-basierte Mittelspannungsanlagen für **Dienststellen des Bundes** verboten.



Gas	GWP	Lebensdauer
	[CO2 EQ]	[Jahre]
NF ₃	17200	740
C ₂ F ₆	12200	10000
SF ₆	22800	3200
c-C ₄ F ₈	8700	300
F ₂	0	0
C ₄ F ₆	~0	~0
CF ₄	7390	5000
CHF ₃	11700	264

<https://www.datacenter-insider.de/sf6-verbot-auf-bundesebene-ein-schritt-in-die-richtige-richtung-a-1073958/>

Ersatz für SF₆ – welche Gase?

- FAN Gasmischung = F₂ / Argon / N₂ Mischung, verwendbar für PECVD-Reinigung und für Plasmaätzen
- F₂ ist in Ar und N₂ verdünnt (komprimiertes Gas, max. 30vol%)
- FAN-Gasmischung ist effizienter als 100% F₂ beim Plasmareinigen
- 100% F₂ = sehr gefährlich, Sondertransport usw.

Gas	GWP	Lebensdauer
	[CO2 EQ]	[Jahre]
NF ₃	17200	740
C ₂ F ₆	12200	10000
SF ₆	22800	3200
c-C ₄ F ₈	8700	300
F ₂	0	0
C ₄ F ₆	~0	~0
CF ₄	7390	5000
CHF ₃	11700	264

Ersatz für SF₆: FAN Gasmischung - Eigenschaften

- Korrosiv, nicht selbstentzündlich, nicht explosiv
- F₂-Mischungen benötigen eine einmalige Passivierung des Edelstahl-Gasverteilungs-Systems
- Zwei Mischungen verfügbar, optimiert für PECVD*:
 - „Solvaclean™ NO“ → RPS-optimiert
 - „Solvaclean™ N“ → In-situ-Reinigung (weniger Ar, mehr N₂)

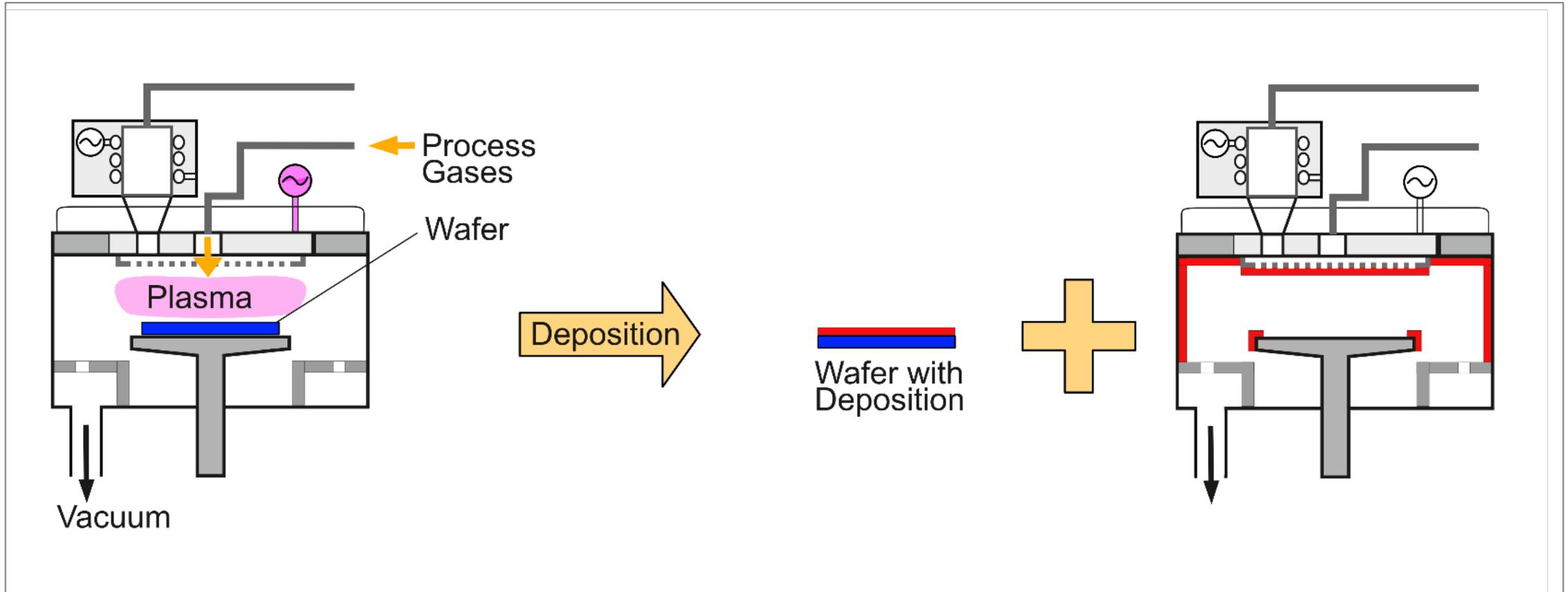
Bond Dissociation Energies			
Molecule			Diss. Energy [kJ/mol @ 298K]
N ₂	-->	N + N	945
F ₂	-->	F + F	155
O ₂	-->	O + O	498
SF ₆	-->	SF ₅ + F	326
N ₂ O	-->	NO + N	115
NF ₃	-->	NF ₂ + F	243
CF ₄	-->	CF ₃ + F	506

Quelle: United States department of commerce, national bureau of standards, Lewis M. Branscomb

* R. Wieland, M. Pitroff et al: "Environmental-Friendly Fluorine Mixture for CVD Cleaning Processes...", ECS 2016, San Diego

PECVD Reinigung

- PECVD Prozess – Teil 1: Abscheiden einer dielektrischen oder Si-Schicht auf Wafer



