

S. Büttgenbach,
H.-J. Wagner, Stuttgart*

Möglichkeiten und Perspektiven der Mikromechanik

Dreidimensionale Mikrostrukturen

Die Mikromechanik befaßt sich mit der Herstellung komplexer dreidimensionaler Strukturen, deren Abmessungen in mindestens einer Dimension so klein sind, daß die klassischen feinmechanischen Fertigungstechniken nicht mehr sinnvoll eingesetzt werden können. Die kleinsten funktionsbestimmenden Strukturabmessungen liegen im Mikrometerbereich.

Bisher wurde die komplexe Mikrostrukturierung im wesentlichen bei der Entwicklung und Herstellung integrierter Schaltungen angewendet. Dabei wurden mit außerordentlich großem finanziellen Aufwand die auch für die Mikromechanik wichtigen Prozeßtechnologien Lithographie, Ätztechnik und Schichtabscheidung entwickelt.

In diesem Umfeld ist das Arbeitsgebiet Mikromechanik entstanden. Aus der Tatsache, daß in der Mikromechanik im Gegensatz zur Mikroelektronik dreidimensional strukturierte Gebilde herzustellen sind, ergibt sich die Notwendigkeit, die Verfahren der Mikroelektronik zu modifizieren und in ihrer Leistungsfähigkeit zu steigern sowie neue spezifische Verfahren zu entwickeln. Beispiele dafür sind

- Lithographie: Weiterentwicklung der Röntgenstrahlolithographie zur Tiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung.
- Ätztechnik: Einführung der selektiven, anisotropen Ätztechnik im Silizium-Einkristall. Entwicklung von anisotropen Ionenätzverfahren.
- Schichtabscheidung: Vervollkommenung von Lift-off-Techniken; Entwicklung selektiver Epitaxieverfahren.
- Kunststoffabformung: Weiterentwicklung des Spritzgußverfahrens zur Herstellung von Mikrostrukturen aus Kunststoffen.

Der folgende Beitrag beschreibt zunächst die Ziele und Anwendungsmöglichkeiten der Mikromechanik, ein noch junges, im Umfeld der Mikroelektronik entstandenes Arbeitsgebiet. Nach einer Übersicht über Fertigungsverfahren der Mikromechanik werden einige Anwendungsbeispiele vorgestellt. Die zumindest in einer Dimension im Mikrometerbereich liegenden Strukturabmessungen mikromechanischer Bauteile erfordern Fertigung unter Reinraumbedingungen. Am Forschungsinstitut der Forschungsgesellschaft für Feingeräte-, Mikro- und Uhrentechnik in Stuttgart wurde für Arbeiten auf dem Gebiet der Mikromechanik ein Reinraum der Klasse 10 000 eingerichtet. In diesem Raum sind für kritische Bereiche Laminarflowboxen der Klasse 100 installiert.

- Teilchen- und Laserstrahlen: Anwendung der Kernspurtechnik zur Mikrostrukturierung von Isolatoren; Anwendung von Laserstrahlen zur Mikromaterialbearbeitung.

Diese Methoden der dreidimensionalen Strukturierung kommen additiv zu den Basisverfahren der Halbleiter- und Dünnschichttechnologie hinzu.

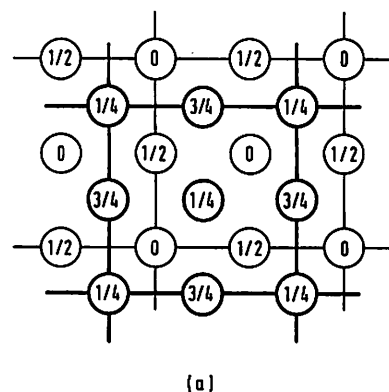
Als Ausgangsmaterial für die Herstellung mikromechanischer Bauelemente bietet sich in vielen Fällen einkristallines Silizium an, das aufgrund der Entwicklungen in der Mikroelektronik in höchster Reinheit und kristalliner Perfektion verfügbar ist. Silizium hat sehr gute mechanische Eigenschaften, die durchaus mit denen von Stahl vergleichbar sind, insbesondere zeigt es keine Ermüdungserscheinungen.

