

Hinweise und Erläuterungen zu

Anhang 54

Herstellung von Halbleiterbauelementen

der Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer nach § 7a WHG

Nur für den Dienstgebrauch

Inhaltsverzeichnis

1	ANWENDUNGSBEREICH	3
2	ABWASSERANFALL UND ABWASSERBEHANDLUNG	3
2.1	HERKUNFT, MENGE UND BESCHAFFENHEIT DES ROHABWASSERS.....	3
2.1.1	Herstellung von Halbleiterbauelementen (Chip).....	3
2.1.1.1	Maskenherstellung.....	4
2.1.1.2	Frontendfertigung	4
2.1.1.3	Backendfertigung.....	7
2.1.2	Herstellungsverfahren von Solarzellen	8
2.1.2.1	Solarzellen auf Siliziumbasis	8
2.1.2.2	Solarzellen auf Cadmiumtellurid (CdTe) - Basis	10
2.1.2.3	Solarzellen auf Kupfer-Indium-Diselenid oder Kupfer-Indium-Disulfid (CIS) -Basis.....	10
2.1.3	Abwasseranfall und Abwasserbeschaffenheit	11
2.1.3.1	Halbleiterherstellung	11
2.1.3.2	Solarzellenherstellung.....	12
2.1.3.2.1	Solarzellen auf Siliziumbasis	12
2.1.3.2.2	Solarzellen auf Cadmiumtellurid (CdTe) - Basis.....	14
2.1.3.2.3	Solarzellen auf Kupfer-Indium-Diselenid- oder Kupfer-Indium-Disulfid (CIS) – Basis.....	14
2.2	ABWASSERVERMEIDUNGSVERFAHREN UND ABWASSERBEHANDLUNGSVERFAHREN	15
2.2.1	Halbleiterherstellung	15
2.2.1.1	Maßnahmen zur Abwasservermeidung.....	15
2.2.1.2	Maßnahmen zur Abwasserbehandlung.....	17
2.2.2	Solarzellenherstellung.....	18
2.2.2.1	Maßnahmen der Abwasservermeidung	18
2.2.2.2	Maßnahmen zur Abwasserbehandlung.....	20
2.3	ABFALLBEHANDLUNG UND ABFALLVERWERTUNG.....	21
3	AUSWAHL DER PARAMETER, FÜR DIE ANFORDERUNGEN ZU STELLEN SIND	21
3.1	HINWEISE FÜR DIE AUSWAHL DER PARAMETER	21
3.2	HINWEISE AUF PARAMETER, DIE GEGEBENENFALLS IM EINZELFALL ZUSÄTZLICH BEGRENZT WERDEN SOLLEN.....	22
4	ANFORDERUNGEN AN DIE ABWASSEREINLEITUNG	22
4.1	ANFORDERUNGEN NACH § 7 A WHG	22
4.2	WEITERGEHENDE ANFORDERUNGEN.....	23
4.3	ALTERNATIVE ANLAGENBEZOGENE ANFORDERUNGEN UND ÜBERWACHUNGSREGELUNGEN	23
4.4	BERÜCKSICHTIGUNG INTERNATIONALER UND SUPRANATIONALER REGELUNGEN	23
5	ÜBERGANGSREGELUNGEN UND -FRISTEN (§ 7A ABS. 3 WHG)	23
6	HINWEISE ZUR FORTSCHREIBUNG.....	23
7	LITERATUR.....	24
8	ERARBEITUNG DER GRUNDLAGEN	24

1 Anwendungsbereich

Dieser Anhang gilt für Abwasser, dessen Schadstofffracht im Wesentlichen aus der Herstellung von Halbleiterbauelementen und Solarzellen einschließlich der zugehörigen Vor-, Zwischen- und Nachbehandlung stammt.

Dieser Anhang gilt nicht für Abwasser aus indirekten Kühlsystemen und aus der Betriebswasseraufbereitung einschließlich Retentaten aus der Reinstwasseraufbereitung durch Membranverfahren.

Die Betriebe der Halbleiter- und Solarzellenfertigung sind meist Indirekteinleiter.

2 Abwasseranfall und Abwasserbehandlung

2.1 Herkunft, Menge und Beschaffenheit des Rohabwassers

2.1.1 Herstellung von Halbleiterbauelementen (Chip)

Ausgangsmaterial sind dünne Scheiben mit planer Oberfläche, sogenannte Wafer, auf der Basis von z.B. Silizium, Galliumarsenid oder Galliumphosphid. Der Aufbau eines Chips findet auf der Oberfläche der Wafer statt und zwar durch gezielte Arbeitsschritte des Materialauftrags, -abtrags und der Stoffumwandlung sowie der Modifikation der Kristallstruktur (Dotieren). Der Gesamtprozess der Herstellung eines Chips kann sich aus mehreren hundert einzelnen Prozessschritten zusammensetzen, von denen sich einige mehrfach wiederholen können.

Die wesentlichen Prozessschritte sind:

- Maskenherstellung,
- Frontendfertigung,
- Backendfertigung,

wie am Beispiel der Siliziumchipherstellung in Abbildung 1 dargestellt.

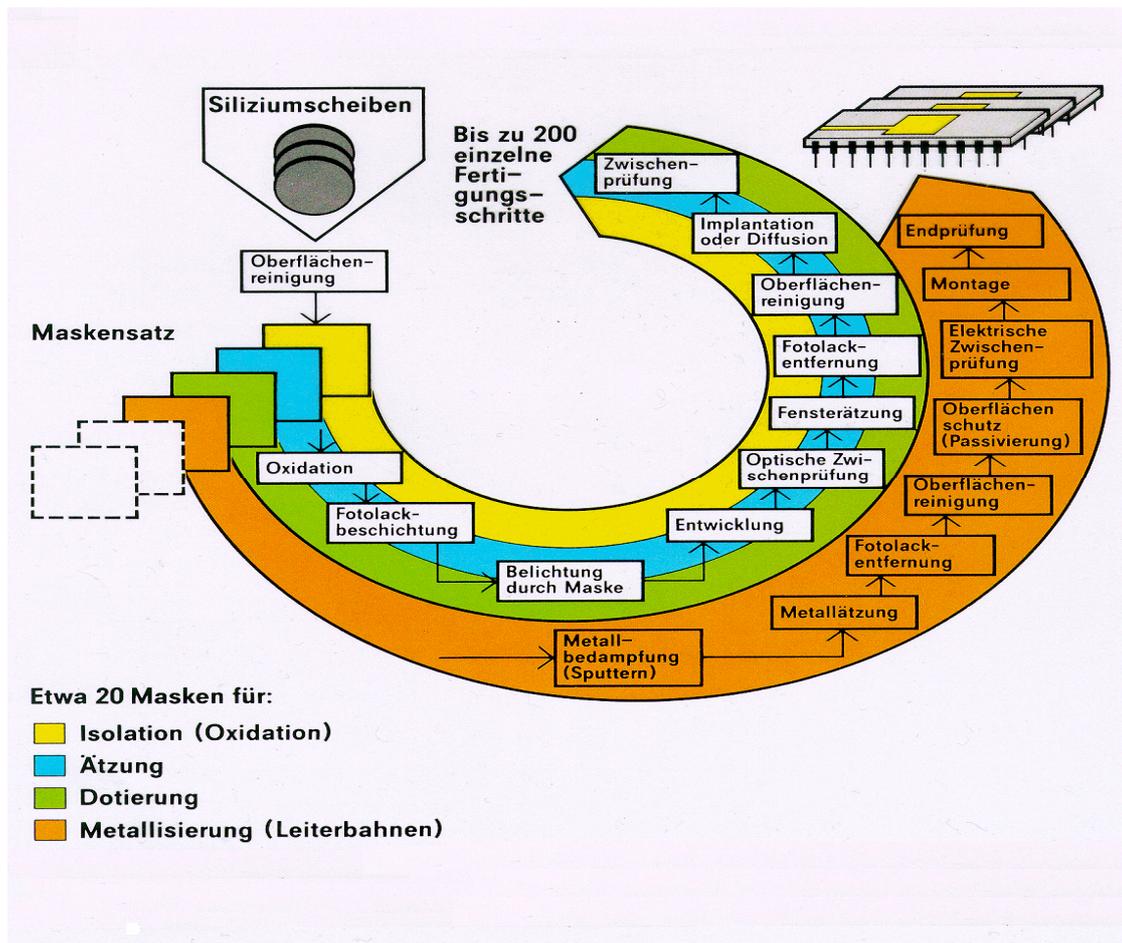


Abbildung 1: Prozessschritte der Halbleiterherstellung für Siliziumchips.

2.1.1.1 Maskenherstellung

Die Fotomaske ist das Hilfsmittel aller fotolithografischen Verfahren, mit der der Schaltungsentwurf des Chips mit einer lichtempfindlichen Fotolackschicht auf den Wafer übertragen wird. Die Maske ist eine Fotoplatte mit lichtdurchlässigen und lichtundurchlässigen Zonen. Die lichtundurchlässigen Bereiche sind z. B. mit Molybdän oder Chrom abgedeckt. Der Herstellungsprozess einer strukturierten Maske setzt sich aus folgenden Schritten zusammen:

- Fotoprozess,
- Ätzprozess,
- Reinigungsprozesse.

2.1.1.2 Frontendfertigung

Die Frontendfertigung umfasst den Schaltungsaufbau auf dem Wafer. Sie kann in Schichterzeugung, Vorbereitung der Schichtstrukturierung, Übertragung von Schicht-

strukturen, Schichtveränderung, Wafer- und Teilereinigung sowie Herstellung planer Schichten gegliedert werden.

Jede dieser Kategorien umfasst mindestens einen Prozess der mechanischen, chemischen und/oder physikalischen Oberflächenbehandlung. Im Regelfall müssen die Oberflächen nach den Behandlungsschritten gereinigt werden. Für diese Reinigungsschritte wird Reinstwasser eingesetzt, dem Chemikalien zur Erhöhung des Reinigungseffektes zugesetzt werden können.

Schichterzeugung

Die Schichten werden durch thermische Oxidation von freiliegendem Silizium (reaktive Gasphasenabscheidung, engl. Chemical Vapour Deposition, CVD), Aufdampfen von Atomen bzw. Molekülen (Physical Vapour Deposition) und Schleuderbeschichtung (z. B. mit Fotolacken) erzeugt.