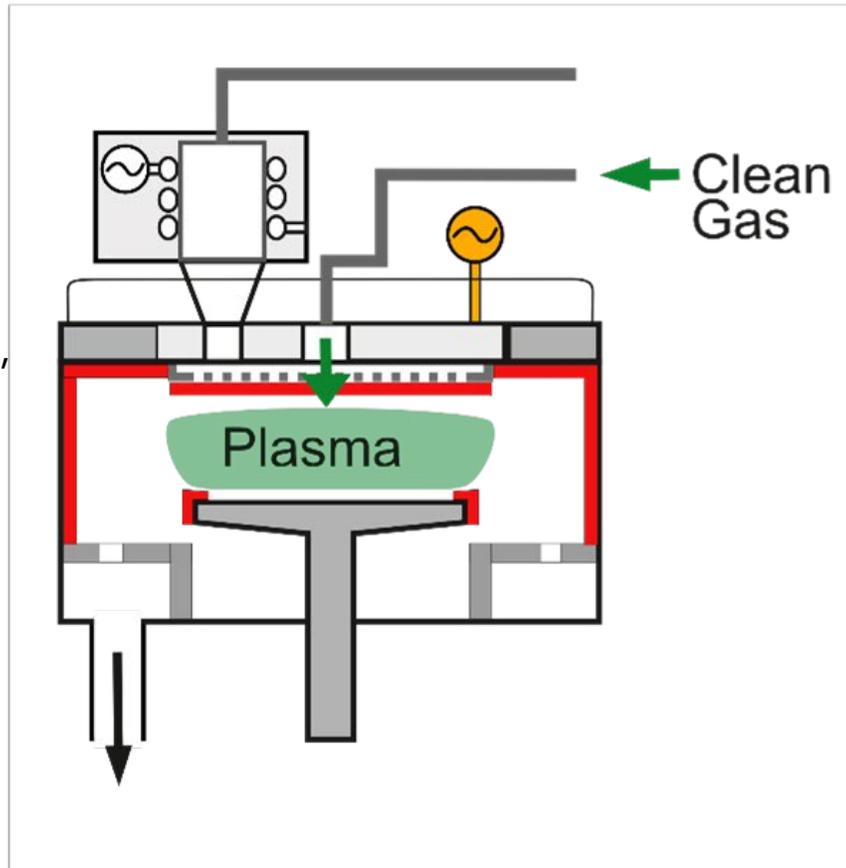
PECVD Reinigung

– PECVD Prozess – Teil 2: Plasmareinigung der Prozesskammer

In-situ Reinigung

“Hard Clean”
Ionen +
Radikale

effizient,
hohe
Abnutzung

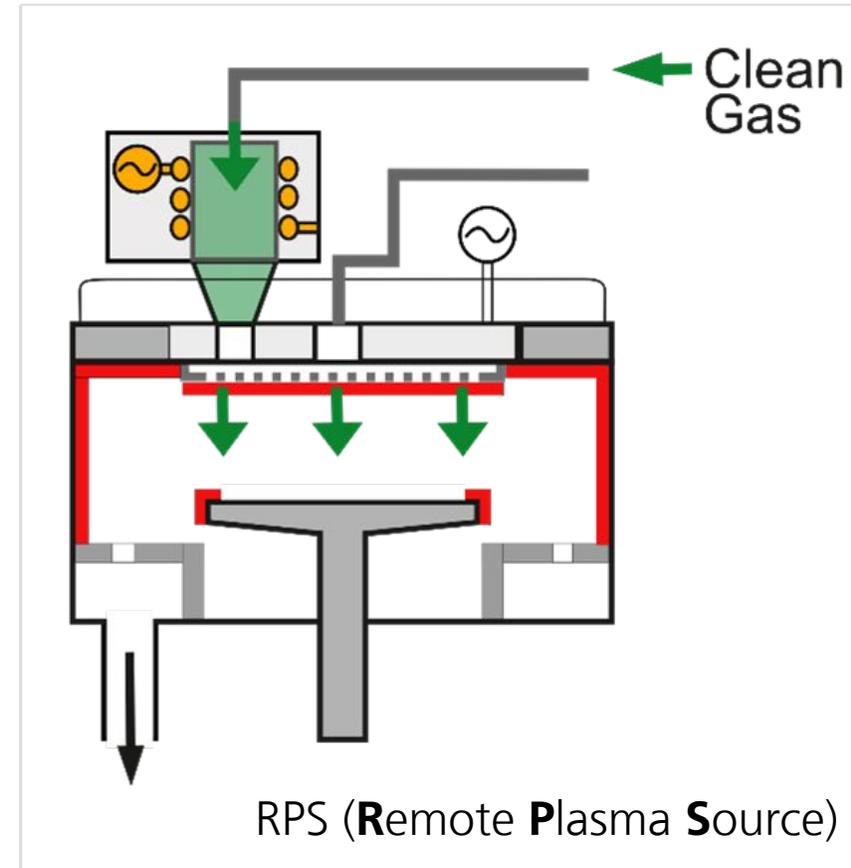


RPS Reinigung

“Soft Clean”

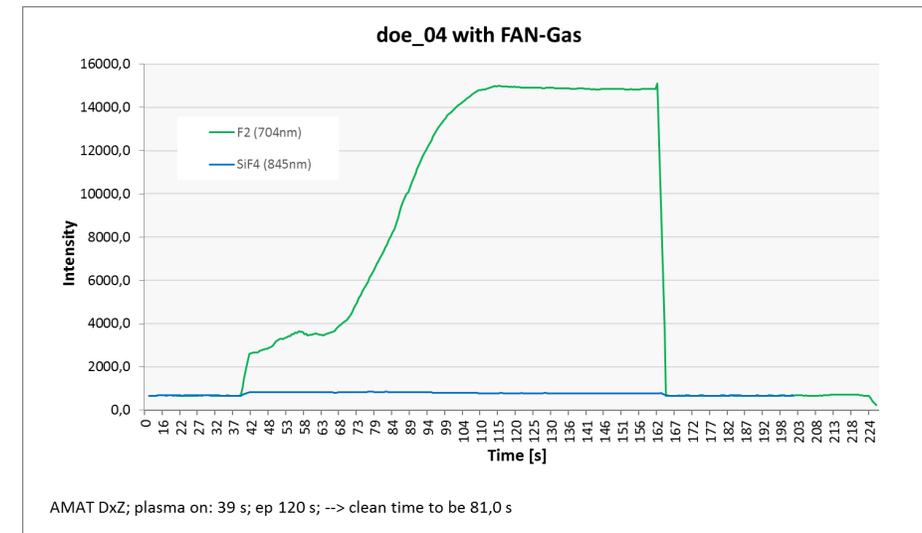
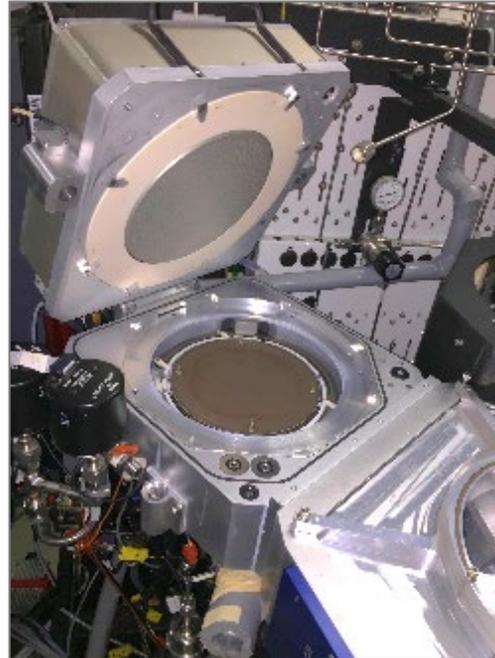
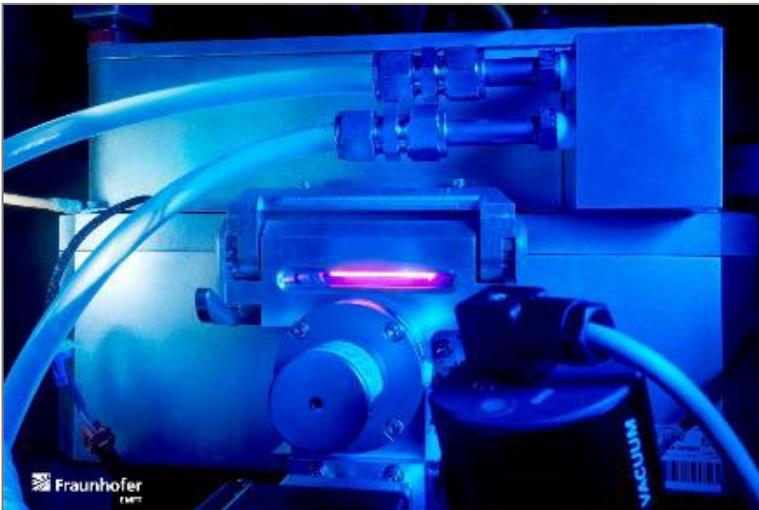
Nur Radikale

