

Halbleitertechnologie von A bis Z

Trockenätzen

Trockenätzverfahren	3
<i>Ionenstrahlätzen</i>	3
<i>Plasmaätzen</i>	5
<i>Reaktives Ionenätzen</i>	7
<i>Eingesetzte Ätzgase beim Trockenätzen</i>	12
<i>Sonderfall: Bosch-Prozess (Deep Reactive Ion Etching)</i>	14

Trockenätzverfahren

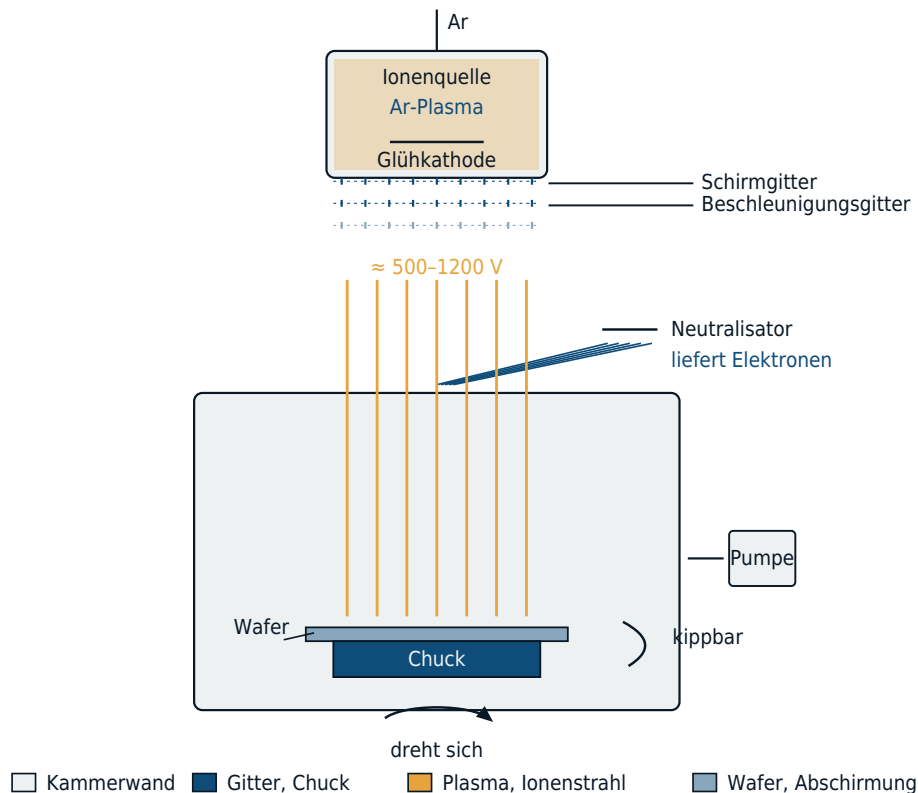
Ionenstrahlätzen

Das Ionenstrahlätzen (ion beam etching, IBE) 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. Die Ionen werden in einer vom Prozessraum getrennten Quelle erzeugt und über ein Gittersystem extrahiert; der Arbeitsdruck liegt unterhalb von 0,1 Pa, damit die Ionen ihre Richtung bis zur Scheibe behalten. Der Wafer wird 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.

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. Wird das reaktive Gas bereits in der Ionenquelle zugegeben, spricht man von reaktivem Ionenstrahlätzen (reactive ion beam etching, RIBE), wird es erst vor der Scheibe eingeleitet, von chemisch unterstütztem Ionenstrahlätzen (chemically assisted ion beam etching, CAIBE).

Ionenstrahl-Ätzreaktor

Ein kollimierter Ionenstrahl trägt das Material rein physikalisch ab



Das Gittersystem beschleunigt die Argon-Ionen zu einem gebündelten Strahl; der Neutralisator liefert Elektronen, damit sich der Wafer nicht auflädt. Weil kein reaktives Gas beteiligt ist, wird nahezu jedes Material rein mechanisch abgetragen – dafür fehlt die chemische Selektivität des reaktiven Ionenätzens.

