

# Praktische Plasmaphysik in der Halbleiterindustrie Kurs bei Trumpf in Ulm

VI RIE I, 22. April 2021

Gerhard Franz

Walter Schottky Institut

TU München

<http://www.gerhard-franz.org>



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- CCP- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation
- ICP-Entladungen: Aufheizung, Elektrodenpotentiale und DC-Bias, Streuprozesse, Gegenüberstellung von ICP- und CCP-Entladungen
- Sputtern
- RIE I + (PE)CVD
- RIE II: Microfeatures, Ätzmechanismen, Endpunktkontrolle, Plasmadiagnostik



# Zielgrößen

- Von welchen Größen hängen ab



# Zielgrößen

- Von welchen Größen hängen ab
  - die Ätzrate,



# Zielgrößen

- Von welchen Größen hängen ab
  - die Ätzrate,
  - die Anisotropie,



# Zielgrößen

- Von welchen Größen hängen ab
  - die Ätzrate,
  - die Anisotropie,
  - die Unterätzung,



# Zielgrößen

- Von welchen Größen hängen ab
  - die Ätzrate,
  - die Anisotropie,
  - die Unterätzung,
  - der Loading-Effect,



# Zielgrößen

- Von welchen Größen hängen ab
  - die Ätzrate,
  - die Anisotropie,
  - die Unterätzung,
  - der Loading-Effect,
  - zahlreiche Microfeatures



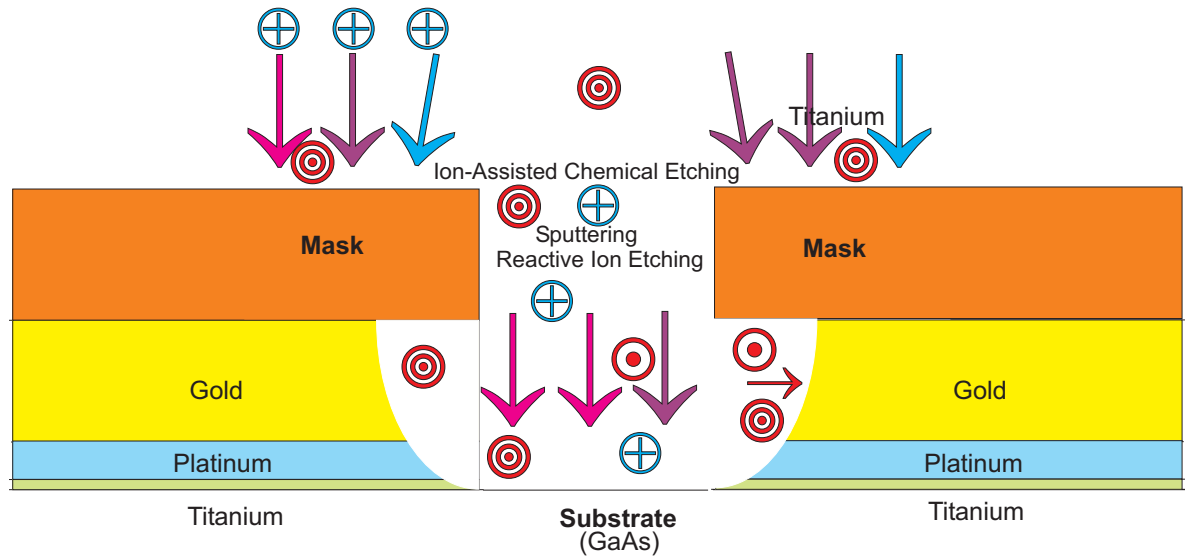


# Zielgrößen

- Von welchen Größen hängen ab
  - die Ätzrate,
  - die Anisotropie,
  - die Unterätzung,
  - der Loading-Effect,
  - zahlreiche Microfeatures
  - ?



# Reaktives Ionenätzen I



- **Mindestens 4 verschiedene Prozesse:**
- Sputtern mit Ionen und schnellen Neutralteilchen
- spontanes chemisches Ätzen
- ionenunterstütztes chemisches Ätzen



„echtes“ RIE

# Reaktives Ionenätzen II

- Sputtern nach SIGMUNDS Theorie mit maximalem Abtrag bei etwa  $60^\circ$ :  $k_1$ .
- Isotropes spontanes Ätzen:  $k_2$ .
- ionenunterstütztes chemisches Ätzen:  
Ionen erzeugen Damage, Neutralteilchen docken an.  
Maximum bei senkrechter Inzidenz:  $k_3$ .
- echtes RIE: Beschuß reaktiver Ionen: Stoßkaskade + chemische Reaktionen an der Einschlagstelle, die zu volatilen Molekülen führen:  $k_4$ .

$$ER = k_1 j_{CF_x^+} + k_2 j_{CF_4} + k_3 j_{CF_x^+} j_{CF_4} + k_4 j_{CF_x^+}$$



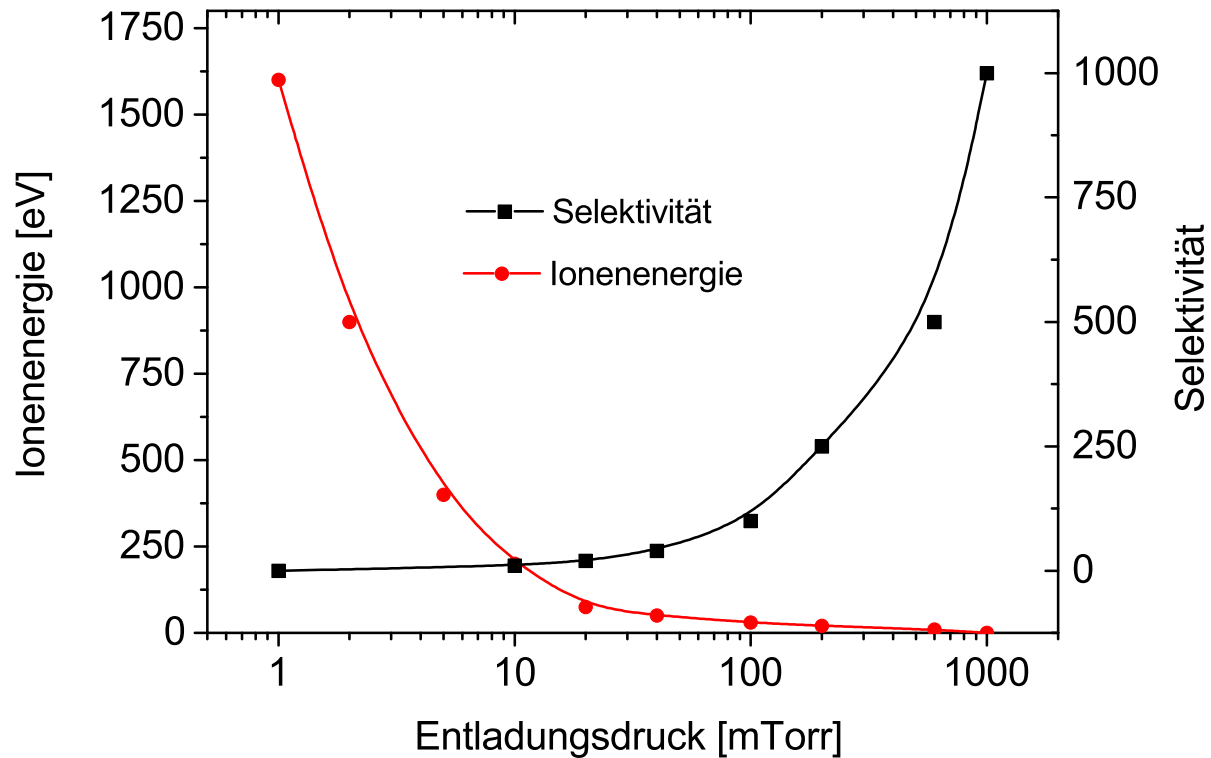
# Reaktives Ionenätzen III

<i>method</i>	<i>Ratengleichung</i>	<i>Selektivität</i>	<i>Profil</i>
Ionen-induziertes sputtern	$k_1 j_{CF_x^+}$ non-ARRHENIUS	schwach	sehr anisotrop
Chemisches Ätzen	$k_2 j_{CF_4}$ ARRHENIUS/ non-ARRHENIUS	extrem hoch	isotropic, empfindlich auf Gitterebenen
Ionen-unterstützt. chemisches Ätzen	$k_3 j_{CF_x^+} j_{CF_4}$ non-ARRHENIUS	hoch	anisotrop
Reactive Ion Etching	$k_4 j_{CF_x^+}$ non-ARRHENIUS	hoch	anisotrop



Die vier unterschiedlichen Ätzprozesse.

# Reaktives Ionenätzen IV



- Ionenenergie und Selektivität verhalten sich zueinander komplementär.

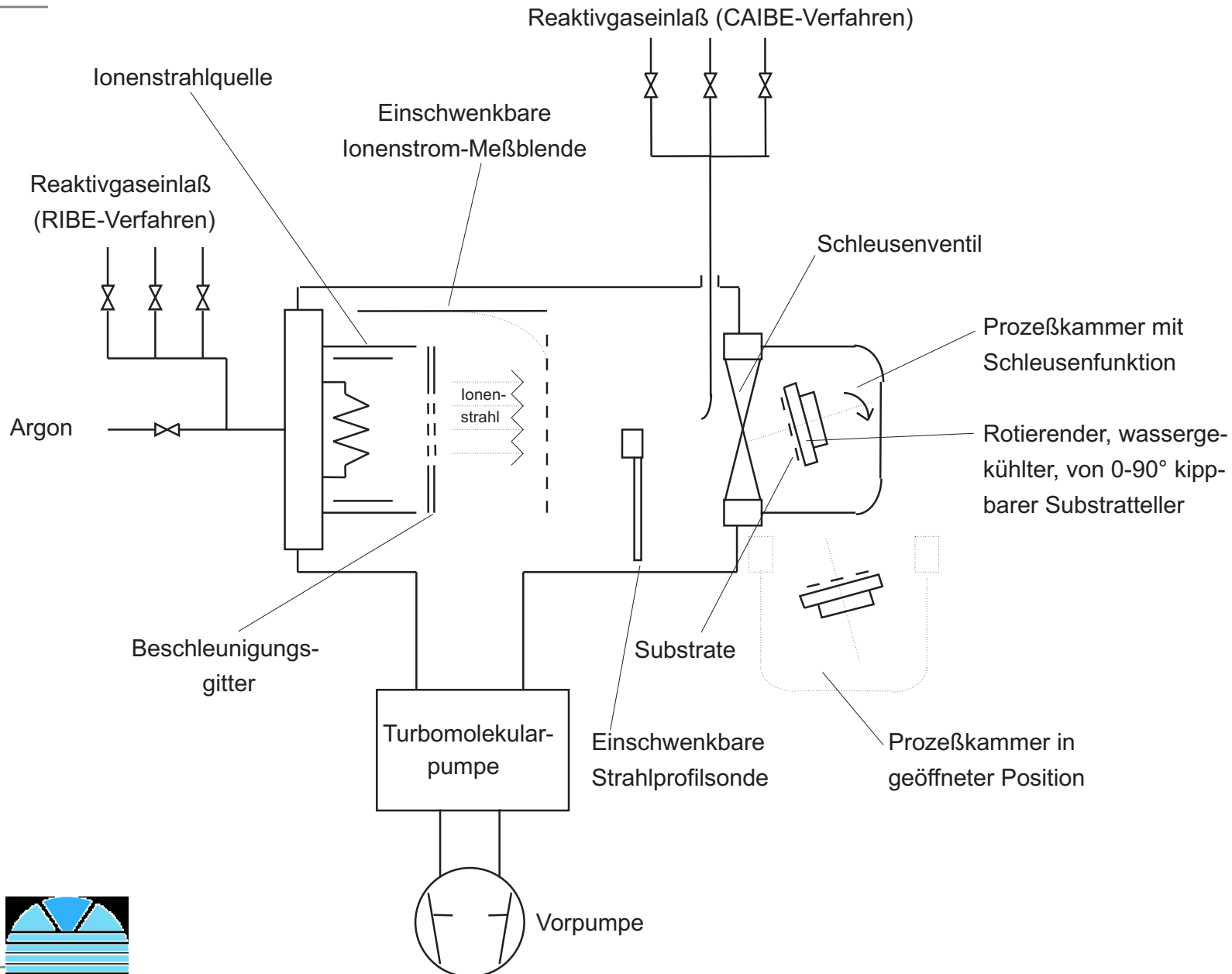


# Reaktives Ionenätzen V

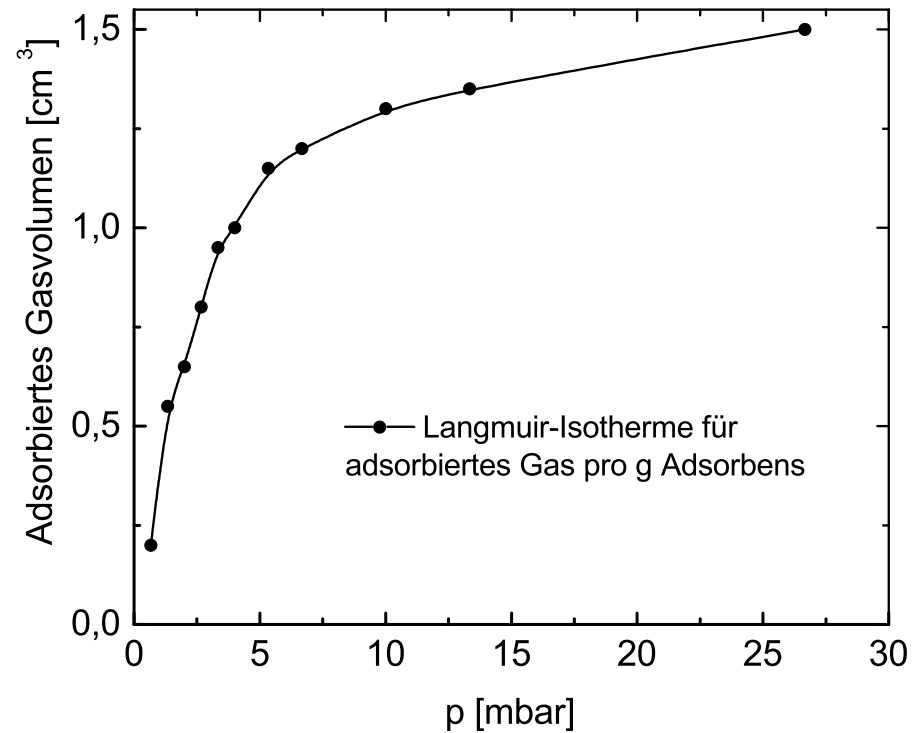
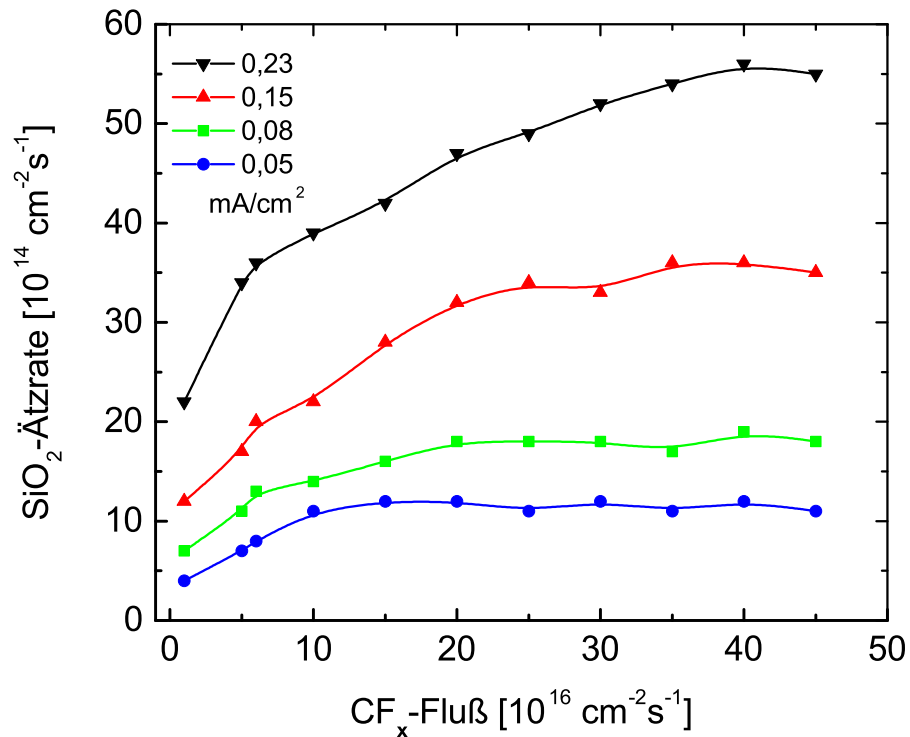
- $ER = k_1 j_{CF_x^+} + k_2 j_{CF_4} + k_3 j_{CF_x^+} j_{CF_4} + k_4 j_{CF_x^+}$
- Kinetik: Wir haben vier Reaktionen,  $k_i$  ist der jeweils geschwindigkeitsbestimmende Schritt.
- Zum Beginn: CAIBE.
- Ar-Ionenbeschuß +  $CF_4$ .