mehr Gas,
geringe
Abnutzung



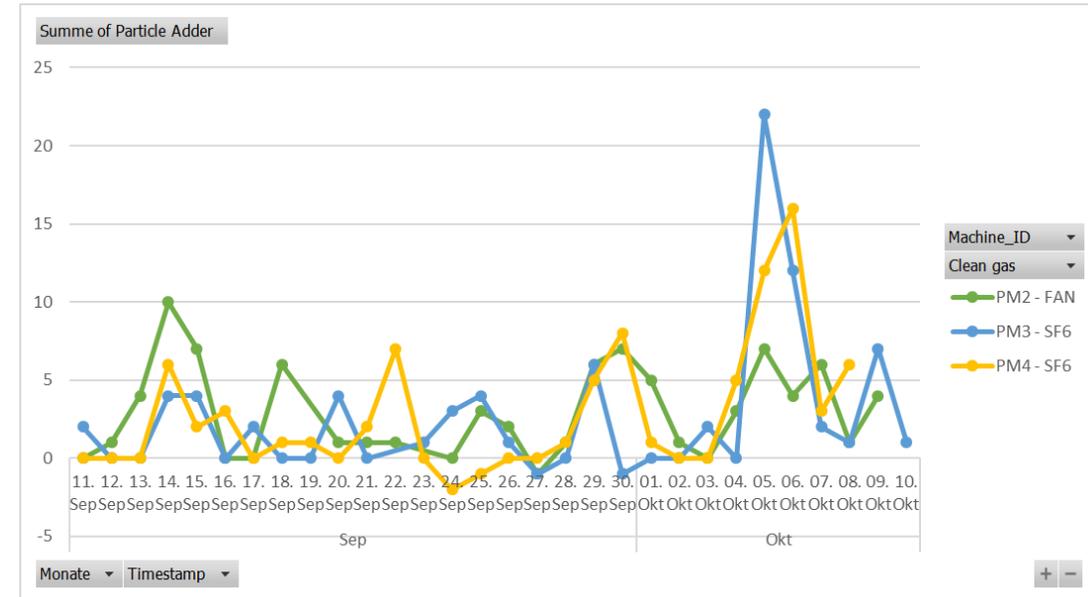
PECVD Reinigung - FAN-Gasmischung als Ersatz für SF₆

- FAN-Gas Clean: Vergleichbare Reinigungsgeschwindigkeit wie C₂F₆/O₂, Ar/NF₃, CF₄/N₂O, SF₆/N₂O



PECVD Reinigung - FAN-Gasmischung als Ersatz für SF₆

- PECVD-Prozess für SiO₂-Beschichtung, 150mm
- Prozess läuft in Produktion
- F-Verbrauch und Defektdichte (Partikel)
- “FAN” Mischung im Vergleich zu SF₆/N₂O

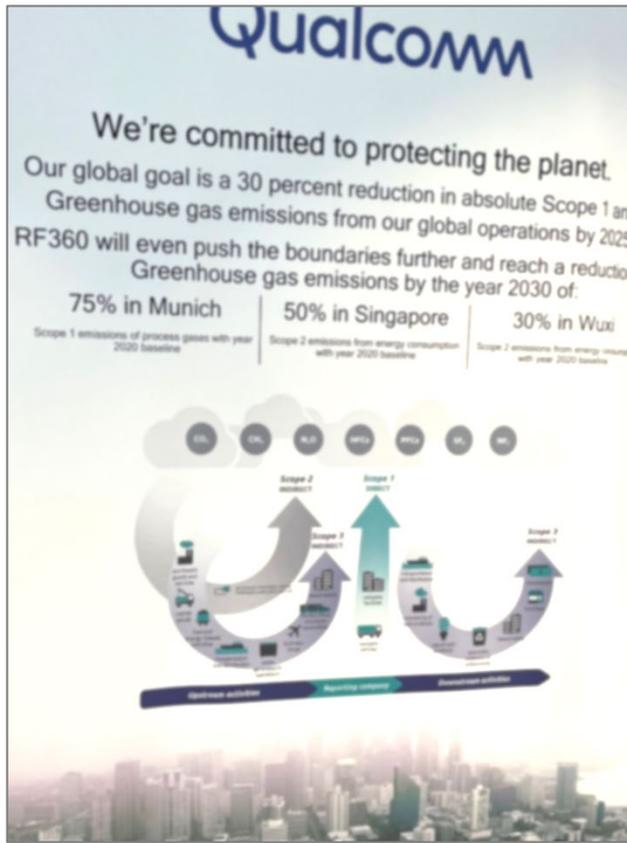


Cleaning chemistry	Solvaclean [®] NO / N ₂ O	POR (SF ₆ / N ₂ O)	Solvaclean [®] NO	POR (SF ₆ / N ₂ O)
	F ₂ -Gas used	weight	weight SF ₆ Gas	F ₂ content
3 μm SiO ₂ onto 5 wafers:	17,1 g	34,4 g	6,0 g	26,9 g
onto 10.000 wafers:	34,1 kg	68,8 kg	12,1 kg	53,7 kg
5 cylinders of FAN "NO":			11,0 kg	
	Gas weight factor: 2,0		Factor for F ₂ : 4,4	

Quelle: Qualcomm München

PECVD Reinigung - FAN-Gasmischung als Ersatz für SF₆

- Einsparung von CO₂-EQ – Beispiel RF360-Qualcomm



Menge	kg Gas	kg Gas
	FAN	SF6
10.000 Wafer	34,1	68,8
CO2-Eq [kg]	460,4	148.174,6
210.000 Wafer/a	716,1	1444,8
CO2-Eq [kg]	9.667	3.111.666
CO2-Eq [t]	10	3.112

Quelle: Qualcomm München und eigene Abschätzung am EMFT

PECVD Reinigung - FAN-Gasmischung als Ersatz für SF₆

- Einsparungs-Potential: Abschätzung der Kosten für Europa

SF₆ hat den größten Einfluss (höchstes GWP)

NF₃ rechnet sich nur in Europa

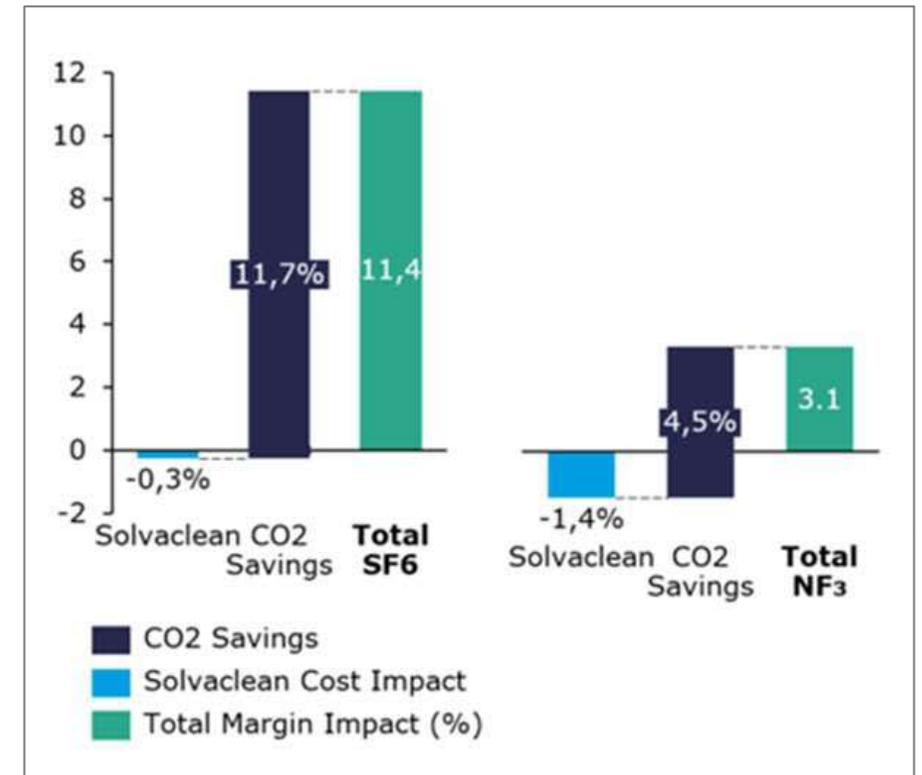
Annahmen:

