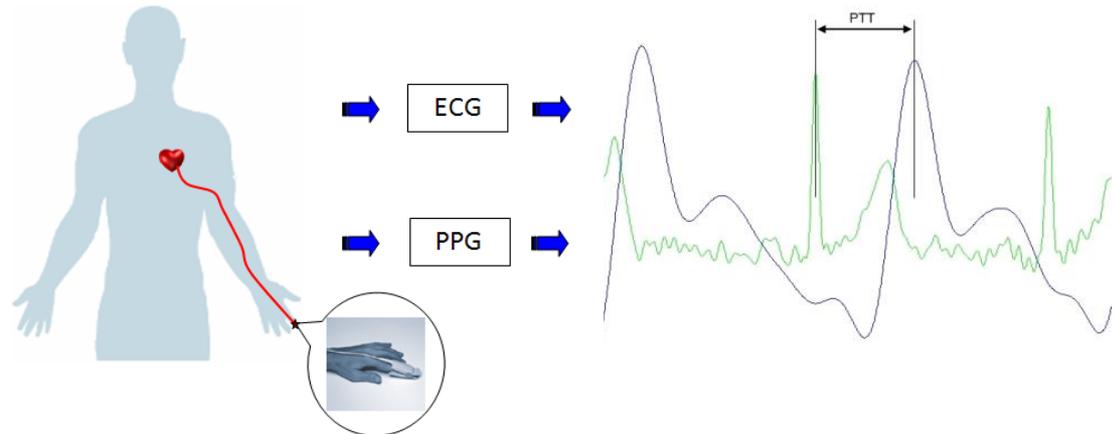


# Vorlesung Mikrosystemtechnik Teil 6: Ätzen, Ätzstoppverfahren

Stefan Hey

Institut für Technik der Informationsverarbeitung



# Gliederung

- Schichtstrukturierung (Ätzen)
  - Nassätzen
    - Tauchätzen
    - Sprühätzen
  - Trockenätzen
    - **BE: Barrel Etching** = Barrel- Ätzen
    - **PE: Plasma Etching** = Plasmaätzen
    - **RIE: Reaktive Ion Etching** = Reaktives Ionenätzen
    - **RIBE: Reaktive Ion Beam Etching** = Reaktives Ionenstrahlätzen
    - **IE: Ion Etching** = Sputterätzen
    - **IBE: Ion Beam Etching** = Ionenstrahlätzen
- Ätzstoppverfahren

# Gliederung

- Ätzstoppverfahren
  - Anisotroper Ätzstopp
  - Ätzstopp nach Zeit
  - Selektiver Ätzstopp an Isolatorschicht
  - Selektiver Ätzstopp an hochdotierter  $p^{++}$  Schicht
  - Elektrochemischer Ätzstopp

# ÄTZPROZESSE UND ÄTZTECHNIK

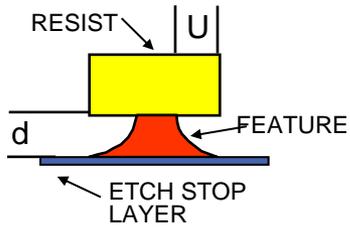
# Ätzprozesse

- Man kann zwischen zwei Ätzprozessen unterscheiden:
  - Isotrope Ätzung
    - Teilchen bewegen sich in alle Richtungen
    - Hohe Selektivität
    - Unterätzung der Maske
  - Anisotrope Ätzung
    - Teilchen bewegen sich senkrecht gerichtet oder entlang Gitterstrukturen
    - Geringe Selektivität
    - Strukturübertragung exakt

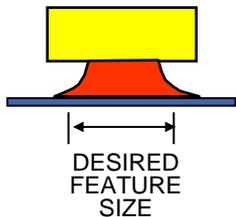


Isotroper (a) und anisotroper (b) Ätzprozess mit einer Maske

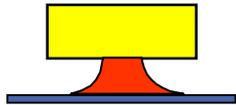
# Typische Ätzprofile und Fehler



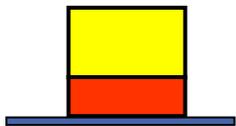
1. **Isotropes Ätzen** führt zu einer schüsselförmigen Ausbildung des Materialabtrags und einer Unterätzung  $U$  der Fotolackmaske um mindestens die Schichtdicke. Die Kante der geätzten Struktur ist nicht gerade und senkrecht. Dies muss berücksichtigt werden, wenn die lateralen Abmessungen der Struktur von ähnlicher Größenordnung wie die Schichtdicke sind.



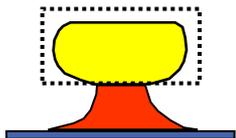
2. **Isotropes Ätzen mit Masken-Vorhalt**, d.h. die Vergrößerung der Maskenstruktur bei einem Steg (Leiterbahnen), kann die Unterätzung im Hinblick auf die Stegbreite ausgleichen. Dadurch wird der kleinste mögliche Abstand zwischen Stegen vergrößert. Daher ist isotropes Ätzen nur sinnvoll, wenn die lateralen Strukturabmessungen groß gegen die Tiefe/Schichtdicke sind.



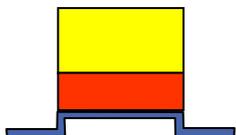
3. **Überätzen** beim isotropen Ätzen führt zu einer unerwünschten Verringerung von Stegbreiten.



4. **Anisotropes Ätzen**: Der Ätzangriff erfolgt in diesem Beispiel nur nach unten ( $V_h = 0$ ). Mit anisotropem Ätzen können die kleinsten lateralen Abmessungen erreicht werden.



5. **Isotropes Ätzen mit Ätzangriff der Maske** entsteht, wenn die Selektivität zu gering ist, und führt zu einer unerwünschten Verringerung von Stegbreiten.

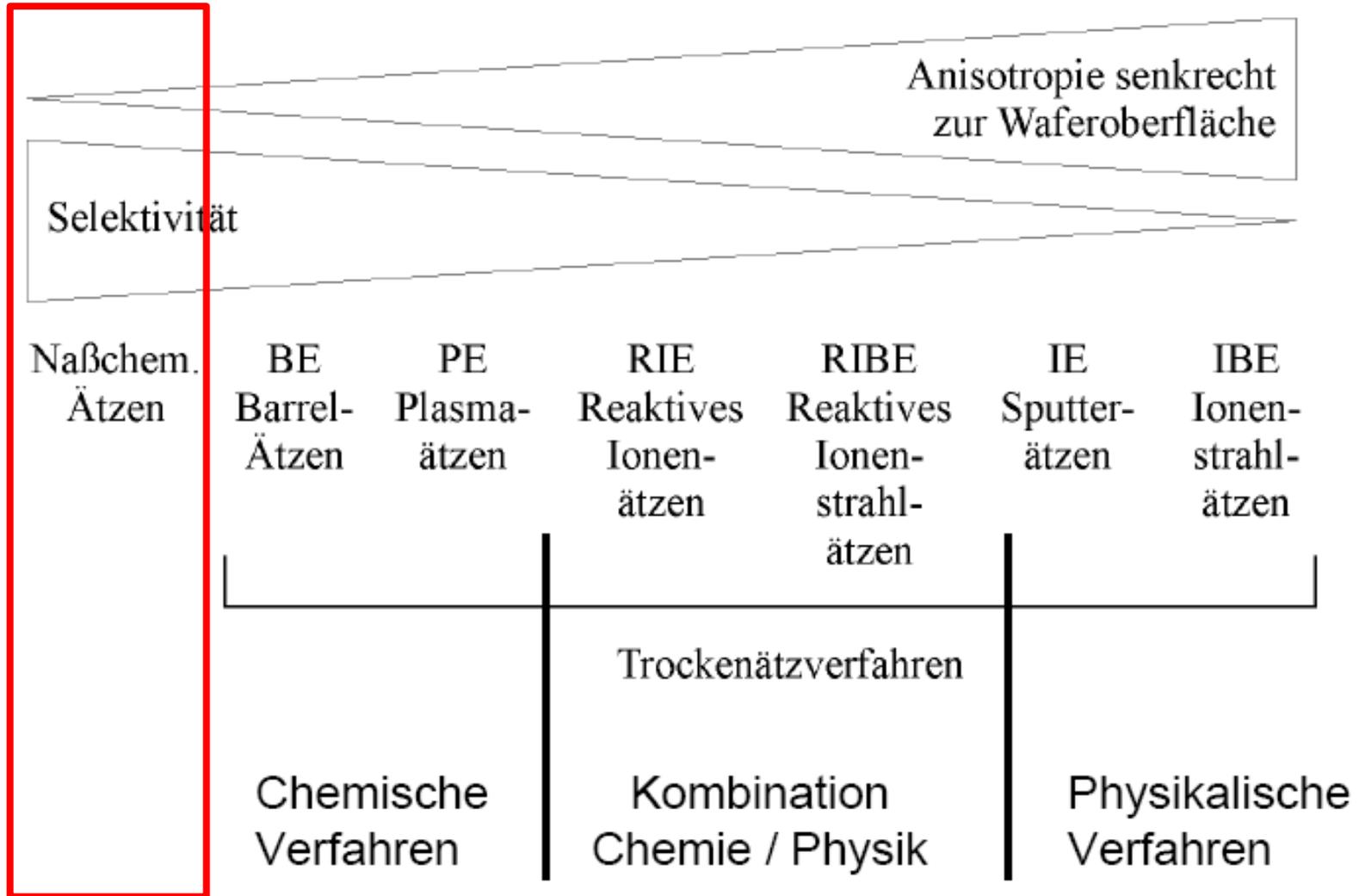


6. **Anisotropes Ätzen** mit geringer Selektivität zu der unterliegenden Schicht führt zu einem Angriff der Schicht.

- Das Ätzen lässt sich grundsätzlich in zwei Techniken unterteilen
  - Nasschemisches Ätzen
    - Es handelt sich um ein chemisches Verfahren
    - Eine chemische Lösung wird auf das ätzende Material aufgebracht
    - Dieses Verfahren erfolgt im allgemeinen isotrop (richtungsunabhängig)
    - Man unterscheidet zwischen Tauchätzung und Sprühätzung
  - Trockenätzen
    - Es gibt drei verschiedene Arten des Trockenätzens
      - Chemisches Trockenätzen
      - Chemisch-physikalisches Trockenätzen
      - Physikalisches Trockenätzen

# NASSÄTZEN

# Selektivität ↔ Anisotropie



# Nassätzen

- Das Prinzip beim Nassätzen ist die Umwandlung des festen Materials der Schicht in flüssige Verbindungen unter zu Hilfenahme einer chemischen Lösung
  - Die eingesetzten Chemikalien können genau auf die vorhandenen Schichten abgestimmt werden
- Sehr hohe Selektivität



Bildquelle: semefab

# Anforderung

- Folgende Anforderungen müssen von den chemischen Lösungen erfüllt werden:
  - Die Maskierungsschicht darf nicht angegriffen werden
  - Die Selektivität muss hoch sein
  - Die Ätzung muss durch Verdünnung mit Wasser gestoppt werden können
  - Es dürfen sich keine gasförmigen Reaktionsprodukte bilden, da die Bläschen vereinzelt Bereiche abschatten können
  - Konstante Ätzrate über lange Zeit
  - Die Reaktionsprodukte müssen direkt gelöst werden, damit keine Partikel die Ätzlösung verunreinigen
  - Gute Umweltverträglichkeit und leichte Entsorgung

# Tauchätzen

- Eine ganze Horde mit Wafern wird auf einmal in einem Becken mit der Ätzlösung prozessiert
- Durch Filter und Umwälzpumpen werden Partikel von den Wafern ferngehalten
- Die Ätzrate muss genau bekannt sein, um reproduzierbare Ätzungen durchführen zu können
- Eine exakte Temperierung der Ätzlösung ist erforderlich
- Die Hebevorrichtung kann die Horde waagrecht und senkrecht transportieren
- Durch Spülen mit Wasser wird nach der gewünschten Dauer der Ätzvorgang gestoppt
- Anschließend kommen die Wafer in eine Trockenschleuder

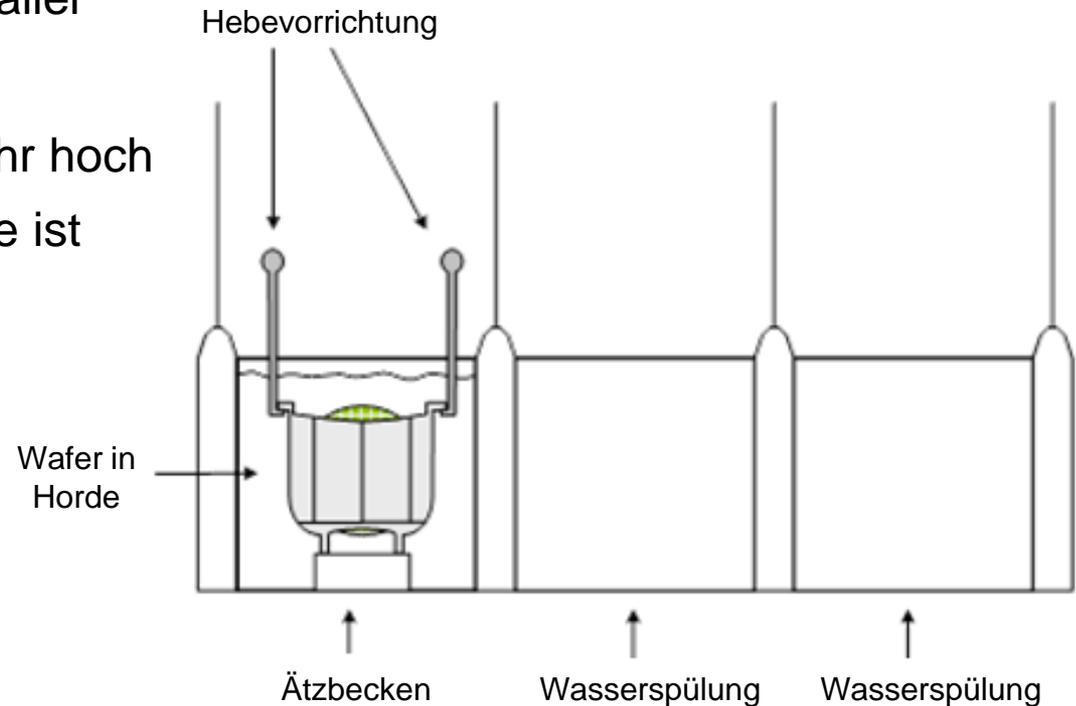
# Tauchätzen

## ■ Vorteile:

- Viele Proben können parallel geätzt werden  
 → Durchsatzrate ist sehr hoch
- Der Aufbau der Ätzanlage ist relativ einfach

## ■ Nachteile:

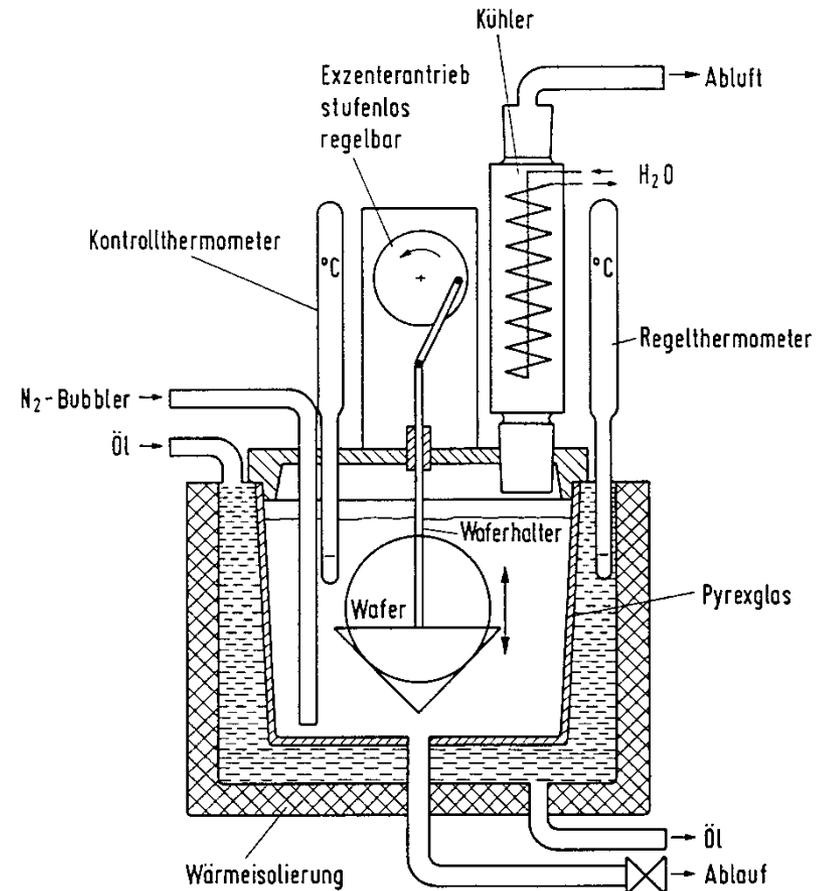
- Schichtabtrag ist relativ inhomogen



Bildquelle: <http://www.halbleiter.org>

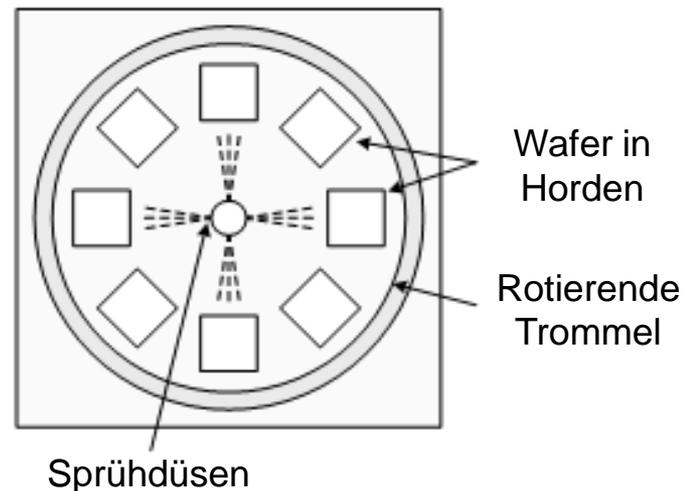
# Ätzapparatur für das Siliziumätzen

- Das Ölbad sorgt für eine Temperierung. Der  $N_2$  - Bubbler führt  $N_2$  zu, durchmischt das Bad und erzeugt eine Schutzgasatmosphäre gegen Luft ( $O_2$ )
- Durch den Kühler wird verdampfende Lösung kondensiert und zurückgeführt. Die Waferbewegung sorgt für einen gleichmäßigen Ätzprozess