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 Ionendichte im Strahl) spielt das Ionenstrahlätzen bei der Strukturierung von Silicium und Siliciumverbindungen keine Rolle mehr. Unverzichtbar ist es dagegen bei Materialien, die keine flüchtigen Reaktionsprodukte bilden und daher chemisch kaum zu ätzen sind:

- magnetische Schichtstapel, etwa die Tunnelelemente von MRAM-Speicherzellen aus CoFeB und MgO, sowie Leseköpfe und Magnetfeldsensoren
- Edelmetalle wie Platin, Iridium und Ruthenium
- piezoelektrische und ferroelektrische Schichten wie PZT
- Lithiumniobat und ähnliche Kristalle in der integrierten Photonik

Der kippbare und rotierende Substrathalter ist dabei ein wesentlicher Vorteil: Über den Einfallswinkel lassen sich der Kantenwinkel der Struktur einstellen

und wieder angelagertes Material von den Seitenwänden entfernen – bei Schichtstapeln aus vielen unterschiedlichen Materialien ein Ergebnis, das mit plasmachemischen Verfahren nicht erreichbar ist. Da isolierende Substrate sich unter Ionenbeschuss aufladen würden, arbeitet die Quelle mit einem Neutralisator, der dem Strahl Elektronen zusetzt.

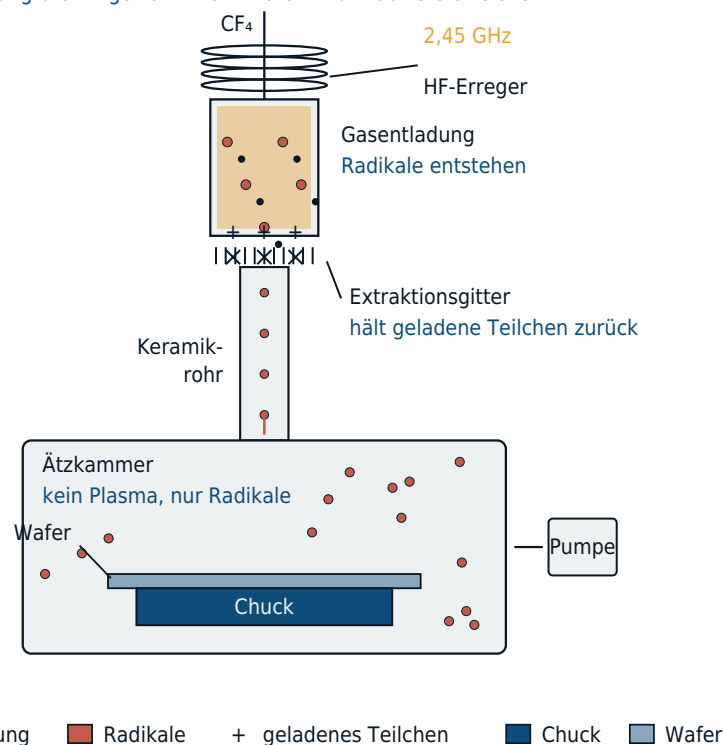
Plasmaätzen

Das Plasmaätzen ist ein rein chemisches Ätzen (engl. chemical dry etching, CDE). 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.

Eine Anlagenart beim Plasmaätzen ist der Down-Stream-Reaktor. Dabei wird durch Anlegen einer hochfrequenten Spannung (z.B. 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.

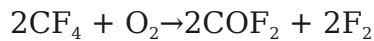
CDE-Downstream-Reaktor

Die Gasentladung brennt getrennt vom Wafer – nur Radikale erreichen ihn



Weil das Plasma vom Wafer getrennt brennt, treffen keine beschleunigten Ionen auf die Scheibe – nur ungeladene, aber reaktionsfreudige Radikale. Das Ätzen bleibt dadurch schadungsfrei, aber isotrop: Es greift in alle Richtungen an.

