

**Fachpraktikum**

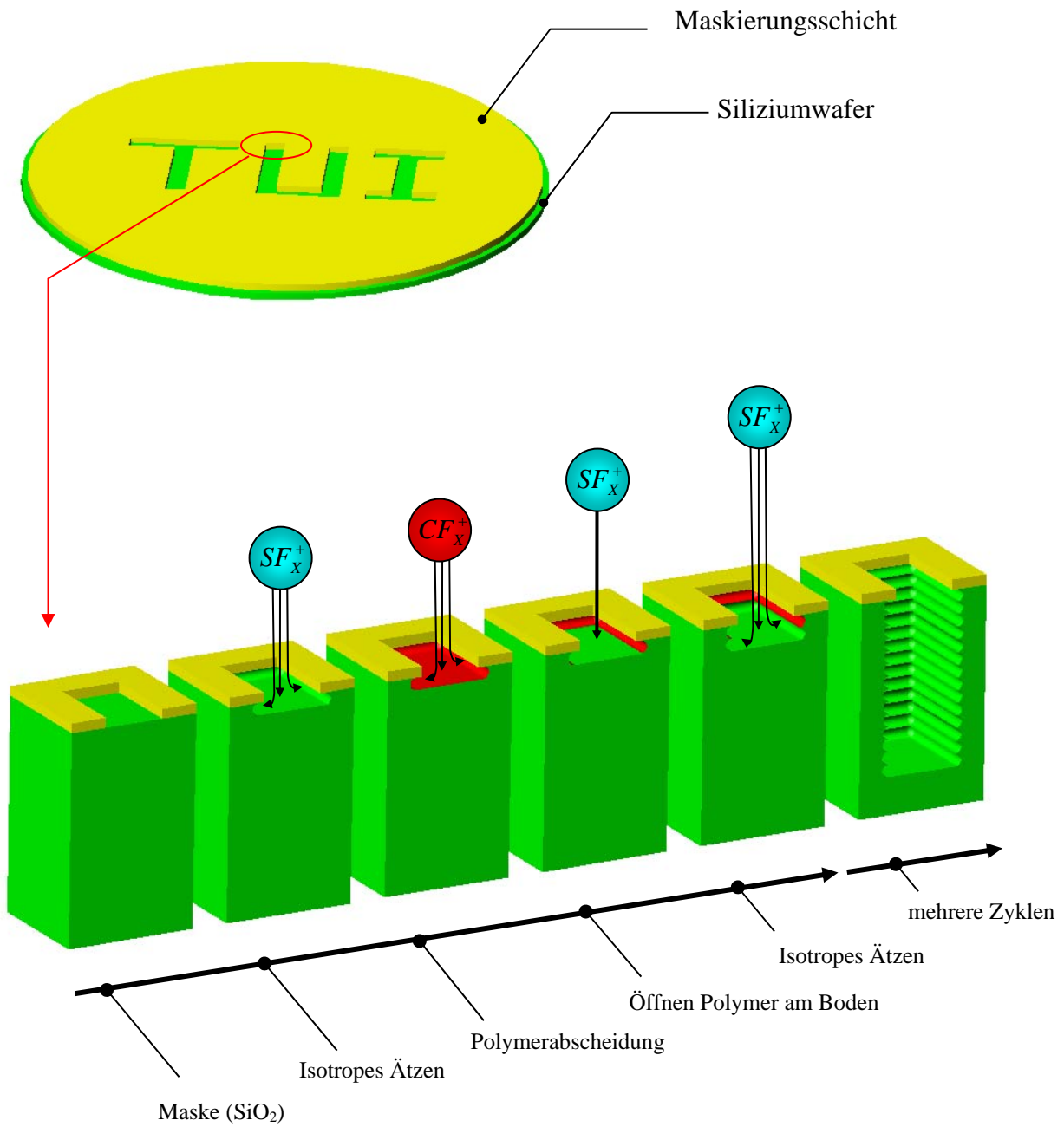
***Mikro-und Nanotechnologiepraktikum***

**Versuch:**

**Trockenätzen von Silizium**



# Versuch: Trockenätzen von Silizium



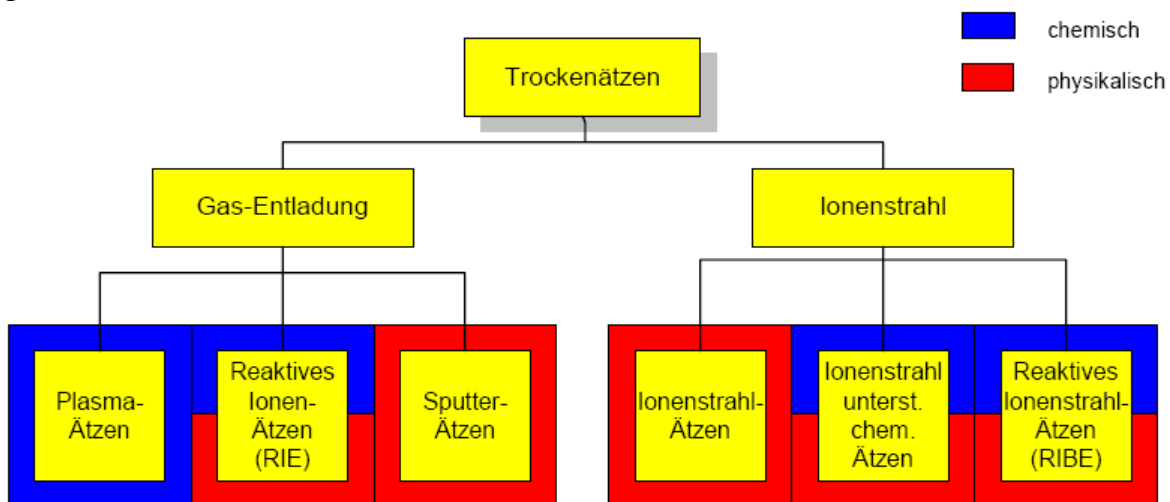
# 1 Zielstellung

- Vorstellung der verschiedenen Verfahren zum Trockenätzen von Silizium
- Kennen lernen der chemischen und physikalischen Prinzipien des reaktiven Ionenätzens (RIE) von Silizium.
- Kennen lernen des Aufbaus und der Wirkungsweise von Trockenätzanlagen für das RIE.
- Praktische Durchführung eines RIE- Prozesses. Dabei:
  - Ätzen einer  $\text{Si}_3\text{N}_4$  - Maske mittels RIE in einem Planarreaktor.
  - Analyse der geätzten Strukturen mit dem Mikroskop