# Sprühätzen

- Rotieren einer oder mehrerer Proben um Düsen, aus denen die Ätzlösung austritt
- Durch die Rotation und die stetige Zugabe frischer Ätzlösung ist die Homogenität sehr hoch
- Zum Trocknen werden die Proben unter Rotation in heißer Stickstoffatmosphäre gebracht
- Nachteil ist hier der relativ hohe Aufwand zum Ätzen der Probe



Bildquelle: <http://www.halbleiter.org>

# TROCKENÄTZEN

# Trockenätzen

- Materialabtragung durch ein gasförmiges Ätzmedium
- Teilschritte
  - Erzeugung reaktiver Teilchen
  - Transport oder Beschleunigung der Teilchen zum Substrat
  - Ätzung durch Substratoberfläche
  - Abtransport der Reaktionsprodukte
- Trockenätztechnik in verdünnter Gasatmosphäre
  - Reagierende Teilchen haben senkrecht zur Oberfläche gerichtete Bewegung → ermöglicht Anisotropie

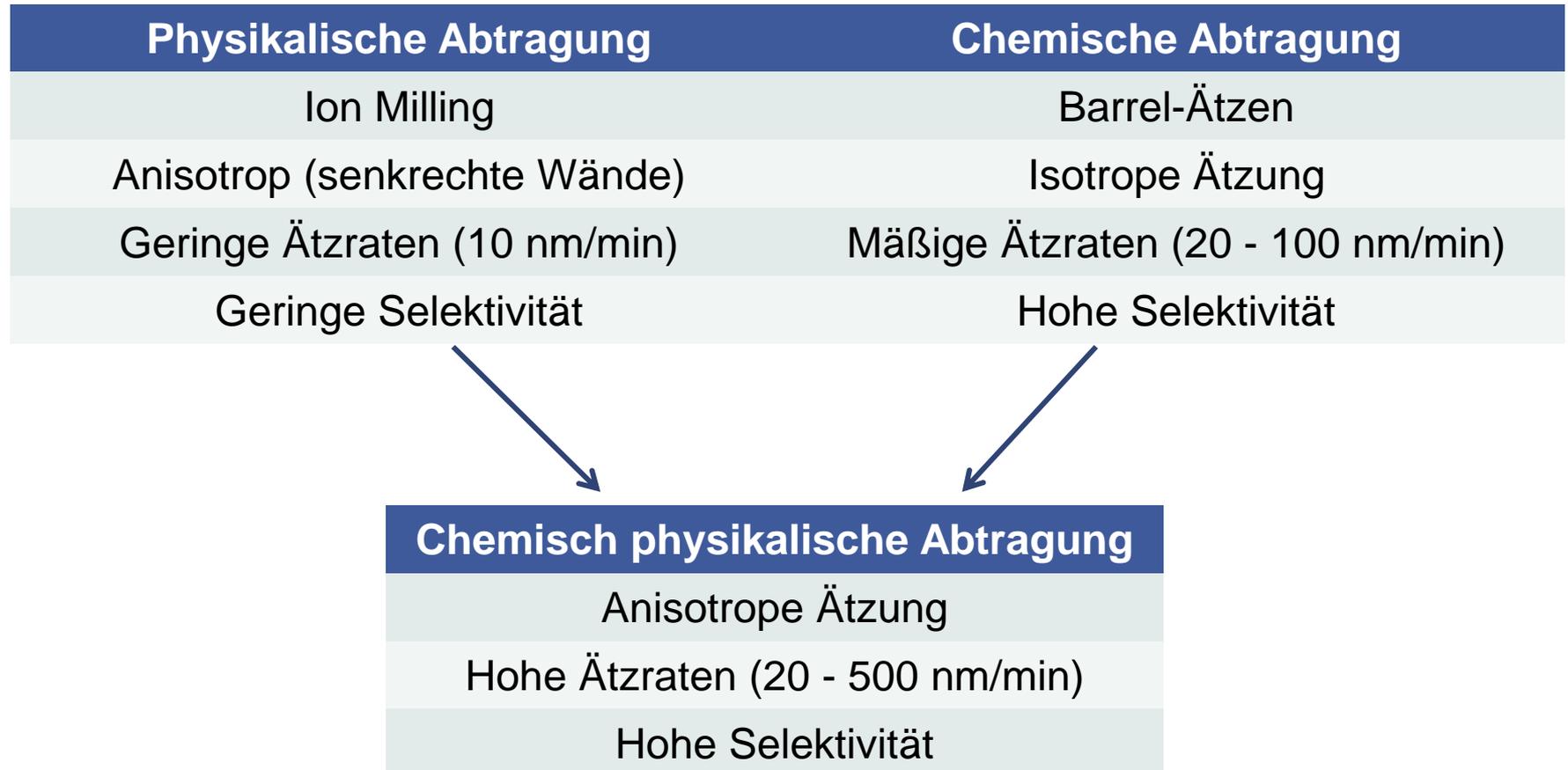
# Anlagenkonzepte beim Trockenätzen

- Substrat befindet sich im Plasma
- Substrat und Plasma sind räumlich voneinander getrennt
  - Größere Freiheit bei Wahl der Prozessparameter
  - Reines Sputtern oder rein chemisches Ätzen je nach gewählter Prozessführung möglich
  - Komplexe Anlagen

# Wichtige Anwendungen in der MST

- Strukturierung von Dielektrika (Nitrid, Oxid)
- Strukturierung von Polysilizium
- Tiefenätzen von Silizium (DRIE)
- Strippen von Resist durch Veraschen (Plasmaätzen)
- Strukturierung von Metallen durch RIBE (Reaktive Ion Beam Etching)

# Arten des Trockenätzen

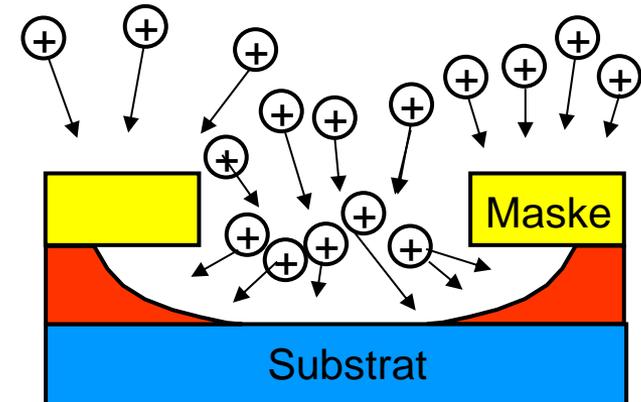
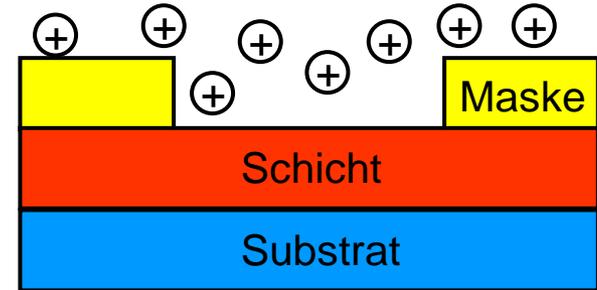


# CHEMISCHES TROCKENÄTZEN

# Chemisches Trockenätzen

- Rein chemisches Ätzen
- Die Scheibenoberfläche wird nicht durch beschleunigte Ionen geschädigt
- Das Ätzprofil ist auf Grund der frei beweglichen Gasteilchen isotrop
  - meist zum Abtragen kompletter Schichten bei hoher Ätzrate eingesetzt
- Anlagenvarianten:
  - Barrel-Ätzen
  - Plasma-Ätzen (Downstream)

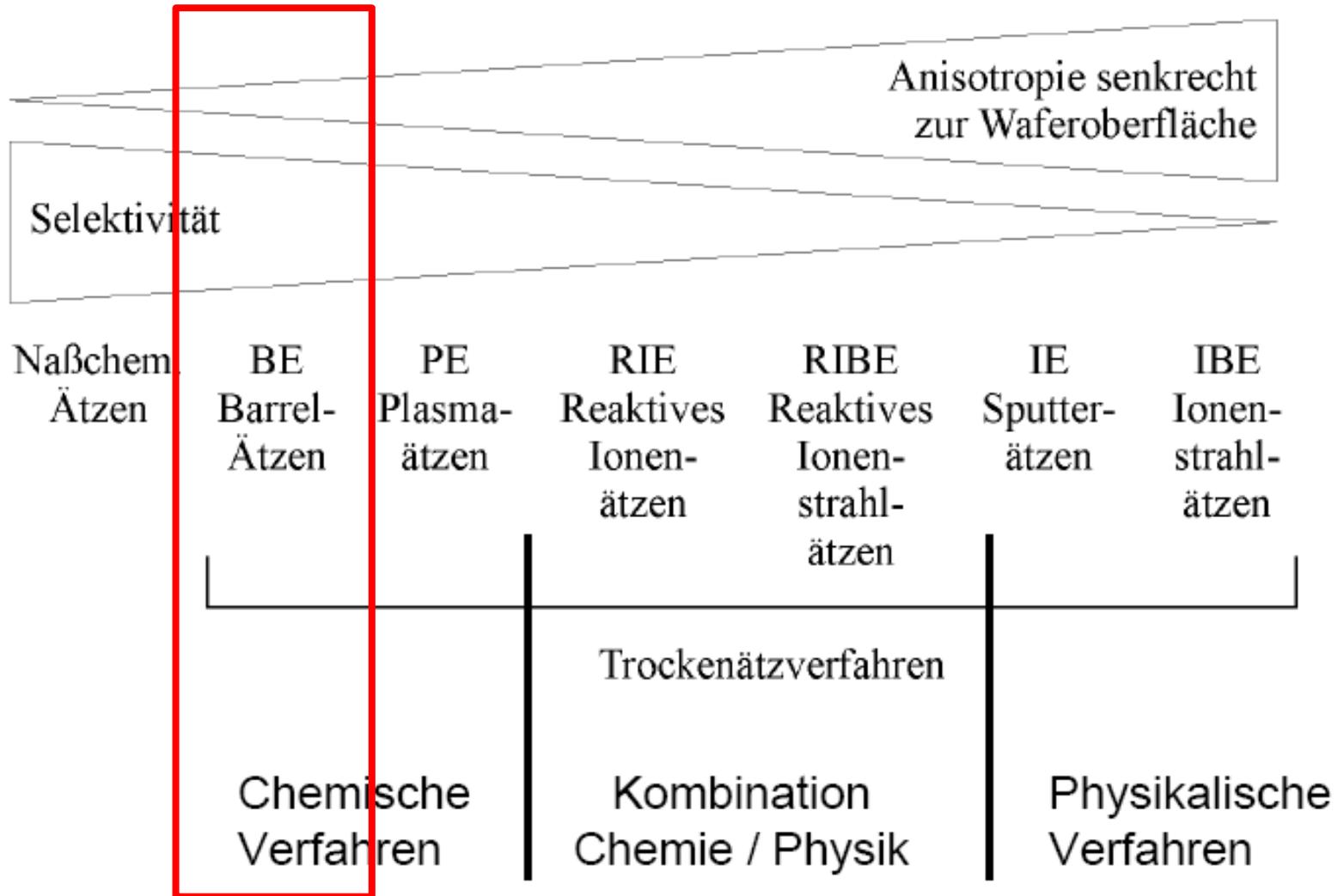
## Chemisches Trockenätzen



Isotropes chemisches Ätzen durch reaktive Ionen und Radikale

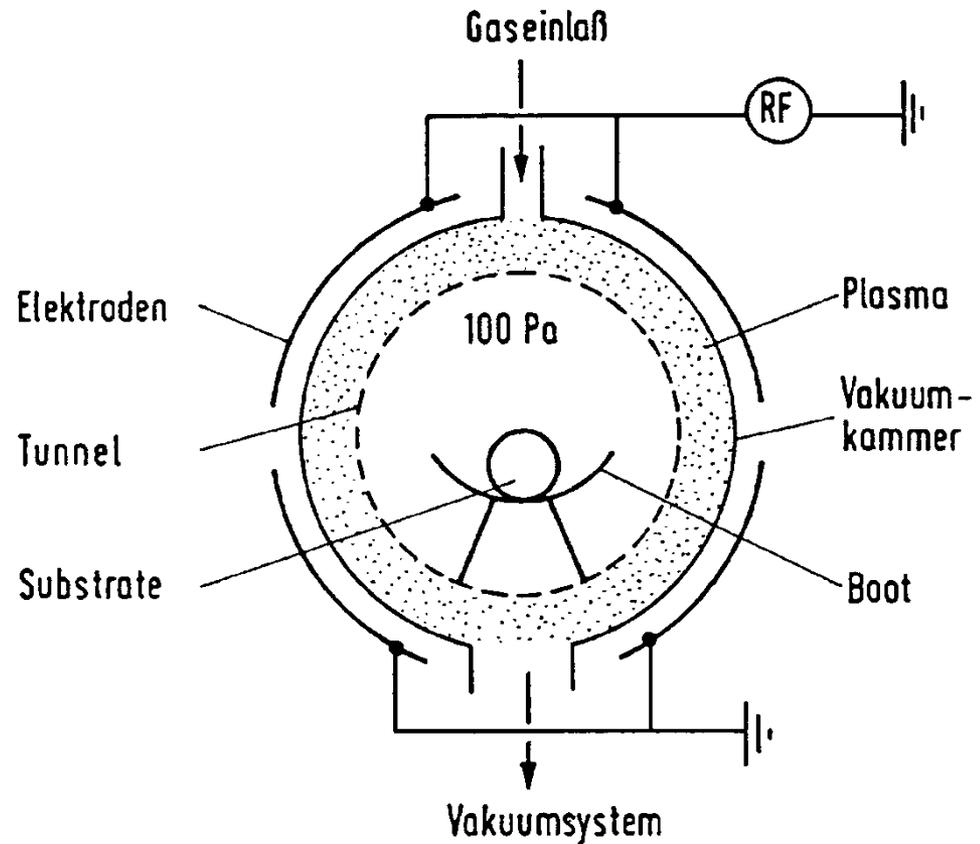
Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Selektivität ↔ Anisotropie



# Barrel Ätzen

- Trockenchemisches Verfahren
- Isotrop, Hohe Selektivität
- Aktivierung des Ätzgases im Plasma
- Trennung von Substrat und Plasma durch Lochzylinder
- Batchprozess:
  - Viele Wafer gleichzeitig
  - Hoher Durchsatz
- Kostengünstiges Verfahren
- Homogenität relativ schlecht
  - Unterschiede an Rand und in der Mitte des Wavers
- Hauptanwendung: Strippen von Photoresist und Röntgenresist in Sauerstoffplasma



Rohrförmiger Reaktor für Boote mit 25-50 Substraten

# Barrel Ätzen

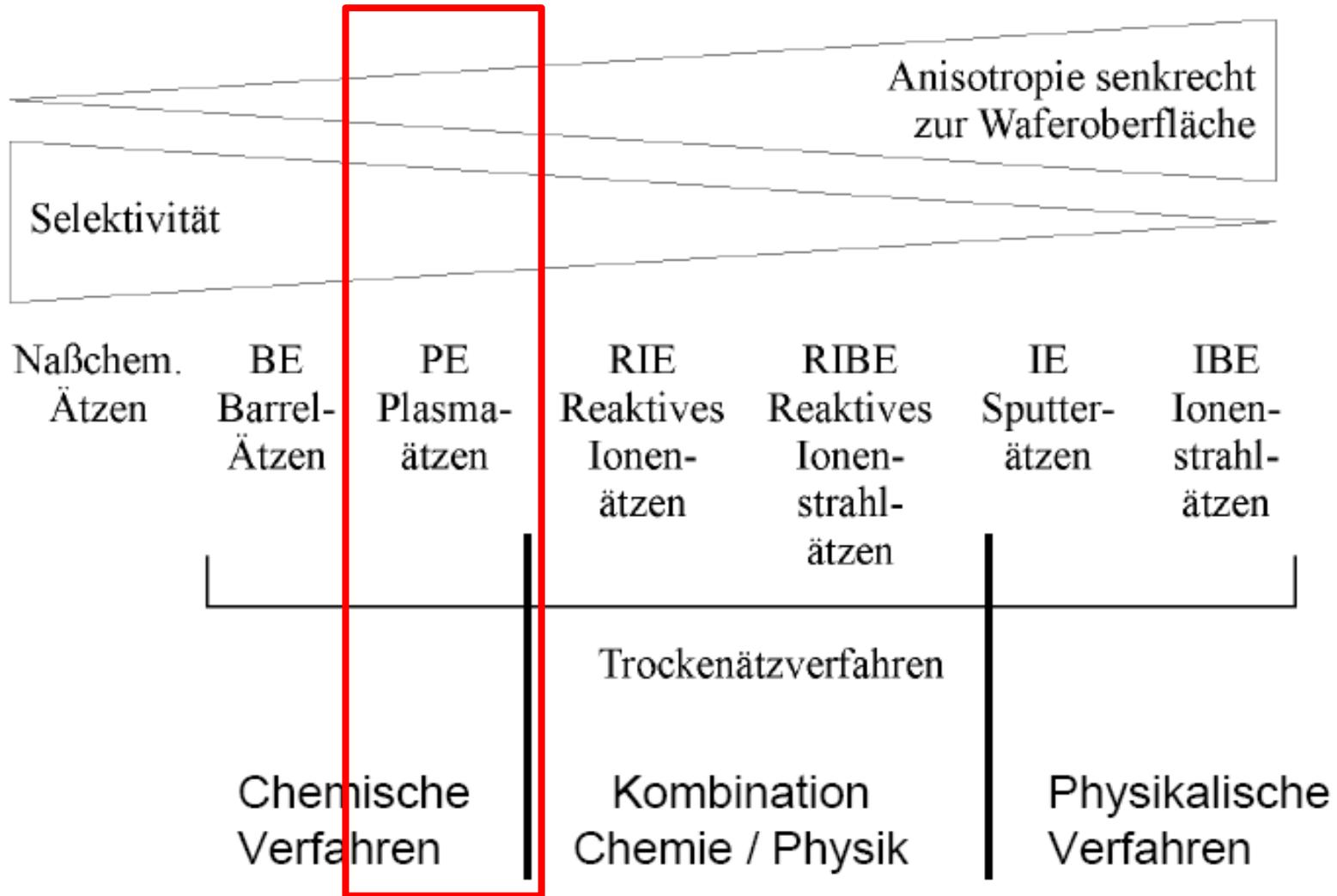
## Typische Anwendungen:

- isotropes Photoresist Strippen mit geringer Schädigung
- Strippen von stark vernetztem Resist
- isotrope SiN Rückseitenätzung
- Si Ätzen für Solarzellen (Ränder)
- Plasma Reinigung



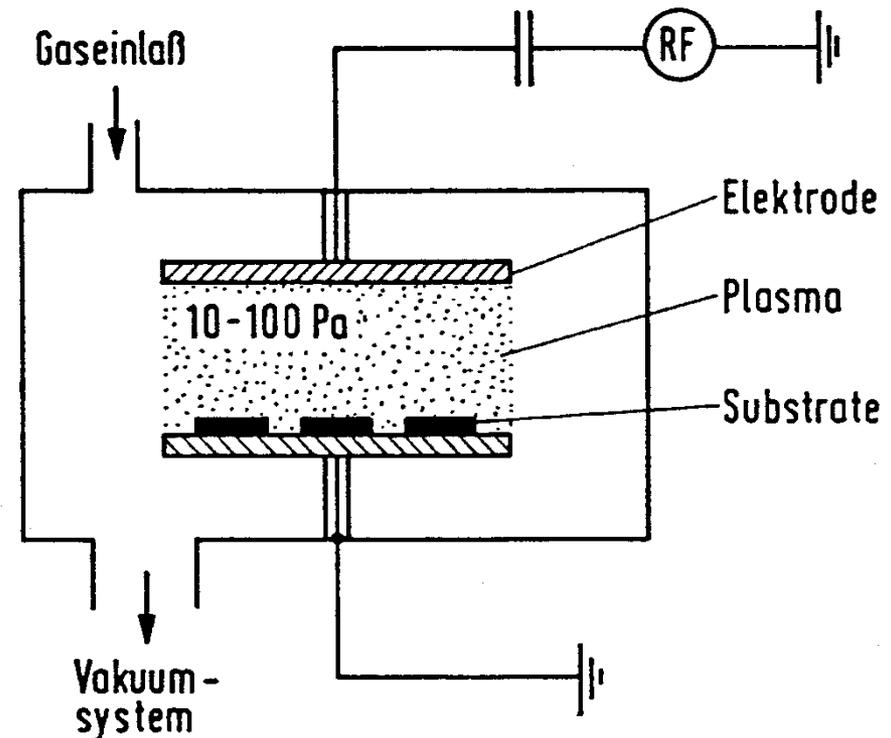
Rohrförmiger Reaktor für  
50 x 6" / 100 x 4" oder 50 x 8" / 100 x 6"

# Selektivität ↔ Anisotropie



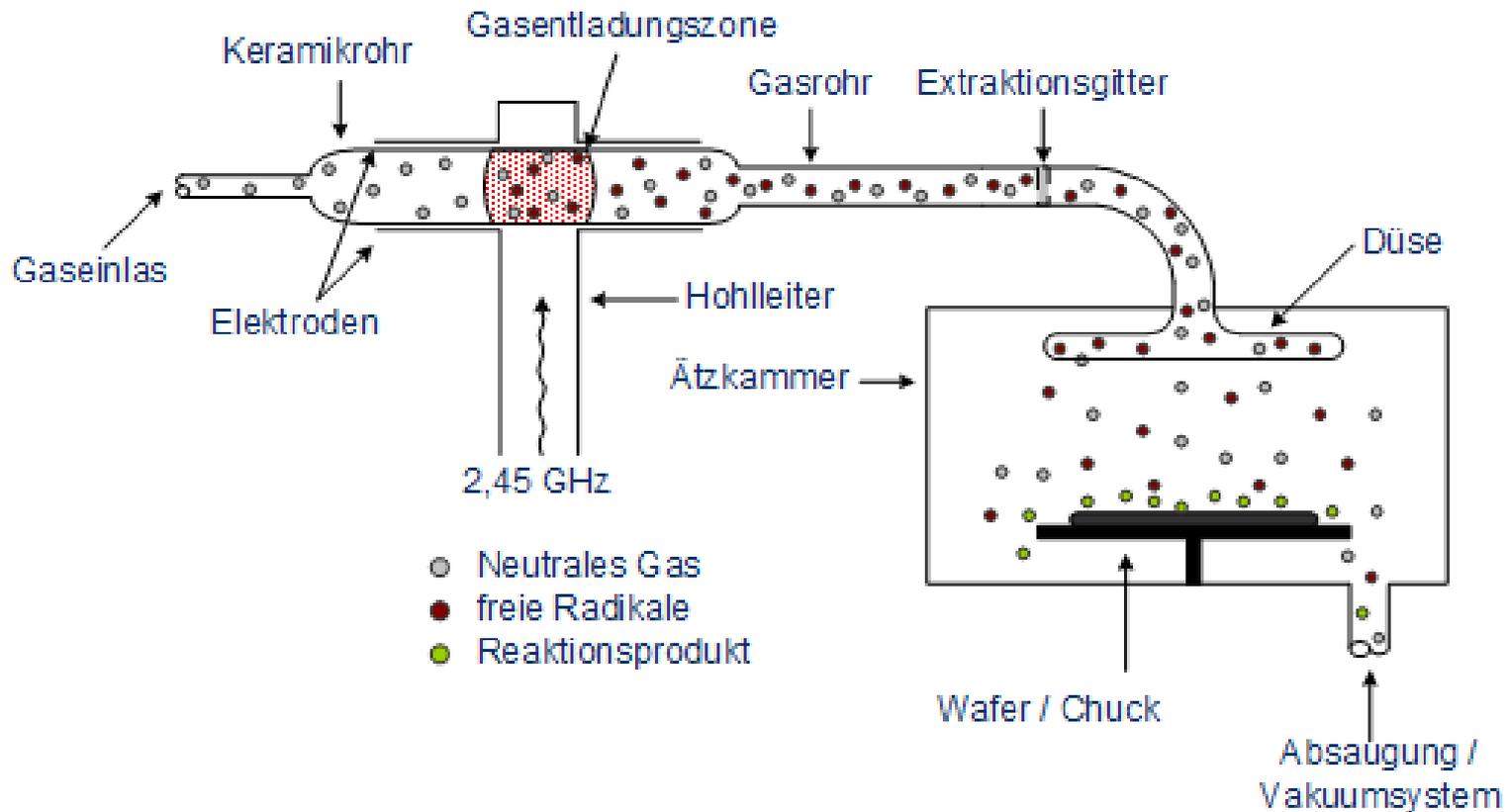
# Plasmaätzen

- Aktivierung des Ätzgases im Plasma (13,56 MHz)
- Gegenelektrode ist kapazitiv gekoppelt und lädt sich negativ auf; Substrate sind auf Erdpotential!
- Ätzabtrag durch chemische Reaktion mit den Plasmabestandteilen (Elektronen, Ionen, Radikale, Ätzgas), ergibt ähnliche Eigenschaften wie das nasschemische Ätzen
- Isotrop, hohe Selektivität
- Hohe Ätzrate
- Haupteinsatz: Ätzen geschlossener Schichten auf der Substratrückseite



Schema des Plasma-Ätzens im Parallel-Platten-Reaktor

# Plasmaätzen (Downstream-Ätzer)



Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Beispiele zum Plasmaätzen

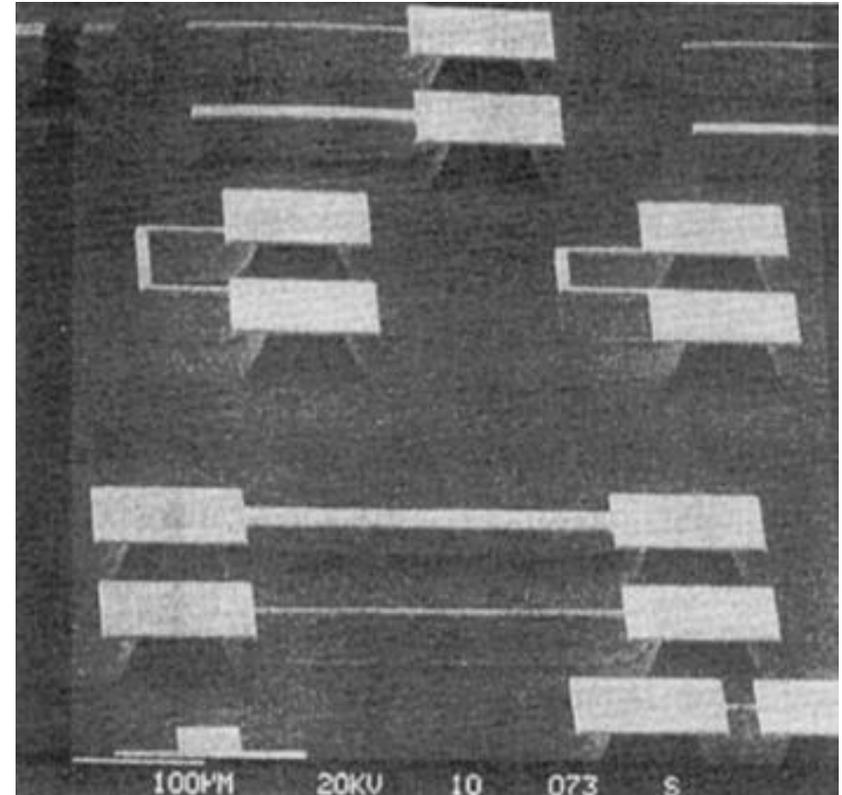
- Si-Ätzen mit  $CF_4$  (Tetrafluormethan)
  - Erzeugen der ätzenden Komponente im Plasma  
Fluorradikale:



- Chemische Vorgänge
  - Fluorradikale greifen Siliziumoberfläche an (Aufbrechen der Si-Si Bindung)
  - Ätzprodukt:  $SiF_4$

# Anwendung des Plasmaätzens

- Prozess-Flow:
  - Abscheidung Al auf Si Wafer
  - Strukturierung von Al
  - Plasmaätzen Si mit SF<sub>6</sub> / O<sub>2</sub>
    - Anisotropes Ätzen von Si
    - Al als Maskierung
  
- Konsequenz:
  - Vollständige Unterätzung von schmalen Strukturen (Brücken, Stege)
  - Großflächige Strukturen werden nur teilweise unterätzt

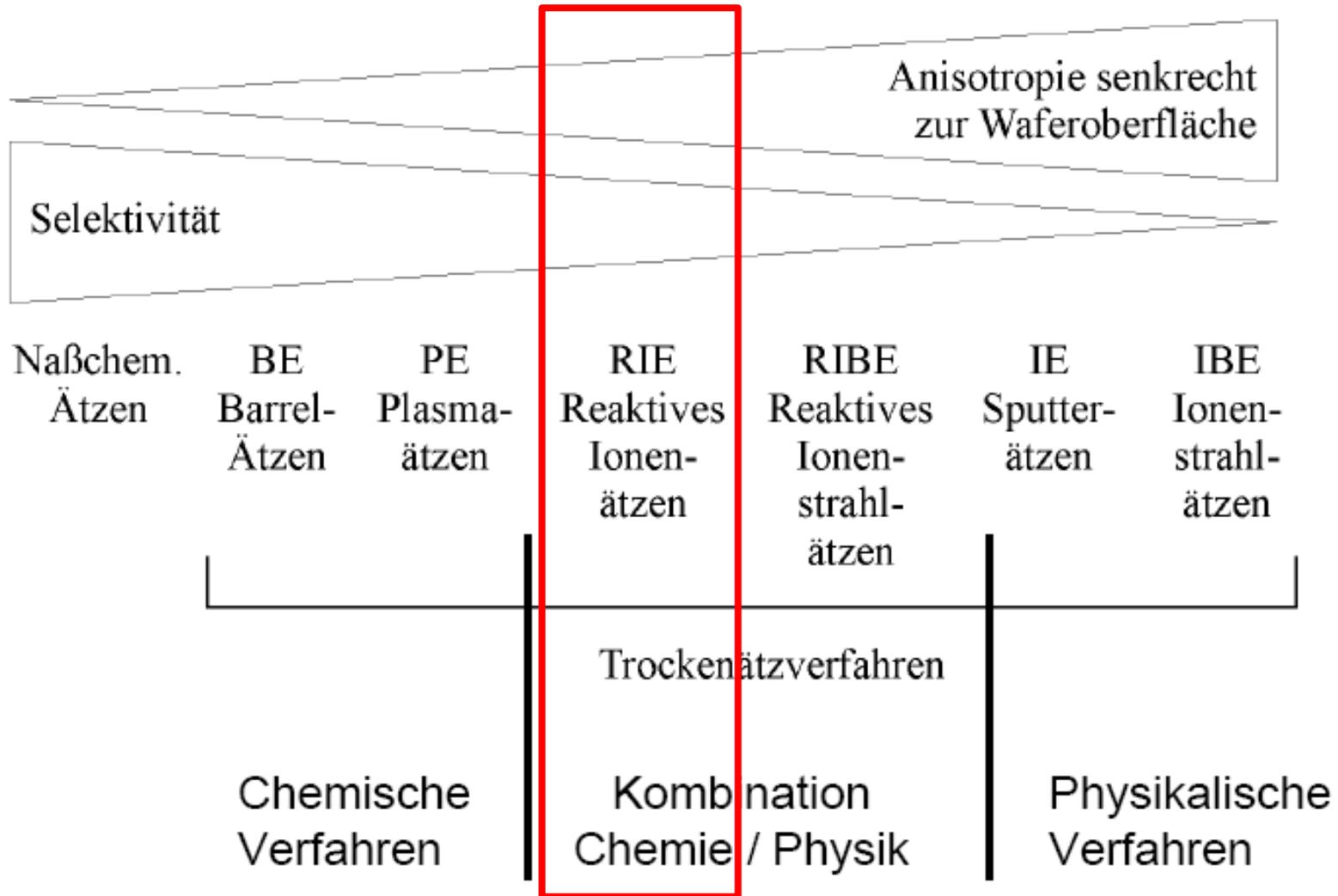


Freistehende Strukturen aus Aluminium ohne Opferschichttechnologie

Bildquelle: C. Lindner et al., Transducers 1991, p. 524

# CHEMISCH-PHYSIKALISCHES TROCKENÄTZEN

# Selektivität ↔ Anisotropie

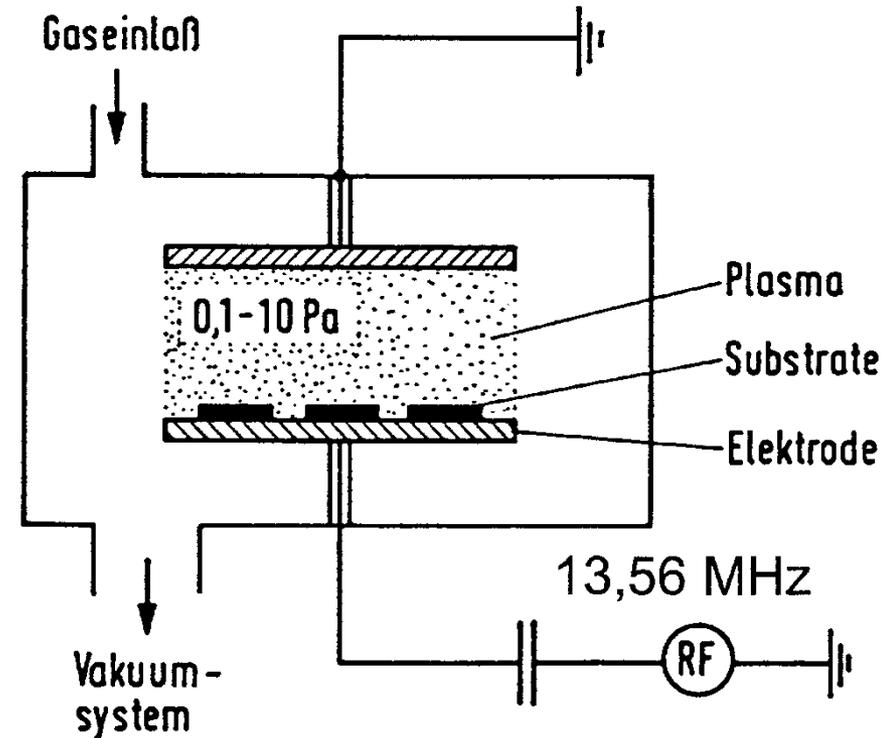


# Reaktives Ionenätzen (Reaktiv Ion Etching RIE)

- RIE ist Stand der Technik für das Ätzen feinsten senkrechter Strukturen und für das anisotrope Trockenätzen von Silizium