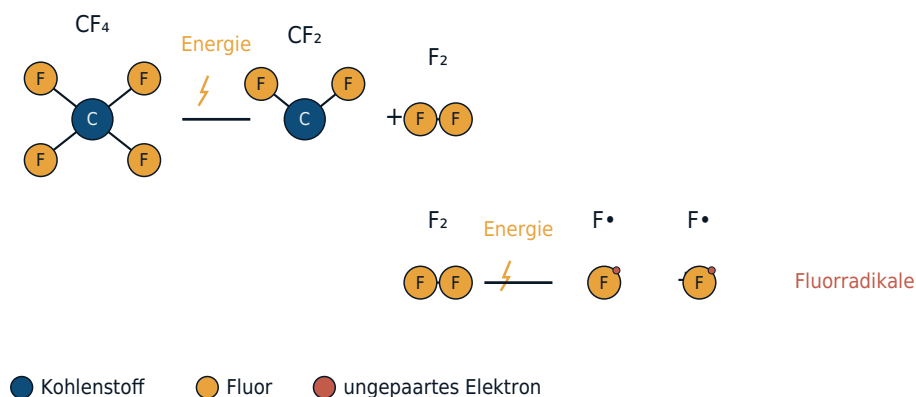
In der Zone der Gasentladung entstehen durch die Stöße der Gasmoleküle untereinander verschiedene Teilchen, unter anderem Radikale. Radikale sind Moleküle mit aufgespaltener Bindung, die durch ein ungepaartes Außenelektron sehr reaktionsfreudig sind. Als neutrales Gas wird beispielsweise Tetrafluormethan CF_4 (auch Kohlenstofftetrafluorid) eingeleitet und durch die Wechselspannung 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 Fluoratome aufgespalten werden: Fluorradikale (Radikale sind ungeladene Teilchen, ein einzelnes Fluoratom besitzt neun Protonen im Kern und neun Elektronen in der Atomhülle).

Bildung von Fluorradikalen

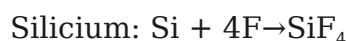
Energie in der Gasentladung spaltet CF_4 in zwei Schritten auf



Ein Radikal ist ein ungeladenes Teilchen mit einem ungepaarten Außenelektron – das macht es sehr reaktionsfreudig. Zusätzlich lässt sich Fluor auch mit zugesetztem Sauerstoff abspalten: $2\text{CF}_4 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{COF}_2 + 2\text{F}_2$.

Neben den neutralen Radikalen entstehen weitere, teils geladene Teilchen (CF_4^+ , CF_3^+ , CF_2^+ , ...), welche gemeinsam über das Gasrohr zur Ätzkammer geleitet werden. 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, wo sie mit der Scheibenoberfläche reagieren. 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:



Siliciumdioxid: $\text{SiO}_2 + 4\text{F} \rightarrow \text{SiF}_4 + \text{O}_2$

Siliciumnitrid: $\text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{F} \rightarrow 3\text{SiF}_4 + 2\text{N}_2$

Heutige Bedeutung

Zur Strukturierung von Schichten ist das rein chemische Trockenätzen ungeeignet, weil das isotrope Profil die Maske unterätzt. Als Remote- oder Downstream-Prozess – das Plasma brennt getrennt von der Scheibe, nur langlebige neutrale Radikale erreichen sie – erfüllt es in der Fertigung aber klar umgrenzte Aufgaben:

- Lackentfernung (Ashing): Sauerstoffradikale verbrennen den Fotolack nach der Ätzung oder Implantation zu CO_2 und H_2O .
- Kammerreinigung: Stickstofftrifluorid NF_3 wird in einer vorgeschalteten Plasmaquelle zerlegt; die Fluorradikale entfernen Abscheidungen aus Prozesskammern, ohne dass diese geöffnet werden müssen.
- Selektives Rückätzen: Radikalprozesse aus NH_3 und NF_3 entfernen natives Oxid und dünne Nitridschichten schadungsfrei – auch in Kontaktlöchern, in die eine gerichtete Ätzung nur schwer hineinreicht.
- Freilegen von Kanälen: Beim Nanosheet- bzw. Gate-all-around-Transistor wird Silicium-Germanium selektiv gegen Silicium isotrop entfernt, um die Kanalschichten freizustellen. Hier wird die Isotropie, die bei der Strukturierung stört, gezielt ausgenutzt.

