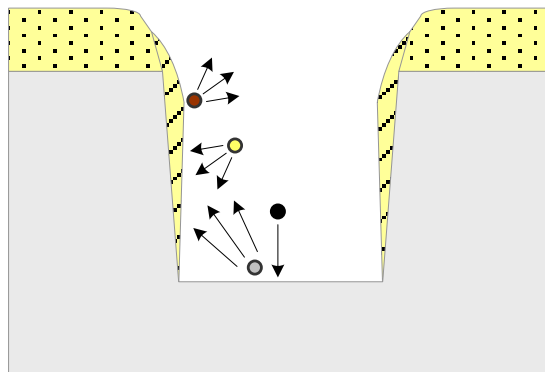


Halbleitertechnologie

von A bis Z



Trockenätzen

www.halbleiter.org

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
1 Trockenätzen	1
1.1 Übersicht	1
1.1.1 Allgemein	1
1.1.2 Wichtige Größen beim Trockenätzen	1
1.1.3 Trockenätzverfahren	2
1.2 Trockenätzverfahren	2
1.2.1 Ionenstrahlätzen	2
1.2.2 Plasmaätzen	4
1.2.3 Reaktives Ionenätzen	5

Abbildungsverzeichnis

1.1	Darstellung eines Ionenstrahl-Ätzreaktors	3
1.2	Darstellung einer CDE-Ätzanlage	4
1.3	Bildung von Radikalen	5
1.4	Darstellung eines RIE-Reaktors in Hexodenbauform	6
1.5	Darstellung eines RIE-Reaktors in Parallelplattenbauweise	7
1.6	Seitenwandpassivierung beim RIE-Ätzen	8

Tabellenverzeichnis

1.1	Übersicht über Prozessgase zum Trockenätzen verschiedener Schichten	9
-----	---	---

1 Trockenätzen

1.1 Übersicht

1.1.1 Allgemein

Bei der nasschemischen Ätzung werden Schichten in der Regel isotrop abgetragen, doch gerade bei kleinen Strukturen ist ein anisotropes Ätzprofil wichtig. Dafür eignen sich die Trockenätzverfahren, die eine ausreichende Selektivität bieten. Die Verfahren ermöglichen reproduzierbare homogene Ätzungen sämtlicher Schichten, die in der Halbleiterfertigung zum Einsatz kommen. Dabei können neben anisotropen Ätzprofilen auch isotrope realisiert werden. Trotz der hohen Anlagenkosten und der sequentiellen Einzelscheibenbearbeitung hat sich das Trockenätzen gegen die nasschemische Ätzung durchgesetzt.

1.1.2 Wichtige Größen beim Trockenätzen

Ätzrate r : Die Ätzrate beschreibt den Ätzabtrag pro Zeit und wird i. d. R. in Nanometer pro Minute angegeben.

$$r = \frac{\text{Ätzabtrag } \Delta z}{\text{Zeit } \Delta t}$$

Anisotropiefaktor f : Der Anisotropiefaktor beschreibt das Verhältnis von horizontaler Ätzrate r_h zu vertikaler Ätzrate r_v .

$$f = 1 - \frac{r_h}{r_v}$$

Zur Strukturübertragung sind stark anisotrope Prozesse erwünscht, also Ätzungen nur in vertikaler Richtung, so dass die Lackmaske nicht unterätzt wird. Für anisotrope

Ätzungen ergibt sich $f \rightarrow 1$, und dementsprechend für isotrope Prozesse $f \rightarrow 0$.

Selektivität S_{jk} zwischen Material j und Material k: die Selektivität beschreibt das Verhältnis der Ätzrate zweier Materialien, z. B. von zu strukturierender Schicht (j) und Lackmaske (k).

$$S_{jk} = \frac{r_j}{r_k}$$

Ob eine hohe oder geringe Selektivität gewünscht ist, hängt vom jeweiligen Prozess ab. Bei der Strukturierung von Schichten sollte der Wert möglichst groß sein, d. h. die zu strukturierende Schicht wird schneller abgetragen als die Lackmaske. Beim Reflowrückätzen muss die Selektivität 1 betragen um Topografien gleichmäßig einzuebnen.