## Unterschiede zum Plasma-Ätzen:

- Die Substrate sind kapazitiv an RF-Quelle gekoppelt und laden sich negativ auf:
  - Die Bias-Spannung sorgt für einen gerichteten Beschuss der Substrate mit den positiv geladenen Ionen
- Gleichzeitiges Sputter-Ätzen und Chemisches Ätzen in einem Reaktor



# Reaktives Ionenätzen (Reaktiv Ion Etching RIE)

- In der Gasentladung entstehen
  - Reaktive Gase
  - Reaktive Ionen
  - Inerte Ionen
- Vorteile
  - Hohe Selektivität
  - Hohe Anisotropie
  - Hohe Ätzrate
    - Anisotropie und Ätzrate sind durch “Prozess – Chemie“ und Prozessparameter (RF-Leistung, Druck, Plattenabstand, Gasfluss,... ) einstellbar
  - Senkrechte Wände
  - Die Anisotropie wird durch eine Seitenwandpassivierung erreicht

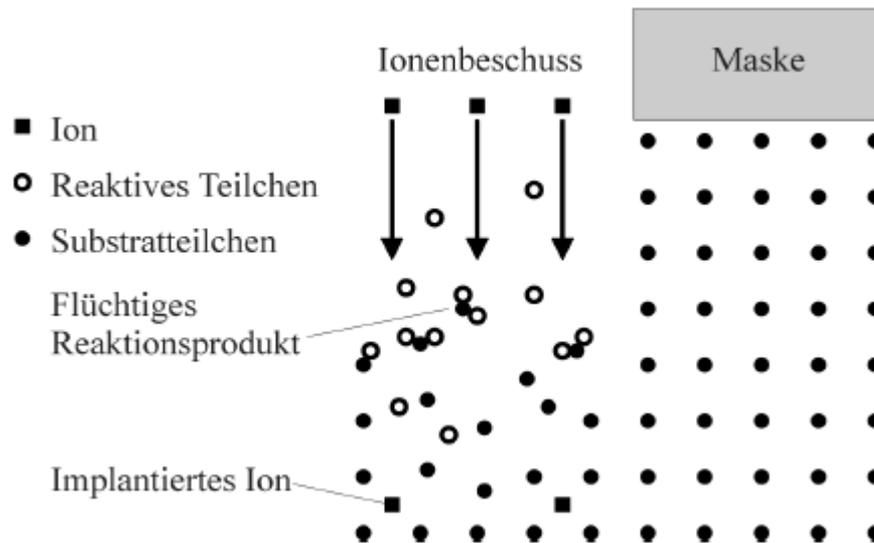
**Reaktives Ionenätzen ist daher die am weitesten verbreitete Trockenätztechnik**

# Effekte beim reaktiven Ionenätzen

## ■ Erhöhung der Ätzrate

### ■ Schädigung der Oberfläche:

- Ionen mit einer Energie  $> 50$  eV erzeugen Gitterfehler und brechen Oberfläche auf
  - Chemische Reaktion geht dadurch schneller
  - Gitterfehler reichen mehrere Atomlagen in die Tiefe
- Ionen mit einer Energie  $< 50$  eV sputtern ätzhemmende Oberflächenbeläge ab

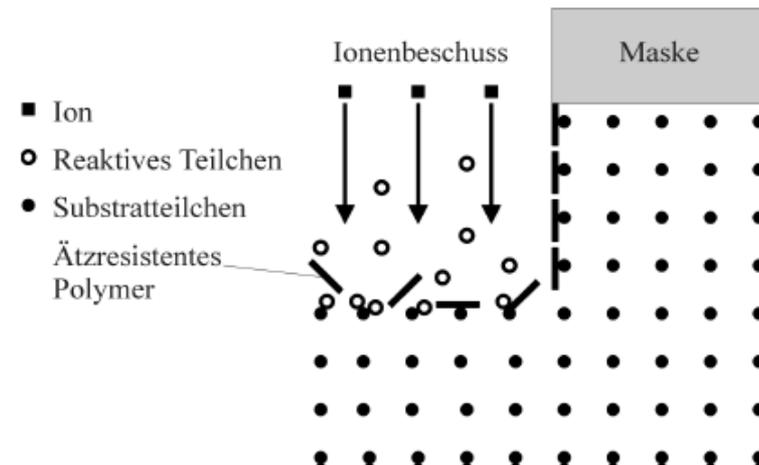
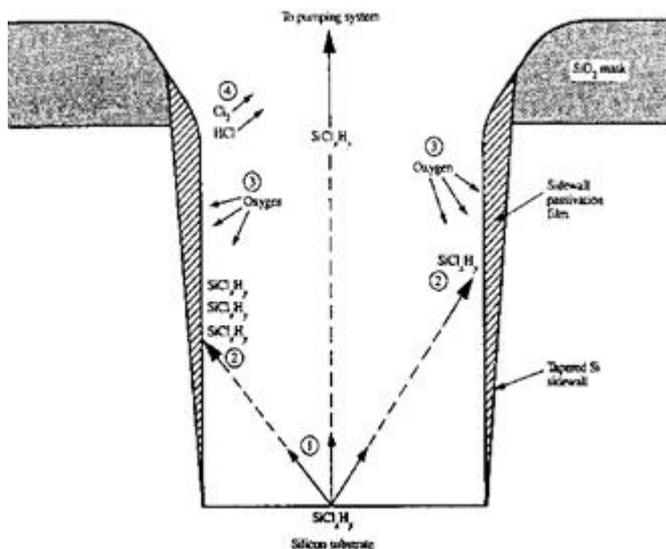


Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Effekte beim reaktiven Ionenätzen

## ■ Seitenwandpassivierung

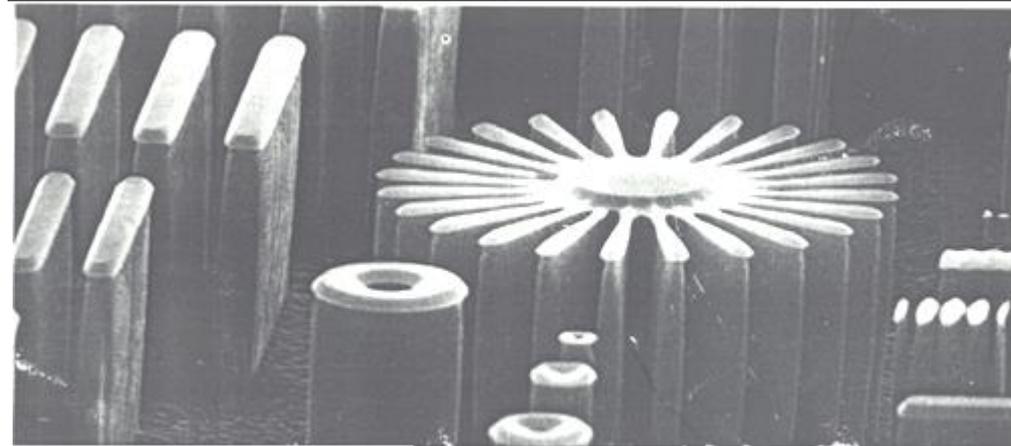
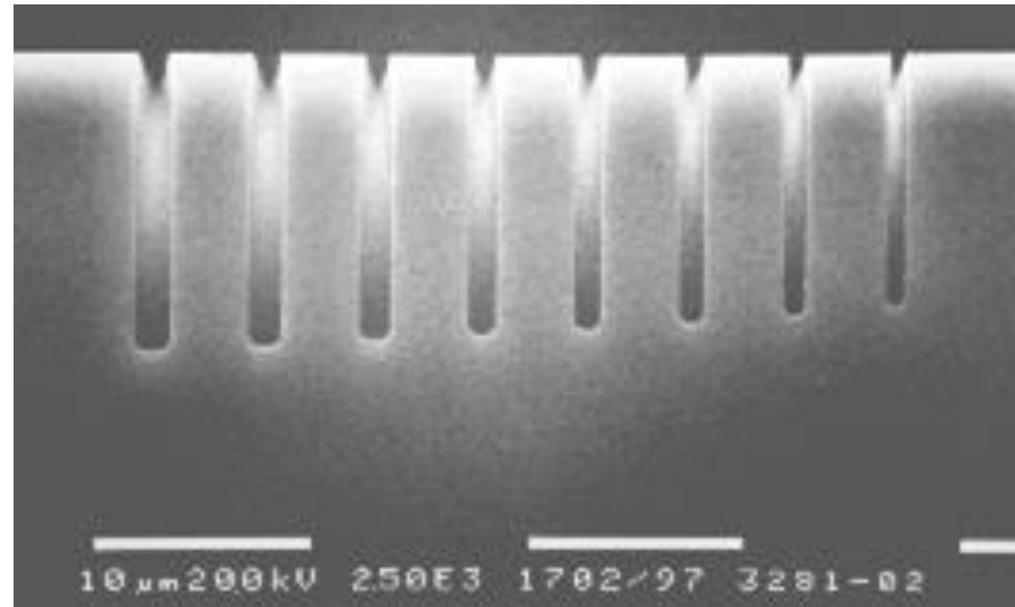
- Bildung von Polymeren aus den Ätzgasen mittels Plasmapolymersation
- Polymere werden chemisch nicht angegriffen, sie werden jedoch von den Ionen physikalisch abgesputtert
- Polymerablagerung am Boden werden durch Sputterprozesse entfernt
- Ablagerung an der Seitenwand bleiben, da kein Ionenbeschuss
  - Polymere verhindern weitere chemische Reaktion
  - Seitenwand ist passiviert und wird nicht mehr weiter geätzt



Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

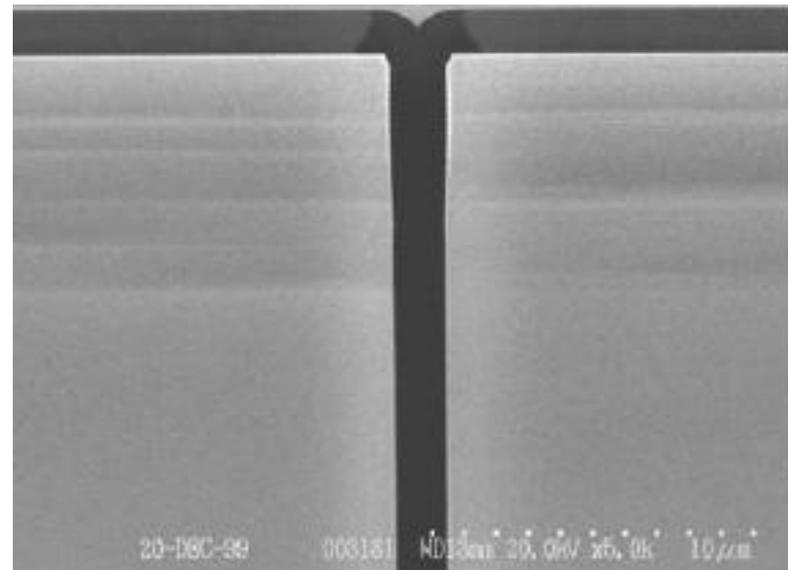
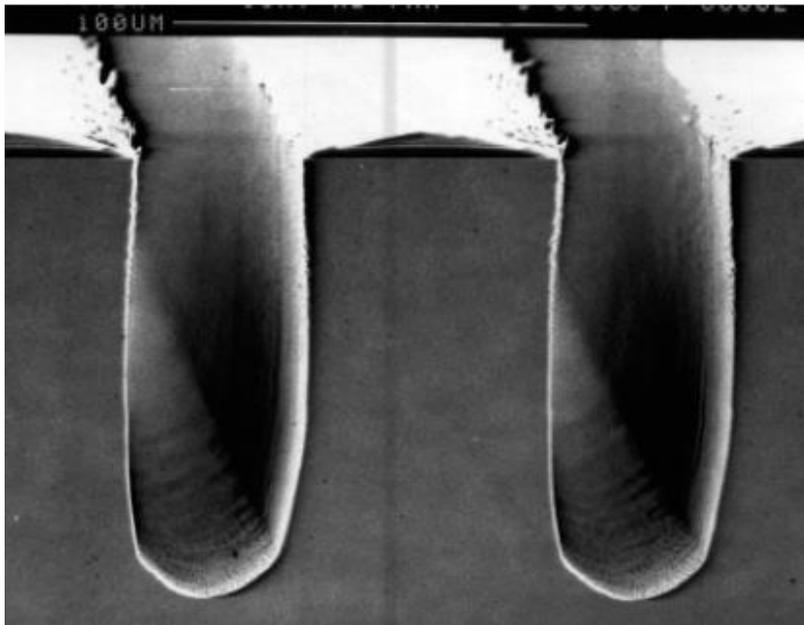
# Anisotropie bei RIE durch Seitenwandpassivierung

- Bildung einer Polymer-Passivierungsschicht durch Betrieb als PECVD- Reaktor
- Wechsel zwischen Ätzprozeß und Polymerabscheidung
- Abtrag der Polymerschicht durch Sputtern bevorzugt am Trench-Boden
- Verarmung des Plasmas in den schmälere Gräben (Loading Effekt)
- Design mit möglichst gleichen Trenchbreiten anstreben



# Anwendung des reaktiven Ionenätzens

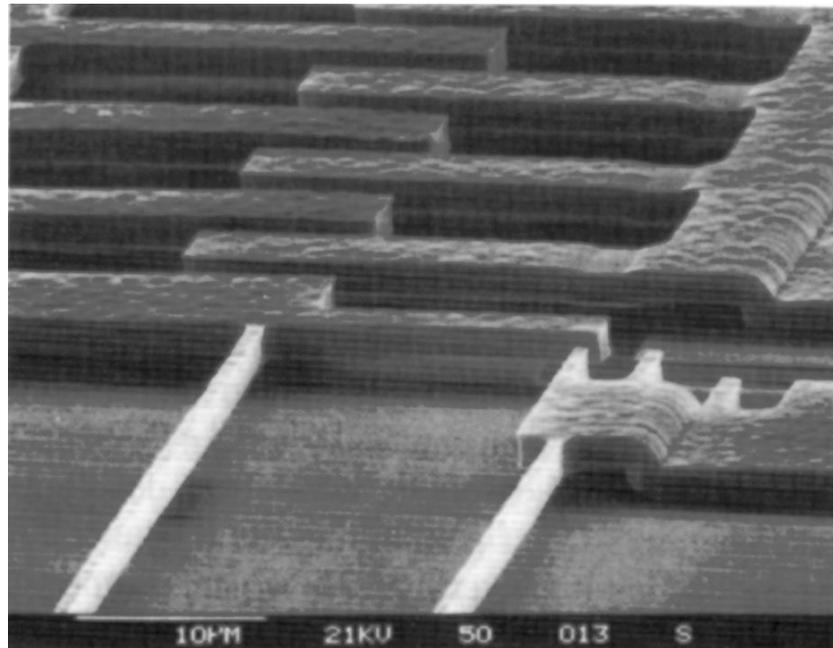
- RIE-Ätzen wurde für die VLSI-Technologie entwickelt
- Beispiel: Tiefe Gräben im CMOS-Prozess
  - Tiefe Gräben (trenches) erlauben hohe Kapazitäten von integrierten Kondensatoren bei geringem Flächenbedarf



Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

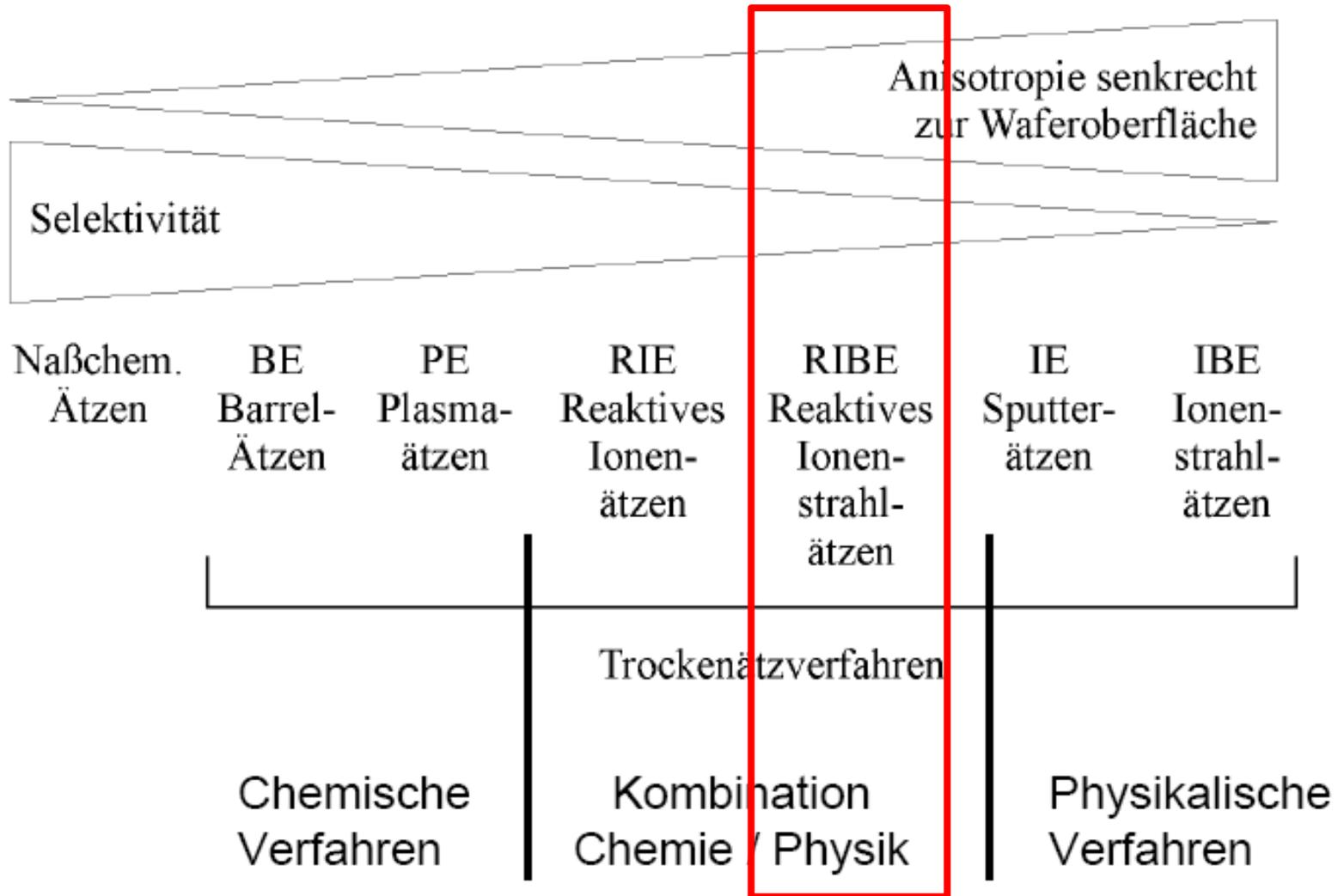
# Anwendung des reaktiven Ionenätzens

- Freistehende Poly-Siliziumstrukturen in der Oberflächenmikromechanik
  - Vorteile:
    - Präzises Ätzen und senkrechte Wände ermöglichen kleine Abstände zwischen den Elektroden
- stärkere elektrostatische Kräfte