# CAIBE I



# Mayer and Barker I



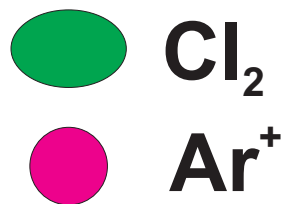
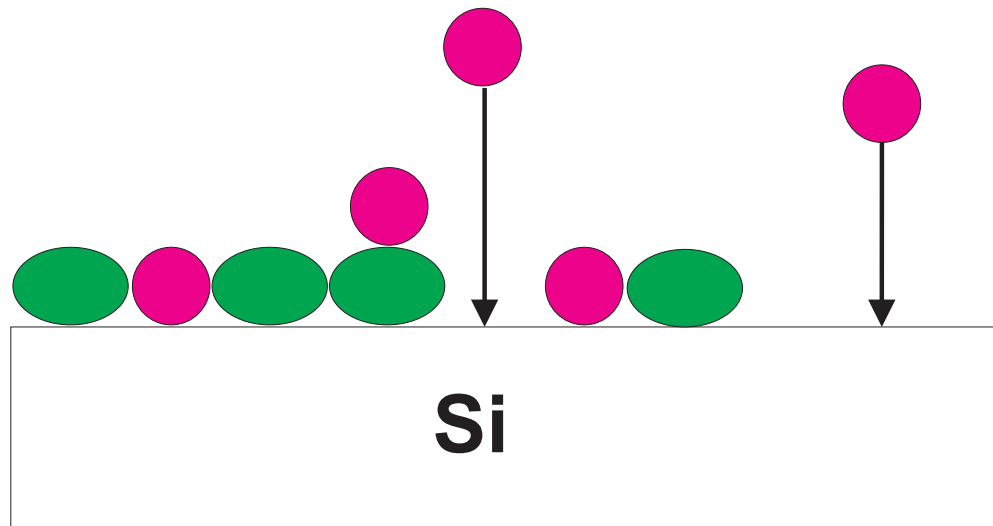
- Verblüffende Ähnlichkeit zwischen der Plasmaätzung von SiO<sub>2</sub> mit CF<sub>4</sub> und einer LANGMUIRSchen Adsorptionsisotherme (N<sub>2</sub> über Cu-Pulver).



T.M. MAYER, R.A. BARKER,  
J. Vac. Sci. Technol. **18**, 349 (1981).



# Mayer and Barker II



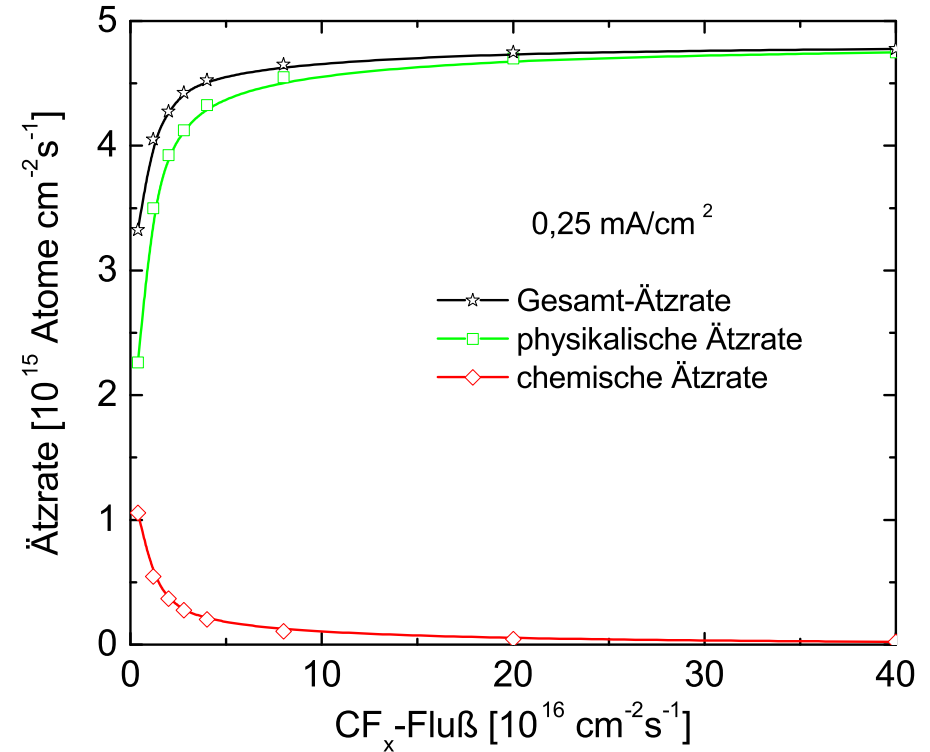
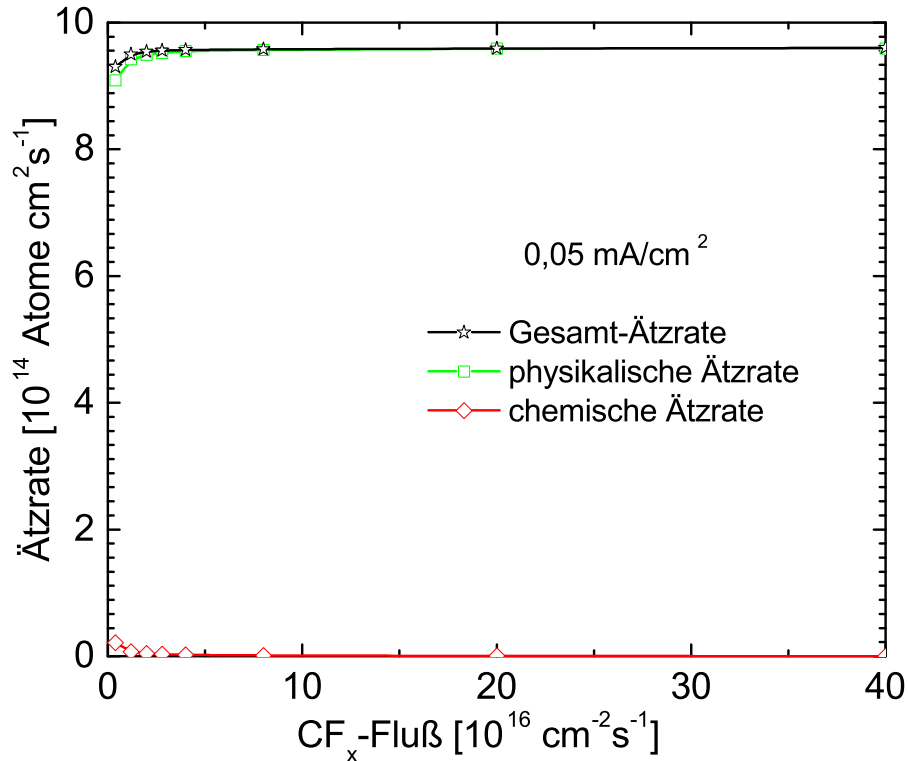
# Mayer and Barker III

- Cl<sub>2</sub> besetzt vorzugsweise Oberflächendefekte, die durch Beschuß von Ar<sup>+</sup>-Ionen entstanden sind.
- Im folgenden Schritt können sie wieder von Ar<sup>+</sup>-Ionen abgeschlagen werden, entweder ohne Reaktion oder nach einer Reaktion mit Oberflächenatomen,
- was zu einer linearen Abhängigkeit der Desorptionsgeschwindigkeit vom Ionenfluß führt.
- Die gesamte Abtragsrate ist die Summe aus abgesputterten und abgeätzten Atomen, und ihre Abtragsrate zeigt eine gegenseitige Abhängigkeit.

● SYNERGIE



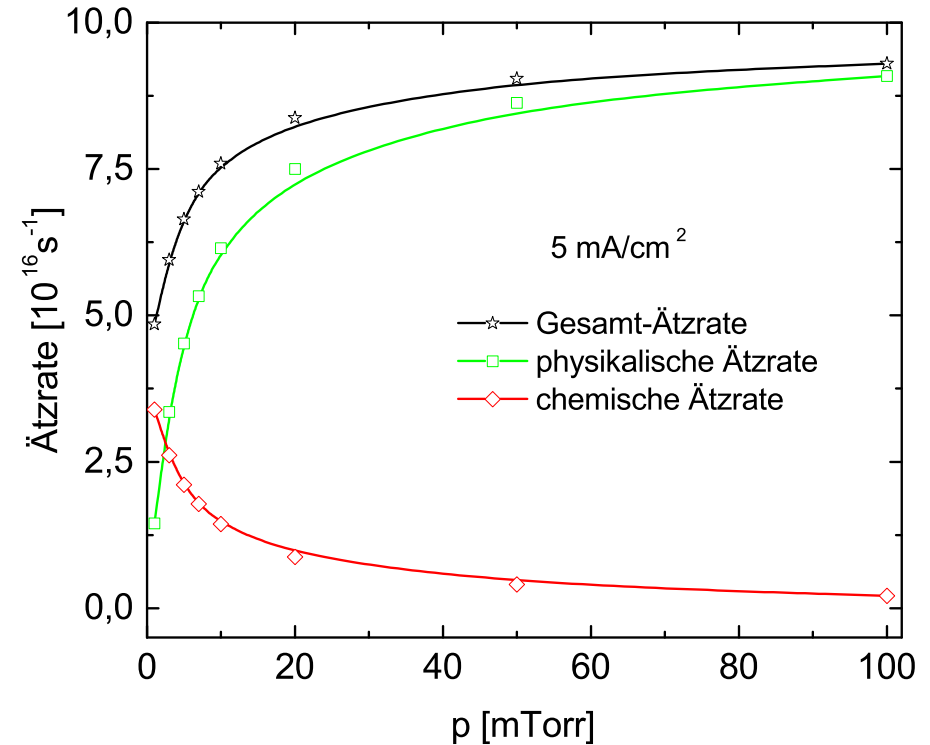
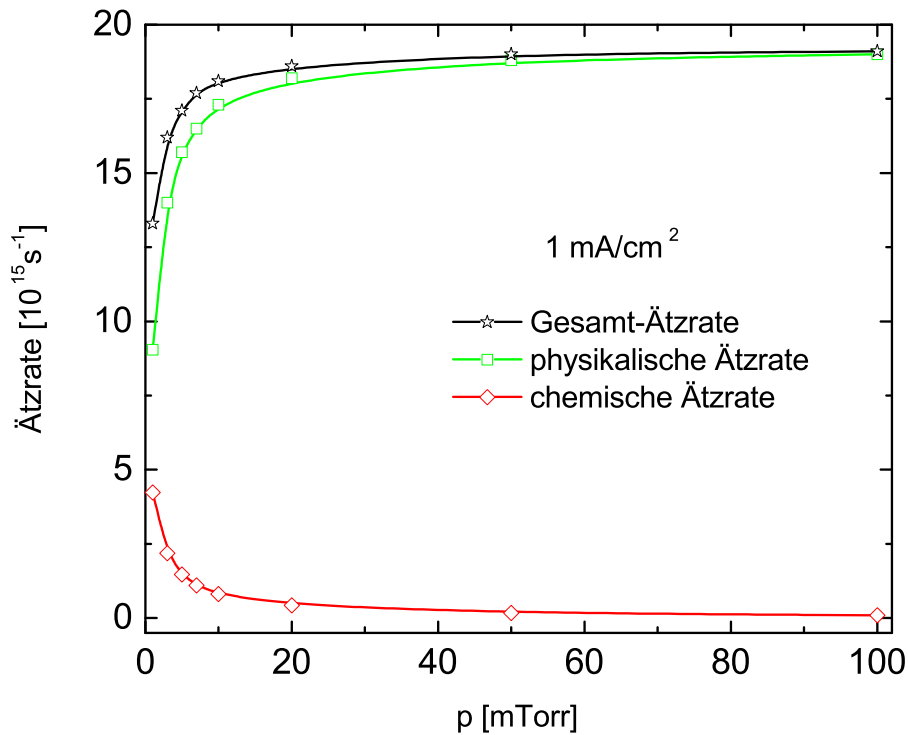
# Mayer and Barker IV



- Die Gesamtätzrate setzt sich beim RIBE aus zwei Komponenten zusammen.  $\text{CF}_4$ -Fluß:  $0,05$  und  $0,25 \text{ mA/cm}^2$ .