1.1.3 Trockenätzverfahren

Bei den Trockenätzverfahren werden Gase durch hochfrequente Wechselfelder angeregt, typisch sind 13,56 MHz und 2,45 GHz. Bei einem Druck zwischen 1 Pa und 100 Pa liegt die freie Weglänge der Teilchen bei wenigen Millimetern bis Zentimetern.

Es gibt generell drei verschiedene Arten des Trockenätzens:

- **Physikalisches Trockenätzen:** physikalischer Abtrag der Waferoberfläche durch beschleunigte Teilchen
- **Chemisches Trockenätzen:** Reaktion zwischen Gas und Scheibenoberfläche
- **Chemisch-Physikalisches Trockenätzen:** physikalisches Ätzen mit chemischen Anteil

1.2 Trockenätzverfahren

1.2.1 Ionenstrahlätzen

Das Ionenstrahlätzen ist ein rein physikalisches Trockenätzverfahren. Dabei werden Argonionen als gerichteter Ionenstrahl mit 1-3 keV auf die Scheibe gelenkt. Durch die Energie der Teilchen schlagen diese Material aus der Oberfläche heraus.

Der Wafer wird dabei senkrecht oder gekippt zum Ionenstrahl in der Prozesskammer gehalten, die Ätzung erfolgt völlig anisotrop. Die Selektivität ist nur gering, da keine Unterscheidung der Materialien von den beschleunigten Ionen ausgeht. Das Gas und herausgeschlagenes Material werden vom Pumpensystem abgesaugt, jedoch setzen sich auch Partikel an den Kammerwänden und an vertikalen Kanten der Scheibe selbst ab, da das abgetragene Material nicht in den gasförmigen Zustand übergeht.

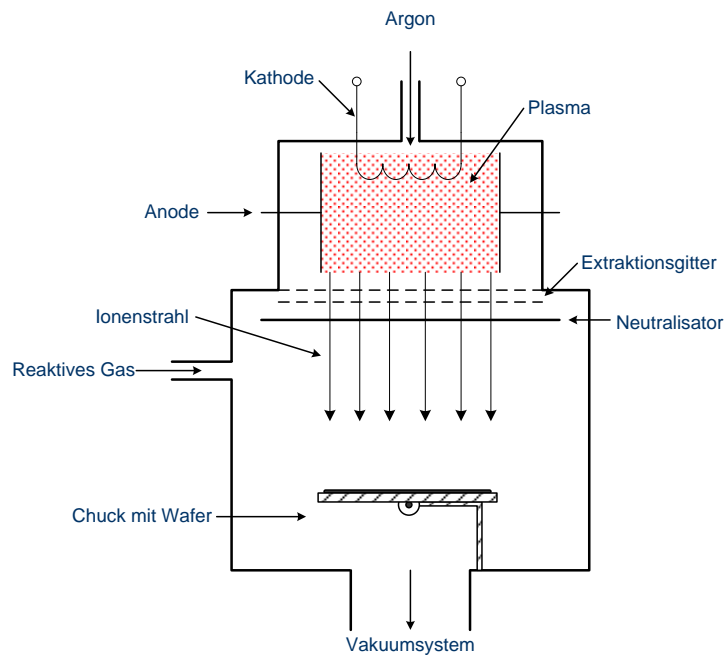


Abb. 1.1: Darstellung eines Ionenstrahl-Ätzreaktors

Um die Partikelablagerungen zu verhindern wird neben Argon ein reaktives Gas in die Kammer eingeleitet. Das Gas reagiert dabei mit den Argonionen und führt zu einem physikalischen Ätzprozess mit chemischem Charakter. Das Gas reagiert nun teilweise mit der Oberfläche, aber auch mit dem durch den physikalischen Anteil herausgeschlagenen Material, zu einem gasförmigen Reaktionsprodukt.

Mit diesem Verfahren können nahezu alle Materialien geätzt werden. Durch die senkrechte Bestrahlung ist der Abtrag an senkrechten Kanten sehr gering (hohe Anisotropie). Auf Grund der geringen Selektivität und der geringen Ätzrate (geringe Ionen-dichte im Strahl) wird dieses Verfahren in der Halbleiterfertigung kaum mehr angewandt.