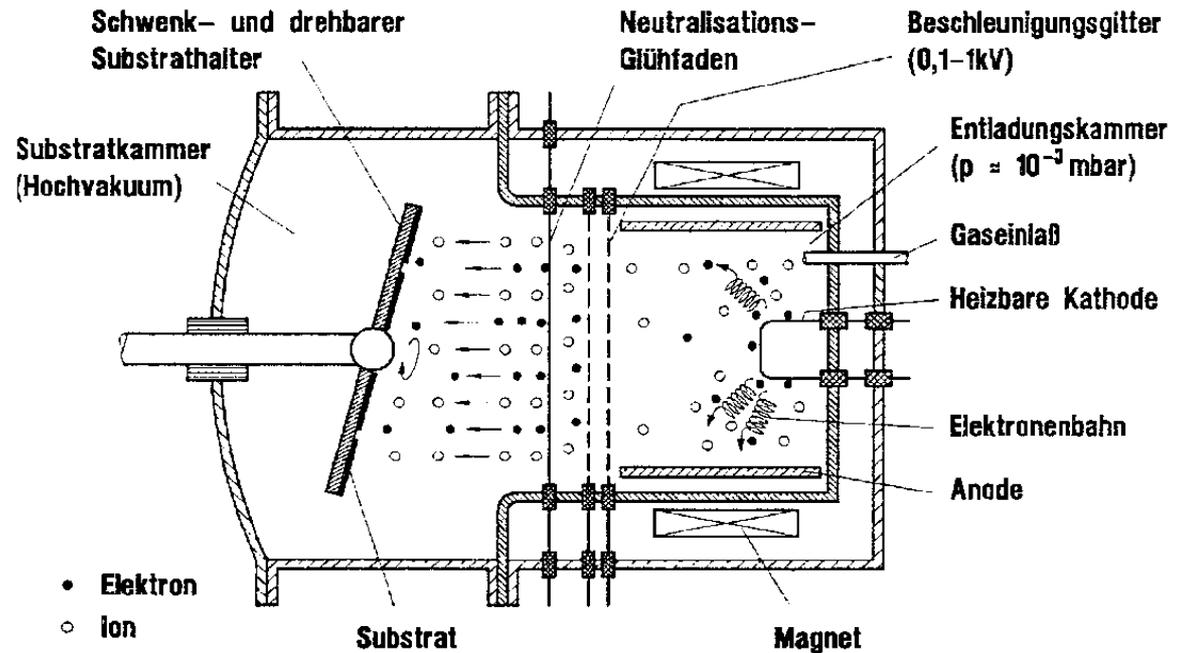
Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Selektivität ↔ Anisotropie



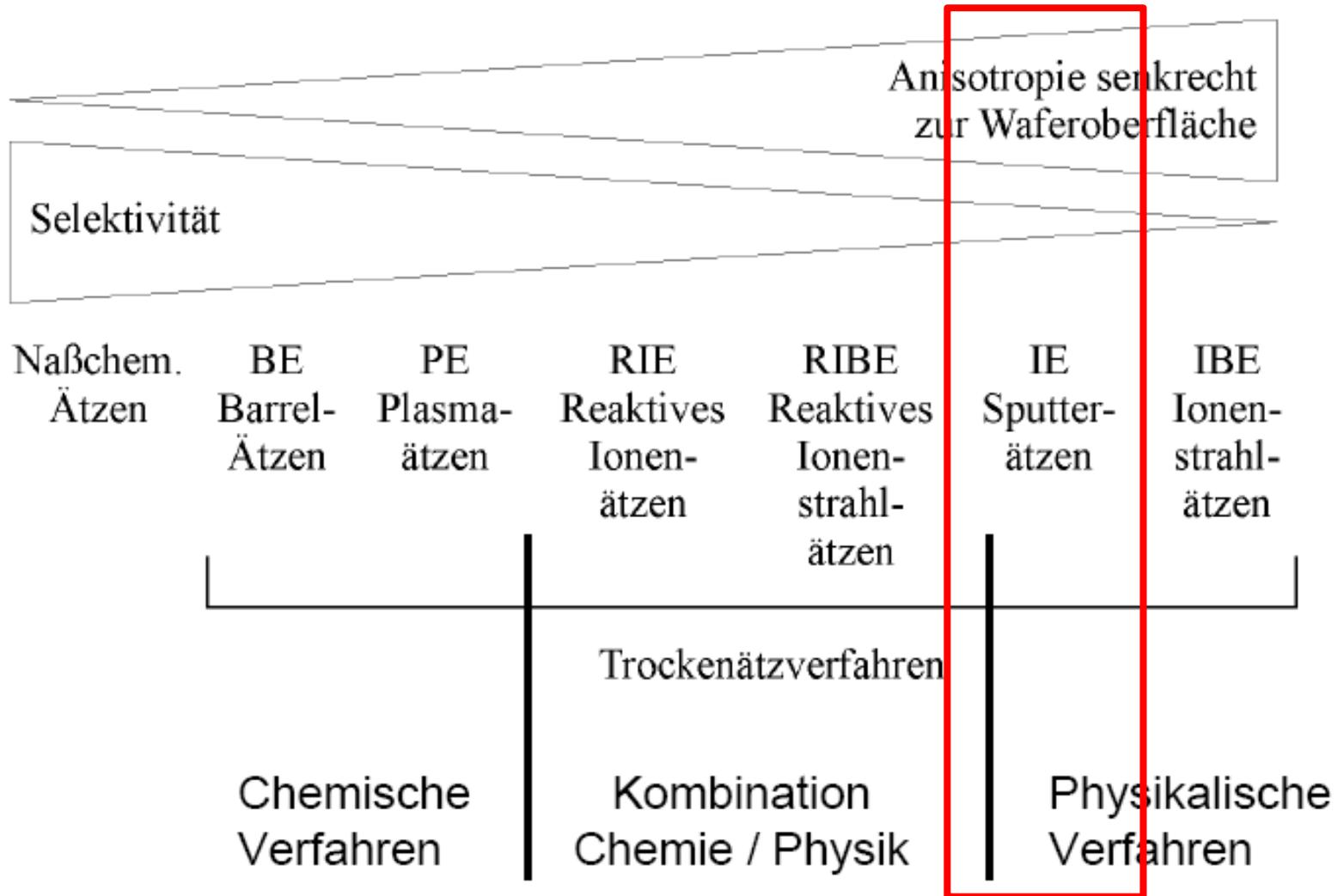
# Reaktives Ionenstrahlätzen (RIBE)

- Gleiche Anordnung wie beim Ionenstrahlätzen
- Ionenquelle wird mit reaktivem Gas betrieben
- Betrieb im Hochvakuum
- Beschuss mit reaktiven Ionen
- Isotrop bis anisotrop
- Selektivität mittel



# PHYSIKALISCHES TROCKENÄTZEN

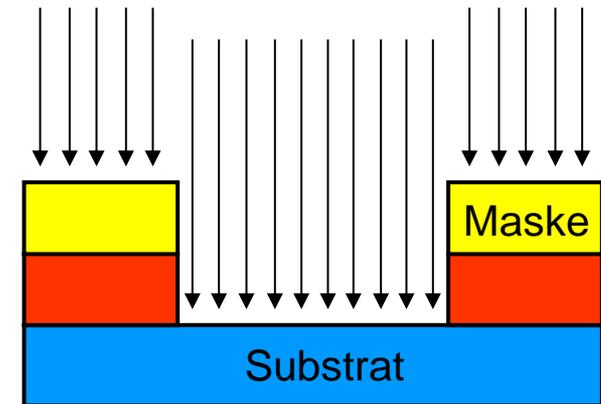
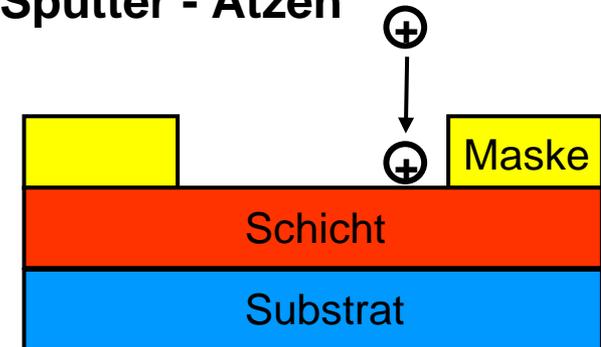
# Selektivität ↔ Anisotropie



# Sputterätzen

- Physikalisches Ätzen mit inerten Ionen
  - meist  $\text{Ar}^+$  bei 0,1 bis 1 keV
  
- Hohe Anisotropie
  - Ätzrichtung durch Ionenstrahl vorgegeben
  
- Geringe Selektivität
  - Sputterraten für alle Materialien in derselben Größenordnung
  - Maske wird ebenfalls abgesputtert
  - Limitierte Ätztiefe auf 2 bis 3-fache Maskendicke

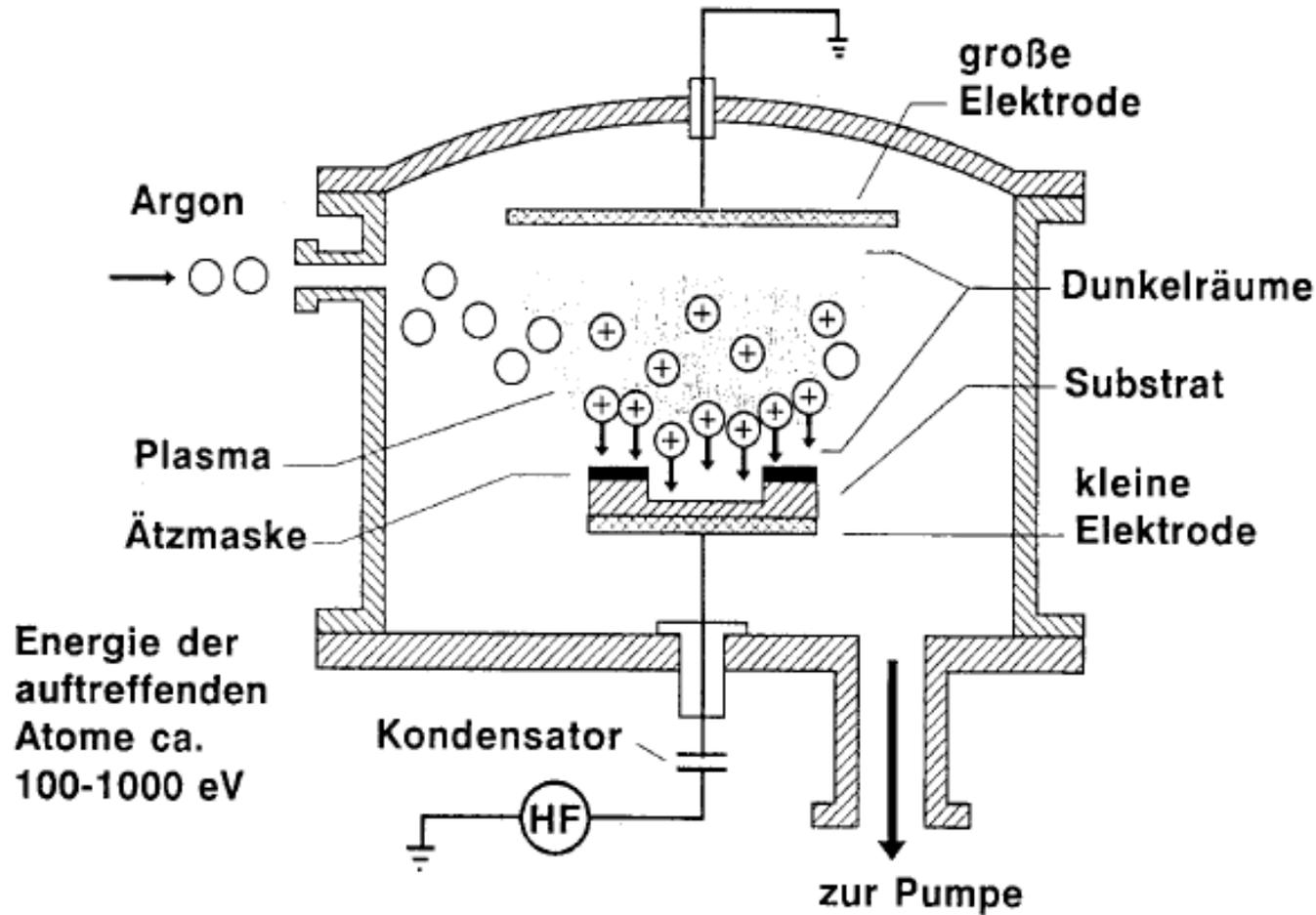
## Sputter - Ätzen



Anisotroper Abtrag durch Beschuss mit gerichteten Ionen (E-Feld)

Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Sputterätzen



Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Sputterätzen

## ■ Elektrodenkonfiguration

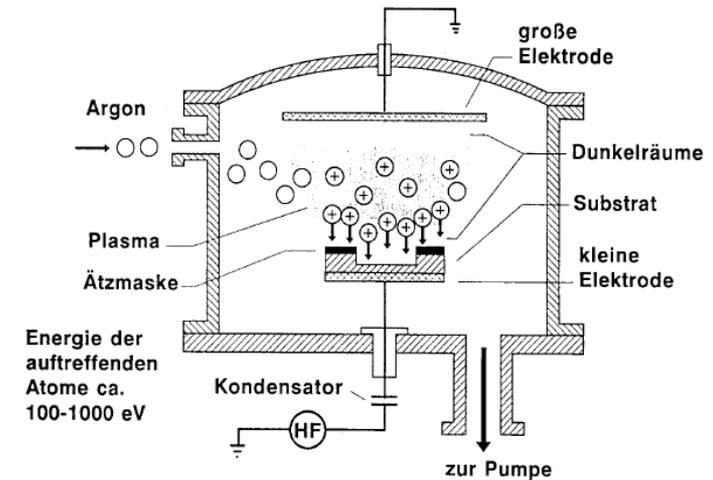
- Elektrodenabstand ca. 1-5 cm
- Unterschiedlich große Flächen
- Wafer auf Bodenelektrode im direkten Kontakt mit Plasma

## ■ Plasma

- Inertgas (Typisch Argon) bei Druck 0,5 -10 Pa
- Gasentladung auf mittleren Bereich zwischen Platten beschränkt
- Größerer Spannungsabfall an kleinerer Elektrode
  - Spannungsabfall  $\sim (\text{Flächenverhältnis})^{-4}$
  - Elektroden laden sich negativ
- Positive Ionen werden auf Elektrode hin beschleunigt
  - Primär auf kleine Elektrode (höherer Spannungsabfall)
  - auch auf gegenliegende Elektrode

# Sputterätzen

- Feldlinien stehen senkrecht zur Waferoberfläche
  - Anisotropie bei niedrigen Drücken
  - Bei höheren Drücken nehmen Stöße zwischen Ionen zu
    - Anisotropie wird weniger ausgeprägt
  
- Selektivität
  - Sputterätzen ist ein physikalisches Prinzip
    - sehr geringe Selektivität