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.

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.

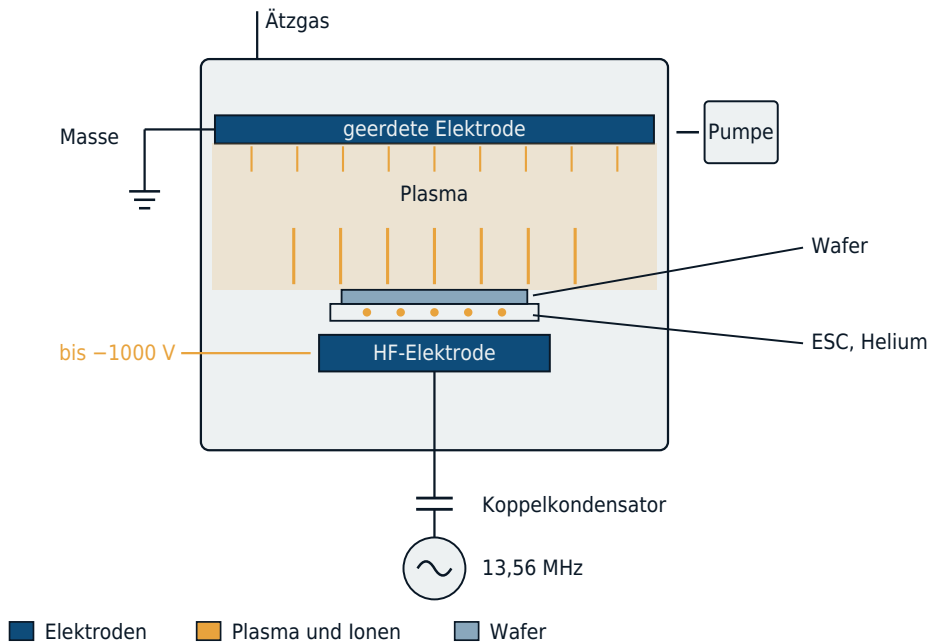
Der chemische Anteil der Ätzung geschieht durch die Reaktion von freien Radikalen auf der Scheibenoberfläche und mit dem physikalisch abgetragenen Material, so dass sich dieses nicht wie beim Ionenstrahlätzen an den Kammerwänden oder auf den Scheiben anlagern kann. Durch Druckerhöhung nimmt die freie 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.

Die Hexodenbauform ätzte mehrere Scheiben gleichzeitig auf einem sechsseitigen Träger. Solche Chargenanlagen sind heute nur noch von historischem Interesse, weil sich Homogenität und Endpunkt über viele Scheiben hinweg nicht ausreichend genau kontrollieren lassen.

Heute wird ausschließlich einzelscheibenweise in Parallelplattenbauweise geätzt. Der Wafer liegt auf einem elektrostatischen Chuck (electrostatic chuck, ESC), der ihn plan festhält und über Helium auf der Scheibenrückseite thermisch an die temperierte Elektrode koppelt. Damit sind Wafertemperaturen von etwa -100 °C bis über 100 °C einstellbar – die Temperatur ist eine der wirksamsten Stellgrößen für Selektivität und Profil.