1.2.2 Plasmaätzen

Das Plasmaätzen ist ein rein chemisches Ätzen. Der Vorteil dabei ist, dass die Scheibenoberfläche nicht durch beschleunigte Ionen geschädigt wird. Das Ätzprofil ist auf Grund der frei beweglichen Gasteilchen isotrop, weshalb das Plasmaätzen meist zum Abtragen kompletter Schichten bei hoher Ätzrate eingesetzt wird.

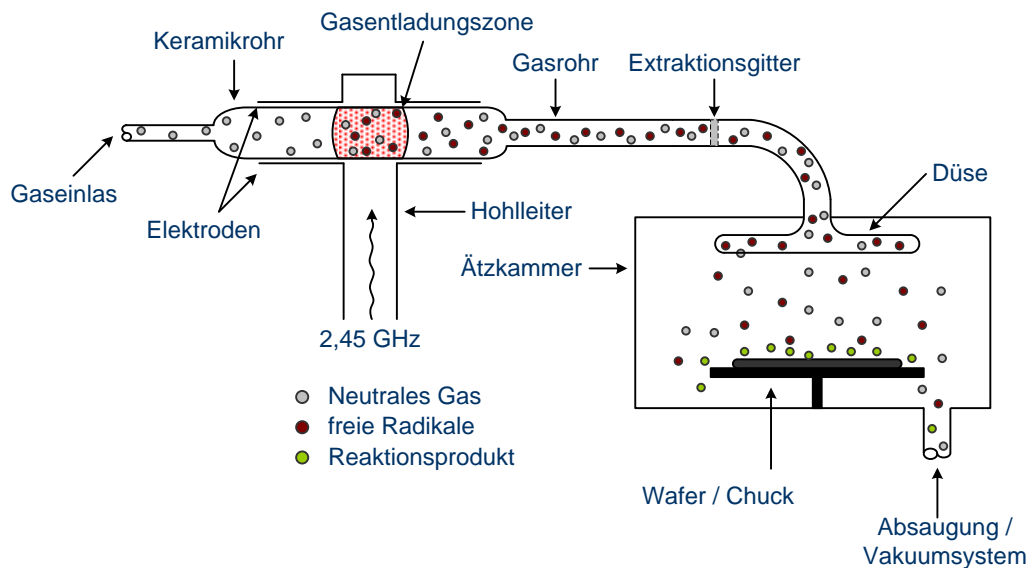
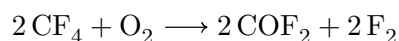


Abb. 1.2: Darstellung einer CDE-Ätzanlage

Eine Anlagenart beim Plasmaätzen ist der Down-Stream-Reaktor (Chemical Dry Etching, CDE). Dabei wird durch Anlegen einer hochfrequenten Spannung (typisch sind 2,45 GHz) ein Plasma durch Stoßionisation erzeugt. Der Raum der Gasentladung ist dabei vom Wafer getrennt, das Gas gelangt über ein Keramikrohr zum Wafer.

In der Zone der Gasentladung entstehen durch die Stöße der Gasmoleküle untereinander verschiedene Teilchen, unter anderem Radikale. Radikale sind Moleküle mit aufgespaltener Bindung, die durch ein ungepaartes Außenelektron sehr reaktionsfreudig sind. Als Neutrales Gas wird beispielsweise Kohlenstofftetrafluorid CF_4 eingeleitet und durch die Wechsellspannung in CF_2 und ein Fluormolekül F_2 zerlegt. Ebenso kann durch Zugabe von Sauerstoff Fluor von CF_4 abgespalten werden:



Das Fluormolekül kann nun durch die Energie in der Gasentladungszone in zwei einzelne Fluorradikale aufgespalten werden: Fluorradikale (Radikale sind ungeladene Teilchen, ein einzelnes Fluoratom besitzt neun Protonen im Kern und neun Elektronen in der Atomhülle).