Die reaktive Gasphasenabscheidung (CVD) ist eine Methode zur Herstellung von verschiedenen Schichten auf der Waferoberfläche durch Abscheidung aus der Gasphase. Die Abscheidung kann thermisch oder über Hochfrequenzanregung im Plasma initiiert werden. Zur Erzeugung von Leitern, Halbleitern oder Dielektrika kommen zum Schichtaufbau siliziumhaltige Gase wie Monosilan, Dichlorsilan und Metallhalogenide wie Wolframhexafluorid sowie Ammoniak, Phosphin und sauerstoffspendende Gase (z. B. N_2O) zum Einsatz.

Anlagenteile für CVD-Prozesse müssen periodisch gereinigt werden. Dazu werden fluorhaltige Gase wie C_2F_6 , C_3F_8 oder NF_3 eingesetzt. Aus diesen Stoffen werden in einem Plasma Fluoratome erzeugt, die den eigentlichen Reinigungsprozess bewirken.

Das Abgas aus den Prozesskammern wird mittels Wäscher, thermischer Nachverbrennung mit integrierter Auswaschung oder Festbettadsorbern gereinigt. Das Waschwasser aus der thermischen Nachverbrennung kann Wolframat, Silikat, Molybdat, Phosphat, Fluorid und Chlorid enthalten.

Mit Hilfe der Gasphasen-Epitaxie werden in der Halbleitertechnik dünne einkristalline Schichten von Silizium bzw. Verbindungshalbleitern wie GaAs und GaAsP auf der Waferoberfläche hergestellt. Die Schichtdicken liegen zwischen 0,5 und 150 μm . Die Silizium-, GaAs- oder GaP-Wafer werden unmittelbar vor der Epitaxie bei hoher Temperatur mit HCl-Gas geätzt. Diese sogenannten epitaxialen Schichten werden aus der Dampfphase bei hohen Temperaturen unter Zugabe von Dotiergasen auf der Waferoberfläche abgeschieden. Bei der Abscheidung von Verbindungshalbleitern dienen

- Stickstoff als Spülgas zwischen den einzelnen Schritten,
- Wasserstoff als Trägergas und
- Arsin bzw. Phosphin als Reaktionsgas.

Als Dotiergas kann bei Siliziumschichten Diboran oder Phosphin und bei Arsenphosphor-Schichten Selen-, Tellur- oder Schwefelwasserstoff verwendet werden.

Zur Abgasreinigung werden verstärkt Trockenbettabsorber verwendet, die nach Beladung entweder aufbereitet werden oder als besonders überwachungsbedürftiger Abfall entsorgt werden müssen.

Leitfähige Schichten werden bevorzugt durch das sogenannten Sputtern oder Physical Vapour Deposition (PVD) hergestellt. Dabei wird ein Target mit Ionen beschossen und so Metallatome, z. B. Kupfer oder Aluminium, herausgeschlagen, die sich anschließend auf dem Wafer ablagern und die leitfähige Schicht bilden.

Das Schleuderverfahren kommt im Bereich der Fotolithografie zur Anwendung. Das aufzubringende Material wird genau dosiert von oben auf einen rotierenden Wafer aufgebracht. Durch die Rotation des Wafers wird das Material gleichmäßig nach außen verteilt. Die Menge, die Rotationsgeschwindigkeit und die Zeit haben Einfluss auf die Schicht, die auf den Wafer aufgebracht werden soll.

Vorbereitung der Schichtstrukturierung

Die Strukturierung der Schicht wird durch Fototechnik (Lithografie, Entwicklung) vorbereitet. Bei den Fotoprozessen werden mit Hilfe von fotolithografischen Verfahren die Bauelement- und Leiterbahnstrukturen des Schaltungsentwurfs auf den Wafer übertragen. Die wichtigste Chemikalie in diesem Prozess ist der Fotolack, der licht- bzw. strahlungsempfindliche Polymere enthält. Zuerst wird die Waferoberfläche mit Fotolack beschichtet und durch eine Fotomaske hindurch belichtet. Beim Entwickeln wird Positivlack an den belichteten, Negativlack an den unbelichteten Stellen abgelöst. Er wird durch Behandlung im Sauerstoffplasma (Plasmaveraschung), mit organischen Lösemitteln oder mit stark oxidierenden Säuren entfernt.

Übertragung von Schichtstrukturen

Die Schichtstrukturen werden durch nasschemische oder trockene Ätzverfahren auf darunter liegende Schichten übertragen sowie nicht benötigte Schichten entfernt. Der Ätzprozess kann ganzflächig (Damageätzung) oder strukturell erfolgen. Beim Strukturätzen werden die nicht vom Fotolack abgedeckten Bereiche der obersten Wafer-schicht entfernt und dadurch Teilstrukturen des Chips hergestellt. Zum Ätzen werden nasse oder trockene Verfahren eingesetzt.

Das nasschemische Ätzen der Wafer erfolgt im Tauch- oder Sprühverfahren. Das Ätzmedium wird so ausgewählt, dass sich nur die oberste Schicht des Wafers selektiv auflöst, ohne die darunter liegende Schicht anzugreifen. Bei Silizium-Halbleitern dienen Salpetersäure, Flusssäure, Essigsäure, Phosphorsäure, Ammoniumfluorid, Kalilauge, Komplexbildner (z. B. EDTA) oder deren Gemische als Ätzmedium. Nach jedem Ätzvorgang werden die Wafer gespült. Reinigungsmittel sind z. B. Reinstwasser oder wässrige Lösungen von Wasserstoffperoxid und Ammoniak sowie verdünnte Lösungen von Salpetersäure oder Salzsäure.

Die Trockenätztechnik erfolgt unter Vakuum. Voraussetzung hierfür sind gasförmige Ätzmittel und Ätzprodukte. Als Ätzgase dienen CF_4 , NF_3 , SF_6 , BF_3 , CHF_3 , C_2F_6 , Cl_2 , BCl_3 und SiCl_4 . Die für die Ionisierung und Spaltung der Gase notwendige Reaktionsenergie liefert ein hochfrequentes Feld. Die entstehenden Gase werden mittels Vakuum aus der Reaktionskammer abgesaugt.

Schichtveränderung

Die Schicht wird zur gezielten Änderung der Stromleitfähigkeit z. B. des Siliziums mit Fremdatomen (Ionenimplantation) dotiert und der Wafer bei erhöhter Temperatur (Tempern) behandelt. Durch Gasphasendiffusion werden Dotieratome in die Waferoberfläche eingebracht. Dieser Prozess ist unterteilt in:

- Abscheidung (Deposition),
- Weiterverteilung im Wafer (Drive-In).

Die Arbeitsgänge finden in einem Diffusionsofen statt. Das Dotiermittel liegt als Gas, Flüssigkeit oder Feststoff vor und wird mit Hilfe eines Trägergases bei hohen Temperaturen (1.000 – 1.200 °C) über die Waferoberfläche geleitet. Flüssige oder feste Dotiermittel müssen vorher in die Gasphase überführt werden.

Die Dotierung findet in einer Ionenimplantationsanlage statt, wodurch genaue Tiefenprofile an Dotieratomen erreicht werden können. Die verwendeten Dotierelemente entsprechen denen der Gasphasendiffusion (As, Sb, P, B).

Wafer- und Teilereinigung

Wafer und Teile werden mit alkalischen, sauren oder organischen Lösemitteln gereinigt und anschließend gespült und getrocknet. Jede, auch die geringste Kontamination der Waferoberfläche beeinträchtigt die spätere Funktion des Chips. Deshalb müssen die Scheiben vor jedem wesentlichen Prozessschritt von gelösten und partikulären Verunreinigungen befreit werden. Dies soll verhindern, dass die Haftung von Schutzschichten und Kontaktiermetallen beeinträchtigt wird und Verunreinigungen eindiffundieren, die die elektrischen und optischen Eigenschaften der Bauelemente verändern können.

Herstellung planer Schichten

Plane Schichten werden durch chemisch-mechanisches Polieren (CMP) erzeugt. Hierbei werden für den weiteren Schichtaufbau vorher aufgebrachte Oxidschichten mittels einer Schleifpaste (Slurry) rotierend mit einem Poliertuch (Pad) behandelt.

2.1.1.3 Backendfertigung

Nach der Fertigstellung der Wafer werden diese auf die erforderliche Scheibenstärke geschliffen. Zur Einebnung der Oberfläche sind Läpp- und Polierprozesse üblich. Das

Läppmittel enthält u. a. Siliziumcarbid, Siliziumdioxid und/oder Aluminiumoxid, aufgeschlämmt in Wasser bzw. in Laugen. Anschließend werden sie aus dem Waferverbund unter Einsatz von diamantbesetzten Sägeblättern mit Wasser als Kühlmittel gesägt, auf Metallrahmen (Leadframes) aufgebracht und durch feine Golddrähte mit den „Beinchen“ der Leadframes verbunden. Hierzu werden Verfahren wie Kleben, Lötensowie galvanische und chemische Metallauftrags- und -abtragsverfahren angewandt. Die montierten Chips werden in eine Pressmasse eingegossen und nach einer galvanischen Beschichtung der Leadframes als komplette Bauelemente ausgestanzt.

2.1.2 Herstellungsverfahren von Solarzellen

In absehbarer Zukunft dürfte die Solarzelle auf Siliziumbasis in den verschiedenen Varianten der dominierende Zellentyp mit deutlich über 95 % Marktanteil sein. Alternative Systeme auf der Basis Cadmiumtellurid, Kupfer-Indium-Diselenid, Kupfer-Indium-Disulfid oder Gallium-Arsenid spielen nach gegenwärtigen Kenntnisstand nur eine untergeordnete Rolle. Fotozellen auf der Basis Gallium-Arsenid werden derzeit in Deutschland nicht hergestellt.

2.1.2.1 Solarzellen auf Siliziumbasis

Mono- und polykristallines Silizium

Zur Herstellung von Solarzellen auf der Basis von mono- und polykristallinem Silizium werden zunächst maßgenaue Siliziumblöcke mit definierter Kantenlänge herausgesägt. Der Querschnitt der Blöcke ist in der Regel quadratisch, die Kantenlänge liegt derzeit bei 15 cm, wobei die Entwicklung zu Kantenlängen von bis zu 30 cm geht. Aus den maßgenau gesägten Siliziumblöcken werden die Grundelemente der Solarzellen, die Wafer, mit Hilfe von Drahtsägen ausgeschnitten. Die Waferdicke liegt bei 200 - 300 μm , die Schneidbreite (vorgegeben durch den Durchmesser des Schneidrahtes) bei etwa 150 μm . Das zerspannte Silizium ist mit Schneidhilfsmitteln und Drahtabrieb stark kontaminiert. Ein direkter Wiedereinsatz in der Halbleiterindustrie ist nicht möglich, so dass es als Sekundärrohstoff in der Metallurgie zur Herstellung von Silizium-Stählen eingesetzt wird. Nach dem Sägen werden die Wafer senkrecht in Horden aus Kunststoff gestellt und in dieser Art anschließend durch alle nasschemischen Prozesse transportiert.