Reaktives Ionenätzen

Parallelplattenbauweise: Der Wafer liegt auf der Hochfrequenzelektrode

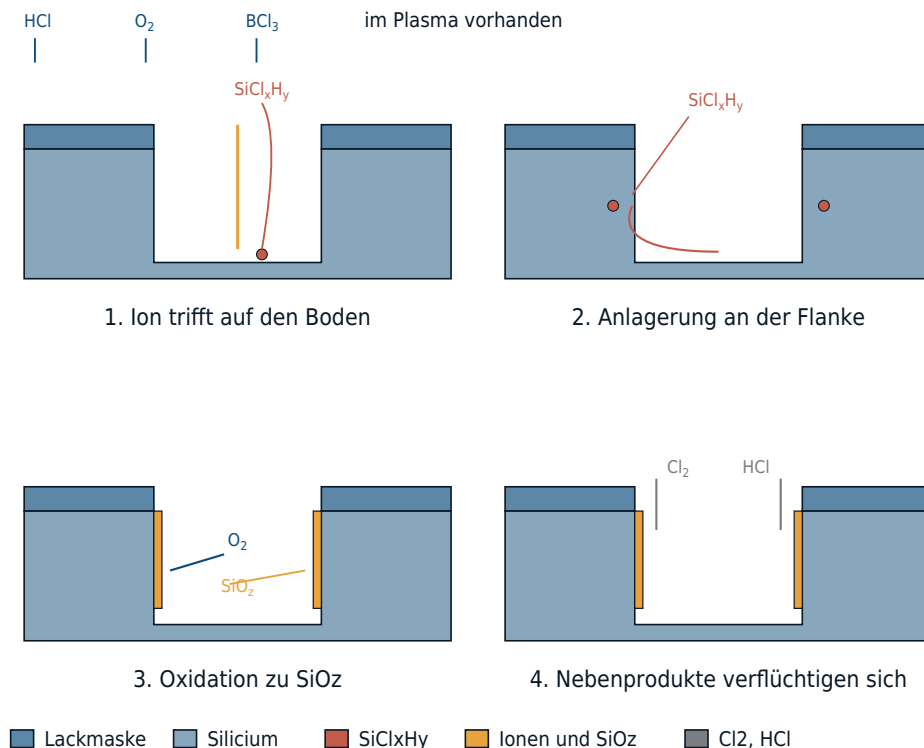


Weil die untere Elektrode kleiner ist als die obere, lädt sie sich gegenüber dem Plasma negativ auf. Die positiven Ionen werden dadurch senkrecht beschleunigt und tragen gerichtet ab – das Ätzprofil wird anisotrop.

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.

Mechanismus der Seitenwandpassivierung

Vier Schritte vom Ionenbeschuss bis zur schützenden Oxidschicht



Der Ionenbeschuss löst am Grabenboden SiCl_xH_y aus dem Silicium heraus. Ein Teil davon lagert sich an den Flanken an und oxidiert dort mit O_2 zu SiO_2 . Cl_2 und HCl verflüchtigen sich, die Oxidschicht bleibt als Schutz zurück – am Boden trägt der senkrechte Ionenbeschuss sie sofort wieder ab.

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 wurde früher Kohlenstoff eingesetzt: 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. Heute sind Elektroden aus Silicium, Siliciumcarbid oder Quarz üblich; die dem Plasma zugewandten Kammerteile werden mit Yttrium- oder Aluminiumoxid beschichtet, um Partikel und metallische Verunreinigungen zu vermeiden.

Weiterentwicklungen des reaktiven Ionenätzens

Der klassische RIE-Reaktor koppelt Plasmadichte und Ionenenergie über dieselbe Elektrode: Mehr Leistung bedeutet gleichzeitig mehr Ätzrate und mehr Schädigung. Die heutigen Anlagengenerationen lösen diese Kopplung auf und erweitern das Verfahren in mehrere Richtungen.

Hochdichte Plasmaquellen

Bei induktiv gekoppelten Anlagen (inductively coupled plasma, ICP, auch TCP) erzeugt eine Spule über einem dielektrischen Fenster das Plasma, bei ECR-Anlagen eine Mikrowelle im Magnetfeld. Die Ionenenergie wird getrennt über einen Bias-Generator an der Waferelektrode eingestellt. Ergebnis sind hohe Ätzraten bei geringer Ionenenergie, also weniger Schädigung, bei Drücken von deutlich unter 1 Pa.

Mehrfrequenz-Anlagen

Beim Ätzen von Dielektrika arbeiten kapazitiv gekoppelte Reaktoren mit zwei oder drei Generatoren unterschiedlicher Frequenz auf derselben Elektrode, um Ionendichte, Ionenenergie und Energieverteilung getrennt einzustellen. Für tiefe Strukturen werden Bias-Spannungen von mehreren Kilovolt eingesetzt.