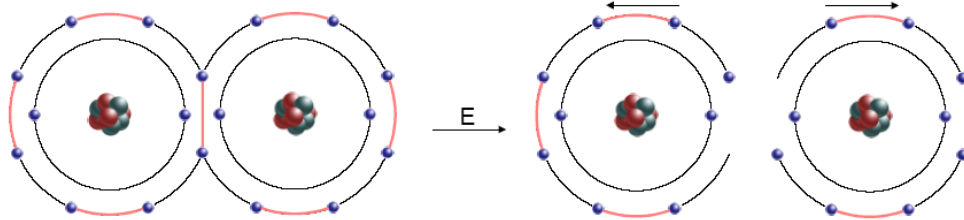


Abb. 1.3: Bildung von Radikalen

Neben den neutralen Radikalen entstehen weitere, teils geladene Teilchen (CF_4^+ , CF_3^+ , CF_2^+ , ...). Die Teilchen werden nun über das Gasrohr zur Ätzkammer geleitet. Geladene Teilchen werden entweder durch ein Extraktionsgitter abgefangen oder rekombinieren auf dem Weg wieder zu ungeladenen Molekülen. Auch die Fluorradikale werden teilweise wieder gebunden. Es gelangen jedoch genügend Radikale in die Ätzkammer, und reagieren dort mit der Scheibenoberfläche. Neutrale Teilchen nehmen nicht an der Reaktion teil und werden, so wie auch die entstandenen Reaktionsprodukte, abgesaugt.

Beispiele für Schichten die im CDE-Verfahren geätzt werden:

- **Silicium:** $\text{Si} + 4\text{F} \longrightarrow \text{SiF}_4$
- **Siliciumdioxid:** $\text{SiO}_2 + 4\text{F} \longrightarrow \text{SiF}_4 + \text{O}_2$
- **Silicium-Nitrid:** $\text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{F} \longrightarrow 3\text{SiF}_4 + 2\text{N}_2$

1.2.3 Reaktives Ionenätzen

Die Ätzcharakteristik - Selektivität, Ätzprofil, Ätzrate, Homogenität, Reproduzierbarkeit - ist beim reaktiven Ionenätzen (Reactive Ion Etching, kurz RIE) durch die eingesetzten Gase und die Prozessparameter (Generatorleistung, Druck, Plattenabstand, Gasfluss) exakt einstellbar. Dabei ist sowohl ein isotropes als auch ein anisotropes Ätzprofil möglich. Damit ist das RIE-Ätzen, ein chemisch-physikalisches Ätzverfahren,

das wichtigste Ätzverfahren zur Strukturierung diverser Schichten in der Halbleiterfertigung.

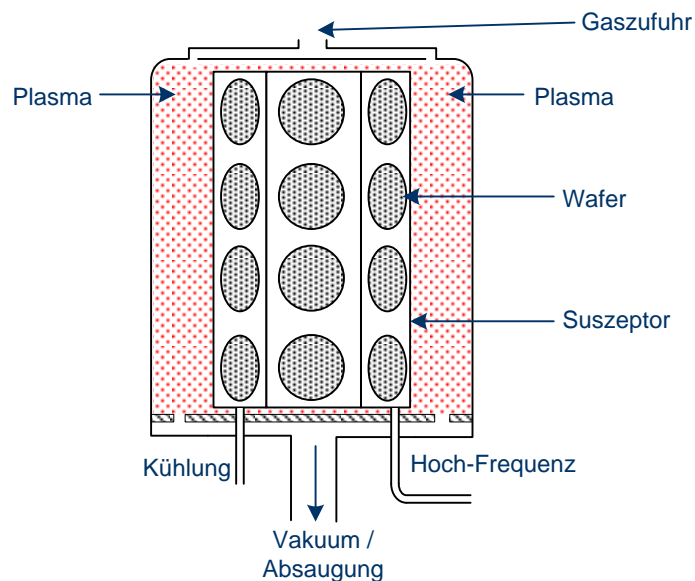


Abb. 1.4: Darstellung eines RIE-Reaktors in Hexodenbauform

In der Prozesskammer befinden sich die Wafer auf einer mit Wechselspannung gespeisten Elektrode (HF-Elektrode). Durch Stoßionisation wird ein Plasma erzeugt, das freie Elektronen und positiv geladene Ionen enthält. Bei positiver Spannung an der HF-Elektrode lagern sich die Elektronen an dieser an, und können sie auf Grund der Austrittsarbeit bei der positiven Halbwelle nicht verlassen, die Elektrode lädt sich somit auf bis zu 1000 V negativ auf (BIAS-Spannung). Die langsamen Ionen, die der schnellen Wechselspannung nicht folgen konnten, bewegen sich nun in Richtung der negativ aufgeladenen Elektrode mit den Wafern.