CO₂ Cost: 85\$/Tons CO₂ Emitted

Gross Margin on chip: 50%

Gases unit price (\$/kg):

SF₆: 24\$



Quelle: Solvay GmbH

CO₂ Besteuerung weltweit

- Beispielrechnung für den Gebrauch von NF₃ als Reinigungsgas

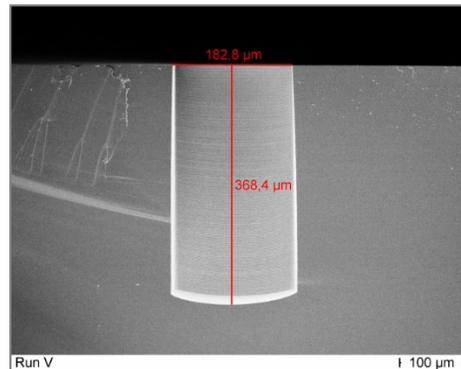
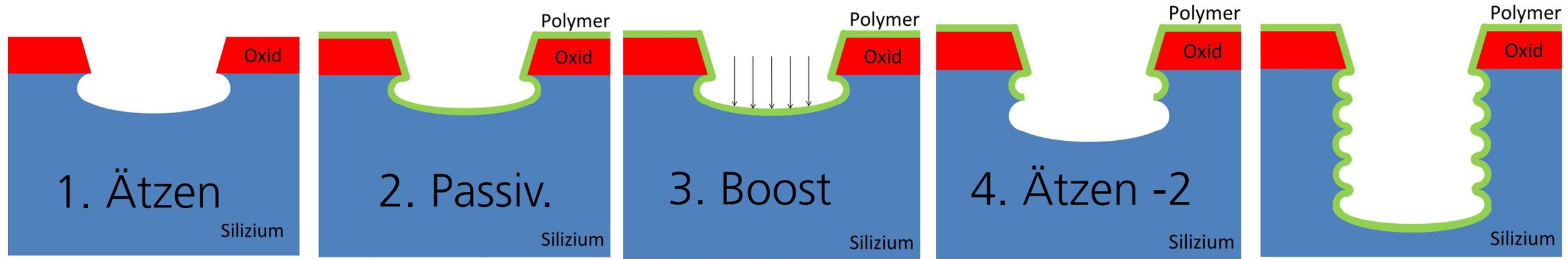
NF₃ rechnet sich derzeit nur in Europa



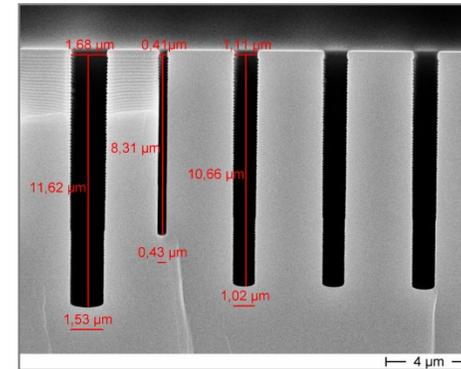
Quelle: Solvay GmbH

Boschprozess – eine SF₆ Erfolgs-Story

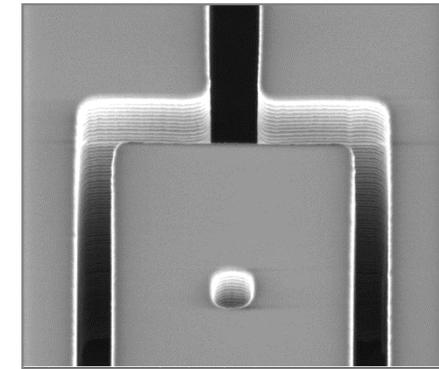
- Abwechselndes Ätzen/Passivieren mit SF₆ und C₄F₈