Gepulstes Plasma

Wird die eingespeiste Leistung im Kilohertzbereich getaktet, klingt der Ladungsaufbau in tiefen Strukturen zwischen den Pulsen ab. Das verringert Profilfehler wie Bowing und Notching und verbessert die Selektivität.

Tiefenätzen (DRIE, Bosch-Prozess)

Beim tiefen reaktiven Ionenätzen wechseln sich sehr kurze Ätzschritte mit SF_6 und Passivierschritten mit C_4F_8 zyklisch ab. So entstehen Gräben mit Aspektverhältnissen über 30:1 und Tiefen von einigen hundert Mikrometern. Die zyklische Führung hinterlässt eine wellige Seitenwand (Scalloping). Hauptanwendungen sind mikromechanische Bauelemente (MEMS) und Durchkontaktierungen durch den Wafer (through-silicon vias).

Kryoätzen

Bei Wafertemperaturen um -100 °C kondensieren Reaktionsprodukte an den kalten Seitenwänden und passivieren sie, während der Ionenbeschuss den Boden freihält. Das ergibt glatte, senkrechte Seitenwände ohne Scalloping. Seit einigen Jahren wird das Verfahren auch beim Ätzen der Speicherlöcher im 3D-NAND-Flash in der Serienfertigung eingesetzt: Bei Tiefen um $10\text{ }\mu\text{m}$ und Aspektverhältnissen über 50:1 erlauben die tiefen Temperaturen Ätzchemien, die bei Raumtemperatur nicht funktionieren, und etwa die doppelte Ätzrate herkömmlicher Dielektrikaprozesse.

Atomlagengenaues Ätzen (ALE)

Aktivierung der Oberfläche und Abtrag werden in getrennte, selbstbegrenzende Halbschritte zerlegt und zyklisch wiederholt. Der Abtrag pro Zyklus liegt im Bereich einer Atomlage, gesteuert wird über die Zyklenzahl. Eingesetzt wird ALE dort, wo einzelne Nanometer über die Funktion entscheiden, etwa beim Freilegen von Kanälen und beim Ätzen

von Gate-Strukturen.

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.

Eingesetzte Ätzgase beim Trockenätzen

Die Prozesse müssen nicht nur mit einer Gasmischung und gleichen Ätzparametern 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. Reale Rezepte bestehen deshalb aus mehreren Schritten mit unterschiedlichen Gasmischungen, Leistungen und Drücken.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Gase, die beim Trockenätzen verwendet werden.

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, erhöhte Selektivität gegen Si
	CHF ₃ , CF ₄	
	CH ₃ F, CH ₂ F ₂	verbesserte Selektivität von Si ₃ N ₄ gegenüber SiO ₂
	C ₂ F ₆ / SF ₆	
	C ₃ F ₈	erhöhte Ätzrate gegenüber CF ₄
	C ₄ F ₆ , C ₄ F ₈ + O ₂ , Ar	Standardchemie für tiefe Strukturen (Kontaktlöcher, Speicherlöcher im 3D-NAND); die kohlenstoffreichen Moleküle bilden eine Polymerschicht auf Maske und Seitenwand, O ₂ steuert deren Dicke
Poly-Si	BCl ₃ , Cl ₂	keine Kontamination durch Kohlenstoff (C)
	SiCl ₄ , Cl ₂ / HCl, O ₂ / SiCl ₄ , HCl	
	HBr / Cl ₂ / O ₂	verbesserte Selektivität gegenüber Fotolack und SiO ₂ ; Standardchemie für Gate-Strukturen
	SF ₆	hohe Ätzrate, gute Selektivität gegen SiO ₂
	NF ₃	hohe Ätzrate, isotrop
	HBr, Cl ₂	