# 2 Trockenätzen von Silizium

## 2.1 Überblick über die verschiedenen Trockenätzverfahren

Im Bereich der Mikrotechnik und Mikroelektronik wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von Trockenätzverfahren zur Substratstrukturierung entwickelt. Prinzipiell erfolgt dabei der Materialabtrag durch die Einwirkung „gasförmiger“ Ätzmedien. Es wird unterschieden zwischen Verfahren mit Gasentladung (Plasmaätzverfahren) bzw. mit Ionenstrahl (Ionenstrahlätzverfahren). Die Prozesse unterscheiden sich zudem im unterschiedlichen Anteil an chemischem und/oder physikalischem Abtragsmechanismus, Bild 1, der auch das Ätzverhalten bestimmt.



**Bild 1: Einordnung der Trockenätzverfahren**

Bei der Art der ätzaktiven Teilchen die in einem Plasma oder Ionenstrahl vorkommen können unterscheidet man /Men97/:

- inerte Ionen (z.B.  $\text{Ar}^+$ ) → mechanische Wirkung
- reaktive Ionen (z.B.  $\text{O}^+$ ,  $\text{ClF}_3^+$ ) → chemische Wirkung
- reaktive neutrale Gase (z.B.  $\text{XeF}_2$ ) → chemische und mech. Wirkung
- reaktive Radikale (z.B.  $\text{F}^*$ ,  $\text{CF}_3^*$ ,  $\text{O}^*$ ) → chemische Wirkung

Der Ablauf des Prozesses des Trockenätzens lässt sich allgemein unterteilen in

- Erzeugung der ätzaktiven Gasteilchen (z.B. Anregung im Plasma)
- Transport der Teilchen zur Substratoberfläche (z.B. Diffusion)
- Adsorption der Teilchen an der Substratoberfläche
- Ätzung der Substratoberfläche (z.B. chem. Reaktion)
- Desorption der Teilchen von der Substratoberfläche
- Abtransport der Ätzprodukte (z.B. Absaugen)

Die Teilschritte werden durch die Art des Gases, die Anregung (Plasma, Ionenstrahl) und den Druck (freie Weglänge) charakterisiert. Weitere Einflussfaktoren auf das Prozessergebnis sind der Bewegungsvektor, die Geschwindigkeit, die Masse sowie die Reaktivität der Teilchen.

Für die unterschiedlichen Varianten des Trockenätzens wird in /Men97/ folgende Übersicht gegeben.

- **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. Das Ätzprofil ist 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. Das Ätzprofil ist sehr anisotrop, die Selektivität ist sehr gering.
- **RIE = Reactive 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. Das Ätzprofil ist isotrop bis anisotrop, die Selektivität ist ausreichend bis gut.
- **RIBE = Reactive 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, die Selektivität ist ausreichend bis gut.
- **PE = Plasma Etching = Plasmaätzen**  
Chemisches Ätzen mit freien Radikalen und geringer Unterstützung durch Ionen. Das Ätzprofil ist isotrop bis anisotrop, die Selektivität ist gut.
- **BE = Barrel Etching = Barrel-Ätzen**  
Das chemische Ätzen erfolgt praktisch ausschließlich mit freien Radikalen. Daher ist die Selektivität gut, das Ätzprofil ist jedoch stark isotrop.

## 2.2 Überblick über die Anlagen für das Trockenätzen von Silizium

Genauso unterschiedlich wie die Prozesse des Trockenätzens sind die verwendeten Anlagen. Diese sind je nach Art der Prozesse auf die entsprechenden Funktionsprinzipien und Anforderungen abgestimmt. Die Abbildungen in Bild 2 aus /Völ00/ sollen einen Überblick über die Verschiedenheit der Anlagen geben. Die Plasmaanregungen zur Aktivierung der Ätzgase erfolgt durch elektrische/magnetische Felder, die mit Gleich- oder Wechselstromgeneratoren erzeugt werden. Typische Frequenzen liegen bei 100kHz...400kHz, im Bereich der Radiofrequenzen (13,56 MHz), sowie im Mikrowellenbereich bei 915 MHz und 2,45 GHz /Völ00/. Allgemein lässt sich festhalten, dass für anspruchslöse Prozesse oder das Strippen von Photolack einfache Barrel-Reaktoren (BE-Ätzen) oder Downstream-Plasmaätzer verwendet werden. Diese sind durch minimalen Ionenbeschuss der Substrate und damit überwiegend chemisch, isotropes Ätzen gekennzeichnet. Wenn der Ätzprozess durch physikalische Prozesse unterstützt und damit zunehmend anisotrop werden soll, kommen Parallelplatten-Reaktoren zum Einsatz (siehe 2.3.1). Eine Trennung zwischen dem Ort der Plasmaerzeugung und der Ätzung wird in Ionenstrahlätzern erreicht.

Für eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Prozesse und deren Anlagen sei auf die Literatur verwiesen. Im Folgenden soll ausschließlich der für das Praktikum relevante Prozess des RIE näher dargestellt werden.