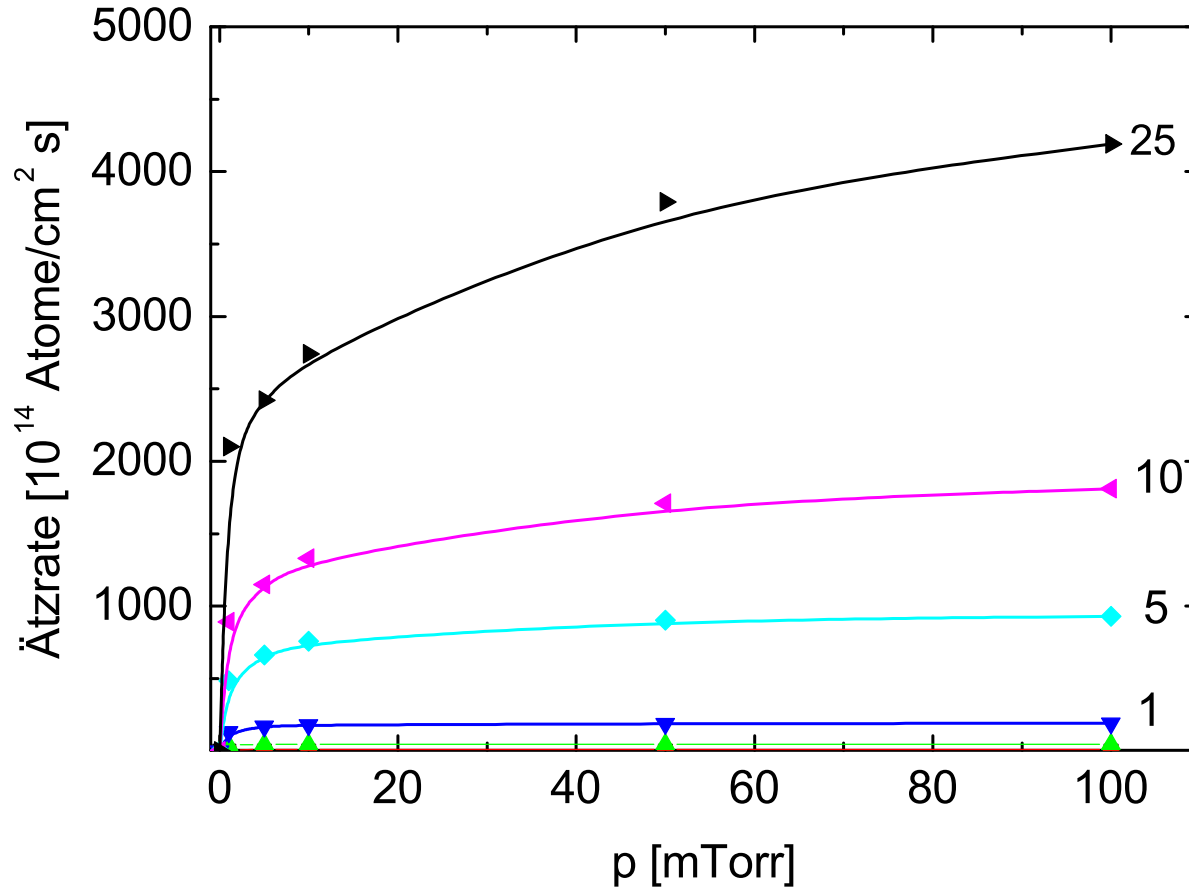
# Mayer and Barker V



- Die Gesamtätzrate als Funktion des Drucks. Ätzrate bei zwei hohen Ionenstromdichten: 1 und  $5 \text{ mA/cm}^2$ .



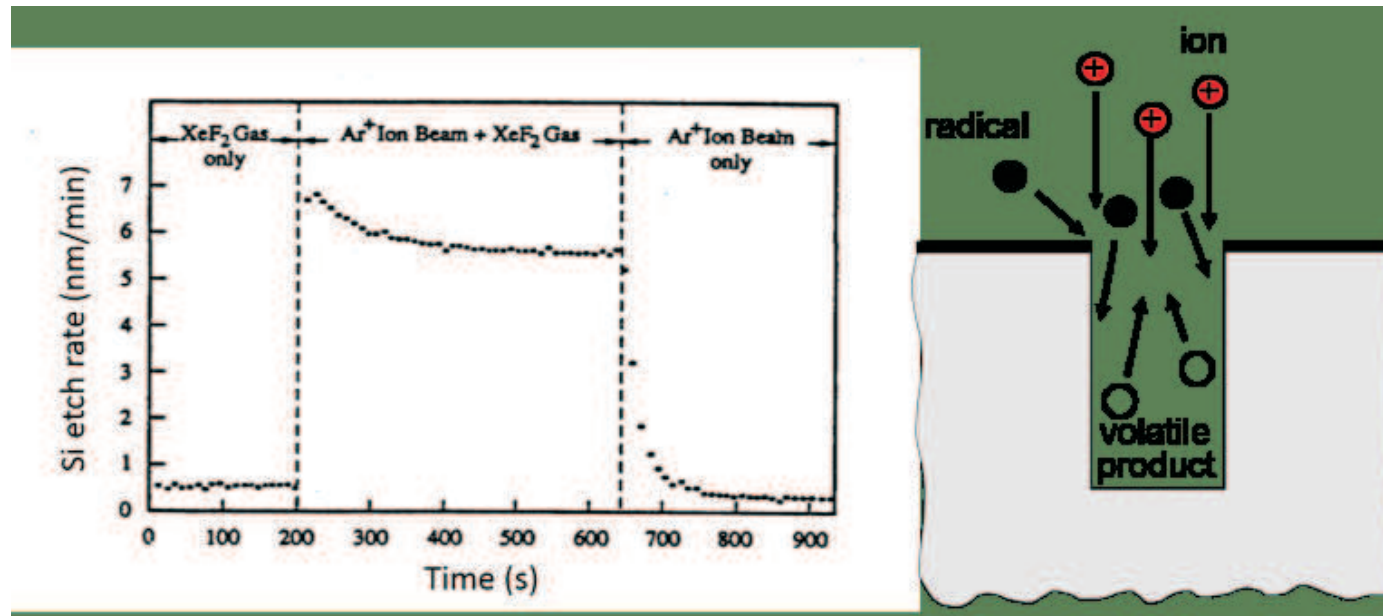
# Mayer and Barker VI



- Gesamtätzrate gegen Entladungsdruck. Kurven für unterschiedliche Stromdichten des Ionenstroms in mA/cm<sup>2</sup>.



# CAIBE II: Coburn and Winters

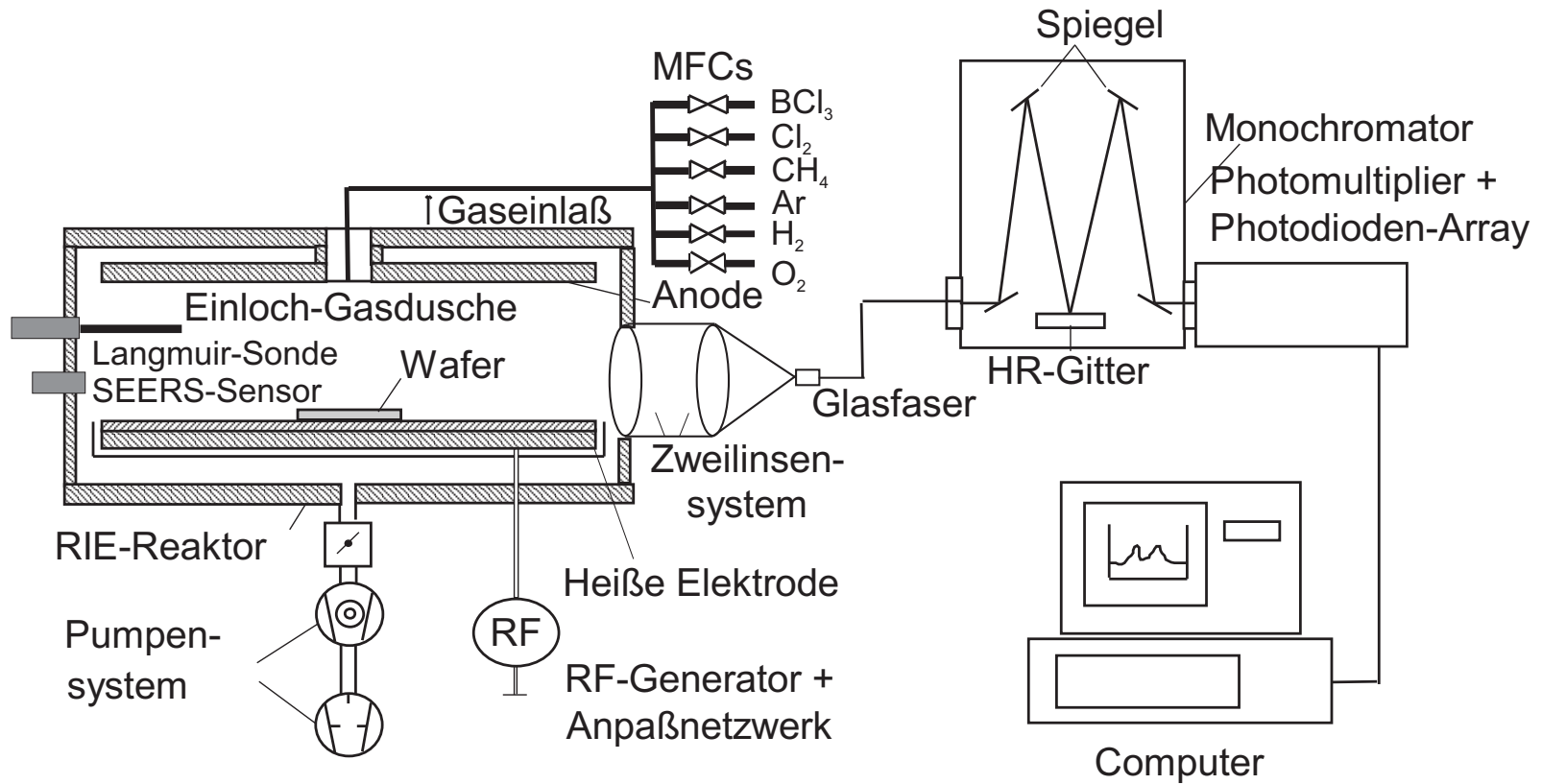


- J.W. Coburn and H.F. Winters, J. Appl. Phys. **50**, 3189 (1979).
- Radikale sind isotrop verteilt, Ionen haben eine Vorzugsrichtung ⇒ **anisotropes Ätzen mit hoher Ätzrate.**

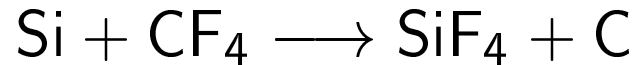
**SYNERGIE**



# RIE I



# RIE II



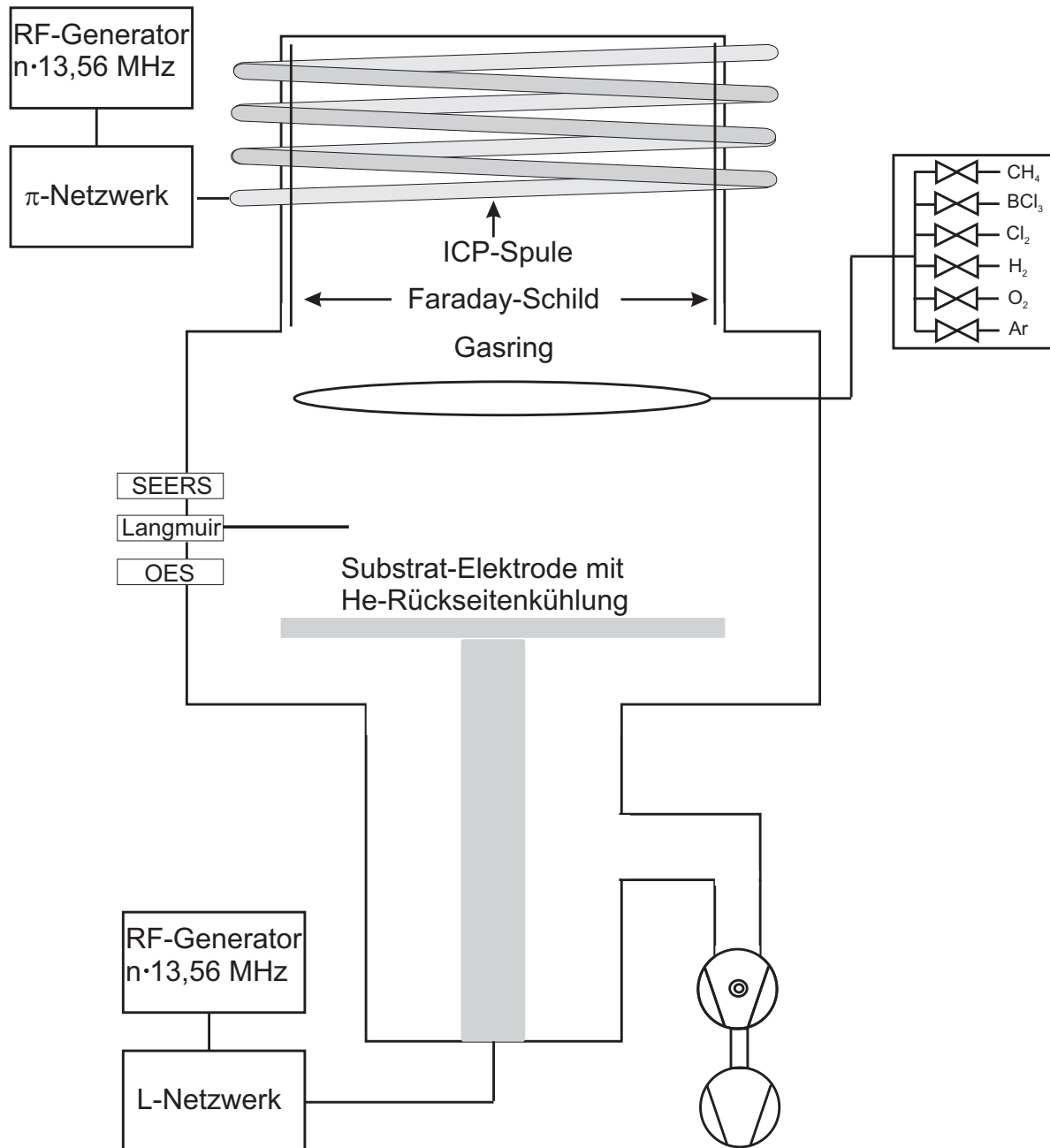
- Typische Plasmadichte eines kapazitiv gekoppelten RF-Plasmas:  $10^{10}/\text{cm}^3 \Rightarrow$
- Ionenfluß:  $\approx 10^{15}/\text{cm}^2\text{sec}$ . Ar-Plasma,  $T_e: 3, 5 \text{ eV}$ ,  $n_p: 1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $j_i: 2 \cdot 10^{15}/\text{cm}^2\text{sec}$ ), etwa  $0,15 \text{ mA}/\text{cm}^2$ .
- Mittlere Ätzzraten von  $100 \text{ nm}/\text{min} = 16,7 \text{ \AA}/\text{sec}$ :
- Abgetragene Si-Atome/Ion: etwa 3.
- Notwendige Anzahl von Halogenatomen: 10.
- $\text{SiF}_4$ -Fluß, der zehnmal so hoch ist.

Konventionelles CCP-RIE ist in Wirklichkeit ionenunterstütztes chemisches Ätzen!

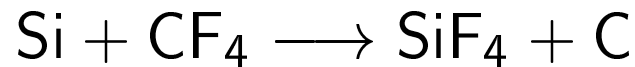




# RIE III



# RIE IV



- Typische Plasmadichte eines induktiv gekoppelten RF-Plasmas:  $10^{11}/\text{cm}^3 \Rightarrow$
- Ionenfluß:  $\approx 10^{16}/\text{cm}^2\text{sec}$ . Ar-Plasma,  $T_e: 3, 5 \text{ eV}$ ,  $n_p: 1 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ,  $j_i: 2 \cdot 10^{16}/\text{cm}^2\text{sec}$ , etwa  $1,5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ .
- Mittlere Ätzzraten von  $1\,000 \text{ nm}/\text{min} = 170 \text{ \AA}/\text{sec}$ :
- Abgetragene Si-Atome/Ion: etwa 30.
- Notwendige Anzahl von Halogenatomen: 100.
- $\text{SiF}_4$ -Fluß kann aus dem Ionenfluß begründet werden.

Konventionelles ICP-RIE ist tatsächlich reaktives Ionenätzen!