Der Sägevorgang erfolgt mit Hilfe von reinem Wasser bzw. einer tensidhaltigen Schneidflüssigkeit unter Zusatz von feinem Siliziumkarbid. Während des Sägevorgangs belädt sich die Schneidflüssigkeit mit Silizium- und Drahtabrieb. Die Feststoffe werden (kontinuierlich oder diskontinuierlich) aus der Schneidflüssigkeit durch Sedimentation, Filtration oder Zentrifugation abgetrennt.

Die Oberflächen der Wafer sind nach dem Sägeprozess sorgfältig von allen organischen und anorganischen Verunreinigungen zu reinigen, meist mit einer Lösung aus Wasserstoffperoxid, Ammoniakwasser und Salzsäure nach einer Vorreinigung in heißer Salpetersäure bei etwa 80 °C. Dabei oxidieren organische Verbindungen, während Restspuren von Metallen komplexieren. Die Reinigung der Wafer kann jedoch

auch mit starken Alkalien oder tensidhaltigen wässrigen Reinigungsmitteln in Kombination mit intensiver Warenbewegung erfolgen. Nach dem Reinigen durchlaufen die Wafer einen mehrstufigen Spülprozess, der in der Regel als Kaskade (2 - 3 Spülschritte) mit anschließendem Heißwasserbecken und Gebläsetrockner ausgelegt ist.

Danach wird die Waferoberfläche für die Dotierung des Siliziums mit dem Dotierelement (Phosphor) durch Ätzen vorbereitet. In diesem Ätzprozess mit sauren (Gemisch aus Salpeter- und Flusssäure) oder alkalischen (NaOH bzw. KOH/Isopropanol-Gemische) Ätzmitteln geht ein Teil des Siliziums als Fluorid (saure Ätzung) bzw. Na/K-Silikat (alkalische Ätzung) in Lösung.

Das Aufbringen der Halbleiterschichten (p/n-Übergang) erfolgt mittels Thermodiffusion bei ca. 800 °C. Durch die Thermodiffusion bildet sich auf der Waferoberfläche eine dünne glasartige Schicht von Phosphaten, die als Isolator wirkt und daher vor den weiteren Prozessschritten entfernt werden muss. Dazu werden die Wafer in verdünnter Flusssäure (HF) oder einer Mischsäure aus Fluss- und Salpetersäure geätzt und anschließend sorgfältig gespült. Bei Erreichen eines bestimmten Phosphatgehalts ist die Ätzlösung erschöpft. Sie wird verworfen und durch frische Lösung ersetzt. Die spezifischen Abwassermengen können wegen unterschiedlicher Ätz- und Spülbedingungen stark schwanken.

Die elektrischen Kontakte auf dem Wafer können auf verschiedene Weise hergestellt werden, wobei alle Verfahren abwasserfrei arbeiten. Ein häufig verwendetes Verfahren ist der Siebdruck, bei dem die entsprechenden Flächen mit einer Metallpaste bestrichen werden, die anschließend in einem thermischen Prozess verfestigt wird.

Foliensiliziumzellen (EFG-Verfahren)

Foliensilizium, das nach dem EFG-Verfahren (Edge defined Film Growth) gewonnen wird, ist ein polykristallines Material, dessen weitere Verarbeitung zur Solarzelle, wie unter mono- und polykristallinem Silizium beschrieben, erfolgt. Allein die Herstellung der Wafer ist unterschiedlich. Beim EFG-Verfahren wird aus einer Siliziumschmelze über eine Graphitform ein achteckiges Rohr mit einer Kantenlänge von etwa 100 mm gezogen. Die Siliziumscheiben werden mittels eines Laserstrahls aus den Wänden des Rohres ausgeschnitten und können ohne weitere mechanische Bearbeitung als Wafer eingesetzt werden. Die Dicke der Rohrwand und damit die Dicke der daraus hergestellten Wafer kann durch die Geometrie der Graphitform, die Temperatur des Siliziums und die Ziehgeschwindigkeit eingestellt werden. Bei dieser Technik entfällt der energie-, abwasser- und abfallintensive Sägeprozess.

Amorphe Siliziumzellen

Solarzellen aus amorphem Silizium werden durch Abscheiden der einzelnen Schichten in einem Hochfrequenzglimmentladungsreaktor hergestellt. Hierzu wird gasförmiges Silan (SiH_4) in den Prozess eingebracht und dort in Wasserstoff und Silizium aufgespalten. Das Silizium scheidet sich dabei als α -Silizium auf dem vorbereiteten Substrat ab. Die notwendige p/n-Dotierung wird durch Zugabe von Diboran (B_2H_6) bzw.

Phosphin (PH_3) in die Gasphase erreicht. Abwasser fällt nur bei der Reinigung der Apparaturen und Reaktionsgefäße an.

2.1.2.2 Solarzellen auf Cadmiumtellurid (CdTe) - Basis

Basis einer CdTe-Solarzelle ist eine Glasscheibe, auf der die funktionalen Schichten der Zelle nacheinander aufgebaut werden. Die Glasscheibe wird mit rotierenden Bürsten und VE-Wasser mechanisch gereinigt. Das Waschwasser wird über Ionenaustauscher im Kreislauf geführt. Durch Kathodenzerstäubung wird als erstes eine ca. 250 nm dicke transparente, elektrisch leitende Schicht, die den Frontseitenkontakt bildet, auf die gereinigte Glasscheibe aufgetragen. Diese auch TCO-Film genannte Schicht besteht aus Indium-Zinn-Oxid und Zinnoxid. Auf die leitende Schicht folgt eine Cadmiumsulfidschicht von 100 nm Dicke, die als n-Leiter fungiert. Darauf wiederum wird der p-Leiter, eine aktive Cadmiumtelluridschicht von etwa 5 μm Dicke aufgebracht. Die Halbleiterschichten CdS und CdTe werden mittels Sublimationsverfahren im Vakuum erzeugt. Das Ausgangsmaterial CdS bzw. CdTe (jeweils mit einer Reinheit von 99,99 %) wird in einem Graphittiegel auf ca. 700 °C aufgeheizt, wobei es bei entsprechendem Vakuum auf der Glasscheibe sublimiert. CdTe wächst hierbei ohne weitere Dotierprozesse p-leitend auf. In einem anschließenden thermischen Prozess erfolgt eine Aktivierung der Halbleiterschichten.

An die Aktivierung schließt sich als einziger nasschemischer Schritt in der gesamten Produktion ein Beizprozess zur Vorbereitung der Oberfläche für die Aufbringung des rückseitigen elektrischen Kontaktes an. Beizmittel ist ein Gemisch aus Phosphor- und Salpetersäure. Den Abschluss der Zelle bildet wiederum eine 200 nm dicke, elektrisch leitende Schicht aus Nickel oder Molybdän, die mittels Kathodenzerstäubung aufgetragen wird.

Cadmiumtellurid-Solarmodule werden üblicherweise in den Maßen 60 x 120 cm gefertigt. Zum Erreichen der Betriebsspannung von rund 80 Volt wird die Gesamtfläche des Moduls in ca. 100 Einzelzellen aufgeteilt, die elektrisch in Serie geschaltet werden. Die Bildung dieser Einzelzellen erfolgt durch Trennschritte jeweils nach Aufbringen der funktionalen Schichten entweder durch Laser oder durch mechanische Verfahren. Zur mechanischen Stabilisierung wird das Cadmiumtellurid-Modul rückseitig mit einer Kunststoffolie und einer weiteren Glasscheibe abgedeckt. Es hat damit die Charakteristik einer Verbundglasscheibe, was ihm eine hohe mechanische Stabilität verleiht.

2.1.2.3 Solarzellen auf Kupfer-Indium-Diselenid oder Kupfer-Indium-Disulfid (CIS) -Basis

Basis einer CIS - Solarzelle ist eine Glasscheibe, auf der sich die funktionalen Schichten der Zelle aufbauen. Die Reinigung der Glasscheibe erfolgt in der Regel in wässrigem Medium, gegebenenfalls unter Zugabe von Tensiden. Auf der gereinigten Glasscheibe scheidet sich im Hochvakuum eine ca. 1 μm dicke Molybdänschicht ab, die den Rückseitenkontakt bildet. Danach werden durch Direktauftrag die Elemente Kupfer und Indium aufgebracht, die sich in einem anschließenden thermischen Prozess in Schwefelatmosphäre in die gewünschte Kristallstruktur Kupfer-Indium-Disulfid

(CuInS₂) mit einer Schichtdicke von 1 bis 3 µm umwandeln. Die physikalisch aufgebraute CuInS₂-Schicht wird zur Reduzierung von überschüssigem Kupfer mit einer niedrig konzentrierten, wässrigen Kaliumcyanid-Lösung behandelt. Dadurch wird überwiegend Kupfer komplex gelöst. Bei CuInSe₂-Schichten ist dieser zusätzliche Ätzschritt nicht unbedingt notwendig. Als Pufferschicht wird auf die Kupfer/Indium-Sulfidschicht eine sehr dünne Cadmiumsulfidschicht von 0,03 µm, gebildet durch chemische Reaktion aus einer alkalischen Lösung von Cadmiumacetat und Thioharnstoff, aufgebracht. Abschließend wird direkt eine Fensterschicht aus Zinkoxid aufgetragen.

2.1.3 Abwasseranfall und Abwasserbeschaffenheit

2.1.3.1 Halbleiterherstellung

Wesentliche Abwasseranfallstellen sind:

- die Abluftreinigung,
- die Erneuerung unbrauchbar gewordener Prozesschemikalien,
- die Spülvorgänge nach den Prozessschritten,
- die Reinstwasseraufbereitung aus Kreislaufwasser,
- die Reinstwasseraufbereitung aus Rohwasser,
- die Teilereinigung,
- die Entwicklung und Fotolackentfernung.

Die Abwasseranfallstellen und die wesentlichen Inhaltsstoffe des Abwassers können für die einzelnen Prozessschritte der Tabelle im Anhang entnommen werden.

Die bei der Halbleiterherstellung entstehenden gasförmigen Emissionen werden entsprechend den Anforderungen der TA-Luft einer Abluftreinigung (nasse oder trockene Verfahren) unterzogen. Auf Verfahren, bei denen Abwasser anfällt, sollte nach Möglichkeit verzichtet werden.