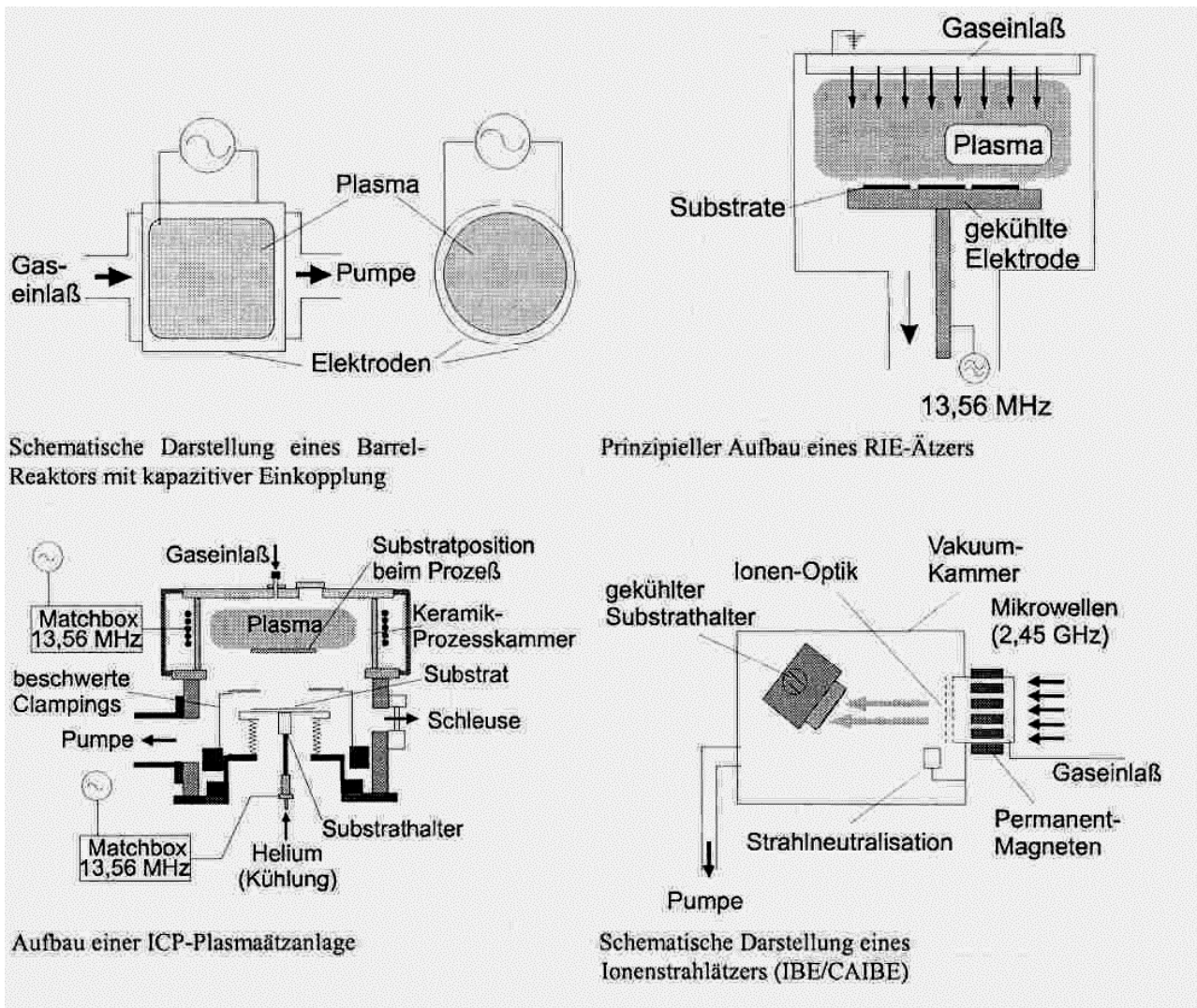


Bild 2: Verschiedene Anlagen zum Trockenätzen /Völ00/

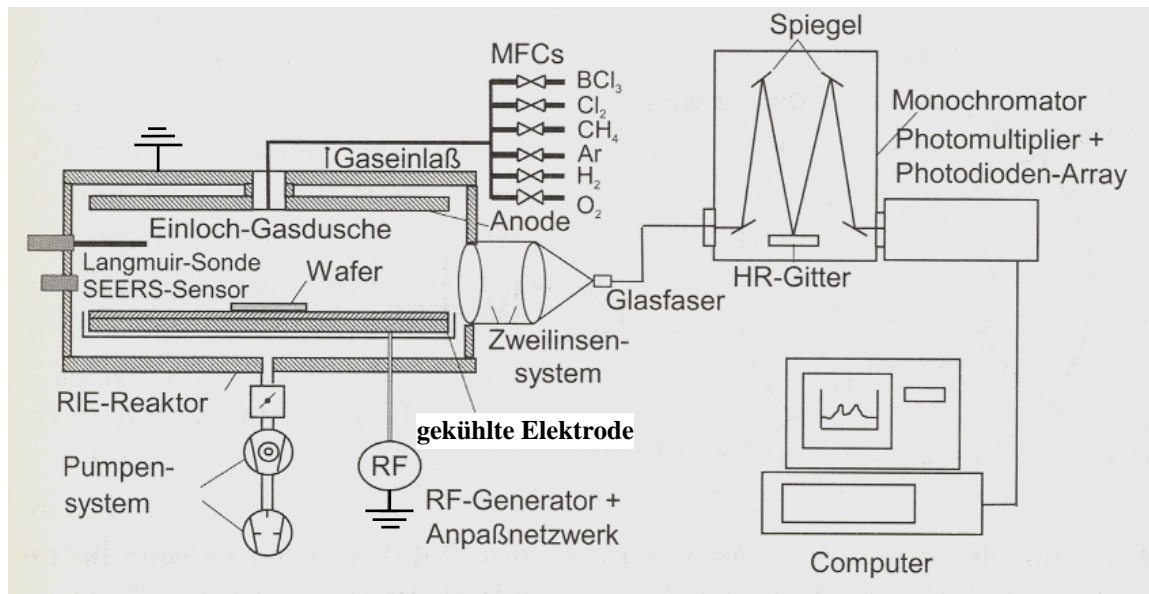
### 2.3 Das Reaktive Ionenätzen (RIE)

Beim RIE wirken prinzipiell eine physikalische (Abtrag durch Herausschlagen von Teilchen) und eine chemisch Komponente (Abtrag durch chemische Reaktion) beim Abtragsprozess. Neben dem Abtrag

von Material ist auch die Abscheidung von chemischen Reaktionsprodukten aus dem Plasma bei Verwendung entsprechender Prozessgase und spezieller Prozessführung (siehe 2.4.2 ASE) möglich. Wie bei allen Plasmaverfahren wird auch beim RIE ein kaltes Plasma d.h. ein durch elektronische und nicht durch thermische Anregung erzeugtes Plasma verwendet. Die genauen Plasmaätzmechanismen sind in vielen Fällen unbekannt /Fra04/.