Ist die freie Weglänge der Ionen groß, treffen die Teilchen auf Grund ihrer Geschwindigkeit nahezu senkrecht auf die Scheiben. Dabei wird Material durch die beschleunigten Ionen von der Oberfläche herausgelöst (physikalisches Ätzen), teilweise reagieren die Teilchen aber auch chemisch mit dem Substrat. Vertikale Kanten werden dabei nicht getroffen, so dass hier kein Abtrag erfolgt und das Ätzprofil anisotrop ist. Die Selektivität ist durch den physikalischen Abtrag nicht sehr hoch, zudem wird die Scheibenoberfläche durch die beschleunigten Ionen geschädigt. Diese muss später durch thermische Behandlung ausgeheilt werden.

Der chemische Anteil der Ätzung geschieht durch die Reaktion von freien Radika-

len auf der Scheibenoberfläche und mit dem physikalisch abgetragenen Material, so dass sich dieses nicht wie beim Ionenstrahlätzen an den Kammerwänden oder auf den Scheiben anlagern kann. Durch Druckerhöhung nimmt die freie Weglänge der Teilchen ab, es passieren auf dem Weg zur Scheibe also viele Stöße zwischen den Teilchen, die so ihre Richtung fortlaufend ändern. So geschieht keine gerichtete Ätzung mehr auf der Scheibenoberfläche, der Ätzprozess nimmt einen stärker chemischen Charakter an, das Ätzprofil ist isotrop, die Selektivität erhöht sich.

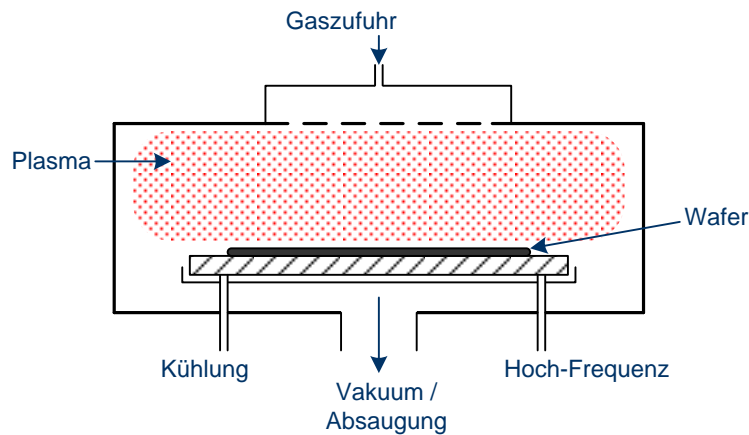


Abb. 1.5: Darstellung eines RIE-Reaktors in Parallelplattenbauweise

Durch eine Passivierung der Seitenwände bei einer Siliciumätzung wird ein anisotropes Ätzprofil erzielt. Dabei reagiert Sauerstoff in der Prozesskammer mit herausgelöstem Silicium der Waferoberfläche zu Siliciumdioxid, das an den vertikalen Kanten aufwächst. Eine Oxidschicht auf horizontalen Flächen wird durch den Ionenbeschuss entfernt, so dass eine Ätzung in die Tiefe fortschreiten kann. Die Ätzrate hängt in jedem Fall vom Druck, der Leistung des HF-Generators, den Prozessgasen, dem Gasdurchfluss und der Wafer- bzw. Elektrodentemperatur ab.

Die Anisotropie nimmt bei steigender HF-Leistung, sinkendem Druck und abnehmender Temperatur zu. Die Homogenität der Ätzung wird von den Gasen, dem Elektrodenabstand und dem Elektrodenmaterial bestimmt. Bei zu geringem Elektrodenabstand ist das Plasma nicht gleichmäßig in der Kammer verteilt und führt so zur Inhomogenität. Bei größer werdendem Abstand nimmt die Ätzrate ab, da das Plasma auf ein größeres Volumen verteilt ist. Als Elektrodenmaterial hat sich Kohlenstoff bewährt. Da die Fluor- und Chlorgase auch Kohlenstoff abtragen, bewirkt die Elektrode eine gleichmäßige Belastung des Plasmas. Scheibenränder werden so nicht stärker belastet als die Scheibenmitte.