Kavitäten tiefgeätzt, 350µm

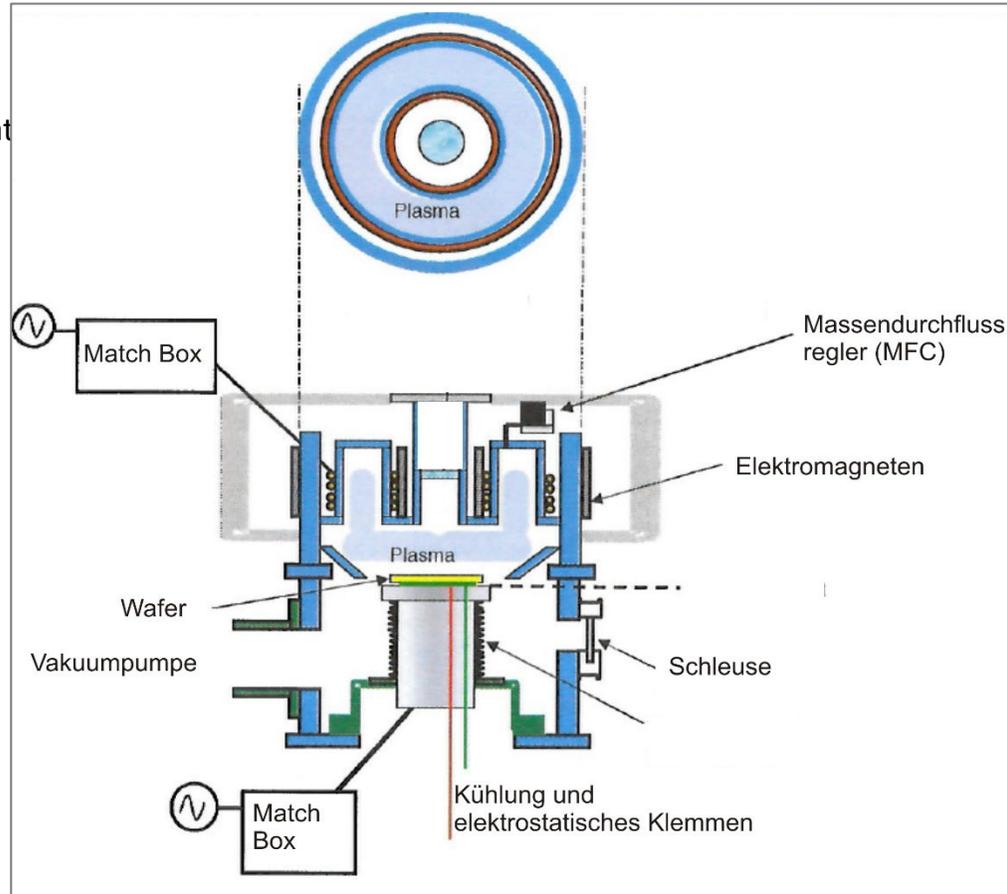


Beschleunigungs-Sensor



Boschprozess – Pegasus DRIE Kammer von SPTS

- -Si-
Tiefenät



Schematische Darstellung Pegasus Kammer

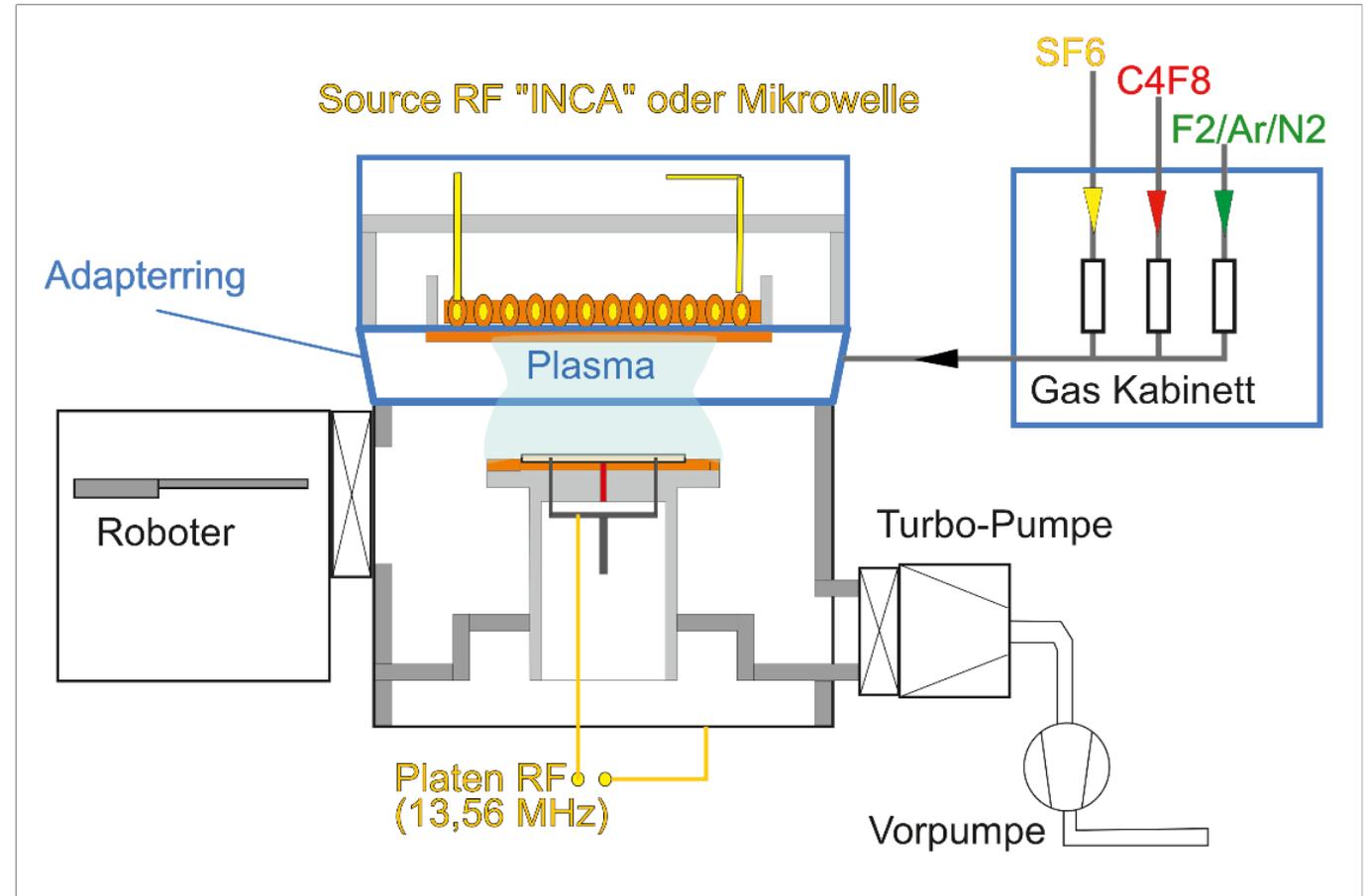


SPTS Pegasus 200mm DRIE-Ätzer, Kammer geöffnet.

MFCs werden nicht abgesaugt = Nicht OK für O₂, FAN, Korrosiv-Gase ohne Umbau

SumSi – Neue Plasmaquellen für FAN-Gas auf Alpha-Site

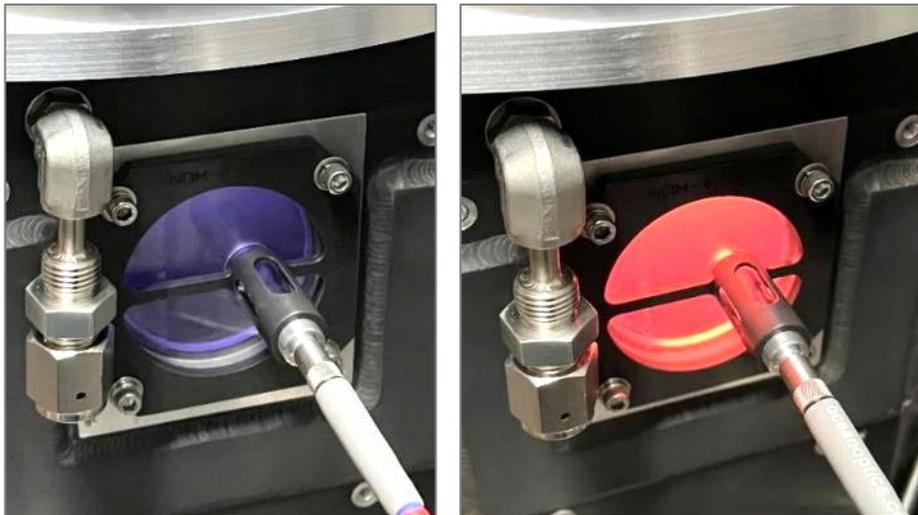
- INCA Quelle: **I**nductive **C**oupled **A**rray Array von 16 Spulen, induktiv gekoppelt durch Keramikplatte
- Mikrowellenplasma: Anordnung von 6 Mikrowellen-Antennen, gekoppelt durch Keramik/Glas



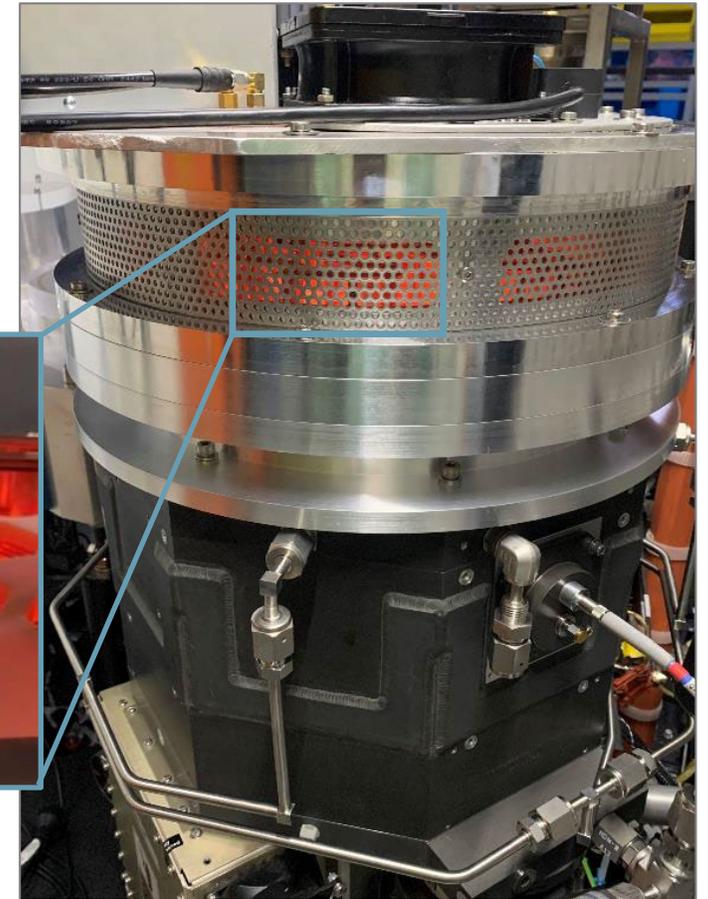
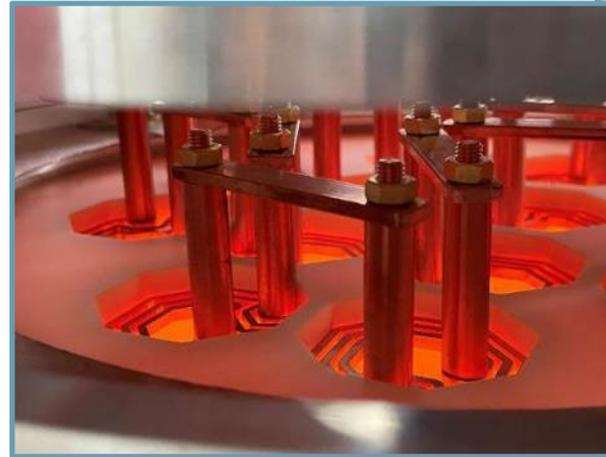
Quellenplatzierung mittels Adapterring, platziert auf modifizierte Ätzkammer von AMAT