Das Arbeiten im Sub-µm-Bereich erfordert höchste Reinheit. Neben hochreinen Prozesschemikalien werden auch Mischungen mit reaktionsfähigen Stoffen eingesetzt. Wegen partikulärer Verunreinigungen der Ätz- bzw. Reinigungschemikalien und wegen der „Alterung“ von Mischungen müssen die Prozesschemikalien aus Qualitätsgründen periodisch erneuert werden.

Jede, auch die geringste Kontamination der Waferoberfläche beeinträchtigt die spätere Funktion der Chips. Aus diesem Grund müssen vor jedem wesentlichen Prozessschritt die Scheiben von gelösten und partikulären Verunreinigungen befreit werden. Dies soll verhindern, dass die Haftung von Schutzschichten und Kontaktmetallen beeinträchtigt wird und dass Verunreinigungen eindiffundieren, die die elektrischen und optischen Eigenschaften der Bauelemente unerwünscht verändern können. Durch die hohen Qualitätsanforderungen an die Waferoberfläche muss Reinstwasser zum Spülen eingesetzt werden, das einen möglichst geringen Anteil an gelösten Salzen und Gasen, organischen Stoffen und Partikeln haben sollte.

Zur Reinstwasserherstellung wird sowohl Frischwasser (Öffentliche Wasserversorgung oder Eigenwasserversorgung) als auch Prozesswasser verwendet. Der Einsatz von Prozesswasser ist dabei durch Art und Konzentration der Prozesswasserinhaltsstoffe limitiert. Auf Grund der Nutzung geeigneter Prozesswasserströme ist die Reinstwasseraufbereitungsanlage das zentrale Element zur Mehrfachnutzung des Spülwassers. Sie besteht in der Regel aus folgenden Komponenten:

zur Vorbehandlung:

- Vorfiltration (Kiesfilter/Aktivkohlefilter),
- Konditionierung (Enthärten, Härtestabilisierung),
- Vakuumentgaser/CO₂-Rieseler,
- Umkehrosmose.

zur Feinreinigung:

- Entsalzung durch Ionenaustauscher,
- Umkehrosmose,
- biologische Behandlungsstufe,
- Entkeimung (UV-Licht),
- Endfiltration.

Bei der Vorbehandlung des Rohwassers (Frischwasser) fallen als Konzentratstrom der Umkehrosmose ca. 30% der eingespeisten Wassermenge als Abwasser an. Die Retentate aus der Umkehrosmose enthalten lediglich die angereicherten Inhaltstoffe aus dem Grund- und Trinkwasser. Das vorgereinigte Rohwasser geht gemeinsam mit dem Kreislaufwasser aus der Produktion in die Behandlungsschritte der Feinreinigung der Anlage zur Herstellung von Reinstwasser. Das Abwasser aus der Reinstwasseraufbereitung (Vorbehandlung und Feinreinigung) fällt unter den Anwendungsbereich des Anhangs 31.

2.1.3.2 Solarzellenherstellung

2.1.3.2.1 Solarzellen auf Siliziumbasis

Bei der Herstellung von Solarzellen auf Siliziumbasis fällt Abwasser im Wesentlichen bei folgenden Prozessschritten an:

Sägen der Wafer

Abwasser fällt in geringen Mengen durch Ausschleusen und Verwerfen von Schleifmittelsuspension an. Abwasserinhaltsstoffe sind Silizium, Siliziumcarbid, Eisen und Legierungselemente (fein verteilt als Partikel) sowie weitere Bestandteile der Schleifmittelsuspension wie Tenside.

Reinigung der Waferoberfläche von Verunreinigungen aus dem Sägeprozess

Abwasser entsteht durch Verwerfen der Reinigungslösung sowie durch Spülwasser. Abwasserinhaltsstoffe sind Wasserstoffperoxid, Ammonium, Salzsäure, Metallionen, Natronlauge und Tenside.

Ätzprozesse

Die verworfenen Ätzlösungen werden entweder als Abfall an externe Entsorger abgegeben oder gemeinsam mit dem Spülwasser in der betriebseigenen Abwasserreinigung behandelt. Abwasserinhaltsstoffe sind Salpetersäure, Nitrite, Flusssäure, Natronlauge und Kalilauge.

Spülprozesse

Für den Transport der Wafer durch die Prozess- und Spülbäder kommen zwei Verfahren zur Anwendung:

Beim Vertikaltransport werden die Wafer senkrecht stehend in Kunststoffbehältern durch Prozess- und Spülbäder transportiert, wodurch ein gutes Abtropfen mit entsprechend geringer Verschleppung von Prozesslösung ermöglicht wird. Das erforderliche Spülkriterium wird in der Regel mit einer dreistufigen Spültechnik erreicht, wobei die Spülstufen meist als Kaskaden ausgelegt sind, deren letzte Stufe mit Reinstwasser betrieben wird.

Beim Horizontaltransport werden die Wafer liegend auf Transportrollen durch die Prozess- und Spülbäder transportiert. Bei dieser Technik kann der Austrag der anhaftenden Prozesslösung durch Abquetschen oder Abblasen erheblich reduziert werden. Der Prozess wird durch die hydrophobe Oberfläche der Wafer unterstützt, so dass Verschleppungen minimiert werden. Das Abquetschen oder Abblasen kann mindestens eine Spülstufe ersetzen.

Bei einigen Ätzprozessen ist es erforderlich, nach dem Ausheben aus der Behandlungslösung die chemischen Reaktionen schnell zu unterbrechen, so dass kein Abtropfen der Prozesslösung über dem Prozessbad möglich ist. In diesen Fällen werden die Wafer unmittelbar nach dem Ausheben in eine relativ hochkonzentrierte Standspüle (Quenche) eingebracht, in der die Hauptmenge der ausgeschleppten Prozesslösung abgeschieden wird. Nach der Quenche folgt gewöhnlich eine wassersparende, mehrstufige Spültechnik unter Verwendung von Sparspülen. So gelingt es, trotz einer hohen Ausschleppung, den Spülwasserverbrauch gering zu halten. Die Rückführung der Halbkonzentrate aus der Quenche in den Ätzprozess ist wegen einer unausgeglichenen Wasserbilanz nicht möglich. Außerdem müssen die Ätzlösungen aus Qualitätsgründen häufig gewechselt werden, so dass die bewusst in Kauf genommene Ausschleppung als Instrument der Prozessbadpflege genutzt wird.

Abluftreinigung

Eine Abluffterfassung und -reinigung ist bei allen Prozessschritten erforderlich, bei denen Schadstoffe in die Luft emittiert werden, insbesondere beim Einsatz von Salpetersäure und Flusssäure. Die Reinigung der Abluft erfolgt durch Nasswäscher, die mit Wasser oder alkalischen Absorptionsmedien arbeiten. Abwasser entsteht beim Ersatz der beladenen Waschlösungen.

Zur NO_x -Abscheidung werden auch katalytische Verfahren der NO_x -Zerstörung eingesetzt. Diese Verfahren haben den Vorteil, dass die Nitratfracht im Abwasser der

Abluftreinigung gering gehalten werden kann. Abwasserinhaltsstoffe sind Salpetersäure, Nitrite und Flusssäure.

2.1.3.2.2 Solarzellen auf Cadmiumtellurid (CdTe) - Basis

Ätzen der CdTe/CdS-Schichten

Das Ätzen der CdTe/CdS-Schichten ist der einzige nasschemische Fertigungsschritt. Der Ätzvorgang erfolgt mit einem Säuregemisch, das im Wesentlichen aus Phosphorsäure besteht. Daran schließt sich eine dreistufige Spülung an. Der Ätzprozess ist abwasserfrei auszulegen. Der Überlauf der ersten Spüle nach dem Ätzbad wird einem Vakuumverdampfer zugeführt, in dem die Spülflüssigkeit wieder auf die ursprüngliche Konzentration der Beizsäure angereichert wird. Das Konzentrat wird über eine Vorlage in den Prozess zurückgeführt, während das Destillat wieder als Spülwasser dient. Säureverluste werden durch Dosierung von Frischsäure ausgeglichen. Da sich die Säure beim Ätzprozess mit Störstoffen anreichert, wird sie periodisch ausgetauscht und in der Regel extern entsorgt.

Die abgesaugte Abluft wird mit Wasser aus der zweiten Spülstufe gereinigt und das Waschwasser des Abluftwäschers der ersten Spülstufe zugeführt.

2.1.3.2.3 Solarzellen auf Kupfer-Indium-Diselenid- oder Kupfer-Indium-Disulfid (CIS) – Basis

Reinigung des Basismaterials Glas

Abwasser entsteht durch Verwerfen der Reinigungslösung sowie durch Spülwasser. Da die eingesetzten Glasscheiben werksseitig sauber angeliefert werden, ist eine signifikante Beladung des Waschwassers mit Schadstoffen nicht zu erwarten. Sofern zur Reinigung Tenside eingesetzt werden, müssen diese der Tensidverordnung entsprechen. Das Abwasser bedarf keiner besonderen Vorbehandlung. Die Vermischung mit dem übrigen Abwasser sollte erst nach dessen Behandlung erfolgen.

Behandeln der Kupfer/Indium-Sulfidschicht

Das Abwasser stammt aus der Kaliumcyanid-Lösung und dem Spülwasser. Kaliumcyanid-Lösung und Spülwasser werden getrennt gesammelt und behandelt. Abwasserinhaltsstoffe sind Kupfer, Kalium und Cyanid.

Aufbringen der Cadmiumsulfidschicht

Das Abwasser besteht im Wesentlichen aus Spülwasser und periodisch verworfener Behandlungslösung. Abwasserinhaltsstoffe sind Cadmium- und Acetat-Ionen, Cadmiumsulfid, Ammoniak sowie Thioharnstoff.

2.2 Abwasservermeidungsverfahren und Abwasserbehandlungsverfahren

2.2.1 Halbleiterherstellung

2.2.1.1 Maßnahmen zur Abwasservermeidung

Entsprechend den allgemeinen Anforderungen des Teils B ist die Schadstofffracht so gering zu halten, wie dies nach Prüfung der Verhältnisse im Einzelfall durch folgende Maßnahmen möglich ist:

- Einsatz wassersparender Spültechnik (z.B. getaktete Spülung, Tauchspritzspültechnik, Leitfähigkeitsweiche),
- Mehrfachnutzung von geeignetem Spülwasser nach Aufbereitung mittels Verfahren wie Kreislaufführung über Ionenaustauscher, Membrantechnik,
- Mehrfachnutzung von geeignetem Spülwasser durch Weiterverwendung auch in anderen Bereichen, z. B. als Kühl- oder Brauchwasser zur Dampferzeugung, in Rückkühlwerken, in Galvaniken, in der Leiterplattenfertigung,
- Kreislaufführung von Abluftwaschwasser,
- Weiterverwendung oder Abgabe von Prozessbädern (z. B. Säuren, organische Lösungsmittel) zur Verwertung.