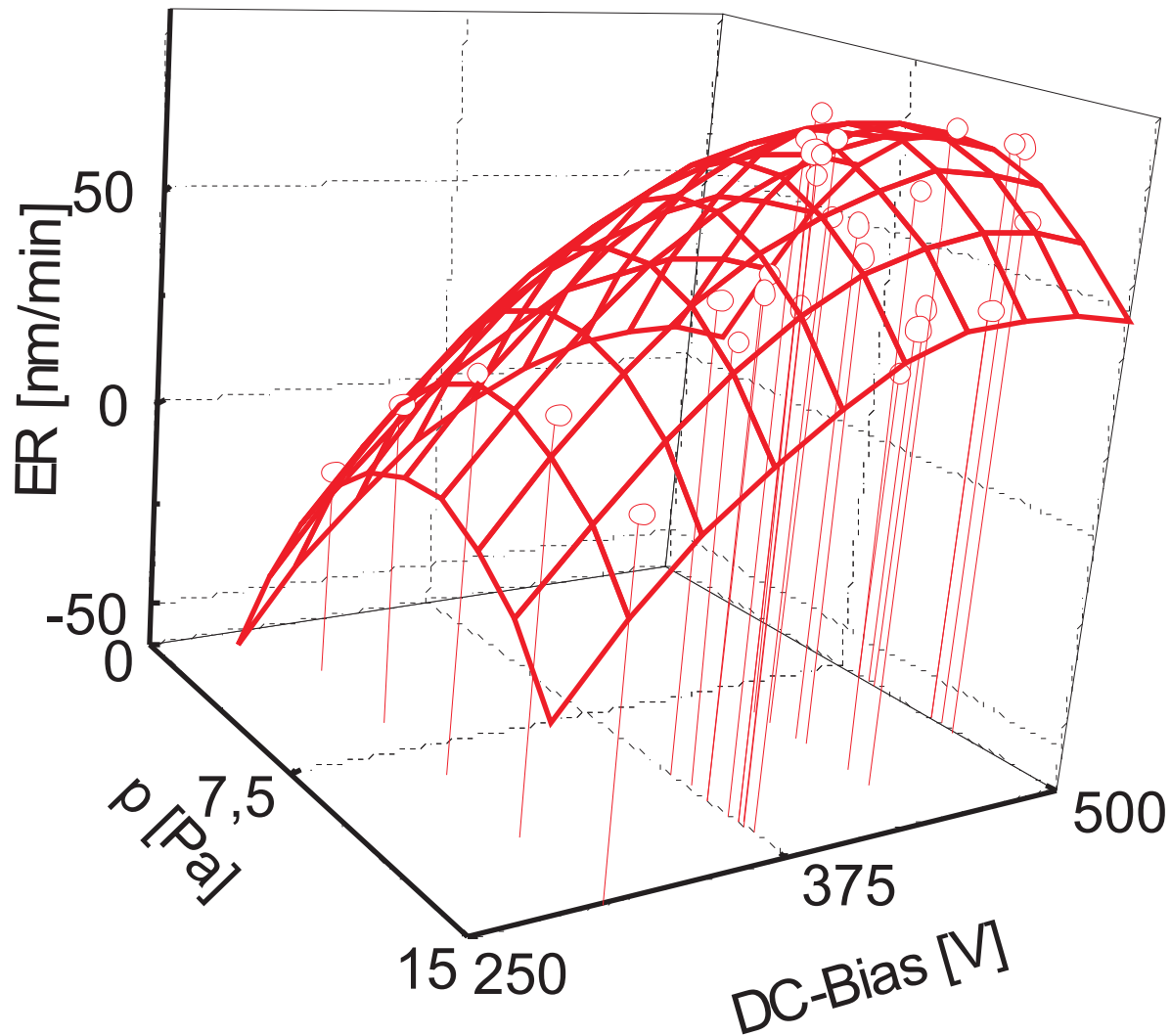


# Zielgröße und funktionale Abhängigkeit

- Ätzrate: Druck, RF-Leistung, Gaszusammensetzung
- Anisotropie: Druck, Seitenwandpassivierung, DC-Bias
- Unterätzung: Druck, Seitenwandpassivierung
- Loading-Effect: Druck, Substrat-Belegung, Gasfluß
- Sidewall-Bowing: DC-Widerstand im Sandwich-System
- ?

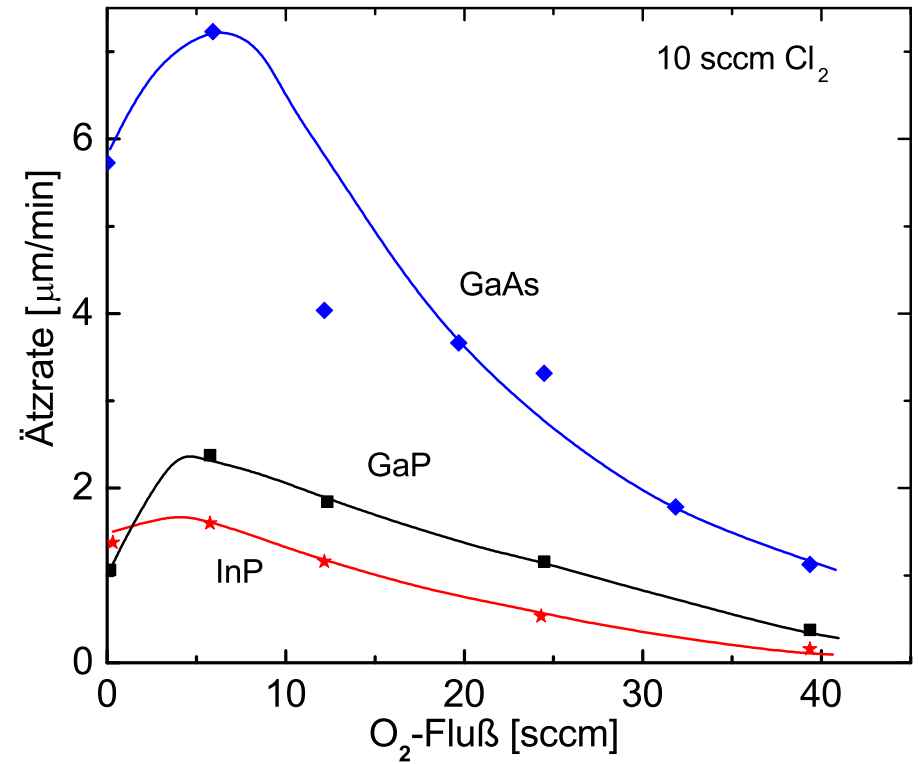
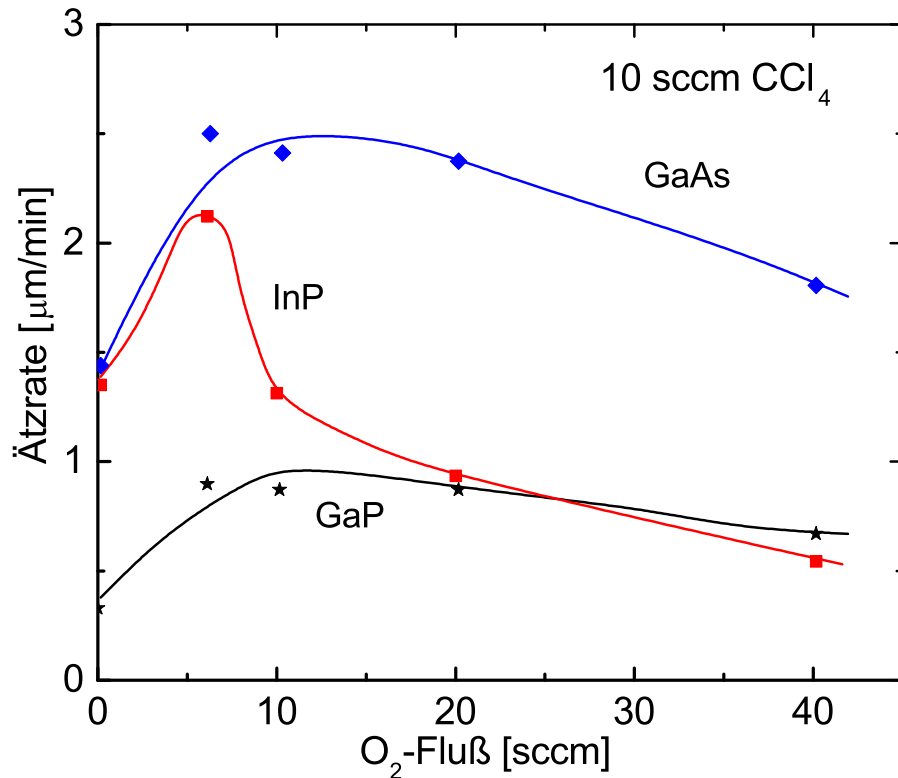


# Ätzrate I



1992: DOE: Ätzrate von GaAs in  $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3$   
als Funktion von Druck und DC-Bias

# Ätzrate II

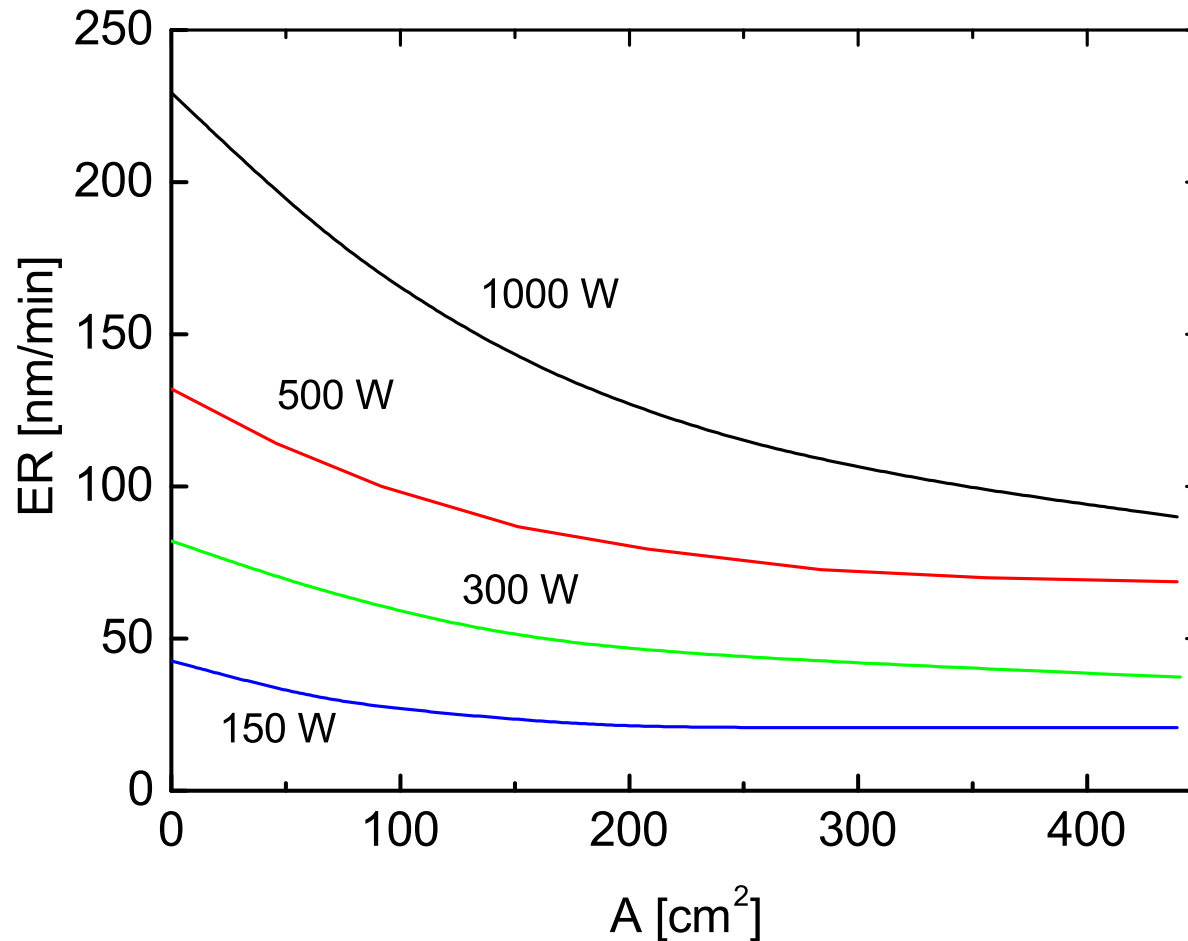


- Zugabe von  $\text{O}_2$  zu  $\text{CCl}_4$  (LHS) und  $\text{Cl}_2$  (RHS) erhöht die Ätzrate zunächst signifikant, um dann gegen Null zu tendieren



BURTON *at al.*, 1983.

# Loading Effect I



- Die Ätzrate kann signifikant von der Menge oder der Beladung des zu ätzenden Materials abhängen: Si-Ätzrate in einer  $\text{CF}_4/\text{O}_2$ -Entladung bei 7 Pa und einem Fluß von 11 l/min (Mogab 1986).

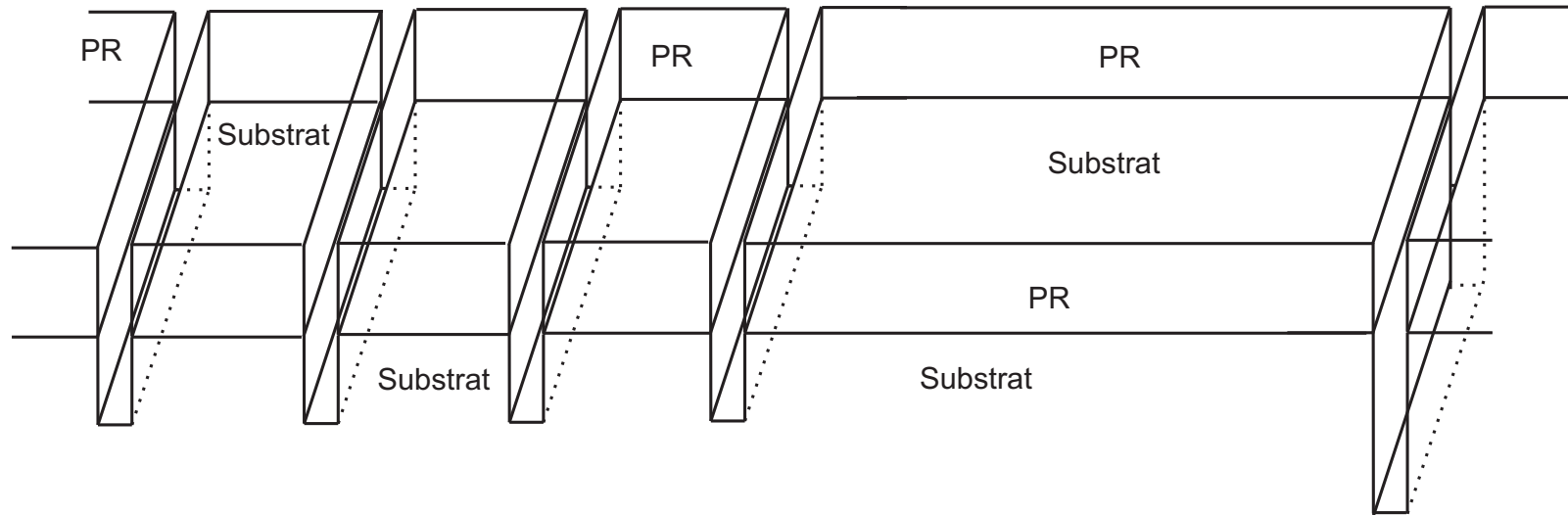


# Loading-Effect II

- Der Ätzprozeß ist der Hauptverbraucher des Ätzgases.
- $\Rightarrow$  durch Erhöhung der eingekoppelten RF-Leistung (also Erhöhung der Plasmadichte) kann der Loading-Effekt nicht bekämpft werden.
- Der Ätzprozeß an der heißen Scheibe muß von untergeordneter Bedeutung werden.
- Sind „Loading“-Effekte vorhanden, muß eine Angabe zum gesamten zu ätzenden Material und der Grenzwert für kleine zu ätzende Flächen ( $F_A \rightarrow 0$ ) angegeben werden.