SumSi – INCA (Plasmetrex)

- Kompletter Bosch-Prozess mit C_4F_8 / SF_6 und C_4F_8 / FAN -mix
- Luftgekühlt, leicht, sehr gut skalierbar
- Zündbar bei sehr niederen Kammerdrücken bis 10mT



Depo-step (links) und FAN-Etch step (rechts)

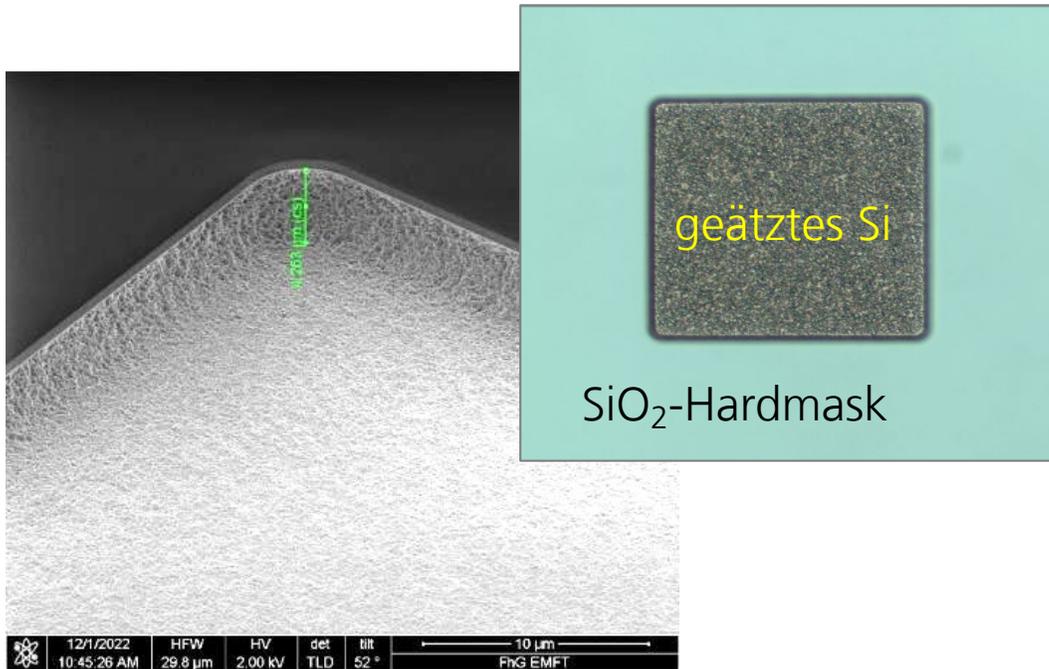


INCA-Quelle in Betrieb

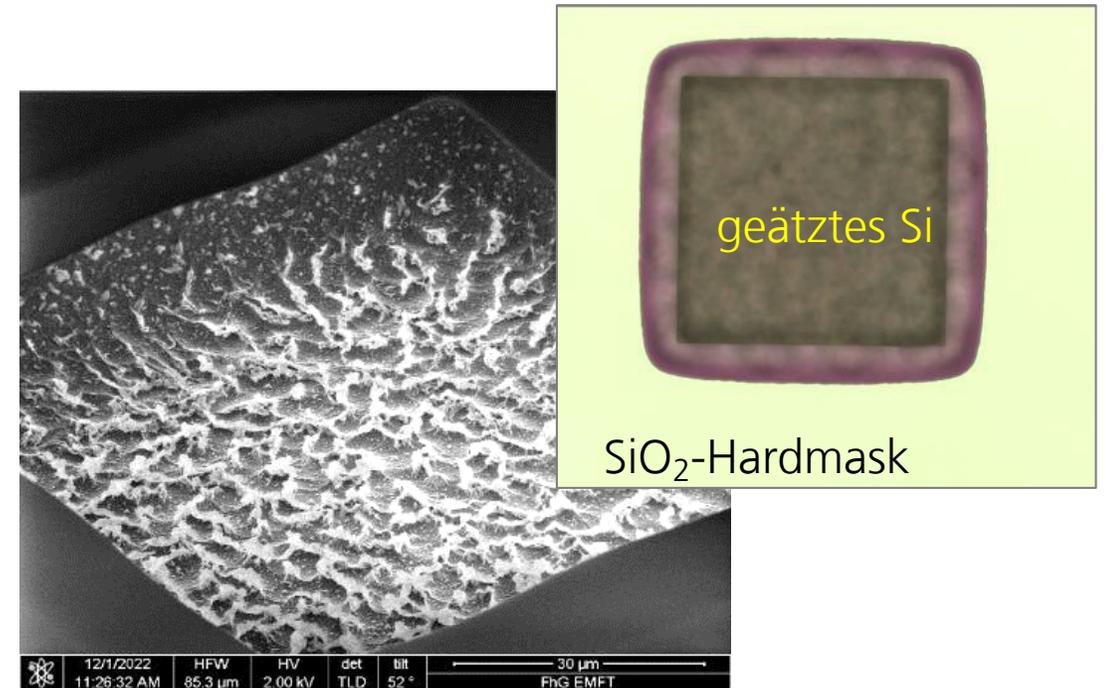
SumSi – INCA Ätzergebnis FAN und SF₆

- Unterschiedliches Ätzverhalten von F₂-Gas Mischung (FAN) zu SF₆

•



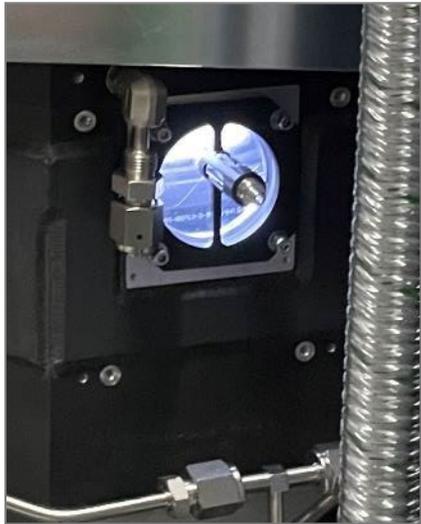
FAN Prozess



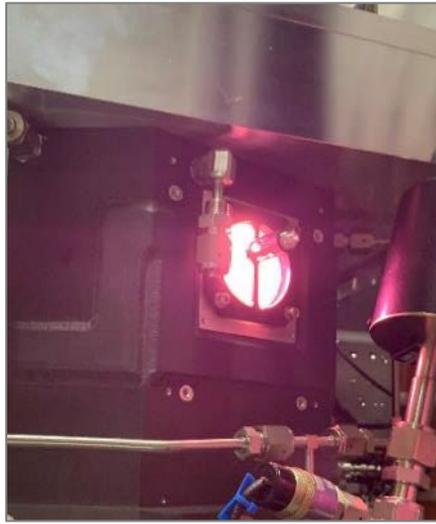
SF₆ Prozess

SumSi – Mikrowellenplasma (HQ-Dielectrics)