### 2.3.1 Anlagen für das RIE

Eine der verbreitetsten Anordnungen bei RIE ist der schon erwähnte Parallelplatten-Reaktor. Bild 3 zeigt eine schematische Anordnung (erweitert im Vergleich zum Bild 2) ähnlich des im Praktikum eingesetzten Plasmaätzsystems STS 320 PC.



**Bild 3: Parallelplatten-Reaktor mit aufwendiger Plasmadignostik: LANGMUIR-Sonde, SEERS-Sensor, optische Emmissionsspektroskopie mit Gitter und Multidetektorbank (OMA). Meist ist auch ein Massenspektrometer zur Restgasanalyse (RGA) und Lecksuche angeflanscht. /Fra04/**

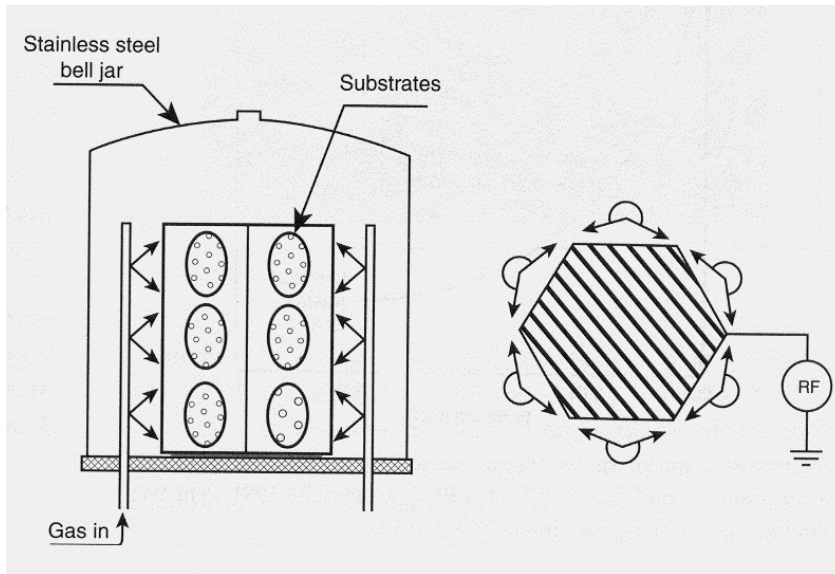
Zu den wichtigen Komponenten innerhalb des Rezipienten aus Aluminium oder Edelstahl eines solchen Systems zählen die Elektroden. Anders als beim einfachen Plasmaätzen mit symmetrischem Elektrodensystem fungiert hier der Substrathalter als kleine Elektrode (Kathode), wo hingegen das Gaseinlasssystem (Gasdusche) zusammen mit dem gesamten Rezipienten die große Gegenelektrode (Anode) darstellt. Die kapazitive Energieeinkopplung (RF: 13,56 MHz) welche die Niederdruckgasentladung initiiert, erfolgt über den Substrathalter und wird durch ein Anpassnetzwerk an die Last (Rezipient, Substrate, Prozess) geregelt, was eine vollständige Umsetzung der Leistung im Plasma ohne Reflektionsverluste, garantiert. Der Rezipient und die Gegenelektrode sind gegenüber dem Substrat isoliert und besitzen Erdpotential. Diese Anordnung führt zu einem niedrigen Plasmapotential von etwa 30V und relativ hohem Biaspotential 200V...500V an der Kathode /Völ00/.

Durch den Ionenbeschuss und die chemische Reaktionswärme ist die Kühlung des Substrathalters nötig. Je nach Anwendungsfall reicht dadurch Photolack als Maskierung nicht mehr aus, SiO<sub>2</sub> oder Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> kommen zum Einsatz.

Der Gasdruck ist mit 10<sup>-3</sup> bis 10<sup>-2</sup> mbar niedrig /Men01/, so dass höhere Ionenbeschleunigungsspannungen als beim einfachen Plasmaätzen erreicht werden.

Neben dem Pumpsystem (bei der STS 320 Pumpkombination Roots-pumpe-Drehschieberpumpe) und der Gassteuerung (MassFlowController) gehört ein umfangreiches Messsystem zur Prozessüberwachung und Prozesskontrolle zum Aufbau der Anlage.

Da in einer solchen Anlage nur ein oder wenige Wafer (z.B. Forschung) bearbeitet werden kann, wurden hexagonale Anordnungen in sog. Hexoden-Reaktoren entwickelt die größere Wafermengen für die Massenfertigung fassen, Bild 4.



**Bild 4: Hexagonale Anordnung beim RIE im Hexoden-Reaktor (Substrat senkrecht aufgehängt) /Mad02/**

Ein Nachteil der Parallelplatte-Reaktoren ist die Verkopplung der in das Plasma eingekoppelten RF-Leistung mit dem sich entwickelten Biaspotential.