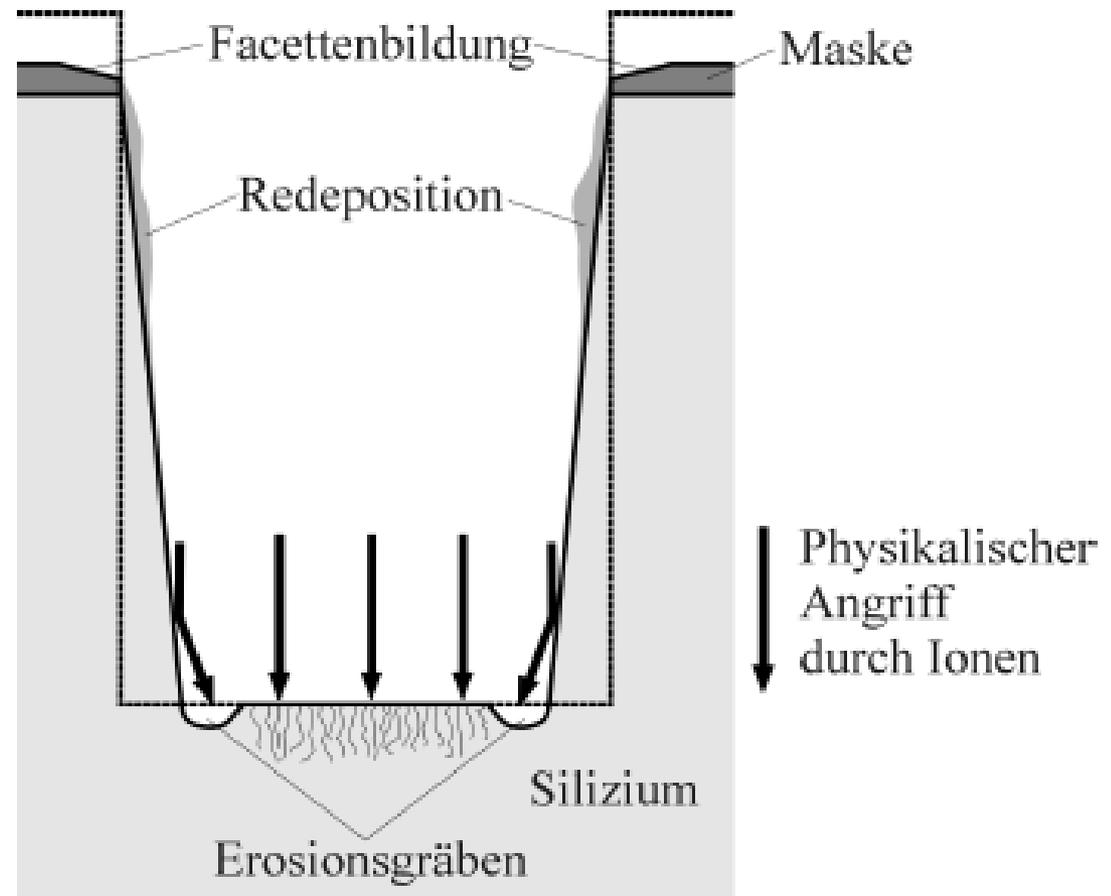
# Probleme beim Sputterätzen

- Redeposition
- Erosionsgräben (trenching)
- Absputtern der Maske
- Facettenbildung (faceting)
- Implantation der Ionen

# Probleme beim Sputterätzen

## ■ Redeposition

- Keine chemische Umsetzung beim Zerstäuben
- Teilchen können sich also wieder niederschlagen
- Ablagerung insbesondere an Seitenwänden

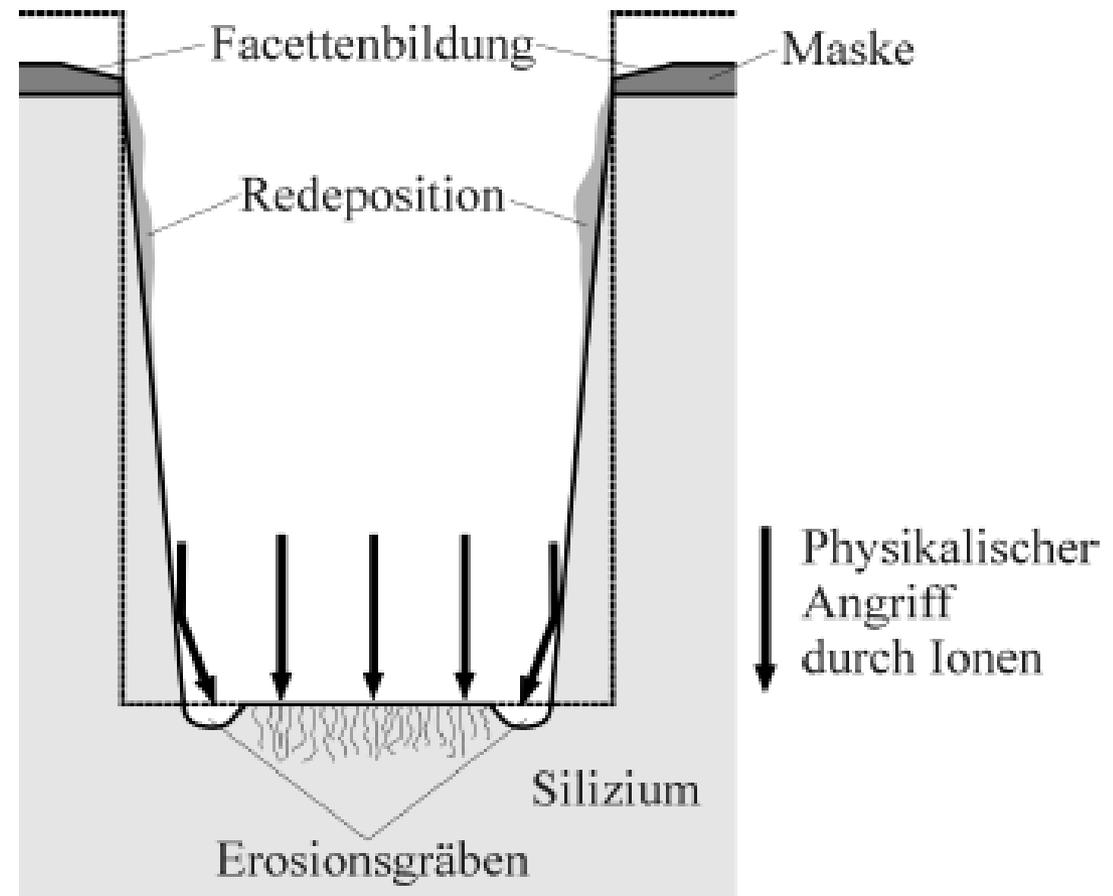


Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Probleme beim Sputterätzen

## ■ Erosionsgräben

- Ionen werden an Seitenwänden reflektiert
- Lokale Erhöhung der Ionenstromdichte am Boden in Wandnähe
- Höhere Ätzrate
- Ausbildung von Erosionsgräben



Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Probleme beim Sputterätzen

- Facettenbildung (faceting)
  - Maximum der Sputterausbeute liegt bei ca.  $70^\circ$ 
    - Flächen mit dem idealen Einfallswinkel werden am schnellsten geätzt
    - Ecken werden bevorzugt abgesputtert (faceting)
  - Durch Winkelabhängigkeit bilden sich bei anfänglich senkrechten Kanten im Laufe des Ätzprozesses schräge Flanken
  - Bei streifendem Einfall der Ionen an den Wänden wird kein Material an der Wand abgetragen
    - Selbst leicht geneigte Seitenwände werden nicht abgesputtert
  - Mit Sputterätzprozessen können keine senkrechten Wände erzeugt werden

# Probleme beim Sputterätzen

## ■ Implantation

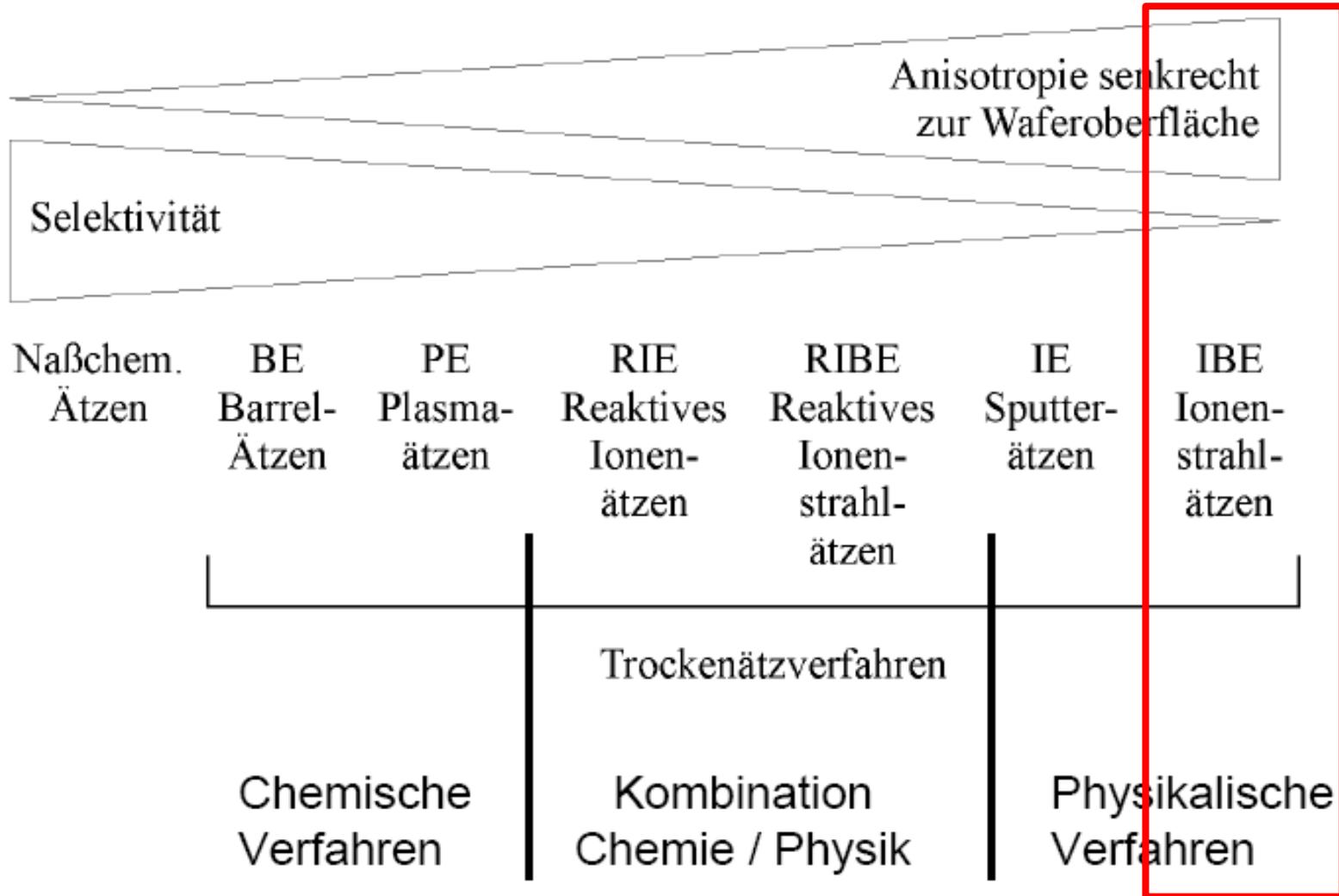
- Energie der sputternden Ionen ist oft ausreichend für eine oberflächennahe Implantation

→ Schädigung und evtl. Dotierung der oberflächennahen Schicht bis ca.  $1\mu\text{m}$  Tiefe

## ■ Sonstige Probleme:

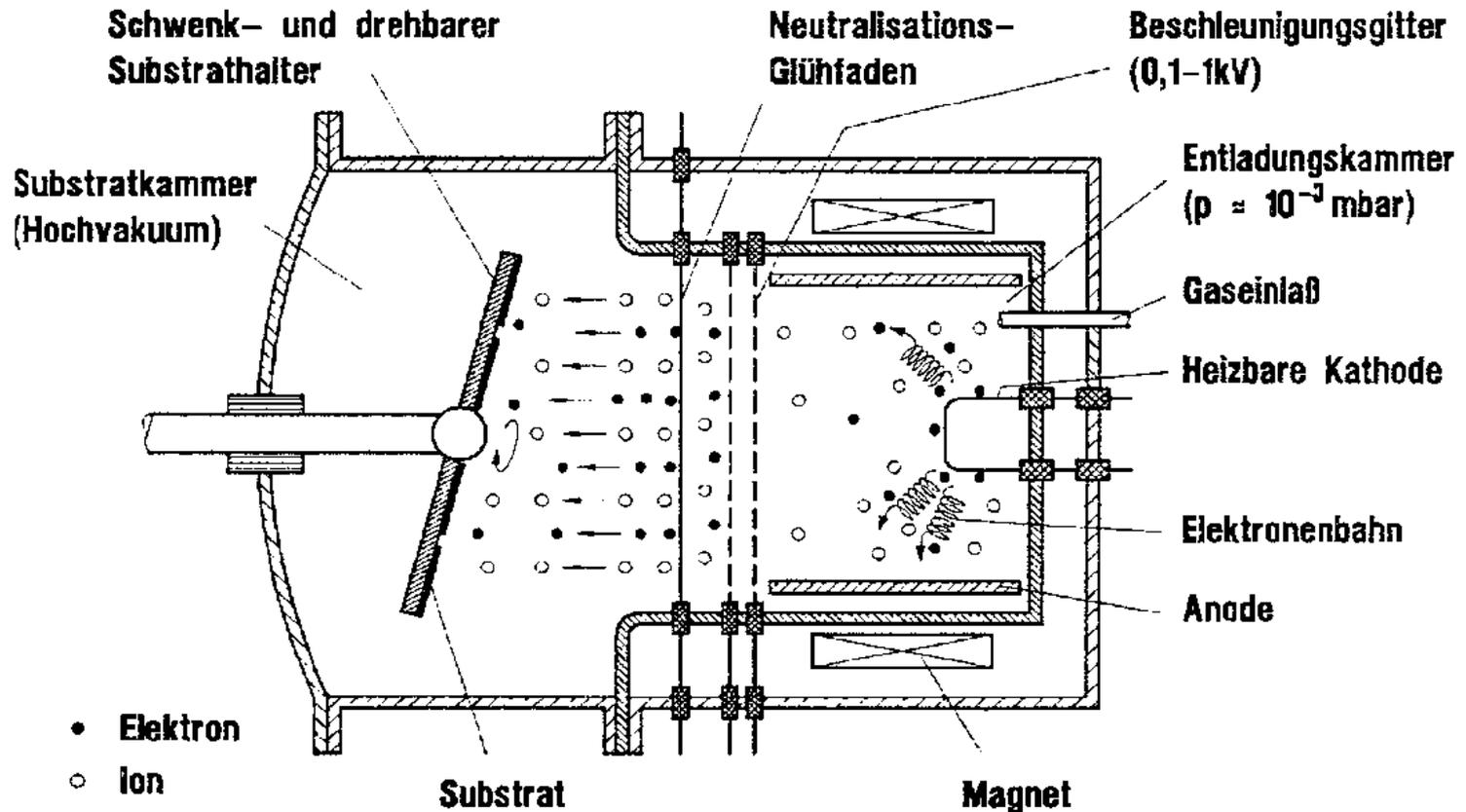
- Sputternde Ionen werden teilweise in den Reaktionsraum zurückgestreut und treffen die Apparatur
  - Apparatur wird ebenfalls abgesputtert
  - Kontamination / Verunreinigung
- Geringe Ätzrate von lediglich einigen  $10\text{ nm/min}$ 
  - geringer Durchsatz

# Selektivität ↔ Anisotropie



# Ionenstrahlätzen

- Räumliche Trennung von Substraten und Plasma

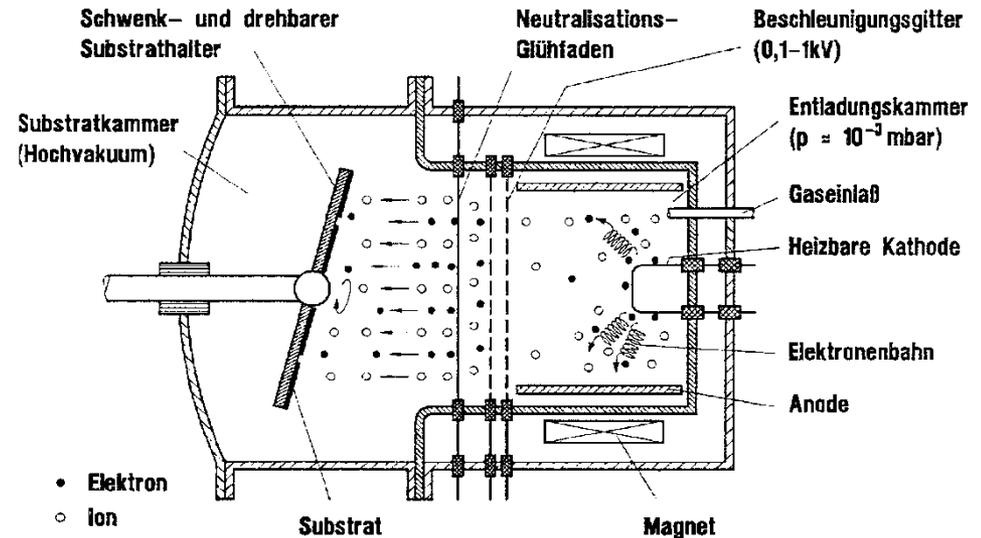


- Gleiche Anordnung wie beim reaktiven Ionenstrahlätzen

Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Ionenstrahlätzen

- Räumliche Trennung von Substraten und Plasma
  - Ionenstromdichte und Ionenenergie unabhängig kontrollierbar
  - Keine Kontamination durch Abspattern
  
- Ionenstrom und Ionenenergie
  - 10% bis 30% der im Plasma erzeugten Ionen werden extrahiert
  - Beschleunigungsgitter (0.1 – 1kV)
  - Neutralisation des Ionenstroms mit Elektronen verhindert Aufweitung

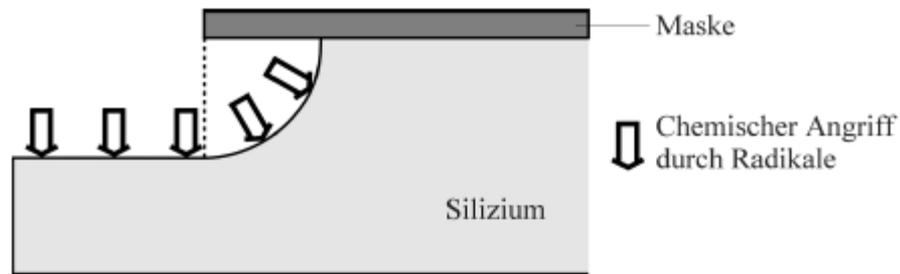


Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

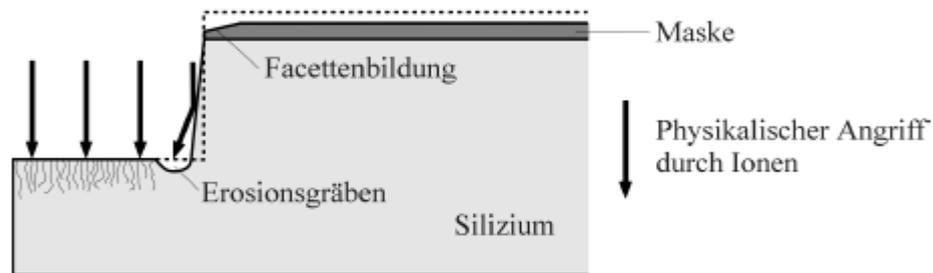
# Ionenstrahlätzen

- Inertes Ätzgas (Ar, N<sub>2</sub>)
- Druck: Ionenkanone  $P \approx 0,1$  mTorr, Parallelplattenreaktor 10 -100 mTorr.
  - Je geringer der Druck ist, desto stärker anisotrop/ gerichtet ist der Ätzprozess.
- Alle Materialien ätzbar
- Hohe Anisotropie ( $V_{\text{horizontal}} \ll V_{\text{senkrecht}}$ )
- Geringe Selektivität, da die Sputterrate nur schwach von der Masse der Atome abhängt.
- Geringe Ätzrate, da die Ionendichte im Strahl gering ist.