Ziel der allgemeinen Anforderungen ist es, den Einleiter zu einer systematischen, durch die Behörden nachvollziehbaren Überprüfung und Umsetzung des diesbezüglichen technischen Potentials zu veranlassen. Die oben genannten möglichen Maßnahmen (Prüfkriterien) konkretisieren die in § 3 Abs. 1 der Abwasserverordnung aufgeführten Maßnahmen und präzisieren den für den Einleiter zu fordernden Prüfumfang. Die Erfüllung der allgemeinen Anforderungen beinhaltet, dass der Nachweis im Sinne des Teils B des Anhangs 54 erbracht wird. Die technischen Möglichkeiten zur Verwirklichung der allgemeinen Anforderungen befinden sich in ständiger Entwicklung. Eine erneute Überprüfung der Anforderungen nach Teil B ist erforderlich, wenn ein Wasserrechtsbescheid neu erteilt oder angepasst wird.

Grundsätzlich sind im Sinne des integrierten Umweltschutzes alle Vermeidungs- und Verminderungsmöglichkeiten auszuschöpfen. Bei einigen Prozessschritten ist eine vollständige Vermeidung von Abwasser durch verschiedene technische Maßnahmen möglich. Im Wesentlichen sind das Prozessschritte, bei denen nasschemische Reaktionen durch Gasphasenreaktionen ersetzt werden. Oft ist eine Verminderung der Spülwassermenge nur begrenzt möglich, wenn der jeweilige chemische Prozess nach dem Ausfahren des Wafers aus der Prozesslösung sofort mit großen Mengen Reinstwasser unterbrochen werden muss. Die Abwasserminimierung in der Halbleiterfertigung wird im Wesentlichen durch die Rückführung geeigneter Prozesswasserströme in den Produktionsprozess erreicht.

Die Halbleiterfertigung unterscheidet sich von den bekannten Verfahren der Oberflächenbehandlung in den folgenden Punkten:

- die Produktion findet in Reinräumen statt,
- die Anzahl der erforderlichen Prozessschritte ist deutlich höher,

- die Anforderungen an die Qualität des Spülwassers sind erheblich höher.

Unter der Vorgabe einer wassersparenden Produktionstechnik erfordern diese Randbedingungen ein spezifisches Wassermanagement (siehe Abbildung 2).

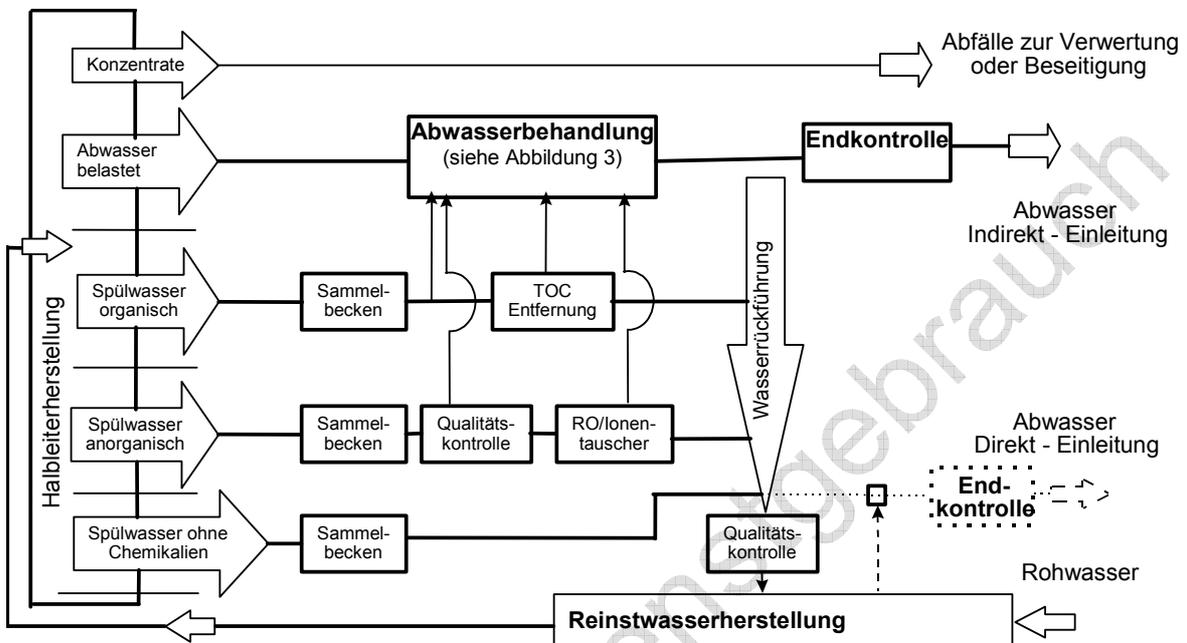


Abbildung 2: Wassermanagement

Der Ablauf der mehrstufigen Reinigung erfolgt prinzipiell über ein Überlaufbecken oder einen Quick-dump-Rinser. Als letzter Prozessschritt wird eine Endreinigung mit Trocknung in einer Trockenschleuder durchgeführt.

Die Wafer werden in Horden von Tauchbecken zu Tauchbecken gehoben. Dieser Vorgang geschieht entweder manuell an verschiedenen Ätzbänken oder vollautomatisch in Ätzrobotern. Eine Horde fasst maximal 25 Wafer und ist nach allen Seiten offen, so dass die Scheiben ständig gut umspült sind.

Nach dem Prozessbecken folgt das Überlaufbecken. Dieses wird ständig von einem geringen Wasserstrom durchflossen, um eine Partikelbildung im Spülbecken zu verhindern. Wird eine Horde in das Überlaufbecken gestellt, erhöht sich automatisch die Durchflussmenge und damit die Spülwirkung. Nach der eingestellten Spüldauer reduziert sich die Durchflussmenge wieder auf den Ausgangswert.

Zur weitergehenden Reinigung werden die Wafer im Quick-dump-Rinser gespült. Dieser wird ständig mit geringem Durchfluss betrieben. Entsprechend dem Spülprogramm folgen automatisch nacheinander mehrere Spülschritte. Zuerst wird das Becken von unten geflutet. Nach der voreingestellten Zeit öffnet sich ein Bodenventil mit großem Durchflussquerschnitt und das gesamte Wasser fließt schlagartig ab. Gleichzeitig werden die Wafer von oben abgesprüht. Dann schließt sich das Bodenventil wieder und das Becken füllt sich langsam. Diese Prozedur wiederholt sich mehrmals.

2.2.1.2 Maßnahmen zur Abwasserbehandlung

Das anfallende Abwasser wird in Konzentrat- und Spülwasserströme unterteilt. Um bei der Abwasserbehandlung auch bei zeitversetztem Abwasseranfall eine gegenseitige Neutralisation zu erreichen, ist eine Pufferung sauren, alkalischen und neutralen Abwassers sinnvoll. Weitere Unterteilungen sind abhängig von Abwassermenge und -belastung. Die einzelnen Abwasserströme und Konzentrate werden den entsprechenden Behandlungen oder Entsorgungswegen zugeführt. Diese sind beispielhaft in Abbildung 3 dargestellt:

- Konzentrate zur Verwertung oder Beseitigung,
- Konzentrate zur Abwasserbehandlung,
- Spülwasser, z. B. sauer/alkalisch, fluoridhaltig, zur Durchlaufneutralisation,
- Spülwasser, arsenhaltig, zur Fällung und Feststoffabtrennung,
- Spülwasser, metallhaltig, zur Fällung und Feststoffabtrennung.

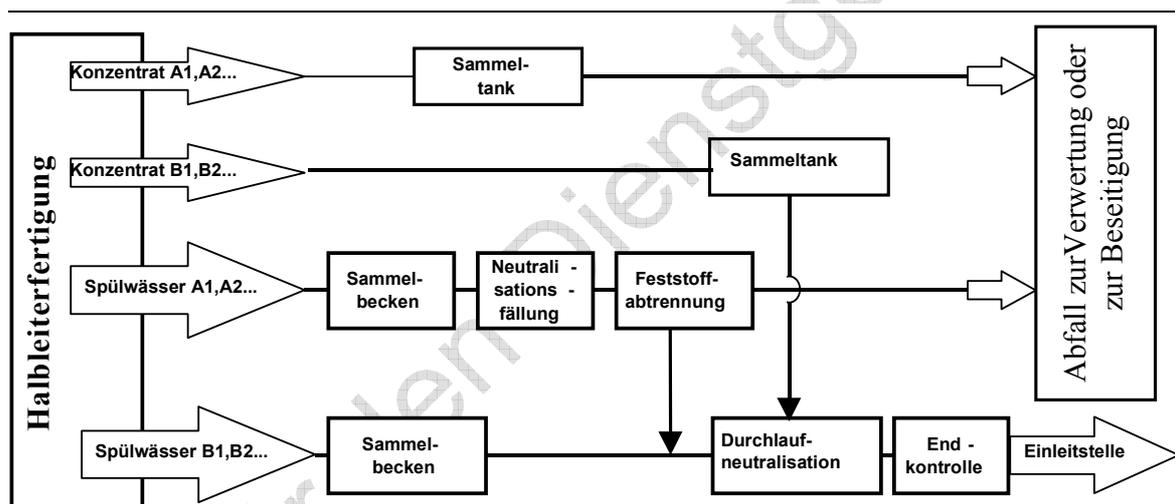


Abbildung 3: Prinzip einer Abwasserbehandlung

Das Erfassen möglichst konzentrierter Abwasserströme bietet die Möglichkeit der Verwertung (z.B. Säurerecycling) und der Chargenbehandlung. Nach der Vorbehandlung erfolgt eine gemeinsame Endbehandlung mit dem übrigen Abwasser, in der Regel eine pH-Wert-Einstellung. In Anwesenheit von Fluorid erfolgt dies mit Kalkmilch oder evtl. auch unter Zusatz von Calciumchlorid. Abhängig von der Fluorid-Konzentration kann eine Vorbehandlung des fluoridhaltigen Abwasserstromes in manchen Fällen sinnvoll sein.

Bei der **Chipmontage** werden Verfahren wie Kleben, Löten sowie galvanische und chemische Metallauftrags- und -abtragsverfahren angewandt. Das anfallende Abwasser aus der Chipmontage entspricht in Art und Konzentration Galvanikabwasser und kann wie dieses behandelt werden.