- Mikrowellenstab-Anregung
- Luft und wassergekühlt, sehr hohe F-Radikaldichte
- Zündbar bis 30mT



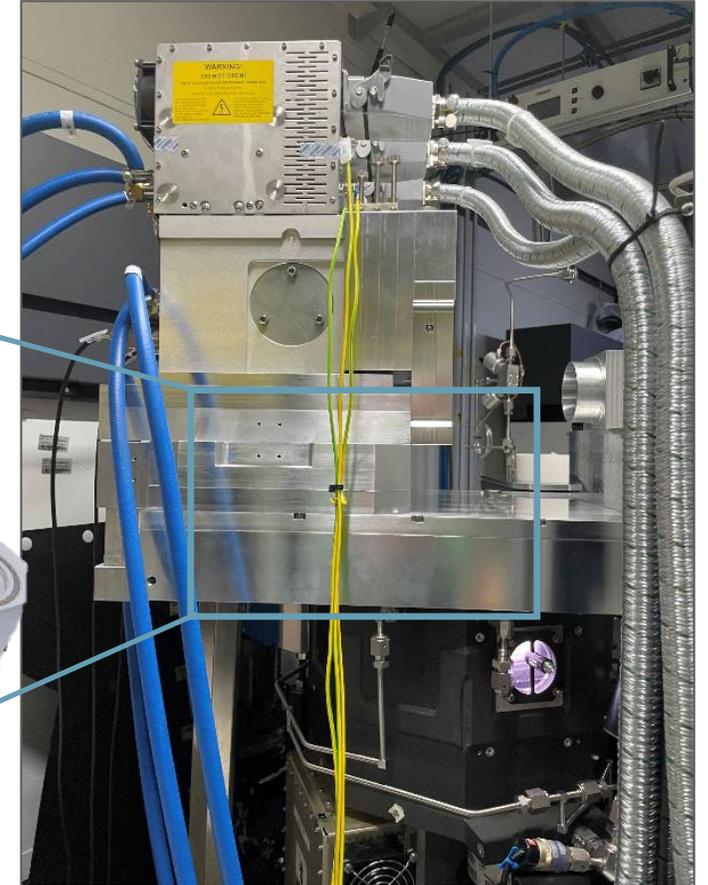
Depo-step



FAN-Etch step



Mikrowellen-Quelle mit Adapter
auf Alpha-Site Kammer



MW-Quelle in Betrieb

SUMSi – Ätzergebnisse im Vergleich

500sccm FAN_INCA	500sccm FAN_MicroW	150sccmSF ₆ _INCA	300sccm SF ₆ SPTS_Ref
800W source-RF	3000W source-MW	800W source-RF	2400W source-RF
600l turbo pump	600l turbo pump	600l turbo pump	2000l turbo pump
ER Si = 278 nm/min	ER Si = 380 nm/min	ER Si = 260 nm/min	ER Si = 5000 nm/min
Sel. ~ 50:1	Sel. ~ 19:1	Sel. > 500:1	Sel. > 300:2

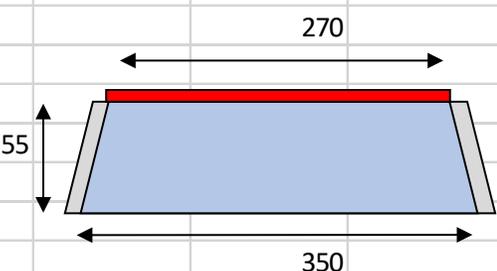
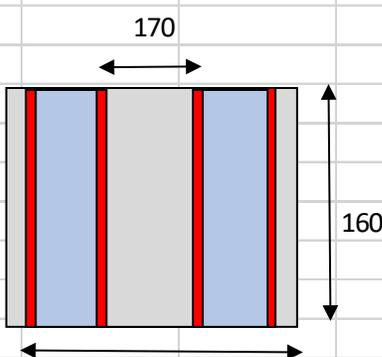
SF₆: Etwa 9-fach schnellere Si-Ätzrate, hohe Selektivität zur Maske (vorläufiges Ergebnis)

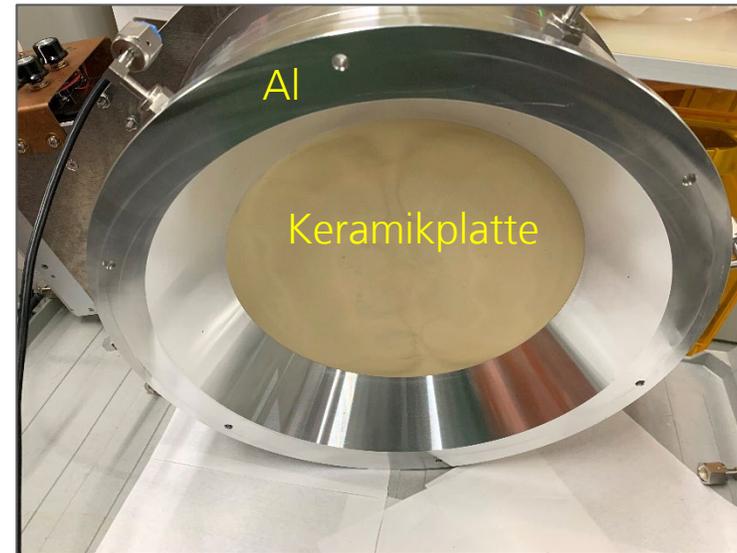
FAN: 3-fach geringerer F₂-Anteil in der Gasmischung

Beide Quellen versprechen vergleichbare Ätzraten mit SF₆ auf SPTS Pegasus-Referenzkammer
 Plasma-Leistungen, also induktiv 13,56 MHz zu Mikrowelle 2,45 GHz, sind nicht direkt vergleichbar

Ausblick – Neue Plasmaquellen mit FAN-Gas

- - ICP Pegasus: Al + Edelstahl, nur MEMS
- - INCA Quelle: Al + Keramik, MEMS + CMOS
- ~25% Volumenreduzierung um

INCA auf Pegasus-Body	ICP-Quelle Pegasus
	
$V = \frac{\pi}{3} \cdot h \cdot (R^2 + Rr + r^2)$	$V = h \cdot (\pi) \cdot (R^2 - r^2)$
16688576,7 mm ³	22116812,3 mm ³
V(INCA) = 16,7 l	V(ICP) = 22,1 l
Volumenreduzierung um 24,5%	