# Vergleich der Ätzprofile



Plasmaätzen



Sputterätzen



Reaktives Ionenätzen

Bildquelle: [www.imtek.de](http://www.imtek.de)

# Trockenätzen Zusammenfassung

- BE: Barrel Etching = Barrel- Ätzen
  - Das chemische Ätzen erfolgt praktisch ausschließlich mit **freien Radikalen**.
  - Das Ätzprofil ist jedoch **stark isotrop** und die **Selektivität ist gut**
- PE: Plasma Etching = Plasmaätzen
  - Chemisches Ätzen mit **freien Radikalen** und geringer Unterstützung durch **Ionen**.
  - Das Ätzprofil ist **isotrop bis anisotrop** und die **Selektivität ist gut**
- RIE: Reaktive Ion Etching = Reaktives Ionenätzen
  - Gerichtetes, stark ionenunterstütztes Ätzen mit **reaktiven Ionen**, die in einer Gasentladung erzeugt werden, wobei das Substrat mit dem Plasma in Berührung steht.
  - Ätzprofil ist **isotrop bis anisotrop**, die **Selektivität ist ausreichend bis gut**

# Trockenätzen Zusammenfassung

- RIBE: Reaktive Ion Beam Etching = Reaktives Ionenstrahlätzen
  - Gerichtetes, stark ionenunterstütztes Ätzen mit **reaktiven Ionen**, die wie beim IBE erzeugt und auf das Substrat **beschleunigt** werden.
  - Das Ätzprofil ist **isotrop bis anisotrop** und die **Selektivität ist ausreichend bis gut**
- IE: Ion Etching = Sputterätzen
  - **Physikalisches Ätzen mit Inert-Ionen**, die in einer Gasentladung erzeugt und auf das Substrat beschleunigt werden, wobei das Substrat mit dem Plasma in Berührung steht
  - Ätzprofil ist **sehr anisotrop**, die **Selektivität ist sehr gering**
- IBE: Ion Beam Etching = Ionenstrahlätzen
  - **Physikalisches Ätzen mit Inert-Ionen**, die in einer Gasentladung erzeugt und mit einer **Ionenkanone** auf das Substrat beschleunigt werden, wobei sich das Substrat außerhalb des Plasmas in einer auf Hochvakuum gehaltenen Ätzkammer befindet
  - Ätzprofil ist **sehr anisotrop**, die **Selektivität ist sehr gering**

# Aufgabensammlung

- Beschreiben sie den Unterschied zwischen Anisotropie und Isotropie.
- Was ist der Anisotropiefaktor?
- Was ist Selektivität?
- Warum kann man Silizium anisotrop ätzen?
- Wie kann man die verschiedenen Ätzprozesse einteilen?
- Was ist Sputterätzen? Wie funktioniert das Prinzip?

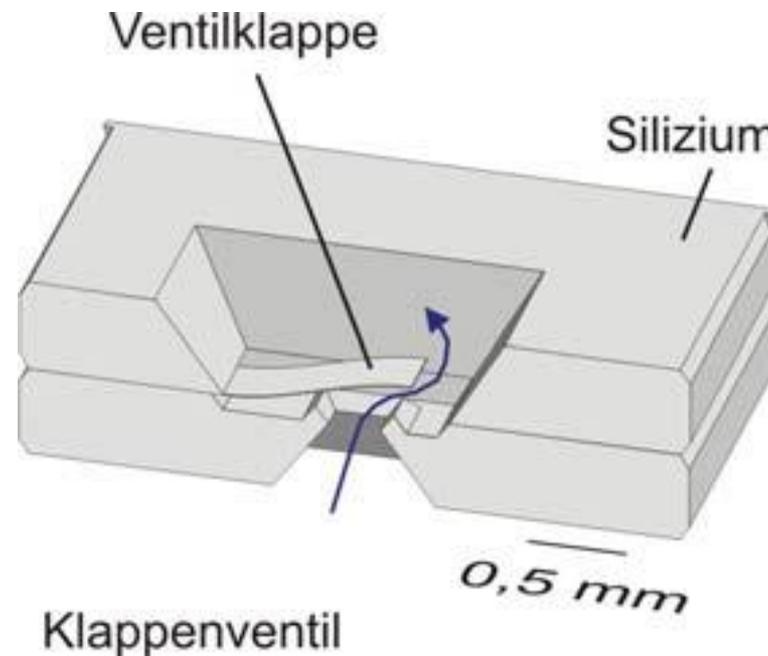
# ÄTZSTOPPVERFAHREN

# Ätzstoppverfahren

- Grundlegende Frage:

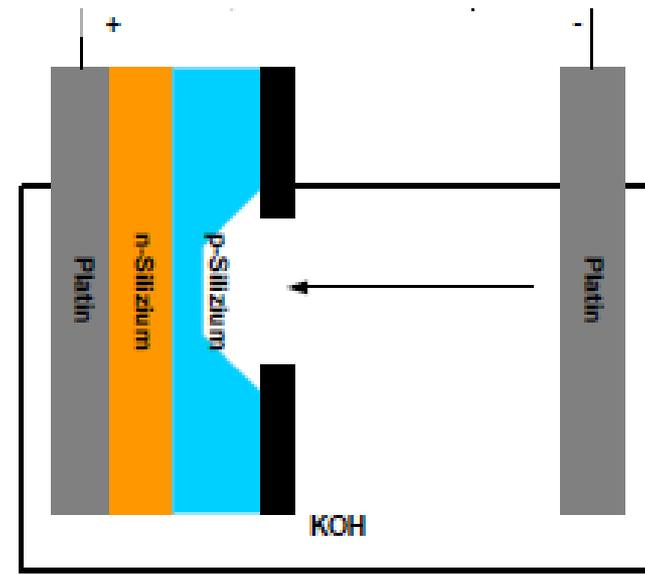
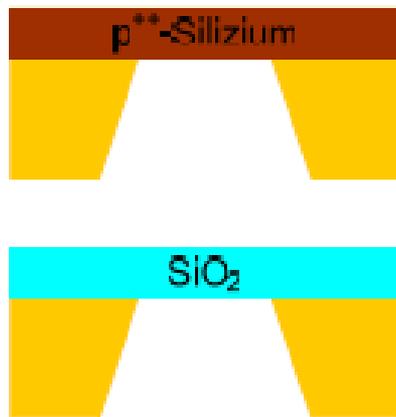
**“Wie kann ich eine Membran oder einen Balken mit einer exakt definierten Dicke herstellen?”**

- z.B. zur Herstellung eines Rückschlagventils mit einer Ventilklappe



# Ätzstoppverfahren

- Anisotroper Ätzstopp
- Ätzstopp nach Zeit
- Selektiver Ätzstopp an Isolatorschicht
- Selektiver Ätzstopp an hochdotierter  $p^{++}$  Schicht
- Elektrochemischer Ätzstopp



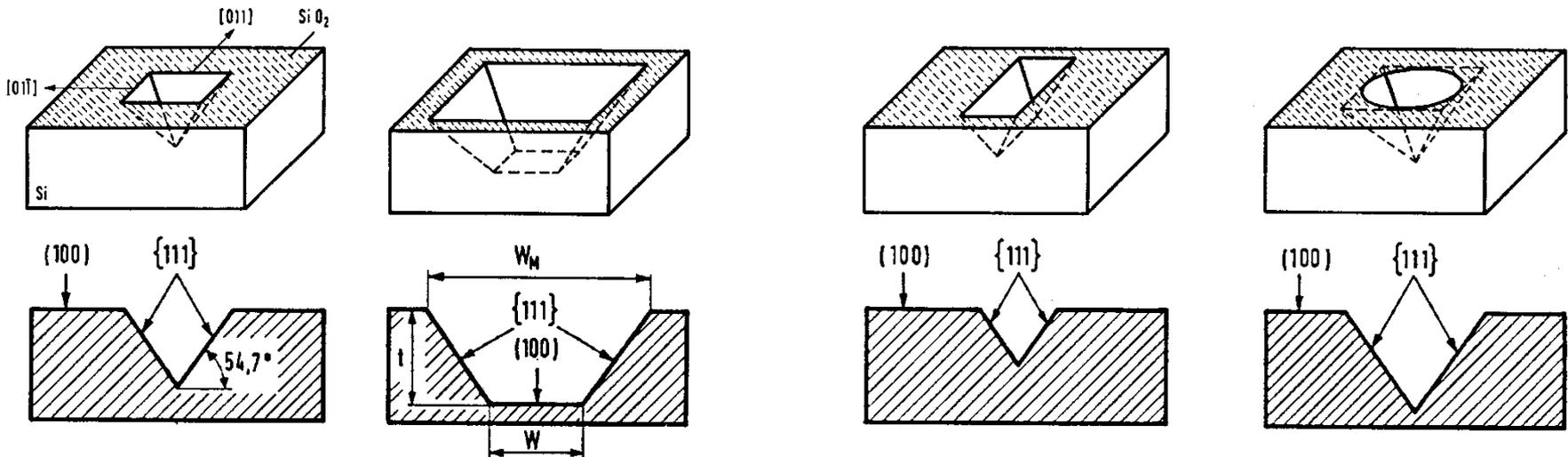
# ANISOTROPER ÄTZSTOPP

# Ätzstop an {111} - Ebenen bei Ätzung mit KOH EDP, TMAH-Lösung

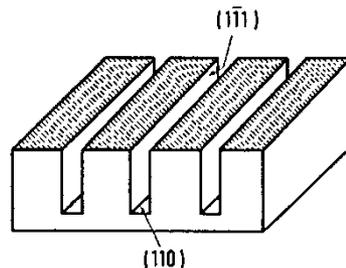
Als Maskenschicht reicht Photolack nicht aus. Die Maskenschicht z.B.  $\text{SiO}_2$  muss vorher strukturiert werden. Die Fenster in der Maskierung müssen zu den Kristallachsen genau ausgerichtet sein.

(100)-Wafer:

Es gibt 4 Scharen von {111} - Ebenen mit einem Winkel von  $90^\circ$  in der Oberfläche und unter  $54,74^\circ$  zur Oberfläche geneigt. Konkave Ecken bilden sich aus!



(110)-Wafer:



Es gibt 2 Scharen von {111} - Ebenen senkrecht zur Oberfläche und mit einem Winkel von  $109,47^\circ$  in der Oberfläche.

# ÄTZSTOPP NACH ZEIT

# Ätzstopp auf Zeit

- Waferdicke:  $525 \mu\text{m} \pm 25 \mu\text{m}$
- Gewünschte Dicke der Klappe:  $20 \mu\text{m}$
- Ätzrate (30 % KOH;  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ):  $79 \mu\text{m/h} = 1,32 \mu\text{m/min}$
- Erforderliche Ätztiefe:  $525 \mu\text{m} - 20 \mu\text{m} = 505 \mu\text{m}$
- Berechnete Dauer:  **$382 \text{ min} \pm 20 \text{ min}$**
- Ätzergebnis ist sehr empfindlich gegenüber Schwankungen in den Prozessparametern, Schwankungen der Waferdicke, Kristallorientierung, ...
- Batchprozess mit 25 Wafern und „Ätzstopp auf Zeit“ wäre eigentlich günstig, aber ...
- aufgrund individueller Schwankungen in der Waferdicke muss jeder Wafer einzeln behandelt werden

# SELEKTIVER ÄTZSTOPP

# Selektive Ätzstoppverfahren

- **Grundlagen für einen automatischen Ätzstopp**
- Beim Ätzen mit KOH werden während der Oxidation Elektronen aus der Grenzschicht in den Kristall injiziert
- Anschließende Reduktion verbraucht die injizierten Elektronen:
  - Elektrische Veränderungen in der Grenzschicht sollten also den Ätzvorgang beeinflussen
  - Entfernung der Elektronen an der Grenzfläche stoppt die Ätzung

# Wie kann man Elektronen entfernen?

- Rekombination im p+-dotierten Halbleiter: **p+-Ätzstopp**
  - Elektronen rekombinieren mit Löchern
  - Elektronen stehen somit für die Ätzung nicht mehr zur Verfügung
- Konsequenz:
  - Ätzrate ist von der Dotierung abhängig
  - Hohe Dotierungen führen zur starken Verringerung der Ätzrate
- Absaugen in elektrischem Feld: **Elektrochemischer Ätzstopp**
- Wirkungsprinzip: Äußere Spannung entzieht Elektronen
- Vorteil gegenüber p+-Ätzstopp: Ätzstopp an niedrig dotierten Schichten möglich

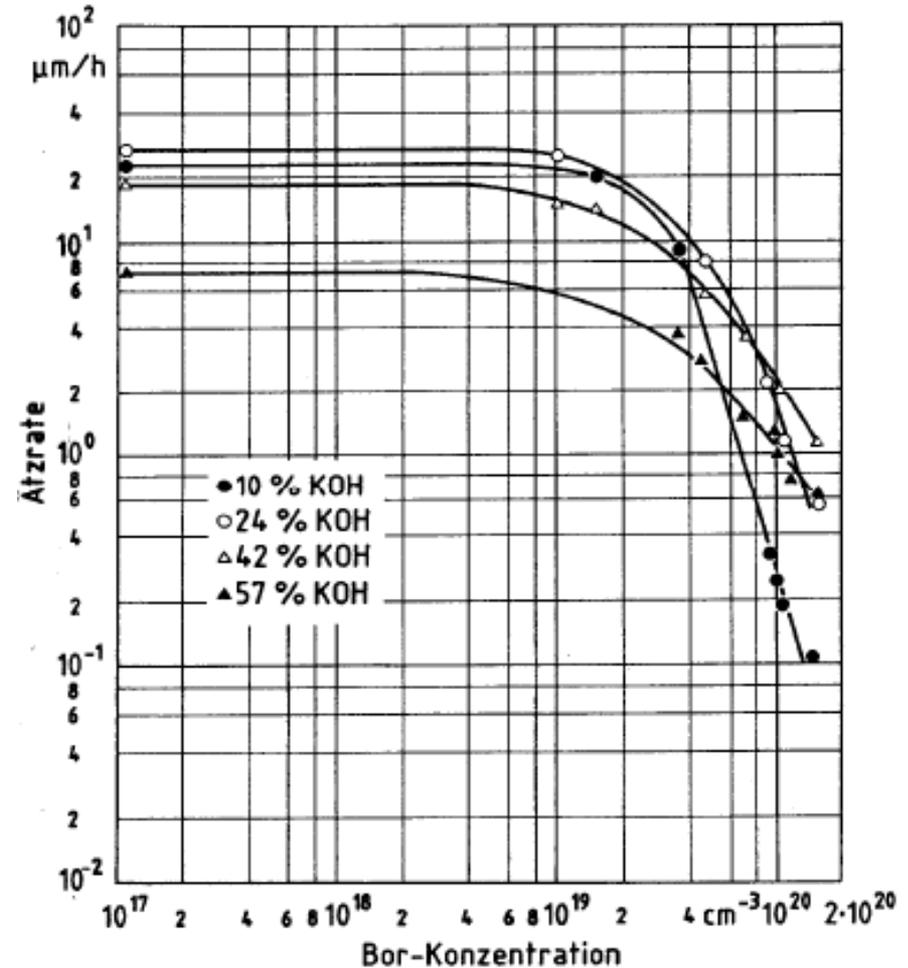
# Vorteile eines automatischen Ätzstopp

- Bessere Homogenität
  - Keilfehler über den Wafer spielt keine Rolle
  - Schwankung der Waferdicke spielt keine Rolle
- Unabhängigkeit von Schwankungen der Prozessbedingungen
  - Temperaturschwankungen
  - Konzentrationsschwankungen der Ätzlösung