Eine Abhilfe stellen die ICP-Anlagen (Inductive Coupled Plasma) dar, die durch eine hohe Plasmadichte die unabhängige Regelung von RF-Leistung und Biaspotential ermöglichen. Weitere Vorteile sind hohe Ätzraten bei niedrigem Arbeitsdruck und hohe Ionisierungs- bzw. Radikalbildungsraten trotz Niedrigenergieplasma. Der niedrige Arbeitsdruck ist notwendig für stoßfreie Beschleunigung der Ionen und die damit schmale Winkelverteilung für anisotrope Prozesse /Völ00/. Den prinzipiellen Aufbau einer ICP-Anlage zeigt Bild 2.

In der ICP-Anlage werden die Ionen-produzierenden Elektronen mit dem durch die RF-Spannung hervorgerufenen magnetischen Feld gekoppelt. Das Plasma ist gegenüber dem elektrischen Feld abgeschirmt, um die kapazitive Kopplung zu vermeiden was zu energiereicheren Ionen führt. Zudem wird der Substrathalter mit flüssigem Stickstoff und Heliumgasfluss für einen optimalen Wärmetransfer auf Tiefsttemperaturen (77 K) gekühlt. Dies führt zur Kondensation der Reaktionsgase auf der Waferoberfläche und schützt die Seitenwände vor dem Ätzprozess was zu einer höheren Anisotropie führt /Mad02/.

Die ICP-Anlagen sind ideal für das Tiefenätzen von Silizium und anderen Materialien geeignet und finden zum Beispiel Anwendung im Gaswechsel-Prozess (siehe 2.4.2)

### 2.3.2 Chemische und physikalische Vorgänge beim RIE

Die physikalische Komponente beim RIE besteht im sog. abspattern von Material durch positive Ionen die durch die Potentialdifferenz im Plasma in Richtung Substrat beschleunigt werden. Durch chemische Reaktionen von reaktiven Teilchen aus dem Plasma und der Substratoberfläche ist der chemische Teil der Ätzprozesse charakterisiert. Meist sind die physikalischen Vorgänge notwendig um den chemischen Ätzvorgang zu starten. Die Kombination aus physikalischem und chemischem Ätzen ermöglicht die Kombination der Vorteile, hohe Selektivität und hohe Anisotropie.

Alle in 2.1 erwähnten Partikel haben einen Anteil am Ätzprozess beim RIE. Sie entstehen durch physikalische Prozesse und chemische Reaktionen im Plasma wie:

Elektronen-Einfang mit Dissoziation	$A_2 + e^- \rightarrow A + A^-$
Elektronen-Einfang	$A + e^- \rightarrow A^-$
Ionisation	$A + e^- \rightarrow A^+ + 2e^-$
Dissoziation	$A_2 + e^- \rightarrow 2A + e^-$
Anregung	$A + e^- \rightarrow A^* + e^-$
Photoemission	$A^* \rightarrow h\nu$ (Leuchten des Plasmas)
Ladungstransfer	$A^+ + B \rightarrow A + B^+$

A, A<sub>2</sub>, B: Reaktanden

e<sup>-</sup>: Elektron

A<sup>\*</sup>: Reaktand A im angeregten Zustand

A<sup>+</sup>, A<sup>-</sup>, B<sup>+</sup>: Ionen von A und B

/Völ00/

Durch die Energie der energiereichen Teilchen wird die nötige Aktivierungsenergie für die chemische Reaktion geliefert. Das aktive Gas reagiert mit der Substratoberfläche und bildet gasförmige Reaktionsprodukte. Durch das zusätzliche Bombardement aus energetischen Teilchen wird der Ätzprozess in Richtung des Teilchenbeschusses beschleunigt. Dies geschieht, indem ätzhemmende Schichten auf der Oberfläche entfernt, atomare Bindungen aufgebrochen oder die Oberfläche lokal erhitzt werden. Auch ist es möglich, dass in der chemischen Reaktion Produkte gebildet werden, die noch mit der Oberfläche locker verbunden sind und dann durch die energiereichen Teilchen gelöst werden /Men97, Men01/.

### Ätzgase

Es gibt viele verschiedene Ätzgase mit unterschiedlicher Auswirkung auf z.B. die Ätzrate oder die Oberflächenrauigkeit. Prinzipiell ist es notwendig die chemischen Bindungen zwischen den Atomen aufzubrechen. Die Bindungsenergien in Tabelle 1 geben Aufschluss über die möglichen Ätzreaktionen. Es gilt die allgemeine Regeln, dass Reaktionen mit Stoffen die zu Produkten führen die eine höhere Bindungsenergie haben als Si-Si ätzen Silizium. Ebenso wird Siliziumdioxid von Stoffen geätzt die in der Ätzreaktion zu Produkten führen die eine höhere Bindungsenergie als Si-O haben /Fran04/.

**Tabelle 1: Bindungsenergien in kJ/mol**

C-O	1080	Si-F	550
Si-O	470	Si-Cl	403
Si-Si	227	Si-Br	370

Photoresist wird im Sauerstoff-Plasma geätzt, meist im Barrel-Ätzer da keine Anisotropie gefordert ist. Für andere Stoffe müssen die Ätzgase meist Halogene wie Brom, Chlor oder Fluor enthalten (Ausnahme: Aluminium wird nicht durch Fluor geätzt).

Im Fall des Siliziums sind die Bindungen Silizium-Halogen stärker als die Bindung Si-Si. Es wird gut geätzt, zumal freie angeregte Halogene im Plasma sehr reaktiv sind. Siliziumdioxid wird nur durch Fluor gut geätzt, da hier die Bindung Si-F stärker als die Bindung Si-O ist. Allerdings kann auch im Brom oder Chlor-Plasma ein Ätzprozess von Siliziumdioxid mit geringen Ätzraten infolge des Ionenbeschusses stattfinden.

Ein weiteres typisches Beispiel für das Ätzen mit Fluor ist das Ätzen von Siliziumnitrid ( $Si_3N_4 + 12F \rightarrow 3SiF_4 + 2N_2$ ).