Ein weiterer interessanter Werkstoff

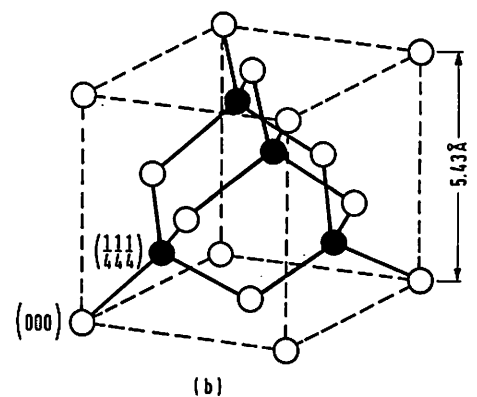
ist einkristalliner Quarz, der sehr gute mechanische Materialeigenschaften mit dem Vorteil der Piezoelektrizität verbindet. Auch andere Materialien, z.B. III/V-Halbleiter (GaAs, InP), Kunststoffe, Metalle, Gläser, sind von großem Interesse.

Die Bedeutung der Mikromechanik läßt sich im wesentlichen auf folgende Punkte zurückführen:

- Mikromechanische Systeme lassen sich mit mikroelektronischen Systemen in monolithischer oder hybrider Technik kombinieren. Bei Sensoren eröffnet dies z.B. die Möglichkeit zur dezentralen Signalverarbeitung und -vorverstärkung (Kompensation von peripheren Störgrößen oder Linearisierung von Kennlinien an jeder Meßstelle) und zur Multifunktionalität (mehrere physikali-



(a)



(b)

Bild 1

Kristallstruktur von Silizium: (a) Zwei kubisch flächenzentrierte Gitter; die Brüche geben die Höhe über der Zeichenebene in Bruchteilen der Kantenlänge des Würfels an. (b) Tetraedrische Bindung im Si-Kristall

*) Dr. S. Büttgenbach ist Leiter der selbständigen Abteilung Mikrotechnik der Forschungsgesellschaft für Feingeräte-, Mikro- und Uhrentechnik e.V. in Stuttgart. Dipl.-Phys. H.-J. Wagner ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsgesellschaft.

sche oder chemische Größen werden erfaßt und zu einer oder mehreren Aussagen verknüpft).

- Der auf allen Gebieten der Wissenschaft und Technik zu beobachtende Vorstoß in Mikrostruktur-Bereiche erfordert die Bereitstellung von in der Dimension angepaßten Bauelementen, z.B. für rückwirkungsfreie Meßverfahren oder im Bereich der biomedizinischen Technik.
- Mikromechanische Bauelemente können ebenso wie integrierte Schaltungen in größerer Anzahl in einem Prozeßdurchlauf (Batchprozeß) hergestellt werden. Dies impliziert eine günstige Kostenentwicklung.

Da die Mikromechanik ein noch relativ junges Arbeitsgebiet ist, sind die Möglichkeiten dieser Technologie bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Als Hauptanwendungsgebiete gelten derzeit:

- Sensorik (Druck-, Beschleunigungs-, Kraft-, Durchflusssensoren, chemische Sensoren).
- Aktorik (bewegliche Spiegel, Displays, Mikroschalter, Mikroventile und -pumpen).
- Computerperipherie (Düsen für Ink-Jet-Drucker, Thermodruckköpfe).
- Optik (mikrooptische Bauelemente, Justierhilfen für faseroptische Komponenten).
- Analytik (Mikrofiltration, Gaschromatographie, Trenndüsen).
- Aufbau- und Verbindungstechnik (miniaturisierte Chipkühlung, Multichip-Carrier).

Im folgenden sollen die wichtigsten Fertigungsverfahren der Mikromechanik vorgestellt und an Hand einiger ausgewählter Beispiele erläutert werden.