# Loading Effect III

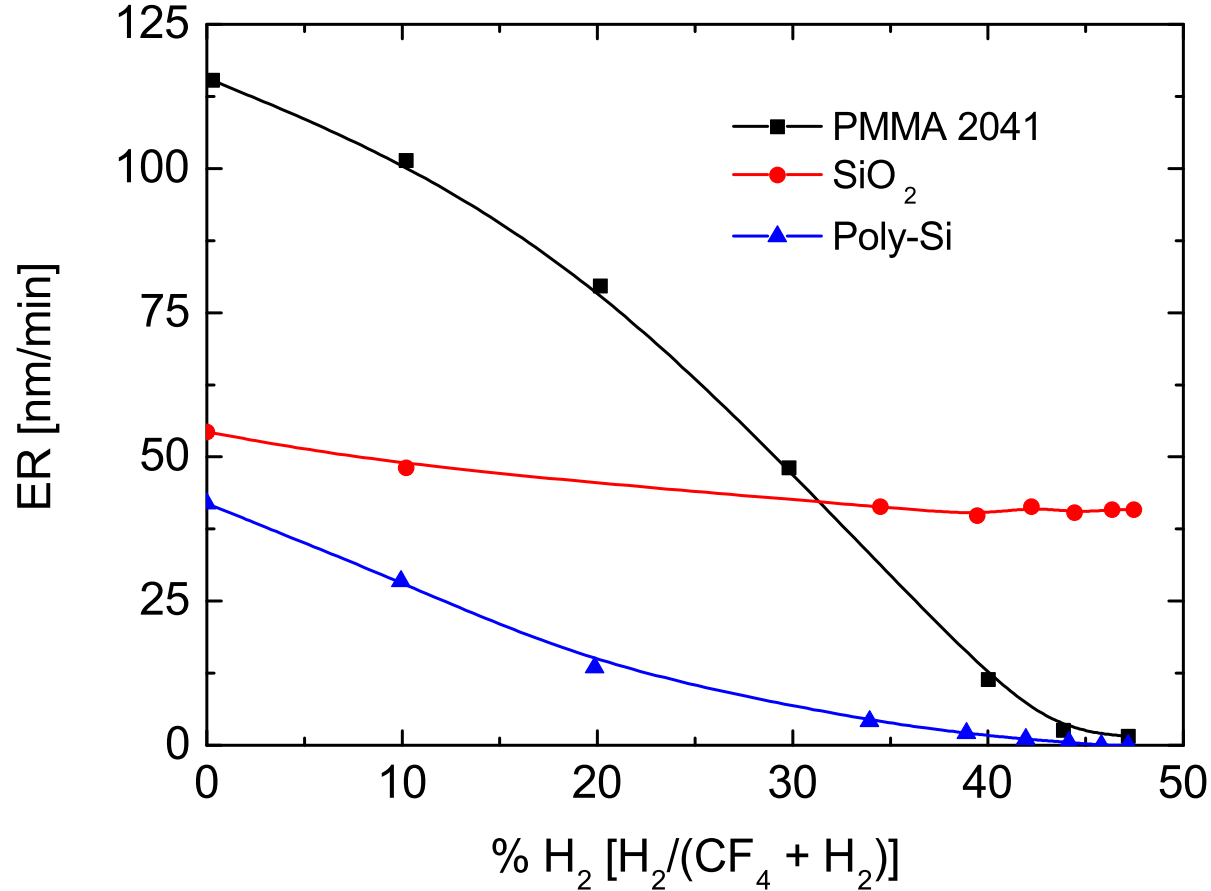


- Die Ätzrate kann signifikant von der Dichte der zu ätzenden Strukturen abhängen, hier schematisch angedeutet bei einer Trench-Ätzung.





# Selektivität I

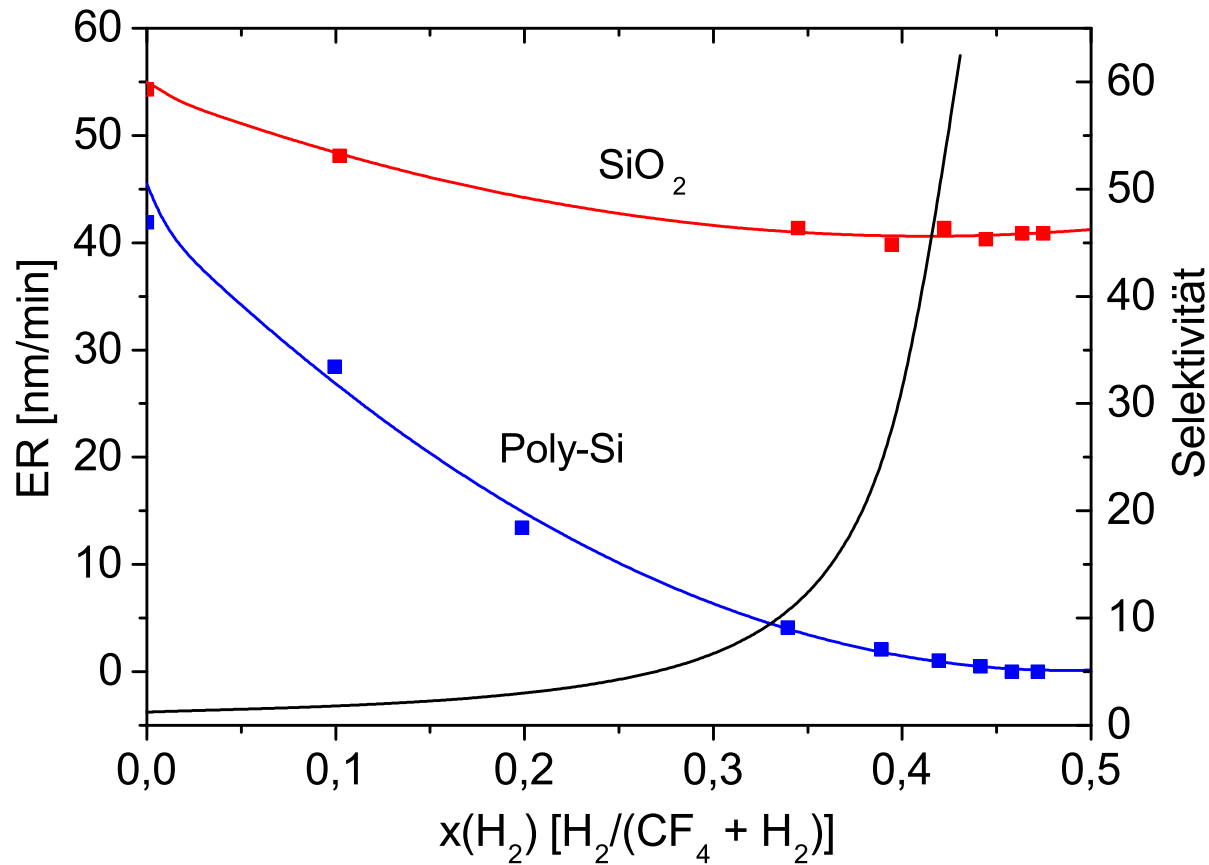


- Ätzzraten von PMMA 2041, SiO<sub>2</sub> und Poly-Si in CF<sub>4</sub> als Funktion des Molenbruchs des Additivs H<sub>2</sub>.

J.W. Coburn, and E. Kay, IBM J. Res. Develop. **23**, 33 (1979).



# Selektivität II

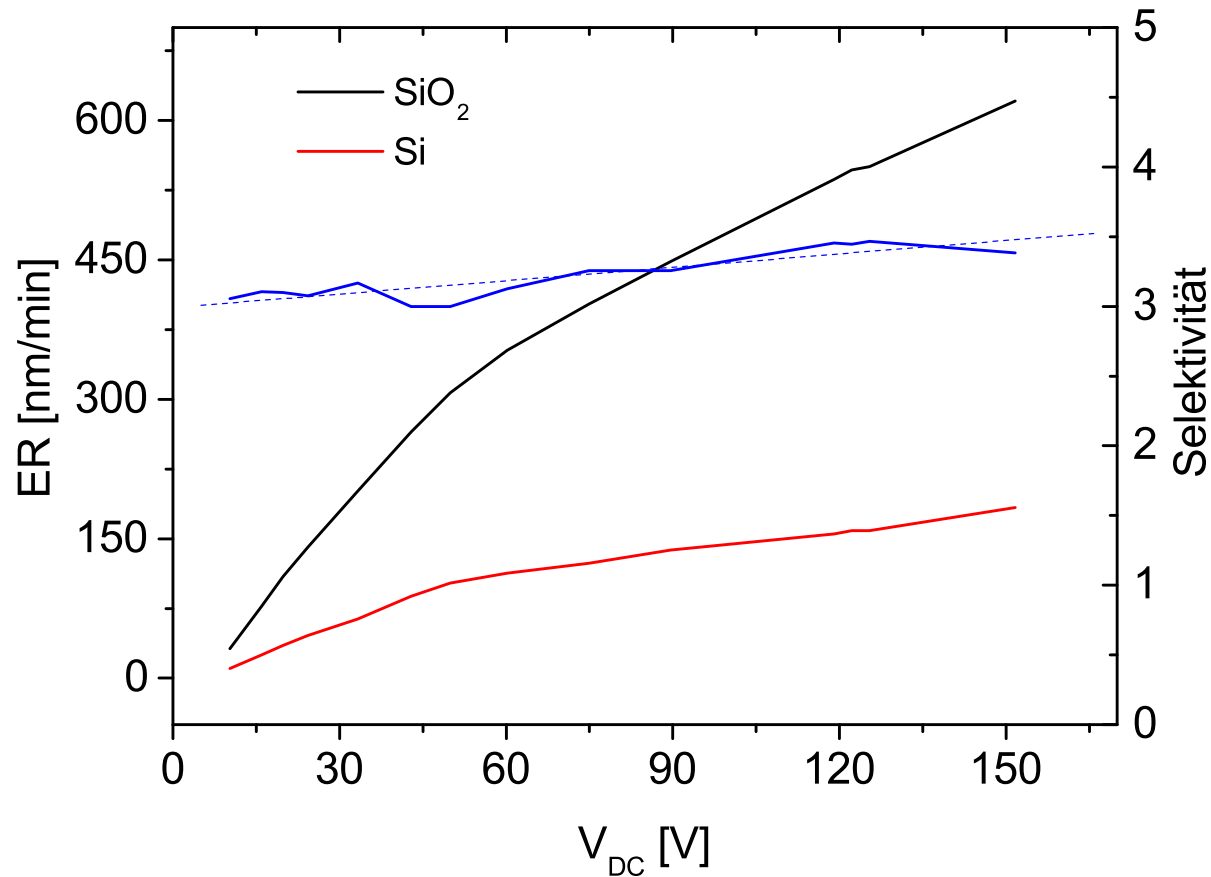


- Ätzzraten von SiO<sub>2</sub> und Poly-Si in CF<sub>4</sub> als Funktion des Molenbruchs des Additivs H<sub>2</sub>. Zusätzlich die Selektivität

$$S = \frac{ER(\text{SiO}_2)}{ER(\text{Si})}.$$



# Selektivität III



- Ätzzraten von  $SiO_2$  und Poly-Si in  $CF_4$  als Funktion des DC-Bias. Die Selektivität ist über den ganzen  $V_{DC}$ -Bereich nahezu unverändert, obwohl ER um etwa einen Faktor 3 ansteigt.



# Selektivität IV

- Einfach: PR-Veraschen auf Dielektrika, Halbleitern und Metallen:  
Ätzstopp auf dem Substrat.



# Selektivität IV

- Einfach: PR-Veraschen auf Dielektrika, Halbleitern und Metallen:  
Ätzstopp auf dem Substrat.
- Simpel: Trilevel-Technik: sehr dicke Maske.



# Selektivität IV

- Einfach: PR-Veraschen auf Dielektrika, Halbleitern und Metallen:  
Ätzstopp auf dem Substrat.
- Simpel: Trilevel-Technik: sehr dicke Maske.
- Chemisch: Volatilität des Ätzprodukts: Ätzen einer  $\text{SiO}_2$ -Maske auf III/V.

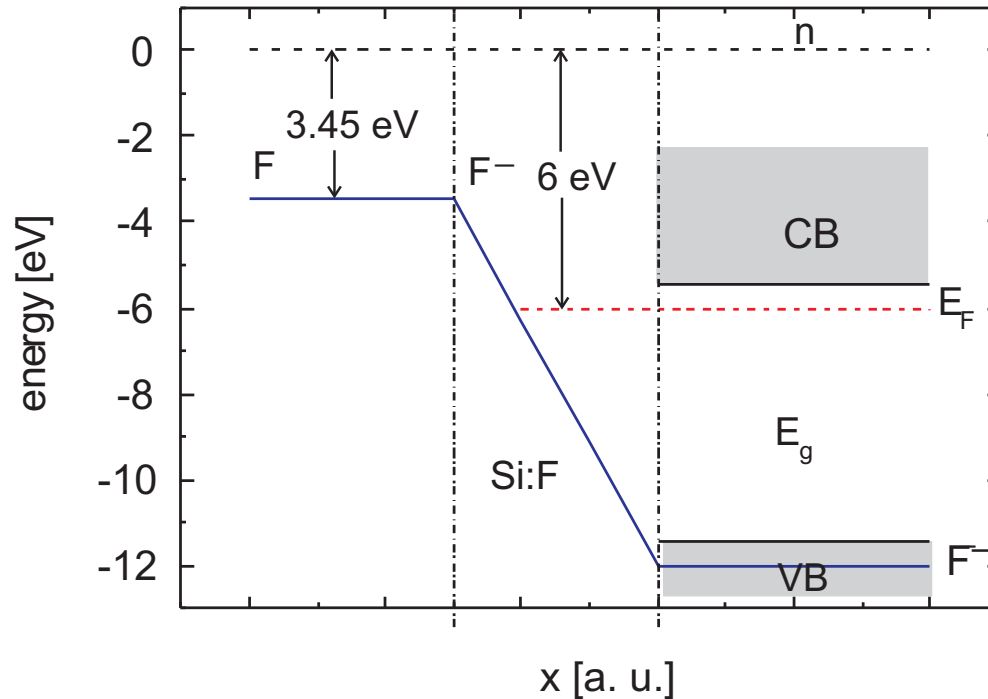


# Selektivität IV

- Einfach: PR-Veraschen auf Dielektrika, Halbleitern und Metallen:  
Ätzstopp auf dem Substrat.
- Simpel: Trilevel-Technik: sehr dicke Maske.
- Chemisch: Volatilität des Ätzprodukts: Ätzen einer SiO<sub>2</sub>-Maske auf III/V.
- **Thermodynamisch: Endotherme Reaktionen laufen langsamer ab als exotherme:**  
**Si/SiO<sub>2</sub> mit Cl<sub>2</sub>:**