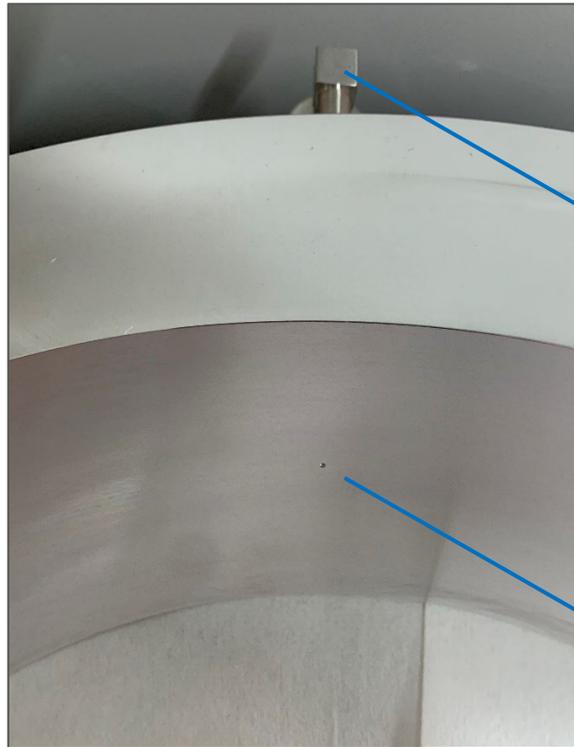
INCA Quelle – CMOS kompatibel



ICP Pegasus
Edelstahlschrauben im Plasma

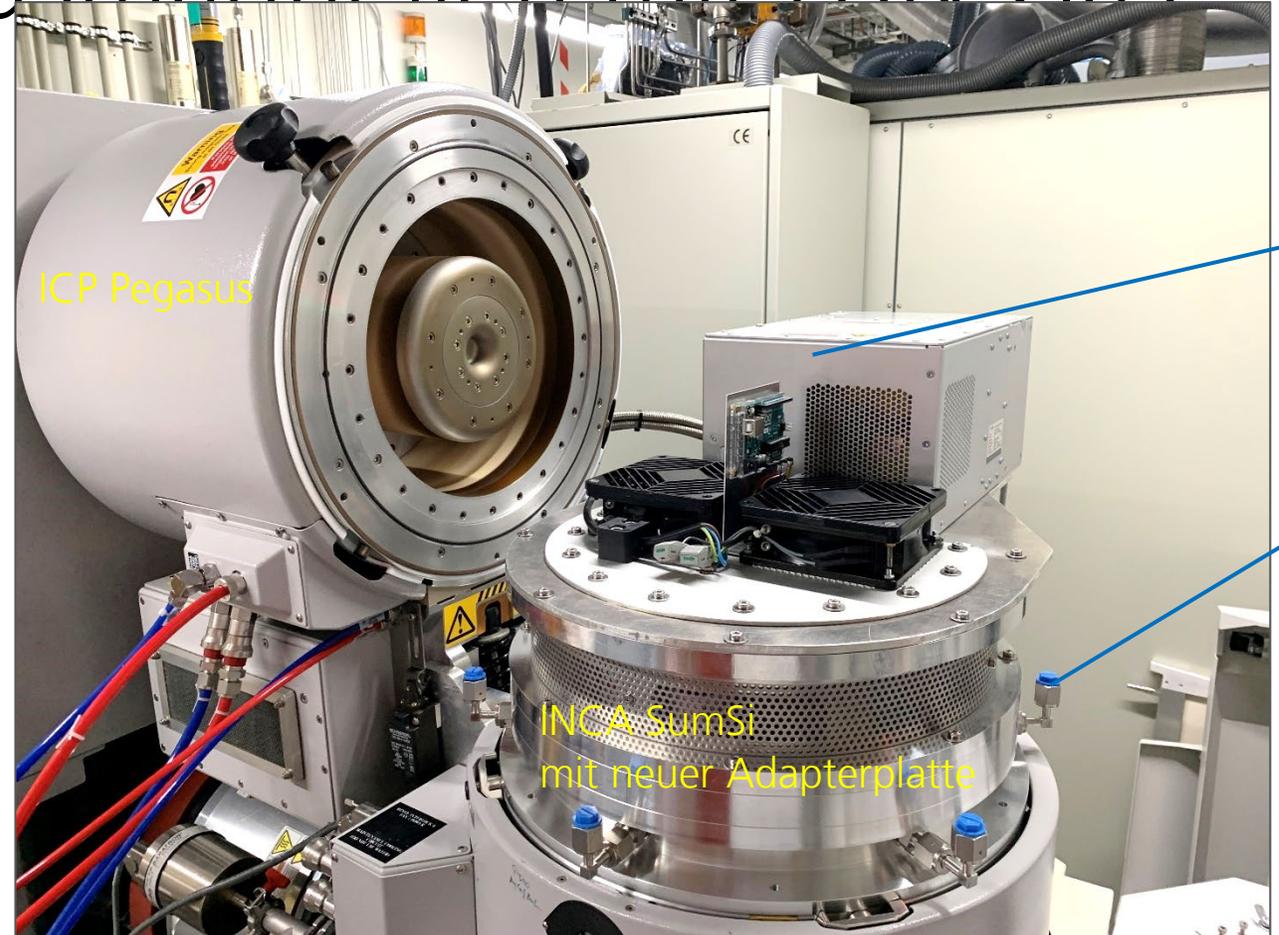
Ausblick – Neue Plasmaquellen mit FAN-Gas

- - INCA SumSi:
Auf SPTS Pegasus Kammer-Body
montiert
- Sechsfache Gasverteilung



VCR-Gas Einlass

Bohrungen für
Gas-Einlass

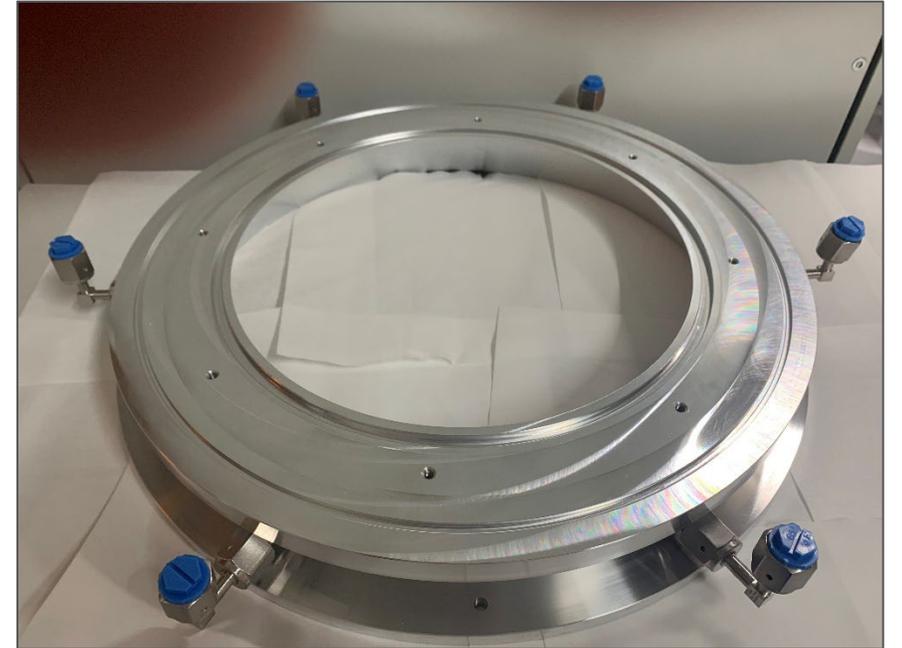


match
unit

VCR-
Gas
Einlass

Zusammenfassung

- Beide neuen Quellenkonzepte, INCA und Mikrowelle, sind für Bosch-Prozess verwendbar
- INCA-Quelle kann direkt auf eine Beta-Site Kammer (SPTS Pegasus) adaptiert werden. Mikrowelle ev. auch.
- FAN-Gasmischung als Ersatz für SF_6 hat zu geringen F-Anteil
→ Zusatz F-Quelle nötig
- Nötig: Umfangreiche Prozessentwicklung mit alternativer Gasmischung zu SF_6 / C_4F_8



Neuer Adapterring, passend auf SPTS Pegasus

Danksagung:

VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Projektträger für das
Bundesministerium für Bildung und Forschung: J. Kerbusch

HQ-Dielectrics GmbH: J. Niess, W. Beckmann, S. Müller

Plasmetrex GmbH: M Klick, L. Eichhorn, S. Golka

Solvay Fluor AG: M. Pittroff, T. Schwarze

Ruhr Universität Bochum: U. Czarnetzki

Muegge GmbH, J. Hofmann

Fraunhofer EMF Team: Anh Bui-Tran, Martin Heigl, Saskia Heinze,
Constantin Heß, Wilfried Lerch, Reinhard Merkel, Kim Nguyen,
B. Piechullek, Uwe Seidelmann, Hung Vu



- Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!