EDTA-haltiges Abwasser

EDTA und ihre Salze dürfen im Abwasser aus galvanischen Prozessen nicht enthalten sein. Bei der Halbleiterfertigung gibt es Verfahrensschritte, bei denen es sich nicht um galvanische Prozesse handelt, die den Einsatz von EDTA derzeit noch erfordern (Verfahrensschritte in der Fototechnik, nasschemische Ätzprozesse). Für die Vorbehandlung dieser Ströme kommen die Membrantechnik (z. B. Umkehrosmose in Kombination mit Verdampfertechnik) oder Oxidationsverfahren mit UV-Strahlung in Betracht. Die Vermischung des EDTA-haltigen Abwasserteilstromes mit anderen Abwasserteilströmen sollte auf Grund der komplexbildenden Eigenschaften der EDTA nach der Schlussneutralisation erfolgen.

Arsenhaltiges Abwasser

Arsenhaltiges Abwasser fällt bei der Herstellung von Galliumarsenid-Halbleitern sowie bei Ätzprozessen arsenhaltiger Schichten von Silizium-Halbleitern und bei nachgeordneten Reinigungsprozessen an:

- Abwasser aus der Abluftwäsche für arsenhaltige Abluft,
- Abwasser aus der mechanischen Bearbeitung,
- Abwasser aus arsenhaltigen Ätzprozessen,
- Reinigungswasser von Abgasrohren und Behältern.

Arsenhaltiges Abwasser ist am Ort des Anfalls vorzubehandeln. Arsen, das nicht im 5-wertigen Zustand vorliegt, muss oxidiert werden (z.B. mit Wasserstoffperoxid). Nach Zusatz von Eisen (III)-salzen fällt schwerlösliches Eisen (III)-arsenat aus.

Cadmium- und selenhaltiges Abwasser

Cadmium- und selenhaltiges Abwasser ist bei der Herstellung von Cadmiumselenid-Halbleitern zu erwarten. Das Abwasser ist am Ort des Anfalls vorzubehandeln. In Deutschland werden derzeit keine Cadmiumselenid-Halbleiter hergestellt.

2.2.2 Solarzellenherstellung

2.2.2.1 Maßnahmen der Abwasservermeidung

Bei der Herstellung von Solarzellen fällt neben den Behandlungslösungen Spülwasser an, da die Oberfläche der Module nach jedem Prozessschritt für die nächste Behandlung vollkommen gereinigt werden muss. Grundsätzlich kann die Spültechnik in der Solarzellenfertigung wassersparend ausgelegt werden, da die Oberflächen der Module glatt und eben sind und in der Regel (entsprechend der Vorbehandlung) eine hydrophobe Oberfläche aufweisen. Das begünstigt ein gutes Abfließen der Flüssigkeit und minimiert die Verschleppung.

Zur Verminderung von Schadstofffracht und Abwassermenge stehen folgende Maßnahmen zur Verfügung:

- Verlängerung der Standzeit der Prozesslösungen,

- Verminderung der Ausschleppung von Prozesslösungen,
- Rückführung von Prozesslösungen/-wasser,
- wassersparende Spültechnik,
- Rückführung von Spülwasser.

Solarzellen auf Siliziumbasis

Die wichtigste Maßnahme zur Verlängerung der Standzeit von Prozesslösungen ist die analytische Überwachung und die eventuell erforderliche Korrektur der Zusammensetzung der Lösungen.

Ein wesentliches Instrument zur Verringerung der Ausschleppung ist die Optimierung der Abtropfzeiten. Diese Maßnahme ist bei chemischen Prozessen, die nach dem Ausheben aus dem Prozessbad keine Nachreaktion erlauben und sofort unterbrochen werden müssen, eingeschränkt.

Beim Horizontaltransport der Wafer kann die anhaftende Prozesslösung durch Abquetschen oder Abblasen zurückgehalten werden, so dass das Verschleppen minimiert wird.

In der Solarzellenfertigung ist die dreistufige Kaskadenspüle der Regelfall. Damit werden die erforderlichen Spülkriterien sicher erreicht und der spezifische Spülwasserverbrauch gering gehalten. Die glatte und hydrophobe Oberfläche der Wafer, die das Spülwasser rasch ablaufen lässt, unterstützt diesen Prozess.

Die hohen Anforderungen an die Spülkriterien erfordern in der Solarzellenfertigung in aller Regel den Einsatz von Reinstwasser. Da die Herstellung von Reinstwasser sehr aufwändig ist, werden geeignete Spülwasserströme in die Reinstwasseraufbereitung zurückgeführt.

Das Prozesswasser aus den Sägeprozessen wird separat vorbehandelt, da es sich in den Inhaltsstoffen und der daraus resultierenden Behandlungstechnik stark von dem übrigen Abwasser unterscheidet und ggf. nach der Vorbehandlung für den Sägeprozess wieder eingesetzt werden kann.

Solarzellen auf Cadmiumtellurid (CdTe) - Basis

Die Standzeit der Phosphorsäurebeize liegt bei 3 Monaten. Es ist zu erwarten, dass diese durch Einsatz von Feinstfiltration und/oder Ionenaustausch deutlich verlängert werden kann.

Solarzellen auf Kupfer-Indium-Diselenid- oder Kupfer-Indium-Disulfid (CIS) – Basis

Durch eine mehrstufige Spülkaskade kann Spülwasser eingespart werden. Verschiedene Entwicklungen lassen erwarten, dass die Prozesslösung zur Herstellung der CdS-Schicht nach Filtration und Konzentrationsanpassung wieder verwendet bzw. die Chemikalien in Reinform durch Aufbereitung der Prozesslösung zurück gewonnen

werden können. Abhängig von der Qualität des Spülwassers kann dieses zum Teil wieder verwendet werden (z.B. als Reinigungswasser für Glasscheiben).

2.2.2.2 Maßnahmen zur Abwasserbehandlung

Solarzellen auf Siliziumbasis

Bei der betriebsinternen Behandlung werden Prozesslösungen sowie Spülwasser zusammengeführt und das daraus resultierende Abwasser gemeinsam in Chargenanlagen neutralisiert. Bei der Neutralisation werden neben Säuren oder Laugen Fällungs- und Flockungsmittel zur Entfernung von Spuren an Schwermetallionen, sowie Kalzium-Ionen zur Fällung von Fluorid-Ionen zugegeben. Der bei der Fällung gebildete Schlamm wird abgetrennt und über eine Filterpresse entwässert. Das behandelte Abwasser wird eingeleitet.

Solarzellen auf Cadmiumtellurid (CdTe) – Basis

Der Produktionsprozess ist abwasserfrei.

Solarzellen auf Kupfer-Indium-Diselenid- oder Kupfer-Indium-Disulfid (CIS) – Basis

Die Inhaltstoffe der Abwasserströme:

- Reinigung der Glasscheiben,
- Behandlung der Kupfer-Indium-Disulfid-Schicht mit Cyanidlösung,
- Aufbringen der Cadmiumsulfid-Schicht

unterscheiden sich so stark, dass eine getrennte Behandlung der jeweiligen Teilströme erforderlich oder eine Behandlung am Ort des Anfalls durchzuführen ist.

Das Abwasser, das bei der **Reinigung der Glasscheiben anfällt**, ist ausschließlich mit organischen Inhaltsstoffen belastet und bedarf vor Einleitung in eine biologische Kläranlage keiner besonderen Vorbehandlung.

Bei der **Behandlung der Kupfer-Indium-Disulfid-Schicht mit Cyanidlösung** fällt Abwasser als verbrauchte Prozesslösung und Spülwasser an. Die Kontamination des Spülwassers ist extrem gering. Zur Behandlung des Abwasser werden zunächst die Cyanid-Ionen durch Oxidation mit Peroxid zerstört. Anschließend werden die Schwermetalle, insbesondere Kupfer, aus dem Abwasser als Hydroxide gefällt. Der Niederschlag wird abfiltriert und freie Schwermetallionen mit Ionenaustauscher entfernt.

Beim **Aufbringen der Cadmiumsulfidschicht** fällt Abwasser aus verbrauchter Prozesslösung und Spülwasser an. Das cadmiumhaltige Abwasser muss separat von anderem Abwasser erfasst und behandelt werden. Die Kontamination des Spülwas-

sers ist extrem gering. Deshalb werden Spülwasser und Prozesslösung getrennt behandelt. CdS setzt sich am Boden der Prozesslösung ab und kann daher gut abgetrennt werden. Die Behandlung der Prozesslösung kann anschließend zusammen mit dem Spülwasser erfolgen. Es wird filtriert, um eventuell noch vorhandenes CdS abzutrennen. Nach Abtrennung des filtrierbaren Anteils des CdS wird der nicht filtrierbare Teil durch Absenkung des pH-Wertes gelöst. Das restliche Cadmium wird mittels Ionenaustauscher entfernt.

Die Behandlung der Prozesslösung erfolgt mittels Strippung von Ammoniak und Extraktion von Thioharnstoff. Diese Verfahren sind in der Erprobung.

2.3 Abfallbehandlung und Abfallverwertung

Bei der Behandlung des Abwassers können, je nach Art der Abwasserbelastung, Abfälle anfallen. In der Tabelle im Anhang sind die zu erwartenden Abfälle den jeweiligen Prozessschritten zugeordnet; außerdem werden Angaben zur ordnungsgemäßen Entsorgung (Verwertung oder Beseitigung) gemacht. Beladene Festbettabsorber werden entweder aufbereitet oder als besonders überwachungsbedürftiger Abfall entsorgt.

3 Auswahl der Parameter, für die Anforderungen zu stellen sind

3.1 Hinweise für die Auswahl der Parameter

AOX ist ein Maß für die Summe der **adsorbierbaren organisch gebundenen Halogene**. Er ist ein für die Abwasserabgabe maßgebender Parameter.

Die **Giftigkeit gegenüber Fischeiern G_{EI}** ist ein Maß für die Schädlichkeit des Abwassers gegenüber Fischeiern. Sie ist ein für die Abwasserabgabe maßgebender Parameter.

Cadmium wurde aufgenommen, weil es zur Herstellung von bestimmten Halbleitern eingesetzt wird und toxisch (krebserregend, fruchtschädigend, erbgutschädigend) auf Wasserorganismen wirkt. **Cadmium** ist ein für die Abwasserabgabe maßgebender Parameter.

Arsen wurde aufgenommen, weil es zur Herstellung von bestimmten Halbleitern eingesetzt wird und toxisch (krebserregend) auf Wasserorganismen wirkt.