Fertigungsverfahren

Anisotrope, selektive Ätztechnik [1,2]

Kristallines Silizium hat die gleiche Kristallstruktur wie Diamant. Man kann sich diese Struktur aus zwei ineinandergestellten kubisch flächenzentrierten Gittern gebildet denken, die um ein Viertel der Raumdiagonalen gegeneinander versetzt sind (Bild 1a). Die tetraedrische Bindung in der Siliziumstruktur zeigt Bild 1b. Jedes Siliziumatom hat vier nächste Nachbarn; in jedem Einheitswürfel befinden sich acht Atome.

Neben den isotropen Ätzflüssigkeiten, die einkristallines Silizium mit gleicher Geschwindigkeit nach allen Richtungen ätzen, gibt es eine Reihe von Ätzlösungen, deren Ätzgeschwindigkeit sowohl stark von der Dotierung (Selektivität), wie auch von der Kristallrichtung (Anisotropie) abhängt. Die gebräuchlichsten isotropen Ätzmittel sind Mischungen aus Fluß-, Salpeter- und Essigsäure (HNA-Lösungen). Die wichtigsten selektiven, anisotropen Ätzlösungen sind Mischungen aus Ethylen-diamin, Brenzkatechin und Wasser (EDP) und Kaliumhydroxid und Wasser (KOH).

Bei den anisotropen Ätzlösungen ist die Ätzgeschwindigkeit in Richtung der

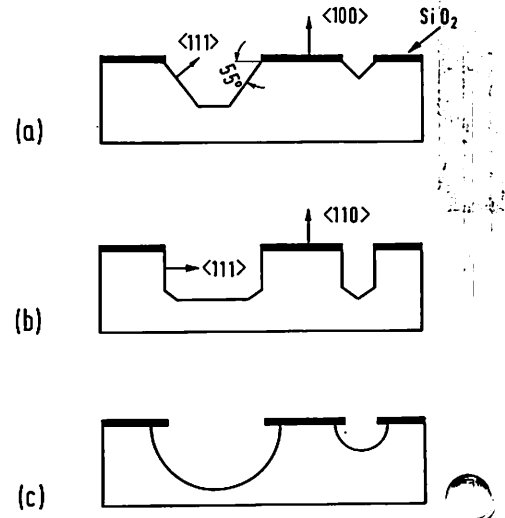


Bild 3 Naßchemisch geätzte Vertiefungen in Silizium: (a) Anisotrop geätzte (100)-Scheibe. (b) Anisotrop geätzte (110)-Scheibe. (c) Isotrop geätzte Vertiefung

Kristallebenen mit (111)-Orientierung minimal, z.B. ist das Verhältnis der Ätzraten in (100)- und (111)-Richtung größer als 100:1 (Bild 2). Die (111)-Ebenen sind daher ätzbegrenzend und können zum Design verschiedener Strukturen genutzt werden. Ein Unterätzen von Strukturen tritt nur an konvexen Ecken auf. Bild 3 zeigt die Form von isotrop und anisotrop geätzten Vertiefungen.

Bei hochbordotierten Schichten, hergestellt z.B. durch einen Epitaxieprozeß, beobachtet man eine um mehrere Größenordnungen verringerte Ätzrate. Solche Schichten eignen sich daher als Ätzstoppschichten und damit z.B. zur Herstellung von Membranen (Bild 4). Bei einer anderen Ätzstopptechnik wird der Ätzvorgang elektrochemisch durch Anlegen einer Vorspannung an eine p-n-Grenzschicht abgestoppt.

Grundelemente und Grundstrukturen, die sich mit der selektiven, anisotropen Ätztechnik im Silizium-Einkristall herstellen lassen, sind z.B. Gräben, Membranen, Zungen, Brücken, Löcher. Sie bilden die Basis für mikromechanische Bauelemente aus Silizium.