Eine Besonderheit ist die Verwendung von kohlenstoffhaltigen Gase zum Zweck der Seitenwandpassivierung (siehe ASE™-Prozess) oder um CO bzw. CO<sub>2</sub> zu bilden, beim Ätzen von Oxiden.

(z.B. SiO<sub>2</sub> im CHF<sub>3</sub> Plasma,  $3\text{SiO}_2 + 4\text{CHF}_3 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{CO}_2 + 3\text{SiF}_4 + \text{H}_2$ ) /Ges04/

Ein weiteres Auswahlkriterium für die Verwendbarkeit eines Gases ist die Flüchtigkeit bzw. die Siedetemperatur/Gasdruck der Reaktionsprodukte da diese von der Oberfläche des Substrates durch Vakuumabsaugung entfernt werden müssen /Fran04/.

## 2.4 Besondere Verfahren mit RIE

### 2.4.1 SCREAM-Verfahren

Ein wichtiges technisches Prinzip der Mikrotechnik zur Fertigung dreidimensionaler Strukturen ist das SCREAM-Verfahren (Single Cystal Reactive Etching And Metallisation) welches neben dem naschemisch isotropen Ätzen auch das physikalisch/chemisch anisotrope in Formen des RIE verwendet. Vorteile dieses Verfahrens liegt sind die Verwendung von nur einem Photolithographieschritt sowie dem hohen Aspektverhältnis. Zudem spielt die Kristallorientierung keine Rolle /Men97/. Im Folgenden sind die Prozessschritte des Verfahrens dargestellt (Bild 5) und erläutert.

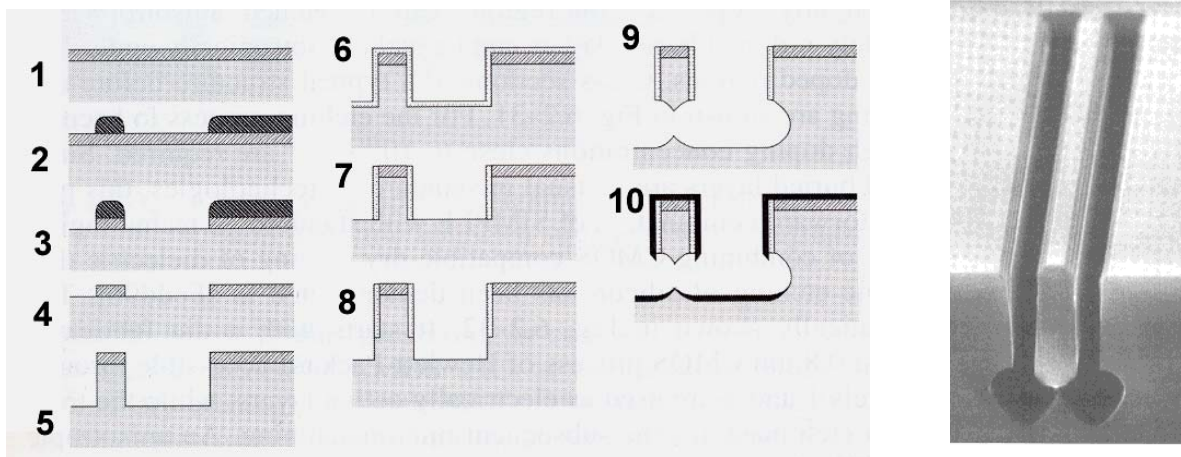


Bild 5: Arbeitsschritte des SCREAM-Verfahrens und REM-Aufnahme eines mit dem Verfahren hergestellten Biegebalkens /Men97/, /Men01/

Ablauf des SCREAM-Prozesses:

1. Abscheiden einer Schicht SiO<sub>2</sub> mittels PECVD
2. Aufbringen einer Resistschicht und photolithographische Strukturierung der Schicht
3. Strukturierung der SiO<sub>2</sub>-Schicht (z.B. mit MERIE-magnetron reactive ion etching)
4. Strippen des Photoresists im Barrelätzer (Sauerstoffplasma)
5. Strukturierung des Siliziums durch RIE (anisotrop), Prozessgas Bortrichlorid (BCl<sub>3</sub>) + Chlor (Cl<sub>2</sub>), Ätztiefe 4-20µm

6. Gleichmäßige Beschichtung der gesamten Struktur mit  $\text{SiO}_2$  im PECVD-Prozess, Schichtdicke 300nm
7. Anisotropes Ätzen der Oxidschicht mittels RIE, dabei Entfernen der Passivierung an der Oberfläche und am Boden und Erhalt der Seitenwandpassivierung, Prozessgas Kohlenstofftetrafluorid ( $\text{CF}_4$ ) + Sauerstoff ( $\text{O}_2$ )
8. Zweiter anisotroper RIE-Prozess ( $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2$ ), Ätztiefe 3-5 $\mu\text{m}$ , teilweise Freilegung der Seitenwandpassivierung
9. Isotropes Ätzen (RIE) der teilweise ungeschützten Seitenwände und des Bodens mit  $\text{SF}_6$ , unterätzen und freilegen der Stege, gute Selektivität da das Oxid durch  $\text{SF}_6$  kaum geätzt wird
10. Aufspütern einer Schicht Aluminium als Kontaktierungsschicht