Selen wurde aufgenommen, weil es zur Herstellung von bestimmten Halbleitern eingesetzt wird und toxisch auf Wasserorganismen wirkt.

Die Parameter **Blei, Chrom, Chrom(VI), Kupfer, Nickel, Silber und Zinn** wurden aufgenommen, weil sie in galvanischen Prozessstufen der Halbleiterfertigung eingesetzt werden und toxisch auf Wasserorganismen wirken. Chrom(VI)-Verbindungen sind krebserregend, fruchtschädigend und erbgutschädigend. Blei, Chrom, Kupfer und Nickel sind für die Abwasserabgabe maßgebende Parameter.

Sulfid gelangt im Wesentlichen bei der Anwendung von Sulfidfällungen in das Abwasser. Sulfid sowie Schwefelwasserstoff wirken toxisch auf Wasserorganismen.

Cyanid (leicht freisetzbar) stammt aus der galvanischen Abscheidung von Metallen und wirkt toxisch auf Wasserorganismen.

Freies Chlor kann bei der Abwasserbehandlung (Cyanidoxidation) freigesetzt werden.

Leichtflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (LHKW) werden in der Regel in der Halbleiterindustrie nicht mehr eingesetzt und sind daher nicht abwasserrelevant.

Benzol und Derivate werden wegen ihrer Toxizität begrenzt. Sie sind aus verschiedenen Herkunftsbereichen im Abwasser zu erwarten. **Benzol** ist ein krebserregender Stoff, der bereits bei der Einleitung in eine Kanalisation aus diesem Grund minimiert werden muss. In der Halbleiterindustrie wird Benzol aufgrund seiner Eigenschaften (R 45, 46 nach Gefahrstoffverordnung) nicht mehr eingesetzt.

EDTA und ihre Salze dürfen im Abwasser aus galvanischen Prozessen nicht enthalten sein. Bei der Halbleiterfertigung gibt es Verfahrensschritte, bei denen es sich nicht um galvanische Prozesse handelt, die den Einsatz von EDTA erfordern.

3.2 Hinweise auf Parameter, die gegebenenfalls im Einzelfall zusätzlich begrenzt werden sollen

Im Einzelfall kann es erforderlich sein, zusätzlich weitere Parameter zu begrenzen:

- Temperatur,
- pH-Wert,
- abfiltrierbare Stoffe,
- Aluminium,
- Eisen,
- Phosphor (P_{ges}),
- EDTA,
- chemischer Sauerstoffbedarf (CSB),
- biochemischen Sauerstoffbedarf (BSB₅),
- Stickstoff, gesamt.

4 Anforderungen an die Abwassereinleitung

4.1 Anforderungen nach § 7 a WHG

siehe Anhang 54 zur Abwasserverordnung.

4.2 Weitergehende Anforderungen

Wenn aus Gründen des Gewässerschutzes weitergehende Anforderungen an die Einleitung zu stellen sind, können durch geeignete Maßnahmen, z.B. durch Hinzufügen einer weiteren Reinigungsstufe, geringere Schadstofffrachten erreicht werden.

4.3 Alternative anlagenbezogene Anforderungen und Überwachungsregelungen

Keine.

4.4 Berücksichtigung internationaler und supranationaler Regelungen

Die Entscheidung Nr. 2455/2001/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. November 2001 zur Festlegung der Liste prioritärer Stoffe im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG ist am 21. November 2001 in Kraft getreten (ABl. EG vom 15.12.2001 Nr. L 331 S. 1). Damit sind die prioritären und prioritären gefährlichen Stoffe als Anhang X der Wasserrahmenrichtlinie (2000/60 EG) festgelegt.

Nach Artikel 16 festzulegende Strategien gegen die Wasserverschmutzung werden vom Europäischen Parlament und dem Rat festgelegt. Dies betrifft Maßnahmen zur schrittweisen Reduzierung der prioritären Stoffe sowie die Beendigung oder schrittweisen Einstellung von Einleitungen, Emissionen und Verlusten von prioritären gefährlichen Stoffen.

Der Zeitplan für die Beendigung der Einleitung der prioritären gefährlichen Stoffe darf nach Verabschiedung entsprechender Maßnahmen auf europäischer Ebene 20 Jahre nicht überschreiten. Für prioritäre Stoffe zielen die Maßnahmen auf eine schrittweise Reduzierung ab.

Von der Liste der prioritären Stoffe haben folgende Stoffe für die Herstellung von Halbleiterbauelementen Bedeutung:

- Cadmium als prioritärer gefährlicher Stoff,
- Blei als möglicher prioritärer gefährlicher Stoff (von der Kommission noch zu überprüfen) und
- 1,2 Dichlorethan, Dichlormethan, Benzol und Nickel als prioritäre Stoffe

5 Übergangsregelungen und -fristen (§ 7a Abs. 3 WHG)

Soweit die Anforderungen noch nicht eingehalten sind, scheint unter Berücksichtigung der Planungs- und Ausführungszeiten aus technischer Sicht ein Zeitraum von drei Jahren angemessen.

6 Hinweise zur Fortschreibung

Der Anhang 54 ist fortzuschreiben, sobald erkennbar ist, dass sich der Stand der Technik geändert hat oder die Überwachungsergebnisse eine Anpassung rechtfertigen, insbesondere durch eine Begrenzung des Parameters Gesamt-Stickstoff. Die Anforderungen sind daher in drei Jahren zu überprüfen.

7 Literatur

DWA-Regelwerk Abwasser - Abfall, ATV H 765: Abwasser, das in der metallverarbeitenden Industrie anfällt - Blatt 10: Halbleiterherstellung

Abwasserrecht, Verlag Bundesanzeiger, 3. Aufl. 2003, ISBN 3-89817-285-6

Gesetz über die Umweltverträglichkeit von Wasch- und Reinigungsmitteln (WRMG) BGBl. I 175, S.2255 zuletzt geändert durch Art. 127 V v. 25.11.2003 BGBl. I S.2304.

Verordnung (EG) Nr. 648/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 31. März 2004 über Detergentien (ABl. EG L 104 vom 8.4.2004 S.1)

8 Erarbeitung der Grundlagen

Die Grundlagen für die Hinweise und Erläuterungen des Anhangs 54 wurden in einer Arbeitsgruppe von Behörden- und Industrievertretern unter der Leitung von Herrn Klaus Bosse, Umweltbundesamt Dessau, erarbeitet.

Tabelle: Übersicht über die wichtigsten Prozessschritte bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen

Prozessschritte	wesentliche Inhaltstoffe					Abfallbehandlung und -verwertung (beispielhaft)
	in den Einsatzstoffen	im Abwasser aus Prozess	in der Abluft	im Abwasser aus Abluftreinigung	in den Abfällen ⁴⁾	
Maskenherstellung	<p>Photolacke enthalten z.B. Ester wie Methoxypropylacetat, PGMEA ¹⁾ und Ketone wie Heptan-2-on</p> <p>Alkohole wie Isopropanol</p> <p>Ketone wie Aceton, Methyl-isobutyl-keton und Methyl-propylketon</p> <p>Ester wie Butylacetat</p> <p>Wasserstoffperoxid</p> <p>Säuren wie Schwefelsäure, Salzsäure, Salpetersäure und Perchlorsäure</p> <p>Laugen wie Ammoniak-Lösung, Natronlauge</p> <p>sonstige anorganische Stoffe wie Eisen(II)-chlorid</p>	<p>Säuren</p> <p>Laugen</p> <p>Wasserstoffperoxid</p> <p>sonstige anorganische Stoffe sowie Reaktionsprodukte</p>	<p>Photolacke</p> <p>Alkohole</p> <p>Ketone</p> <p>Ester sowie Reaktionsprodukte</p>	<p>Photolacke</p> <p>Alkohole</p> <p>Ketone</p> <p>Ester</p> <p>Säuren sowie Reaktionsprodukte</p>	<p>Photolacke</p> <p>Alkohole,</p> <p>Säuren</p> <p>sonstige anorganische Stoffe</p> <p>Gemisch organischer Lösemittel</p>	<p>Recycling</p> <p>thermische Verwertung</p> <p>Abfallbeseitigung</p>
Frontendfertigung						
Photoprozesse	<p>Photolacke enthalten z.B. Ester wie Ethyllactat, PGMEA ¹⁾ und Ketone wie Cyclohexanon, Heptan-2-on, N-Methylpyrrolidon</p> <p>Alkohole wie Isopropanol</p> <p>Amide wie Dimethylformamid</p> <p>Ester wie Ethyllactat, Butylacetat und PGMEA ¹⁾</p> <p>Ketone wie Aceton</p> <p>sonstige organische Stoffe wie Testbenzin</p> <p>Laugen wie Natronlauge und Tetramethylammoniumhydroxid-Lösung</p> <p>Edelgase wie Argon, Helium, Krypton, Neon und Xenon</p> <p>Grundgase wie Sauerstoff und Stickstoff</p> <p>Sondergase wie Fluor</p>	<p>Photolacke</p> <p>Laugen sowie Reaktionsprodukte</p>	<p>Photolacke</p> <p>Alkohole</p> <p>Amide</p> <p>Ketone</p> <p>Ester</p> <p>Laugen</p> <p>sonstige organische Stoffe</p> <p>Sondergase sowie Reaktionsprodukte</p>	<p>Reste organischer Lösemittel bei speziellen Abluftreinigungsverfahren</p>	<p>Photolacke</p> <p>Alkohole</p> <p>Amide</p> <p>Ketone</p> <p>Ester</p> <p>sonstige organische Stoffe</p> <p>Gemisch organischer Lösemittel</p>	<p>Recycling</p> <p>thermische Verwertung</p> <p>stoffliche Verwertung</p>
Chemical Vapour Deposition (CVD)	<p>Alkohole wie Isopropanol</p> <p>Element-organische Verbindungen wie Tetraethylorthosilicat und Triethylarsin</p> <p>Grundgase wie Sauerstoff und Wasserstoff</p> <p>Sondergase wie Ammoniak-Gas, Arsin, Chlorwasserstoff, Diboran, Dichlorsilan, Germaniumwasserstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid, Lachgas, Methylsilan, Phosphin, Silan und Wolframhexafluorid</p> <p>PFC ²⁾ wie Perfluoromethan, -ethan, Stickstofftrifluorid, Schwefelhexafluorid</p>		<p>Element-organische Verbindungen</p> <p>Grundgase</p> <p>Sondergase</p> <p>PFC ²⁾ sowie Reaktionsprodukte</p>	<p>Säuren wie Fluss- und Salzsäure</p> <p>Kalisalze</p> <p>Siliciumdioxid sowie Reaktionsprodukte</p>	<p> feste Reaktionsprodukte aus Kammer-, Vakuumrohrreinigung etc. sowie aus Brennern mit Wäscher</p>	<p>Abfallbeseitigung</p>