monokristallines Si	HBr, NF ₃ , O ₂	höhere Selektivität gegen SiO ₂
	BCl ₃ , Cl ₂ / HBr, NF ₃	
	SF ₆ / C ₄ F ₈ / SF ₆ , O ₂	Tiefenätzen: zyklisch im Bosch-Prozess bzw. bei tiefen Temperaturen im Kryoprozess
	Cl ₂	isotrope Ätzung
	BCl ₃	nur geringe Ätzrate, bindet zusätzlich Restfeuchte und natives Al ₂ O ₃
Al-Legierungen	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
W, TiN, Ti	SF ₆ / NF ₃	Rückätzen von Wolfram in Kontaktlöchern
	Cl ₂ , BCl ₃	Barrieren- und Metal-Gate-Schichten

Historisch wurden für monokristallines Silicium auch bromhaltige Fluorchlorkohlenwasserstoffe wie CF₃Br verwendet. Sie sind als ozonschichtschädigende Stoffe nach dem Montreal-Protokoll verboten und in der Fertigung durch HBr-Mischungen ersetzt worden.

Metallisierung: warum Kupfer nicht geätzt wird

Die Ätzung von Aluminiumlegierungen hat mit dem Übergang auf Kupferleitbahnen an Bedeutung verloren. Kupfer bildet mit Chlor und Fluor keine bei Prozesstemperatur flüchtigen Verbindungen und lässt sich deshalb praktisch nicht trockenätzen. Stattdessen wird im Damascene-Verfahren zunächst der Graben im Dielektrikum geätzt, anschließend das Kupfer abgeschieden und der Überschuss durch chemisch-mechanisches Polieren entfernt. Aluminium wird weiterhin für Bondpads sowie in der Leistungs- und Analogtechnik strukturiert.

Klimawirkung der Prozessgase

Die perfluorierten Ätz- und Reinigungsgase sind chemisch außerordentlich stabil – genau die Eigenschaft, die sie im Prozess brauchbar macht. In der Atmosphäre werden sie deshalb kaum abgebaut und wirken als sehr starke Treibhausgase. Die Treibhauspotenziale über 100 Jahre liegen nach dem sechsten IPCC-Bericht bei rund 7400 für CF₄, rund 12 400 für C₂F₆, rund 14 600 für CHF₃, rund 17 400 für NF₃ und rund 25 000 für SF₆. CF₄ verbleibt dabei nach heutiger Abschätzung einige zehntausend Jahre in der Atmosphäre.

Fertigungsseitig wird das Abgas jeder Anlage einzeln nachbehandelt (point-of-use abatement), thermisch, katalytisch oder in einem Plasmabrenner. Reaktive Gase wie NF₃ werden dabei zu über 99 % zerlegt, CF₄ jedoch nur teilweise; es

entsteht überdies als Zerlegungsprodukt anderer Fluorverbindungen. Reduziert wird der Beitrag daher vor allem am Prozess selbst: durch Ersatz von C_2F_6 durch NF_3 bei der Kammerreinigung, geringere Gasflüsse, kürzere Ätzzeiten und Verfahren wie das Kryoätzen mit höherer Ätzrate. Regulatorisch sind die Stoffe von der EU-Verordnung über fluorierte Treibhausgase erfasst; zusätzlich wird im Rahmen von REACH eine Beschränkung von PFAS diskutiert, für die Halbleiterfertigung bislang mit Ausnahmen und langen Übergangsfristen.

Sonderfall: Bosch-Prozess (Deep Reactive Ion Etching)

Eine wichtige Weiterentwicklung des reaktiven Ionenätzens ist der Bosch-Prozess (DRIE), der durch zyklischen Wechsel aus Ätz- und Passivierungsschritten extrem hohe Aspektverhältnisse bei nahezu senkrechten Wänden ermöglicht – deutlich mehr, als mit kontinuierlichem Ätzen erreichbar wäre.

Da er vor allem in der Mikrosystemtechnik zur Strukturierung tiefer Gräben und zur Vereinzelung von MEMS-Bauelementen eingesetzt wird, ist er ausführlich im Bereich Mikromechanik beschrieben: [DRIE: Deep Reactive Ion Etching](#).