# Selektivität V

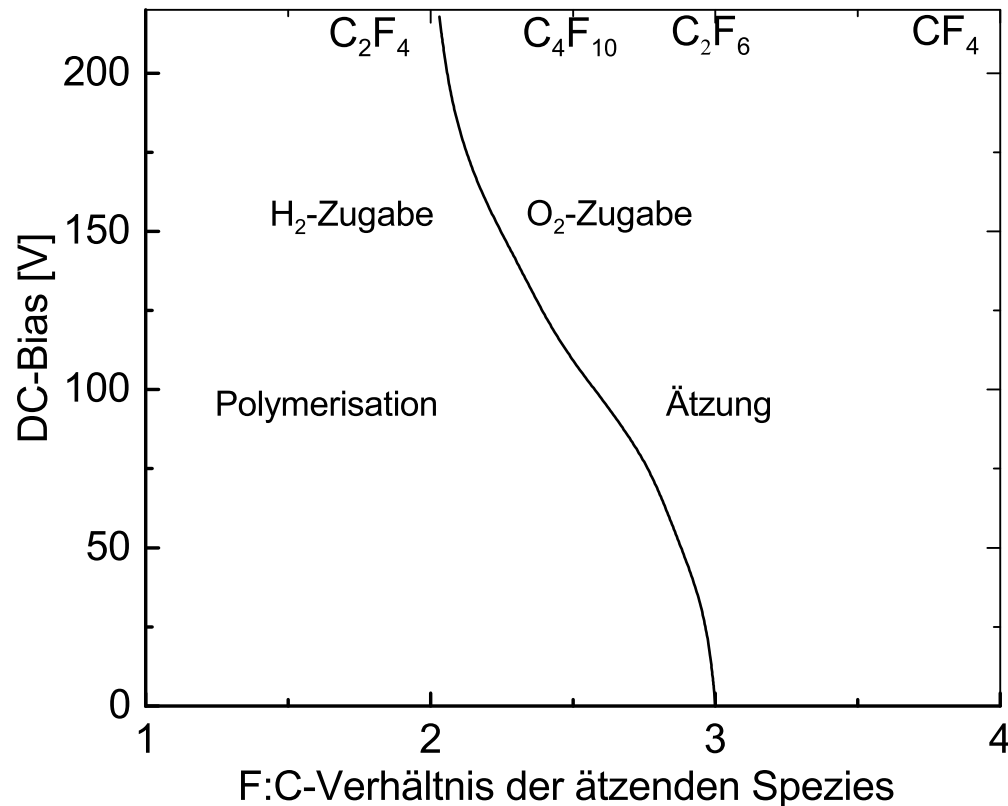


- n-Doping erhöht das FERMI-Niveau an die Unterkante des Leitungsbandes, wodurch die Aktivierungsenergie für den Elektronentransfer sinkt.





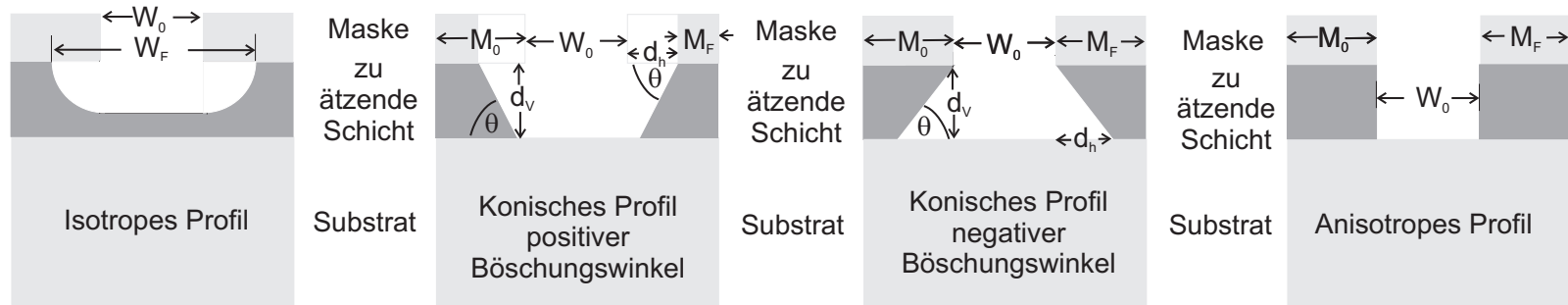
# Selektivität VI



- Das F:C-Verhältnis im reaktiven Gas und das DC-Bias beeinflussen den Verlauf der Reaktion. Erhöhte Beladung führt wie Wasserstoffzugabe zu stärkerer Polymerbildung J.W. Coburn, and E. Kay, IBM J. Res. Develop. **23**, 33 (1979).



# Anisotropie I



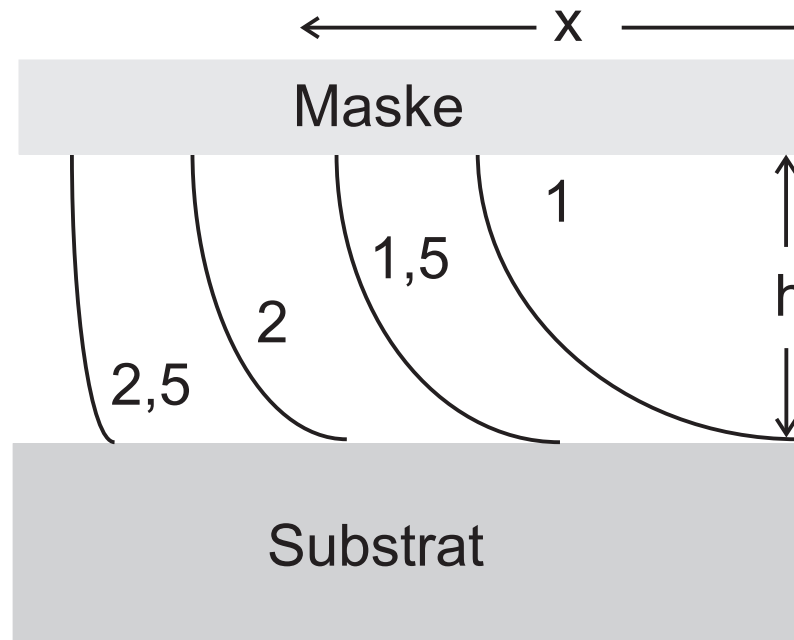
- Ätzprofile für rein isotrope, rein anisotrope und in der Charakteristik dazwischen liegende „konische“ Ätzung mit positivem oder negativem Böschungswinkel.
- $W$ : Maskenabstand,  $M$ : Maskenbreite, der Index 0 vor, der Index F nach der Ätzung,  $d_h$ : horizontale („Unterätzung“),  $d_v$ : vertikaler Abtrag, Konuswinkel  $\Theta = \arctan d_v/d_h$
- $\frac{d_v}{d_h}$  bzw. die Differenz  $1 - \frac{d_h}{d_v}$ : „Anisotropieverhältnis“ oder auch „Aspektverhältnis“  $A$ .



Rein anisotrope Ätzung:  $A = \infty \vee 1$ ,

rein isotrope Ätzung:  $A = 1 \vee 0$ .

# Anisotropie II



- Beim isotropen Ätzen kann die Maske stark unterätzt werden. Eine Unterätzung von 100 % ( $x/h = 1$ ) bis zu 250 % ( $x/h = 2,5$ ) täuscht einen Gang zu höherer Anisotropie lediglich vor  $\Rightarrow$  Bezug auf ein  $(x,y,z)$ -Normal ist erforderlich (z. B. die nicht angegriffene Maskenstruktur).



# Anisotropie III

- Von welchen Größen hängt das Anisotropieverhältnis ab?
- Verhältnis der Flüsse Neutralteilchen/Ionen.
- Spontane Ätzung  $\rightarrow$  horizontale Unterätzung.
- Deposition an den Seitenwänden (Passivierung).
- Desorption von Reaktionsprodukten (Temperatur, Druck).



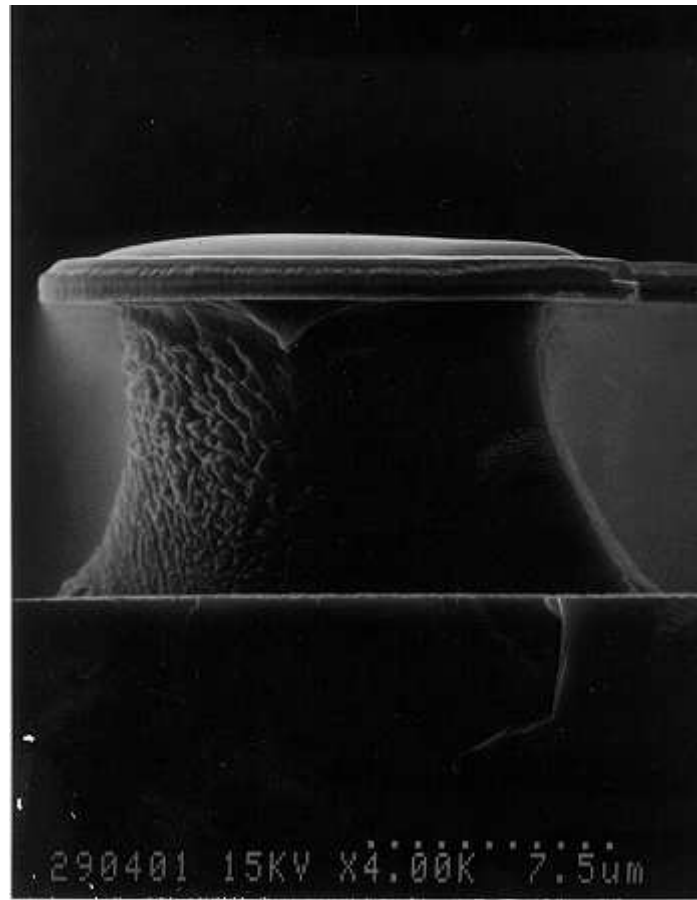
# Anisotropie IV

Ätzung von Silicium in  $\text{CF}_4$ : Abhängigkeit der Ionenenergie, Fluorfluß und Anisotropie von verschiedenen Parametern.

<i>Parameter</i>	<i>Änderung</i>	<i>Zielgröße</i>		
		<i>F-Fluß</i>	$E_{\text{Ion}} / \langle E \rangle$	<i>Anisotropie</i>
Druck	Anstieg	Zunahme	Abnahme	Abnahme
RF-Power	Anstieg	Zunahme?	Anstieg	Zunahme
Beladung	Anstieg	Abnahme	-	Zunahme
$\text{H}_2$	Anstieg	Abnahme	-	Zunahme
$\text{O}_2$	Anstieg	Zunahme	-	Abnahme



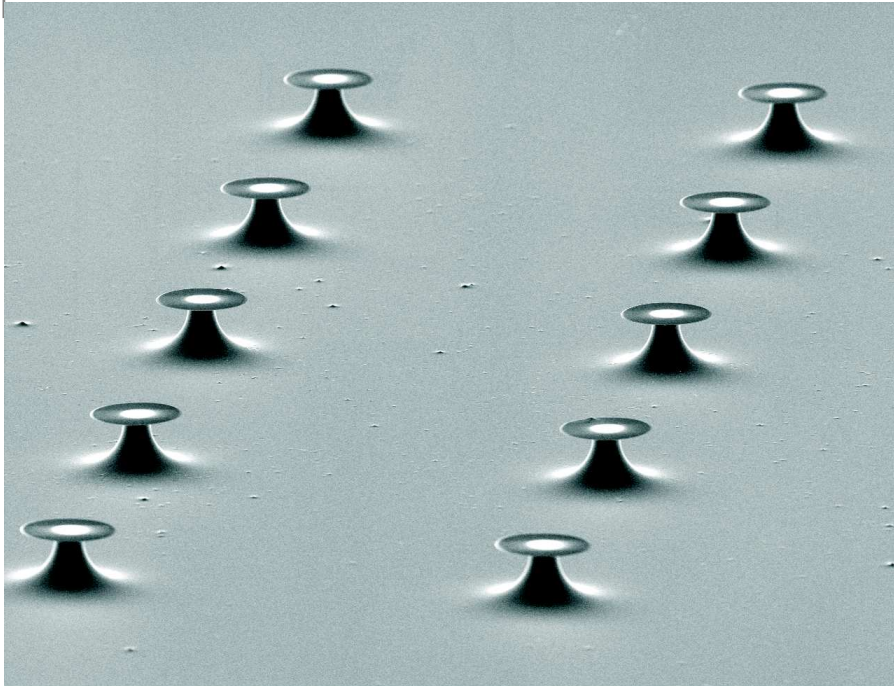
# Seitenwandpassivierung I



- CCP-RIE von GaP in  $\text{Cl}_2$ : nahezu isotropes Ätzprofil.