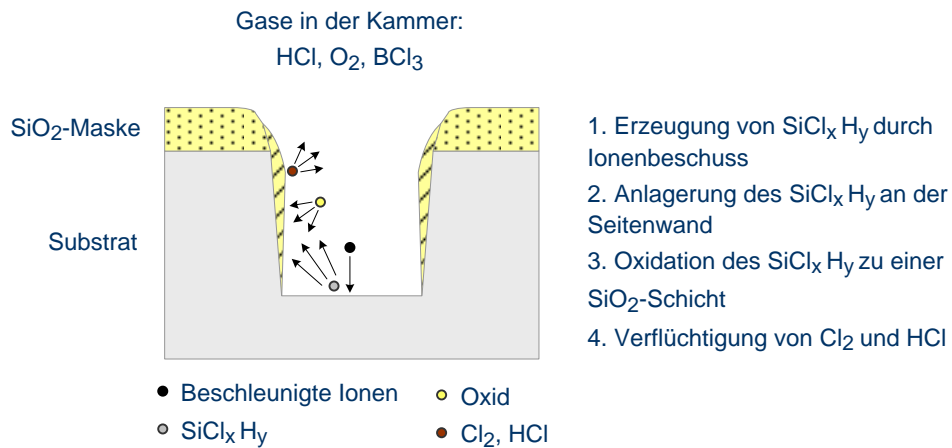


Abb. 1.6: Seitenwandpassivierung beim RIE-Ätzen

Die Selektivität und Ätzrate lassen sich sehr stark durch die eingesetzten Ätzgase beeinflussen. Bei Silicium und Siliciumverbindungen kommen vor allem Chlor und Fluor zum Einsatz.

Die Prozesse müssen dabei nicht nur mit einer Gasmischung ablaufen. Natürliches Oxid auf Polysilicium kann beispielsweise erst mit einer hohen Ätzrate und geringer Selektivität abgetragen werden. Das Polysilicium wird dann mit hoher Selektivität zur darunter liegenden Schicht geätzt.

Tab. 1.1: Übersicht über Prozessgase zum Trockenätzen verschiedener Schichten

Schicht	Prozessgase	Bemerkung
SiO ₂ , Si ₃ N ₄	CF ₄ , O ₂	F ätzt Si, O ₂ entfernt Kohlenstoff (C)
	CHF ₃ , O ₂	CHF ₃ wirkt als Polymer, bessere Selektivität zu Si
	CHF ₃ , CF ₄	
	CH ₃ F	verbesserte Selektivität von Si ₂ N ₄ über SiO ₂
	C ₂ F ₆ / SF ₆	
	C ₃ F ₈	erhöhte Ätzrate gegenüber CF ₄
Poly-Si	BCl ₃ , Cl ₂	keine Kontamination durch Kohlenstoff (C)
	SiCl ₄ , Cl ₂	
	HCl, O ₂	
	SiCl ₄ , HCl	
	O ₂ / SiCl ₄ , HCl	
	HBr / Cl ₂ / O ₂	verbesserte Selektivität zu Fotolack und SiO ₂
	SF ₆	hohe Ätzrate, gute Selektivität gegen SiO ₂
	NF ₃	hohe Ätzrate, isotrop
monokrist. Silicium	HBr, NF ₃ , O ₂ / CF ₃ Br	höhere Selektivität gegen SiO ₂
	BCl ₃ , Cl ₂ / HBr, NF ₃	
Aluminium- Legierungen	Cl ₂	isotrope Ätzung
	BCl ₃	nur geringe Ätzrate
	BCl ₃ / Cl ₂ / CF ₄	anisotrope Ätzung
	BCl ₃ / Cl ₂ / CHF ₃	verbesserte Seitenwandpassivierung
	BCl ₃ / Cl ₂ / N ₂	höhere Ätzrate, keine Kohlenstoffkontamination