Prozessschritte	wesentliche Inhaltstoffe					Abfallbehandlung und -verwertung (beispielhaft)
	in den Einsatzstoffen	im Abwasser aus Prozess	in der Abluft	im Abwasser aus Abluftreinigung	in den Abfällen ⁴⁾	
Gasphasen-Epitaxie	Grundgase wie Stickstoff und Wasserstoff Sondergase wie Arsin, Chlorwasserstoff, Diboran, Dichlorsilan, Monogerman, Monosilan, Phosphin, Siliciumtetrachlorid und Trichlorsilan		Sondergase sowie Reaktionsprodukte des(der) Prozess(e)	Säuren wie Fluss- und Salzsäure Kalisalze Ammoniumsulfat sowie Reaktionsprodukte des(der) Prozess(e) und der(n) Abluftreinigung(en)	feste Reaktionsprodukte aus Brennern mit Wäscher und anderen Abluftaufbereitungsanlagen	Recycling von Gebinden Abfallbeseitigung
Gasphasen-Diffusion	Edelgase wie Argon Grundgase wie Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff Sondergase wie Ammoniak-Gas, Bortribromid, Chlorwasserstoff, Dichlorsilan, Trichlorsilan, Phosphin und Silan sonstige anorganische Stoffe wie Phosphor und Phosphoroxychlorid		Sondergase sonstige anorganische Stoffe sowie Reaktionsprodukte des(der) Prozess(e)	Kalisalze Ammoniak-Lösung sowie Reaktionsprodukte des(der) Prozess(e) und der(n) Abluftreinigung(en)	feste Reaktionsprodukte aus Brennern mit Wäscher und anderen Abluftaufbereitungsanlagen	Abfallbeseitigung
Naßchemisches Ätzen	Alkohole wie Ethylenglykol, Isopropanol und Methanol sonstige organische Stoffe wie Aminoethoxyethanol, Ethanolamin und Hydroxylamin Wasserstoffperoxid Komplexbildner sonstige organische Stoffe sowie Reaktionsprodukte Säuren wie Essigsäure, Flusssäure, Phosphorsäure, Salpetersäure, Salzsäure, Schwefelsäure und Tetrafluoroborsäure Laugen wie Ammoniak-Lösung, Cholin, Kalilauge und Tetramethylammoniumhydroxid-Lösung Komplexbildner wie EDTA sonstige anorganische Stoffe wie Ammoniumfluorid-Lösung	Alkohole Säuren Laugen Wasserstoffperoxid Komplexbildner sonstige organische Stoffe sowie Reaktionsprodukte	Alkohole sonstige organische Stoffe Säuren Laugen sowie Reaktionsprodukte	Alkohole sonstige organische Stoffe Säuren Laugen sowie Reaktionsprodukte	Alkohole sonstige organische Stoffe Säuren sowie Säuregemische und kontaminierte Einweggebinde	Wiederverwenden von Säuren stoffliche Verwertung der Alkohole, sonstigen anorganischen Stoffen und Säuren Abfallbeseitigung
Trockenätzen	Edelgase wie Argon und Helium Grundgase wie Methan, Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff Sondergase wie Ammoniak-Gas, Bromwasserstoff, Bortrichlorid, Chlor, Chlorwasserstoff, Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Lachgas, Monosilan, Schwefeldioxid, Tetrachlorsilan und Tetrafluorsilan PFC² wie Difluormethan, Monofluormethan, Perfluormethan, -ethan und cyclo-Perfluorbutan, Schwefelhexafluorid und Stickstofftrifluorid, Trifluormethan		Sondergase PFC² sowie Reaktionsprodukte	Kalisalze Ammoniak-Lösung sowie Reaktionsprodukte	feste Reaktionsprodukte aus Kammer-, Vakuumrohrreinigung etc. sowie aus Brennern mit Wäscher	Recycling von Gebinden Abfallbeseitigung

Prozessschritte	wesentliche Inhaltstoffe					Abfallbehandlung und -verwertung (beispielhaft)
	in den Einsatzstoffen	im Abwasser aus Prozess	in der Abluft	im Abwasser aus Abluftreinigung	in den Abfällen ⁴⁾	
Ionenimplantation	Alkohole wie Isopropanol Edelgase wie Argon und Xenon Grundgase wie Stickstoff und Wasserstoff Sondergase wie Arsin, Bortrifluorid, Germaniumtetrafluorid und Phosphin PFC ² wie Schwefelhexafluorid sonstige anorganische Stoffe wie Antimon(III)-oxid, Arsen, Indium(III)-chlorid und Phosphor		Sondergase PFC ² sowie Reaktionsprodukte	Reaktionsprodukte	sonstige anorganische Stoffe wie Absorptionsmittel, arsenhaltige Konzentrate	Recycling von Gebinden Abfallbeseitigung
Chemisch-Mechanisches-Polieren (CMP)	Alkohole wie Isopropanol Ketone wie Aceton Wasserstoffperoxid Säuren wie Citronensäure, Flusssäure, Oxalsäure, Salpetersäure, Salzsäure und Schwefelsäure Laugen wie Ammoniak-Lösung, Kali-, Natronlauge und Tetraammoniumhydroxid-Lösung sonstige anorganische Stoffe wie Aluminiumsulfat, -oxid, Eisen(III)-chlorid, -nitrat und Siliciumdioxid	Säuren Laugen Wasserstoffperoxid Kupfer sonstige anorganische Stoffe sowie Reaktionsprodukte,	Säuren Laugen sonstige anorganische Stoffe sowie Reaktionsprodukte	Ammoniumsulfat sowie Reaktionsprodukte	sonstige anorganische Stoffe sowie kontaminierte Hilfsmittel und Einweggebilde	stoffliche Verwertung Abfallbeseitigung
Thermische Oxidation	Edelgase wie Argon Grundgase wie Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff Ammoniak-Gas		Sondergase sowie Reaktionsprodukte	Reaktionsprodukte	Quarzrohre	Verwertung oder Abfallbeseitigung
Teilereinigung	Alkohole wie Isopropanol und Methanol Ester wie PGMEA ¹⁾ Ketone wie Aceton, Cyclopentanon und N-Methylpyrrolidon sonstige organische Stoffe wie Ethanolamin und Dimethylsulfoxid Wasserstoffperoxid Säuren wie Essigsäure, Flusssäure, Phosphorsäure, Salpetersäure und Salzsäure Laugen wie Ammoniak-Lösung, Natron- und Kalilauge	Einsatzstoffe sowie Reaktionsprodukte	Alkohole Ether Ketone sonstige organische Stoffe Säuren Laugen sowie Reaktionsprodukte	Alkohole Ketone Ester Säuren Laugen Kalisalze Ammoniumsulfat sowie Reaktionsprodukte	Alkohole Ether Ketone sonstige organische Stoffe Säuregemische	Wiederverwendung von Flusssäure und ihren Gemischen Edelmetallrecycling Verwertung der Alkohole, Ether, Ketone ansonsten thermische Verwertung Abfallbeseitigung
Neue Technologien	Alkohole wie Isopropanol Ketone wie Aceton Säuren wie Essigsäure und Schwefelsäure Laugen wie Kalilauge Komplexbildner wie EDTA sonstige anorganische Stoffe wie Blei- und Zinnsalze	Säuren wie Essigsäure und Schwefelsäure Laugen wie Kalilauge Komplexbildner wie EDTA sonstige anorganische Stoffe wie Blei- und Zinnsalze	Alkohole Ketone Säuren Laugen	Säuren Laugen	Konzentrate der Metallsalze Alkohole Ketone	Verwertung Abfallbeseitigung
Sonstige Prozesse	Ketone wie Aceton Säuren wie Essigsäure, Flusssäure, Salpetersäure, Salzsäure, Schwefelsäure und Tetrafluoroborsäure Laugen wie Kali- und Natronlauge	Säuren Laugen sowie Reaktionsprodukte	Ketone Säuren Laugen sowie Reaktionsprodukte	Ketone Kalisalze sowie Reaktionsprodukte	Ketone	thermische Verwertung

Prozessschritte	wesentliche Inhaltstoffe					Abfallbehandlung und -verwertung (beispielhaft)
	in den Einsatzstoffen	im Abwasser aus Prozess	in der Abluft	im Abwasser aus Abluftreinigung	in den Abfällen ⁴⁾	
Schleifen	Alkohole wie Isopropanol Ketone wie Aceton	Einsatzstoffe				Verwertung der Siliciumschlämme
Rückseitenbehandlung	Säuren wie Flußsäure, Phosphorsäure, Salpetersäure, Schwefelsäure	Säuren	Säuren	Säuren	Säuren	Wiederverwendung von Säuren
Sägen	Alkohole wie Isopropanol Ketone wie Aceton	Einsatzstoffe				Verwertung der Siliciumschlämme
Chipmontage	PI-Lack ³⁾ enthält z.B. Ketone wie N-Methylpyrrolidon Alkohole wie Ethanol und Isopropanol Ketone wie Aceton und N-Methylpyrrolidon sonstige organische Stoffe wie Aminoethanol Kleber Flussmittel Lötpaste enthält z.B. Metalle wie Silber und Zinn Pressmassen z.B. auf Basis von Epoxidharzen Säuren wie Flußsäure, Phosphorsäure, Schwefelsäure und Sulfonsäure Laugen wie Kalilauge Metalle wie Blei-Zinn-Silber-Legierung sonstige anorganische Stoffe wie Blei- und Zinnsalze		PI-Lack ³⁾ Alkohole Ketone sonstige organische Stoffe sowie Reaktionsprodukte		Pressmassen Leadframes Chip(s) auf Folie Bauelemente Module galvanische Bäder	Verwertung der Leadframes, Bauelemente und Module thermische Verwertung ansonsten Abfallbeseitigung
Sonstige Prozesse	Vergussmasse z.B. auf Basis von Epoxidharzen und Silicon Klebstoff enthält z.B. Silicon Säuren wie Ameisensäure und Salzsäure Laugen wie Natronlauge		Reaktionsprodukte		Vergussmasse Klebstoff	thermische Verwertung

1) PGMEA: Propylenglycolmonomethyletheracetat

2) PFC: Abkürzung für perfluorinated compounds (=perfluorierte Verbindungen)

3) PI-Lack: Polyimid-Lack

4) ohne Wafer- und Chipabfall, Verpackungsabfälle, Restmüll etc.