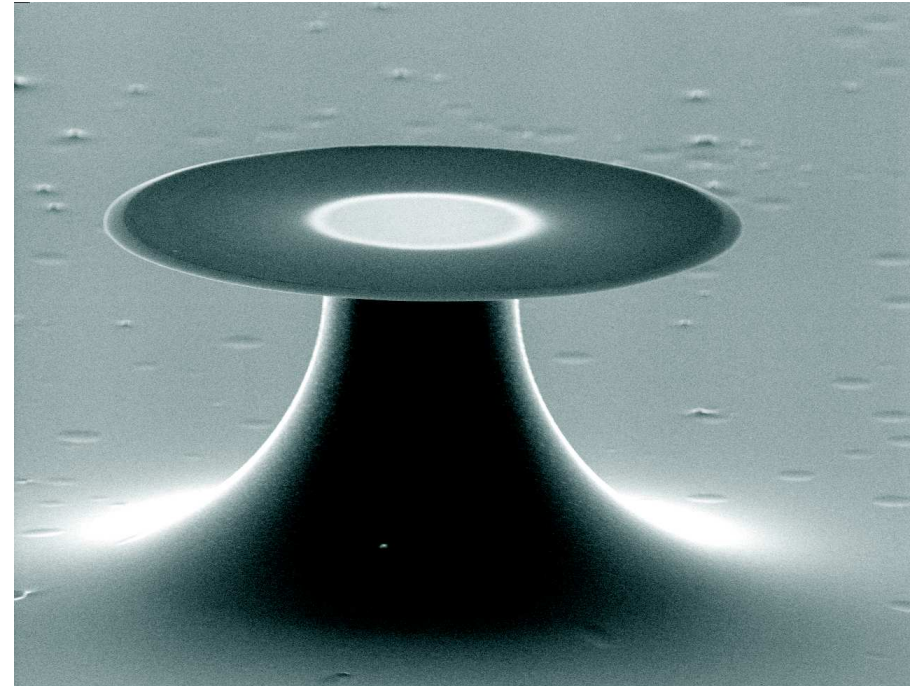


# Seitenwandpassivierung II



S32 final 75°; x100

300 μm



S32 final 75°; x709

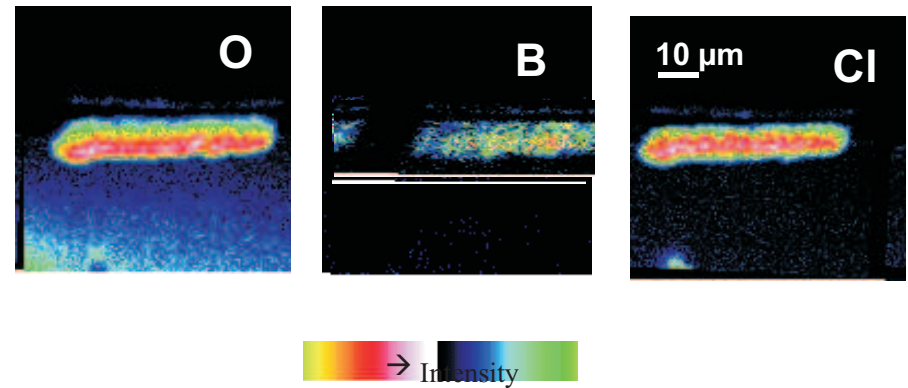
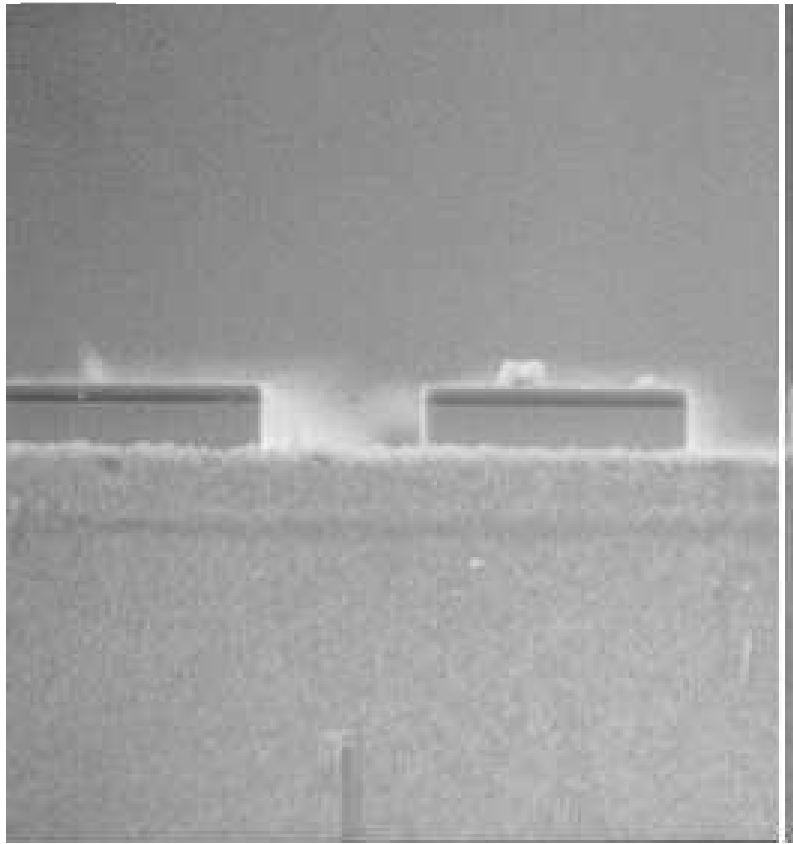
40 μm

- Pilze in einem Zweistufenprozeß:  $\text{SiO}_2$ -Maske wird in  $\text{C}_4\text{F}_8/\text{O}_2$  (CCP) geätzt; das Si in  $\text{SF}_6$  (ICP). F $\cdot$ -Radikale ätzen spontan  $\Rightarrow$  nahezu isotrope Ätzung (Aspektverhältnis: 1.5).

© A. POPP, J.J. FINLEY, 2006.



# Seitenwandpassivierung III



- 20 µm tief geätzte Quader weisen wegen Seitenwandpassivierung eine senkrechte Ätzflanke auf. TOF-SIMS: Der Film besteht überwiegend aus polymerem  $(B_2Cl_4)_\infty$ : Auf dem geätzten Quader ist die Oberflächen-Konzentration des Sauerstoffs deutlich niedriger als die des Chlors. Da chemisch weder aus Gallium- noch aus Boroxid ein Chlorid entstehen kann, muß sich dieses vorher, also während





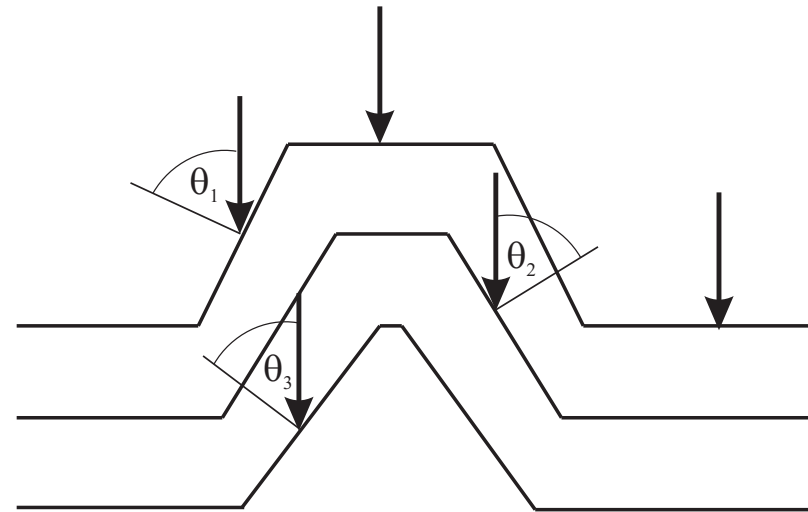
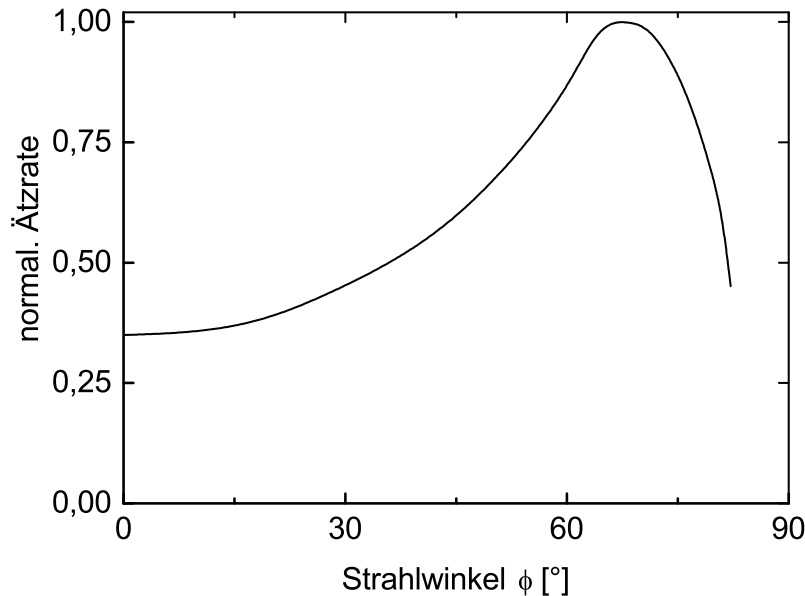
# Seitenwandpassivierung IV

Beispiele, Filmzusammensetzung und Mechanismen.

System	Ätzgas	Film	Mechanismus	Kommentar
Aluminium	$\text{CCl}_4$	$(\text{CCl}_x)_\infty$	Polymerbildung	
GaAs	$\text{BCl}_3/\text{Cl}_2$	$(\text{BCl}_2)_\infty$	Polymerbildung	
InP	$\text{CH}_4/\text{H}_2$	$(\text{CH}_2)_\infty$	Polymerbildung	
Silicium	$\text{CF}_4/\text{O}_2$	$\text{SiO}_x$	Oxidation	schwierig bei PR
Silicium	$\text{CF}_4$	$(\text{CF}_2)_\infty$	Polymerbildung	hohe Drücke



# Facettierung I

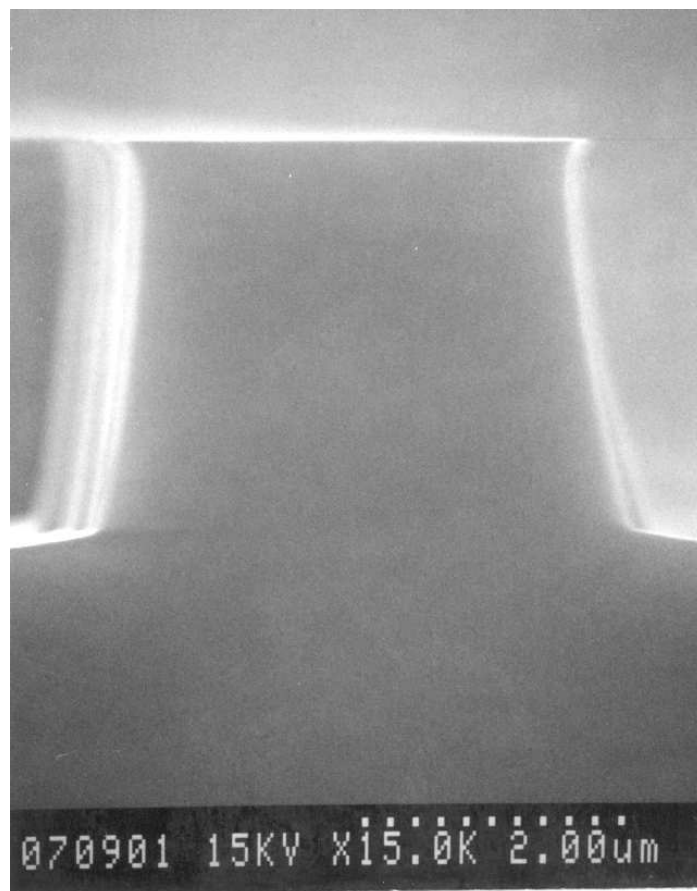


- ER hängt entscheidend vom Einfallswinkel auftreffender Ionen ab. Substratoberfläche und Maskenflanke stoßen meist nie im rechten Winkel aufeinander  $\Rightarrow$  *Facettierung* mit nachfolgender *Konusbildung*



H. Dimigen, H. Lühje: *An Investigation of Ion Etching*, Philips Techn. Rev. **35**, 199 (1975).

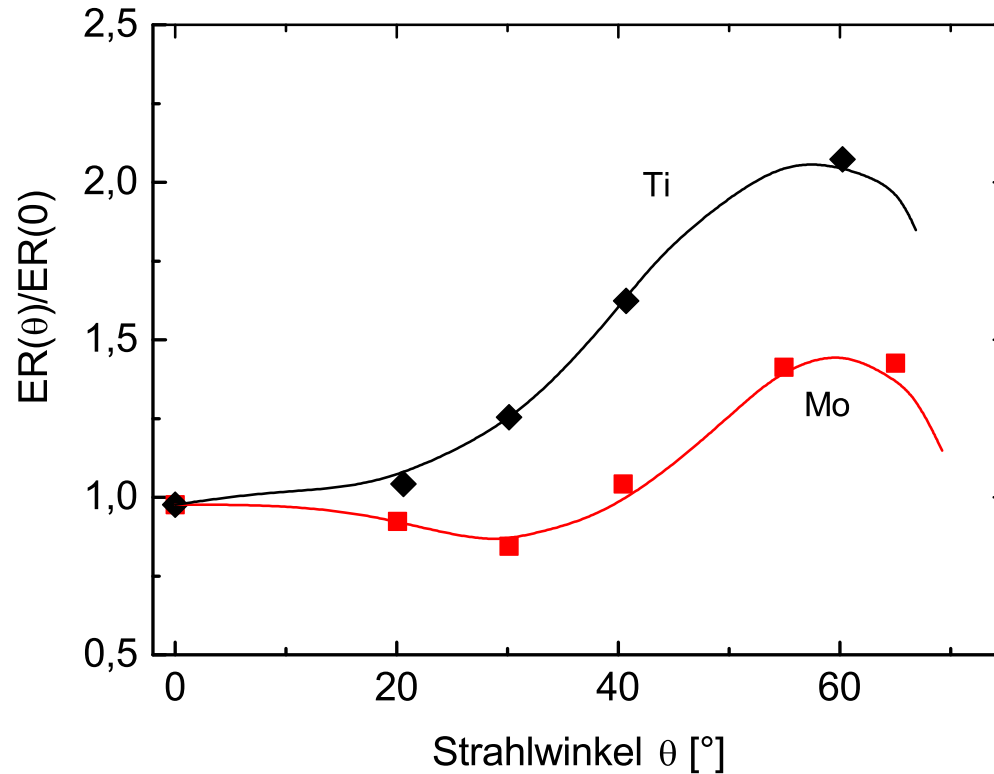
# Facettierung II



- „Tapering“ von InP in Ethan/Wasserstoff 10:40, 5 Pa, 0,25  $\text{W cm}^{-2}$ . Man beachte die geriffelte Seitenwand, die durch exakte lithographische Übertragung des Maskenrandes (gesputtertes  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in den Halbleiter entstanden ist.



# Facettierung III

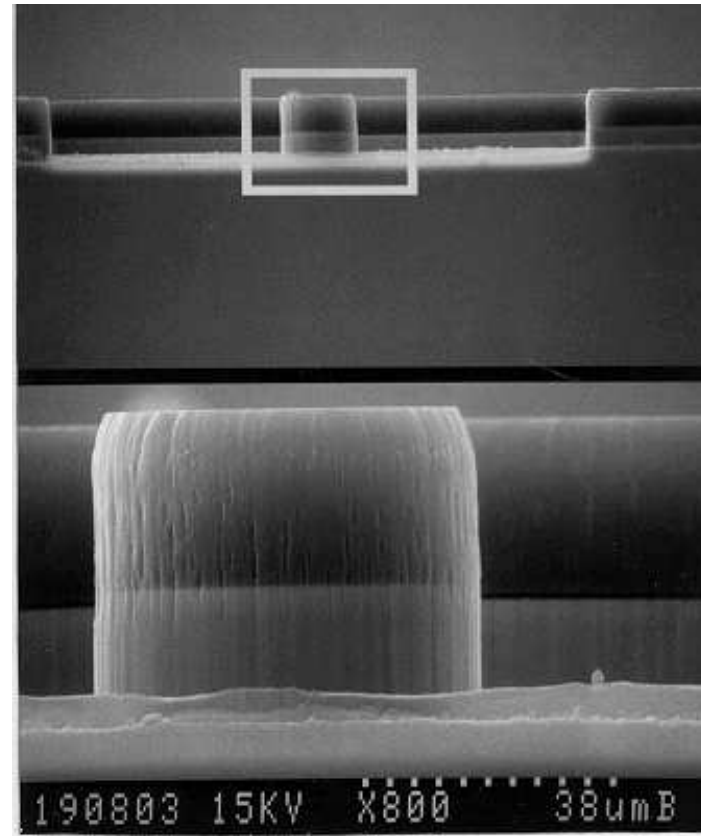
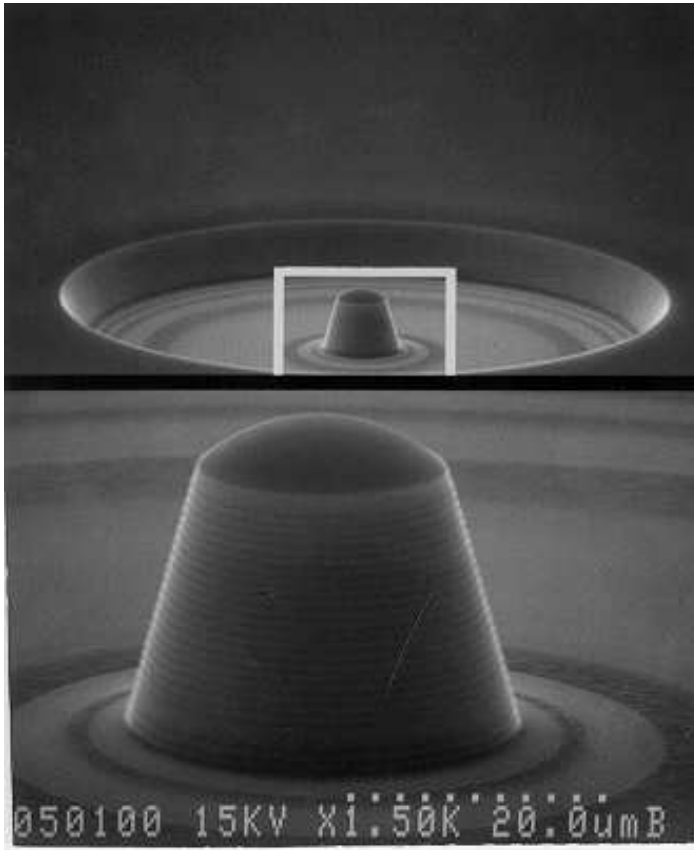