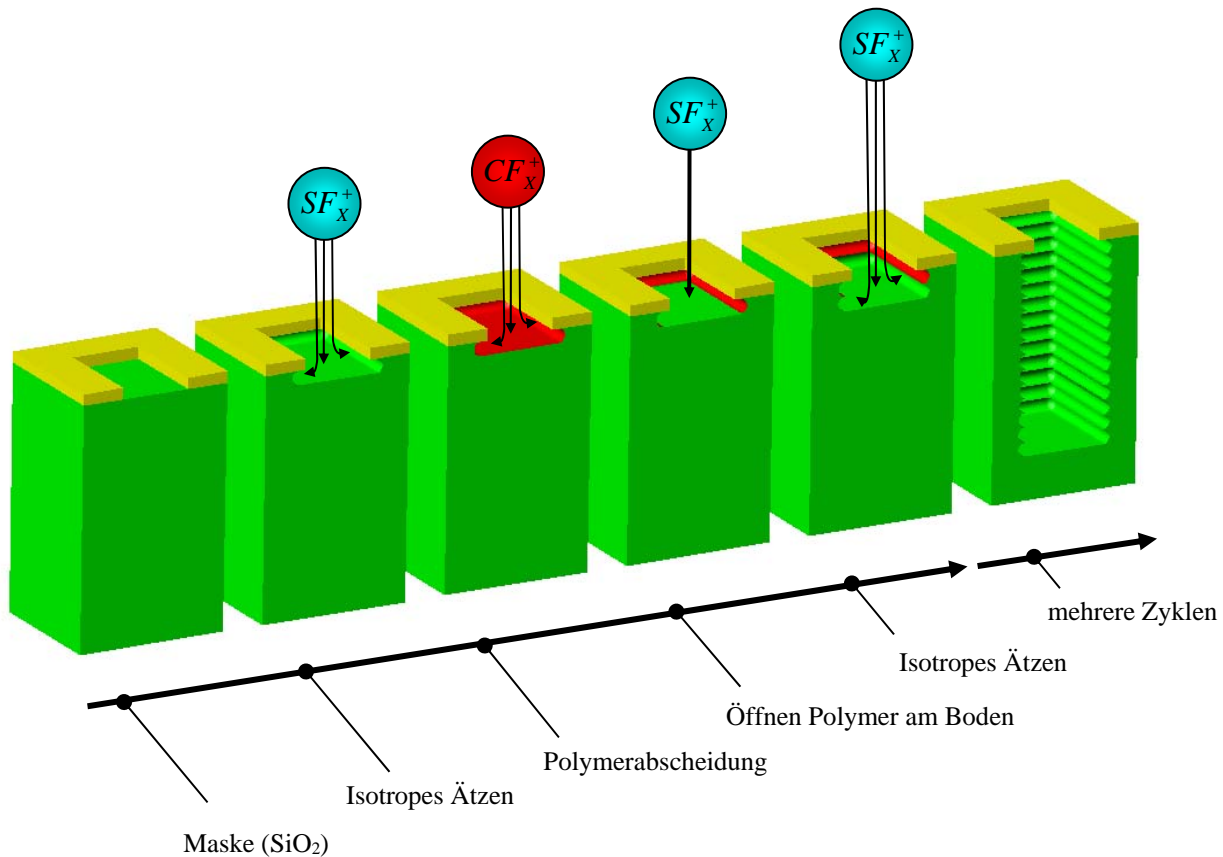
/Men97/, /Mad02/

Mit dem Prozess können frei bewegliche und/oder elastisch deformierbare Elemente hergestellt werden, die dann als Funktionselement in Beschleunigungs- oder Neigungssensoren fungieren. Von Vorteil bei diesem Prozess ist, dass alle Teilprozesse bei Temperaturen kleiner 300°C ablaufen und er kompatibel mit mikroelektronischen Schaltkreisen ist.

Als Anlage kommt der in 2.3.1 beschriebene Parallelplatten-Reaktor zum Einsatz.

#### **2.4.2 Gaswechsel-Prozess**

Ein in der Industrie häufig angewendeter Prozess ist der Gaswechsel-Prozess auch Advanced Silicon Etching (Fa. STS) genannt. Die besondere Eigenart des Prozesses besteht in der abwechselnden Durchführung eines isotropen Ätzprozesses (RIE) und eines Plasmapolymersationsprozesses zur Seitenwandpassivierung. Als Resultat entsteht ein quasi anisotropes Ätzergebnis zur Tiefenstrukturierung. Bild 6 zeigt schematisch die Prozessschritte.



**Bild 6: Ablauf des Gaswechsel-Prozesses**

Ablauf des Gaswechsel-Prozesses:

1. Abscheidung einer Schicht  $\text{SiO}_2$  meist im PECVD- Verfahren
2. Photolithographische Strukturierung der  $\text{SiO}_2$ -Schicht als Maskierungsschicht
3. Strukturierungszyklen zur Tiefenstrukturierung
  - a. vorwiegend isotropes Ätzen auf Tiefe mittels RIE, Ätzgas z.B.  $\text{SF}_6$  welches in  $\text{SF}_5^+$  und  $\text{F}^-$  dissoziiert und mit Si zu  $\text{SiF}_4$  reagiert,  $\text{SiF}_4$  tritt als Gas aus
  - b. Passivierung der Oberfläche in einem Plasmapolymersationsprozess mit z.B.  $\text{CF}_4$  als Prozessgas werden polymere Fluorkarbonate ( $n \text{CF}_x$ ) abgeschieden
  - c. Öffnen der Passivierung am Boden durch vorwiegend anisotropes Ätzen mittels RIE, Prozessgas z.B.  $\text{SF}_6$
  - d. Wiederholung der Zyklenschritte a-c bis gewünschte Ätztiefe erreicht ist
4. Entfernen der  $\text{SiO}_2$ -Maskierungsschicht

/Men01/, /Mad02/

Durchgeführt wird der Prozess in einer ICP-Anlage, weil hohe Ionendichten nötig sind /Mad02/.

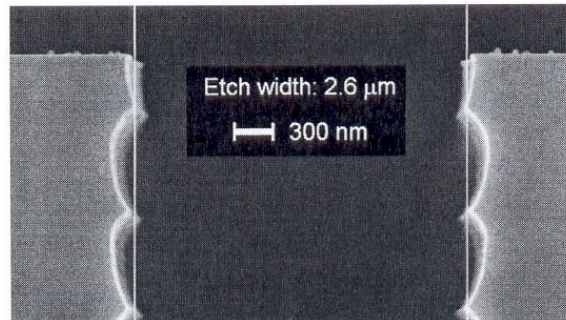
Es werden folgende Parameter verwendet bzw. erreicht:

Zykluszeit: 5-30 Sekunden

Ätzraten:	1,5 – 6 $\mu$ /min	
Flankenwinkel:	$90^\circ \pm 2^\circ$	
Strukturgröße:	1 bis >500 $\mu$ m	
Strukturtiefe:	10 bis 800 $\mu$ m	/Men01/,/Mad02/,/Völ00/

Bei dem Prozess ist neben  $\text{SiO}_2$  auch Photolack als Maskierung möglich. Die Ätzung geschieht unabhängig von der Kristallorientierung des Siliziums.