# SELEKTIVER ÄTZSTOPP MIT DOTIERSCHICHT

# Ätzrate als Funktion der Dotierung

- Ätzrate in Abhängigkeit der Bor-Dotierung für verschiedene KOH-Konzentrationen
- Sehr guter Ätzstopp bei extremer Dotierkonzentration (entarteter Halbleiter), relativ unkritisch, wann der Wafer aus der Ätzlösung genommen wird



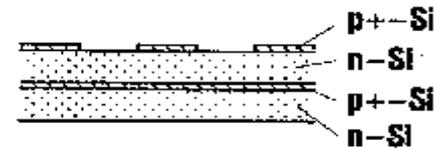
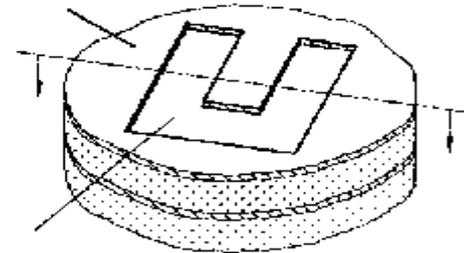
Bildquelle: Heuberger

# Nachteile des p<sup>+</sup>-Ätzstopps

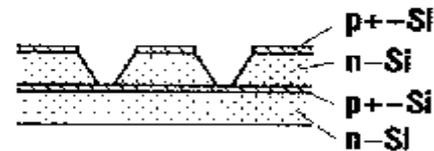
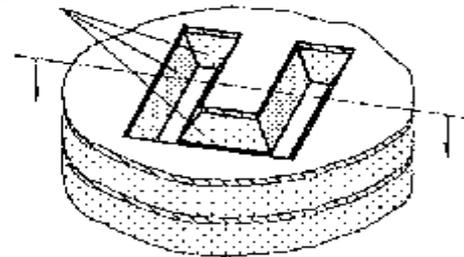
- Bor-Atome sind kleiner als Silizium
  - Es entstehen innere Zugspannungen, die durch Tempern nicht vollständig abgebaut werden können
  - Schichtmaterial wird brüchig
  - Freigelegte Strukturen können sich verbiegen oder sogar brechen
- p<sup>+</sup> Material ist entartet
  - Keine Integration elektronischer Bauelemente möglich (z.B. p/n Übergänge)
  - Monolithische Integration von Mechanik und Elektronik weder in CMOS noch in der Bipolar-Technik möglich
  - Abhilfe schafft niedrig dotierte Epitaxie-Schicht über vergrabener p<sup>+</sup>-Schicht

# Anisotropes Ätzen mit Ätzstoppschichten

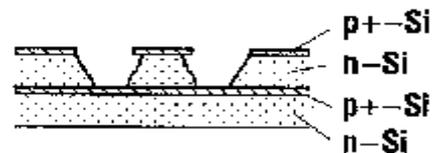
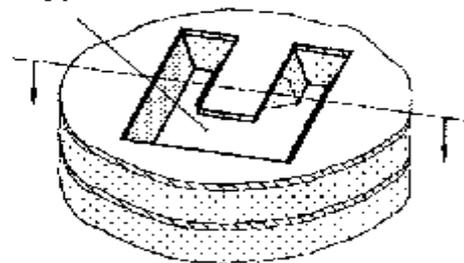
hochdotierte  
Deckschicht



n-Silizium  
(111)-Ebenen



hochdotierte  
Ätzstoppschicht



# Herstellung einer Membran mit Ätzstoppschicht

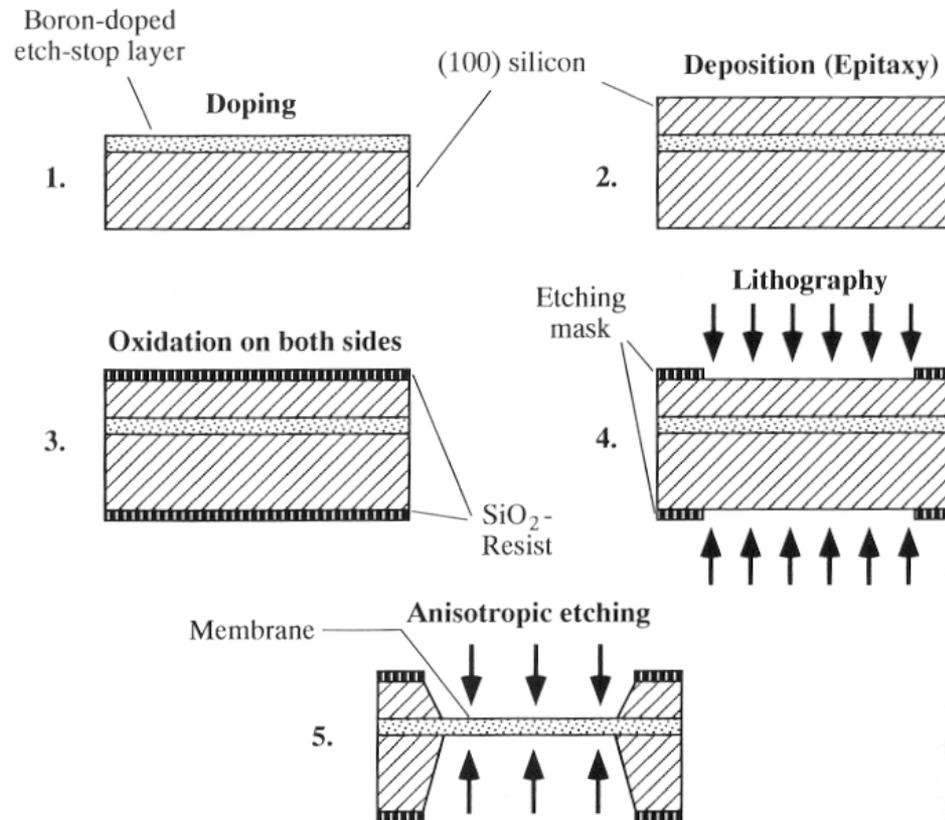
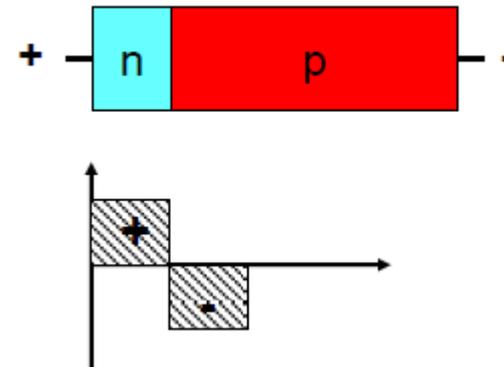
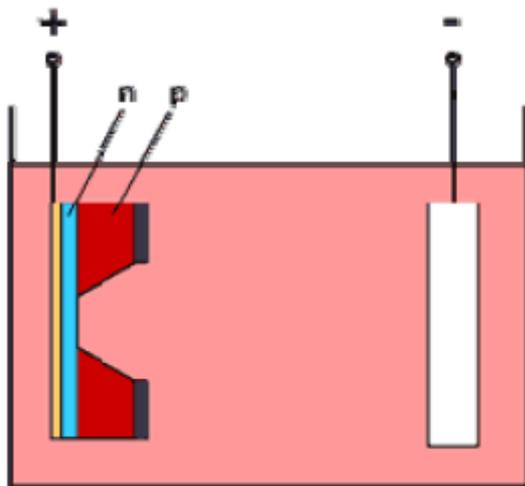


Fig. 4.15: The production of a membrane by the p<sup>+</sup> etch-stop technique

# ELEKTROCHEMISCHER ÄTZSTOPP

# Elektrochemie des KOH-Ätzens

- Elektrochemie erlaubt Ätzstopp bei niedrig dotierten Schichten
- **p-Silizium wird selektiv zu n-Silizium geätzt**
- Vorspannung des pn – Übergangs in Sperrrichtung



- e- werden abgesaugt, Ätzung stoppt auf n-Seite

# Vor- / Nachteile Elektrochemischer Ätzstopp

- Vorteile:
  - Homogene und genaue Herstellung von Membranen & Strukturen
  - Ätzstopp in „normal“ dotierten Schichten möglich
    - monolithische Integration von Elektronik ist möglich
    - geringe innere (mechanische) Spannungen
  
- Nachteile:
  - Elektrische Kontaktierung des Wafers problematisch
    - Dichtigkeit
    - Niederohmige Kontaktierung
    - Aufwendige Einzelwafer-Montage
    - Einkopplung mechanischer Spannungen ist schädlich

# Elektrochemische Ätzstop Methode

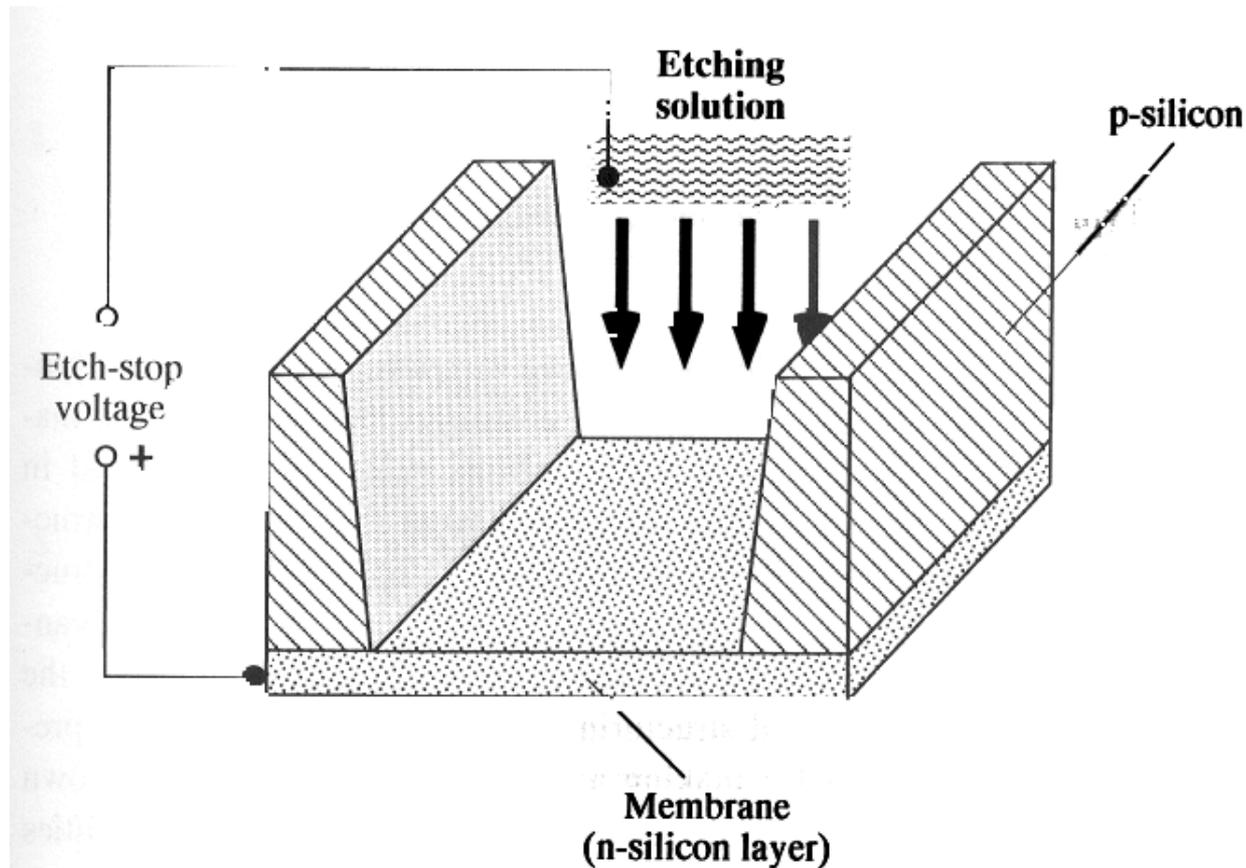


Fig. 4.16: Membrane produced by the electrochemical etch-stop method

# Mikrogetriebe, kommerzielle Anwendungen

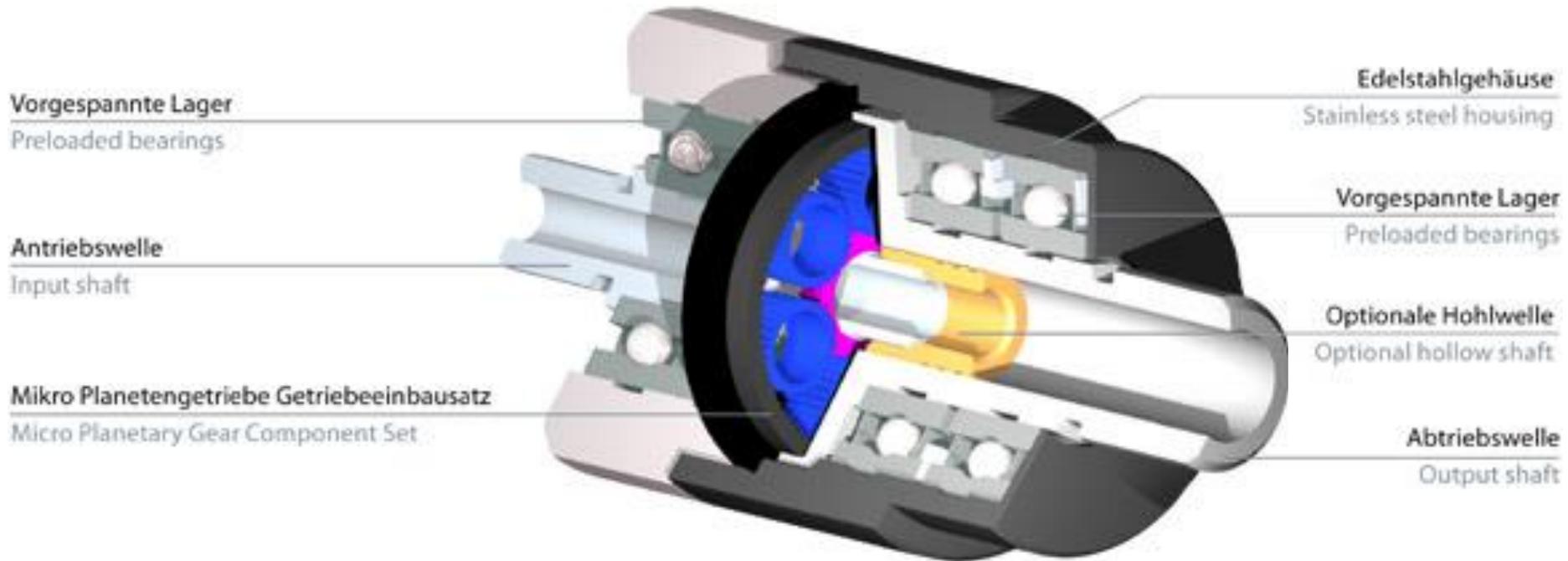
- Mikro Planetengetriebe
  - Spielarmer Mikro Planetengetriebeeinbausatz
  - Vorgespannte Lager für An- und Abtriebswelle
  - Gehäuse und Wellen aus Edelstahl
  - Hohlwelle (optional) ermöglicht Durchführung von Laserstrahlen, optischen Fasern, Druckluft oder Vakuum



Bildquelle: micromotion

# Mikrogetriebe, kommerzielle Anwendungen

## ■ Mikro Planetengetriebe, Bauteile



Bildquelle: micromotion

# Mikrogetriebe, kommerzielle Anwendungen

## ■ Mikro Planetengetriebe, Herstellung

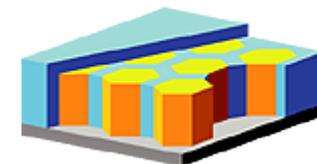
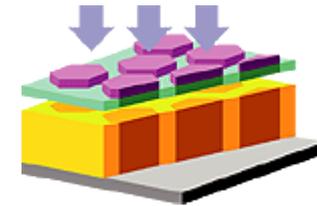
- Herstellung in LIGA-Technik

- Belichtung

- Entwicklung

- Galvanoformung

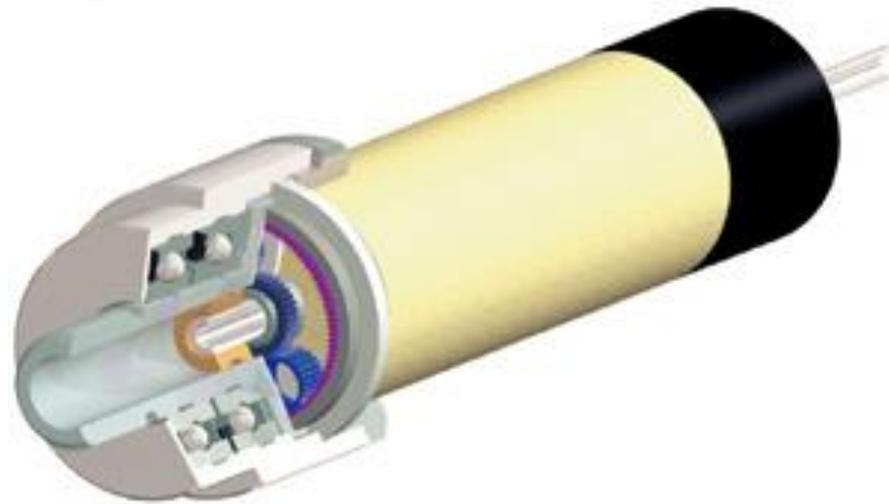
- Bauteile



Bildquelle: micromotion

# Mikrogetriebe, kommerzielle Anwendungen

- Mikro Planetengetriebe, Anwendung
  - Positionierung von Spiegeln, Linsen, Mikroskopobjektiven
  - Bewegung von Greifern und Roboterachsen
  - Einsatz in Mess- und Prüfeinrichtungen
  - Medizin- und Halbleitertechnik
  - Hochgenaue Positionierung



Bildquelle: micromotion