- Verschiedene refraktäre Metalle eignen sich wegen der schwachen Winkelabhängigkeit ihrer Ätzrate und der damit verbundenen geringen Anfälligkeit zur Facettierung besonders als Maskenmaterial. ( $E_{\text{Ion}} = 1 \text{ keV}$ )



H. Dimigen, H. Lüthje, H. Hubsch, U. Convertini: *Influence of mask material on ion*

# Facettierung IV



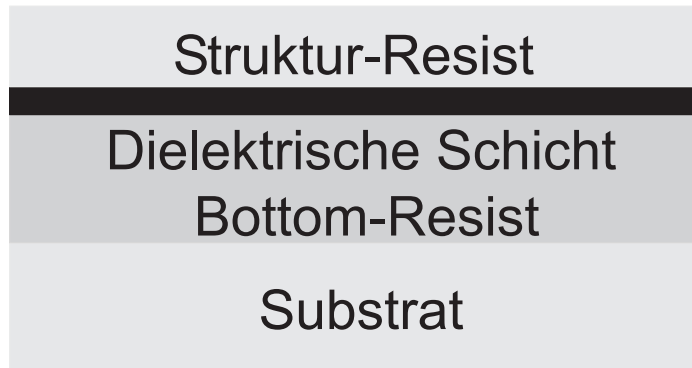
- Der Inzidenzwinkel der (Rest-)Maske bestimmt den Neigungswinkel im Substrat entscheidend, hier dargestellt an einer Sandwich-Kegel- bzw. Zylinderstruktur in AlGaAs/GaAs. Maske aus PR.



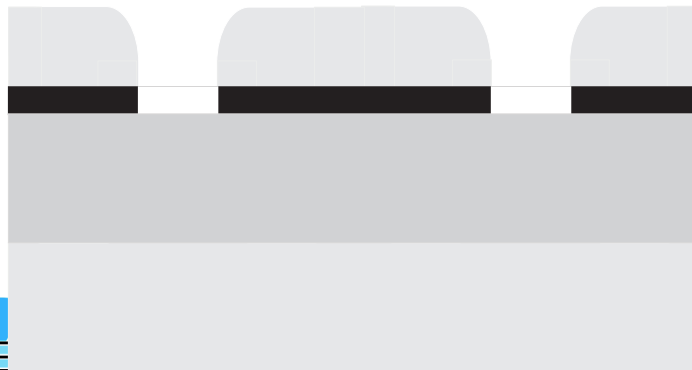
# Facettierung V

Trilevel-Photoresist-Technik:

Schichtfolge



nach PR-Lithographie

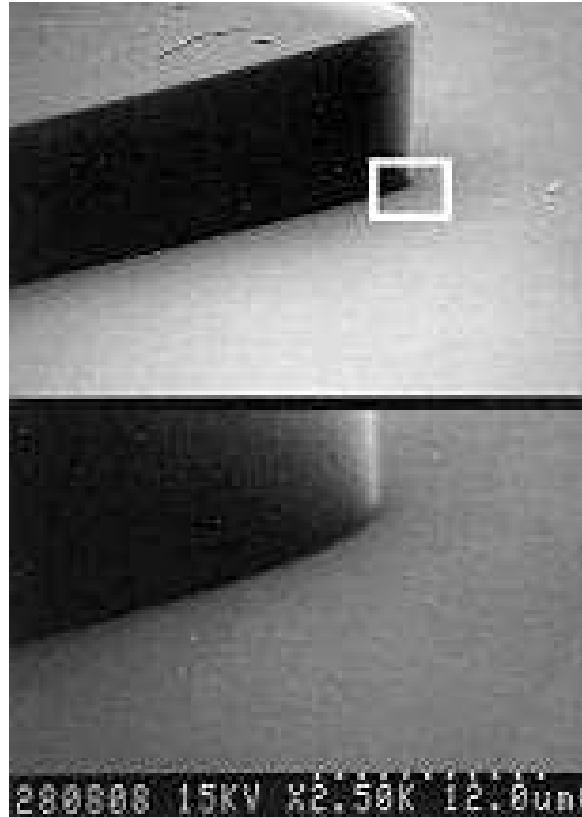


nach  $\text{CF}_4/\text{O}_2$ -RIE



nach  $\text{O}_2$ -RIE

# Facettierung VI

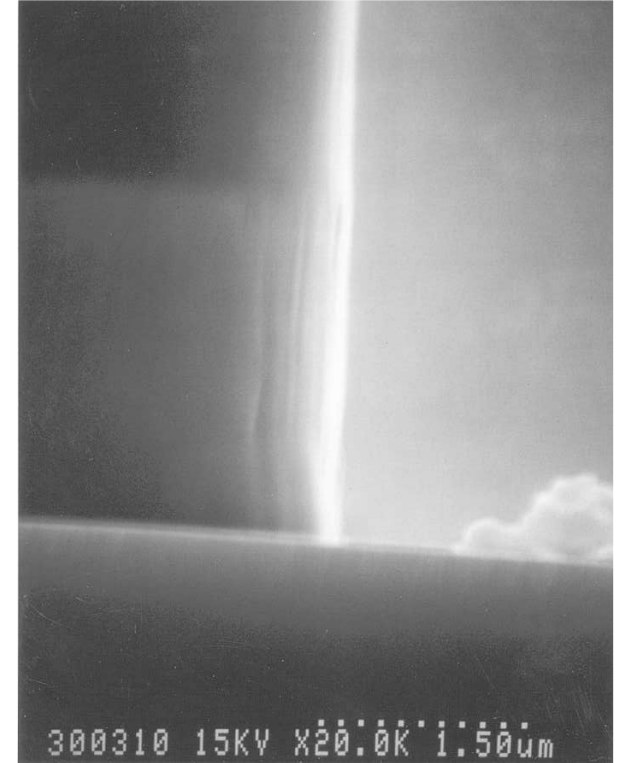
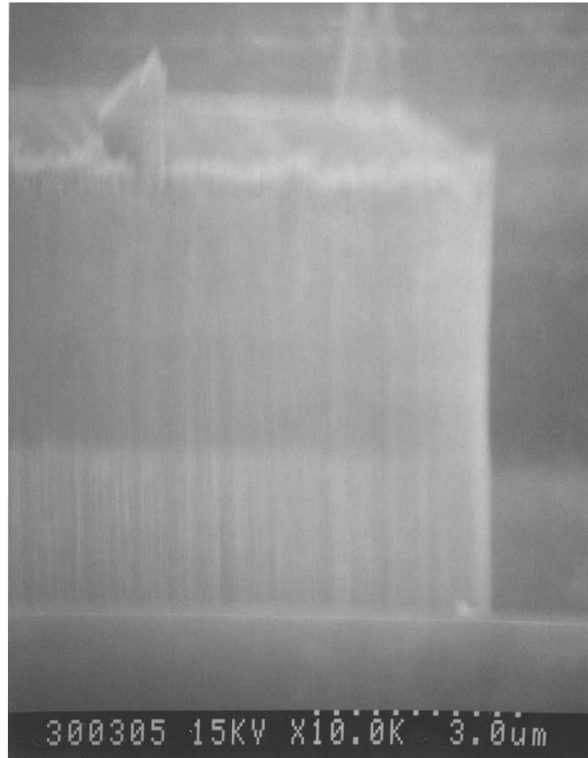
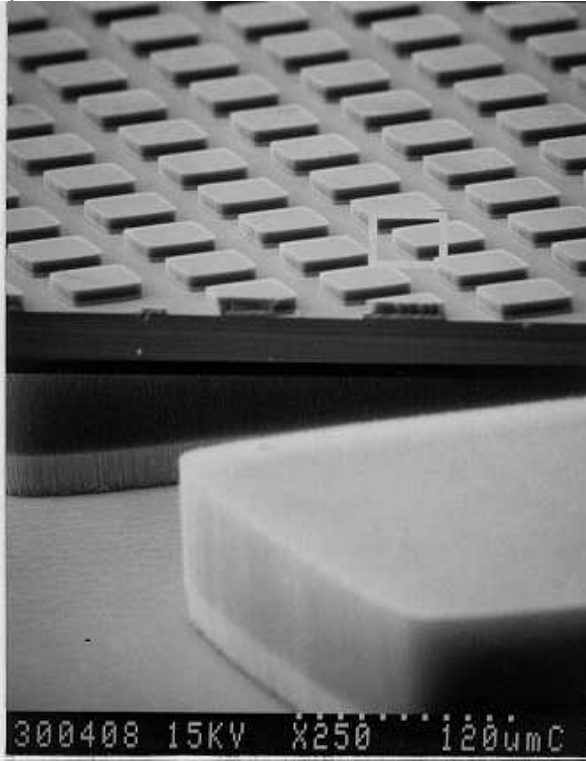


- Trilevel-Photoresist-Technik mit AZ 4562 Bottomresist, 200 nm SiO<sub>2</sub> und AZ 5214.

G. Franz, J. Vac. Sci. Technol. **A 16**, 1542 (1998).



# Facettierung VII



- Trilevel-Photoresist + spezielle Glättungstechnik der Photolackkanten:  
Facetten in GaN/AlGaN.

G. Franz, F. Rinner, J. Vac. Sci. Technol. **A 17**, 56 (1999).





# Zusammenfassung I

- Reaktives Ionenätzen setzt sich aus mindestens vier Prozessen zusammen.



# Zusammenfassung I

- Reaktives Ionenätzen setzt sich aus mindestens vier Prozessen zusammen.
- An CAIBE kann gezeigt werden: Die chemische Ätzrate von  $\text{CF}_4$  und  $\text{XeF}_2$  gegen Si kann dramatisch erhöht werden.



# Zusammenfassung I

- Reaktives Ionenätzen setzt sich aus mindestens vier Prozessen zusammen.
- An CAIBE kann gezeigt werden: Die chemische Ätzrate von  $\text{CF}_4$  und  $\text{XeF}_2$  gegen Si kann dramatisch erhöht werden.
- In CCPs ist das ionenunterstützte chemische Ätzen der dominierende Prozeß.



# Zusammenfassung I

- Reaktives Ionenätzen setzt sich aus mindestens vier Prozessen zusammen.
- An CAIBE kann gezeigt werden: Die chemische Ätzrate von  $\text{CF}_4$  und  $\text{XeF}_2$  gegen Si kann dramatisch erhöht werden.
- In CCPs ist das ionenunterstützte chemische Ätzen der dominierende Prozeß.
- In ICPs ist echtes RIE dominierend.



# Zusammenfassung I

- Reaktives Ionenätzen setzt sich aus mindestens vier Prozessen zusammen.
- An CAIBE kann gezeigt werden: Die chemische Ätzrate von  $\text{CF}_4$  und  $\text{XeF}_2$  gegen Si kann dramatisch erhöht werden.
- In CCPs ist das ionenunterstützte chemische Ätzen der dominierende Prozeß.
- In ICPs ist echtes RIE dominierend.
- Die Ätzrate kann durch Zuschläge zum eigentlichen Ätzgas stark beeinflußt werden.



# Zusammenfassung II

- Die Ätzrate kann signifikant von der Menge oder der Beladung des zu ätzenden Materials abhängen, über alles (Loading), aber auch partiell (Microloading).



# Zusammenfassung II

- Die Ätzrate kann signifikant von der Menge oder der Beladung des zu ätzenden Materials abhängen, über alles (Loading), aber auch partiell (Microloading).
- Die Selektivität kann durch verschiedene Maßnahmen stark beeinflusst werden.
  - durch Dotiergase ( $O_2/H_2$  zu  $CF_4$ ), um die Selektivität zw. PR,  $SiO_2$  oder Si zu erhöhen.
  - durch das DC-Bias,
  - durch Temperatur (thermodynamische Kontrolle).
  - durch atomare Kontrolle ( $CF_4 \rightarrow CH_4$ ).



# Zusammenfassung III

- Die Anisotropie wird durch das Verhältnis der Flüsse Neutralteilchen/Ionen beeinflußt.





# Zusammenfassung III

- Die Anisotropie wird durch das Verhältnis der Flüsse Neutralteilchen/Ionen beeinflußt.
- Neutralteilchen können spontan ätzen  $\Rightarrow$  isotropes Profil.



# Zusammenfassung III

- Die Anisotropie wird durch das Verhältnis der Flüsse Neutralteilchen/Ionen beeinflußt.
- Neutralteilchen können spontan ätzen  $\Rightarrow$  isotropes Profil.
- Seitenwandpassivierung kann den horizontalen Angriff wirkungsvoll unterdrücken.



# Zusammenfassung III

- Die Anisotropie wird durch das Verhältnis der Flüsse Neutralteilchen/Ionen beeinflusst.
- Neutralteilchen können spontan ätzen  $\Rightarrow$  isotropes Profil.
- Seitenwandpassivierung kann den horizontalen Angriff wirkungsvoll unterdrücken.
- Aber auch eine simple Maßnahme wie die Beladung reduziert die Neutralteilchen und erhöht dadurch die Anisotropie.



# Zusammenfassung III

- Die Anisotropie wird durch das Verhältnis der Flüsse Neutralteilchen/Ionen beeinflusst.
- Neutralteilchen können spontan ätzen  $\Rightarrow$  isotropes Profil.
- Seitenwandpassivierung kann den horizontalen Angriff wirkungsvoll unterdrücken.
- Aber auch eine simple Maßnahme wie die Beladung reduziert die Neutralteilchen und erhöht dadurch die Anisotropie.
- $\text{SF}_6$  erzeugt nahezu kein DC-Bias und ätzt deswegen isotrop.



# Zusammenfassung IV

- Die Facettierung ist ein Ergebnis der winkelabhängigen Sputterausbeute.



# Zusammenfassung IV

- Die Facettierung ist ein Ergebnis der winkelabhängigen Sputterausbeute.
- Sie wird am wirkungsvollsten durch senkrechte Inzidenzwinkel der Maske bekämpft.



# Zusammenfassung IV

- Die Facettierung ist ein Ergebnis der winkelabhängigen Sputterausbeute.
- Sie wird am wirkungsvollsten durch senkrechte Inzidenzwinkel der Maske bekämpft.
- Auch dünne Metallmasken zeigen gute Ergebnisse für senkrechte Halbleiterstrukturen.



# Zusammenfassung IV

- Die Facettierung ist ein Ergebnis der winkelabhängigen Sputterausbeute.
- Sie wird am wirkungsvollsten durch senkrechte Inzidenzwinkel der Maske bekämpft.
- Auch dünne Metallmasken zeigen gute Ergebnisse für senkrechte Halbleiterstrukturen.
- Für tiefe Ätzungen ist eine Trilevel-Technik mit anschließender Entfernung des ehem. PR im Barrel-Reaktor sehr geeignet.