Im Ergebnis entstehen unebene Seitenwände durch ungleichmäßiges Ätzen (Bild 7). Allerdings ist die Oberflächenplanarität der Seitenwände noch gut, da die entstehenden Bögen eine Tiefe von nur ca. 50-100nm (abhängig von der Zykluszeit) besitzen.



**Bild 7: Seitenwandform beim Gaswechsel-Prozess /Ges04/**

Der Gaswechselprozess wird auch unter dem Sammelbegriff DRIE (deep reactive ion etching) geführt. Ein weiteres Verfahren dieser Gruppe ist das ebenfalls oft in der Literatur erwähnte cryogenic- bzw. cryo-etching. /Ges04/

### 2.4.3 Reaktives Ätzen von Silizium mit Halogenen und Edelgasen ( $\text{XeF}_2$ -Ätzen)

Eine einfache Möglichkeit des trockenen isotropen Ätzens von Silizium ist die Verwendung von Xenondifluorid,  $\text{XeF}_2$ . In gasförmiger Form ohne Anregung im Plasma oder durch Heizung reagiert es auf Siliziumoberflächen zu flüchtigem  $\text{Xe}_2$  und  $\text{SiF}_4$  /Men02/.  $\text{XeF}_2$  ist voll CMOS kompatibel, da weder die Isolation noch die Aluminiummetallisierung von ICs angreift. Ein Nachteil ist die resultierende raue Oberfläche des Siliziums, was den Prozess weniger reproduzierbar macht als das selektive nasschemische Ätzen.

Eine Variation des  $\text{XeF}_2$ -Ätzens wurde am Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt u.a. als alternativer Prozess ohne die zum Teil hochgiftigen Reaktionsprodukte beim reaktiven Ätzen mit Kohlenwasserstoffen.

Ziel war es, leicht zu kontrollierende Reaktionsprodukte, hohen Ätzraten in Silizium und gute Oberflächenqualitäten zu erhalten.

Bei dem Prozess kommen elementares Fluor, Brom und Mischungen derselben mit Zugabe der Edelgase Xenon oder Argon zum Einsatz /Men01, Men97/.

Durch Beimischung von Xe zu  $\text{F}_2$  lassen sich Ätzraten bis zu 1,1  $\mu$ m/min erreichen. Maßgeblich ist dabei, dass im Plasma entstehende  $\text{XeF}_2$  sowie die Sputterwirkung der schweren Xe-Ionen, die unter bestimmten Betriebsbedingungen eine starke Aufrauung der Oberfläche bewirken.

Optimale Ergebnisse in Bezug auf die Oberflächenqualität liefert eine Gasmischung aus Fluor und Brom mit Xenon als Trägergas. Es bildet sich auch hier  $\text{SiF}_4$ . Die Reaktionen im Plasma sind in /Men97/ und /Men01/ näher erläutert. Auf Grund der hohen Oberflächengüte lassen sich mit dieser Methode Abformwerkzeuge aus Silizium zur Prägen von Mikrolinsen aus z.B. PMMA herstellen.

### 3 Versuchsvorbereitung

*Kurze schriftliche Beantwortung folgender Fragen:*

1. Wie gliedert sich der prinzipielle Ablauf beim ASE-Prozess und welche Teilchen sind beteiligt?  
Wie entstehen diese?
2. Beschreiben Sie kurz die für das Trockenätzen verwendeten Prinzipien und deren Anlagen.  
Welche herausragenden Unterschiede gibt es?
3. Erklären Sie das chemische und physikalische Prinzip beim RIE!
4. Wie sind die Anlagen für das RIE aufgebaut?
5. Beschreiben Sie den Potentialverlauf im Plasma bzw. Parallelplatten-Reaktor!
6. Nennen Sie Ätzgase für das Trockenätzen und beschreiben sie die chemischen Prozesse beim Ätzen!

### 4 Literatur

- /Fis00/ Fischer, Wolf-Joachim: Mikrosystemtechnik. 1. Auflage. Würzburg: Vogel Verlag, 2000. (79 ELT ZN 4980 F529)
- /Fra04/ Franz, Gerhard: Niederdruckplasmen und Mikrostrukturtechnik. 3. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2004. (69 ELT ZN 4136 F837)
- /Ges04/ Geschke, Oliver; Klank, Henning; Telleman Pieter: Microsystem Engineering of Lab-on-a-chip Device. 1. Auflage. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2004. (69 ELT ZN 3750 G389)
- /Mad02/ Madou, Marc: Fundamentals of microfabrication : The science of miniaturization. 2. Auflage. Boca Raton: CRC Press Verlag, 2002. (69 ELT ZN 4136 M183(2))
- /Men01/ Menz, Wolfgang; Mohr, Jürgen; Paul, Oliver: Microsystem Technology. 1. Auflage. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2001. (69 ELT ZN 3750 M551 M6)
- /Men97/ Menz, Wolfgang; Mohr, Jürgen: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. 2. Auflage. Weinheim: VCH Verlag, 1997. (79 ELT ZN 3750 M551)
- /Völ00/ Völklein, Friedemann; Zetterer, Thomas: Einführung in die Mikrosystemtechnik. 1. Auflage. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2000. (79 ELT ZN 3700 V873)
- Köhler, Michael: Ätzverfahren für die Mikrotechnik. 1. Auflage. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 1998. (69 ELT ZN 4150 K77)