Ein anisotroper naßchemischer Ätzprozeß bildet auch die Grundlage bei der Herstellung von miniaturisierten Bauelementen aus einkristallinem Quarz, speziell von Quarzresonatoren unterschiedlicher Formen. Bei dieser Technologie wird der Rohquarkristall orientiert und anschließend in einzelne

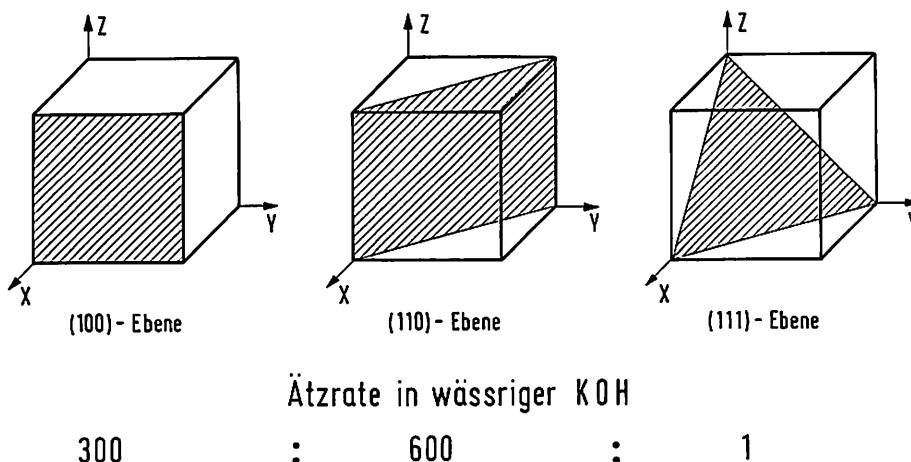


Bild 2 Wichtige Ebenen im Silizium-Kristall und Ätzratenverhältnisse für KOH

Scheiben aufgetrennt. Der je nach Anwendung geeignete Schnittwinkel wird dabei mit dem Röntgengoniometer bestimmt.

Die polierten Scheiben werden nach einem Reinigungsvorgang beidseitig mit Gold beschichtet. In mehreren fotolithographischen Prozessen werden dann die Umriss des Bauelements und die Elektrodenmuster, die zur piezoelektrischen Anregung der Schwingungen dienen, durch chemisches Ätzen auf die Metallschicht übertragen. Anschließend werden die Bauelemente chemisch freigeätzt. Als Ätzmittel werden Lösungen von Flußsäure oder Ammoniumbifluorid benutzt. In beiden Lösungen ist der Ätzbereich stark anisotrop, wobei die Ätzgeschwindigkeit in Richtung der optischen Achse maximal ist.

Sacrificial-Layer-Methode [4]

Mit Hilfe der anisotropen, selektiven Ätztechnik werden in einer Silizium-

scheibe dreidimensionale Strukturen hergestellt. Meist wird dabei die Scheibe über ihre gesamte Tiefe (einige 100 μm) strukturiert.

Der Wunsch, freistehende und bewegliche mikromechanische Strukturen herzustellen, hat zu einem neuen technologischen Ansatz geführt, der Sacrificial-Layer-Methode. Basis sind Sandwichstrukturen, z.B. aus Siliziumdioxid (sacrificial layer) und Polysilizium, mit Schichtdicken im Mikrometerbereich, die auf der Silizium-Scheibe aufgebracht werden. Nach der Strukturierung wird das Siliziumdioxid herausgeätzt, so daß freistehende Polysiliziumstrukturen entstehen.

Kombinierter Lithographie/Galvanikprozeß (LIGA) [5]

Diese mikromechanische Technologie nutzt als Strukturierungsprozesse die Lithographie, die Galvanoformung und die Abformtechnik, um Mikro-

strukturen mit hohem Aspektverhältnis aus Metallen und Kunststoffen herzustellen. Zunächst werden durch Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung Mikrostrukturen aus einem strahlenchemisch leicht veränderbaren Kunststoff (z.B. PMMA) erzeugt. Mit dieser Methode lassen sich dreidimensionale Kunststoffstrukturen mit Aspektverhältnissen von 1:100 herstellen. Hieraus werden dann durch Galvanoformung komplementäre Strukturen aus Metall hergestellt, die ihrerseits wieder als stabile Mikroformen für die Herstellung von sekundären Kunststoffstrukturen durch Abformung mit Gießharzen eingesetzt werden können.

Kernspurtechnik [6]

Eine Fülle von mikromechanischen Anwendungen wird durch die Verfahren mit fokussiertem oder großflächigem Ionenbeschuß eröffnet. Als Bei-

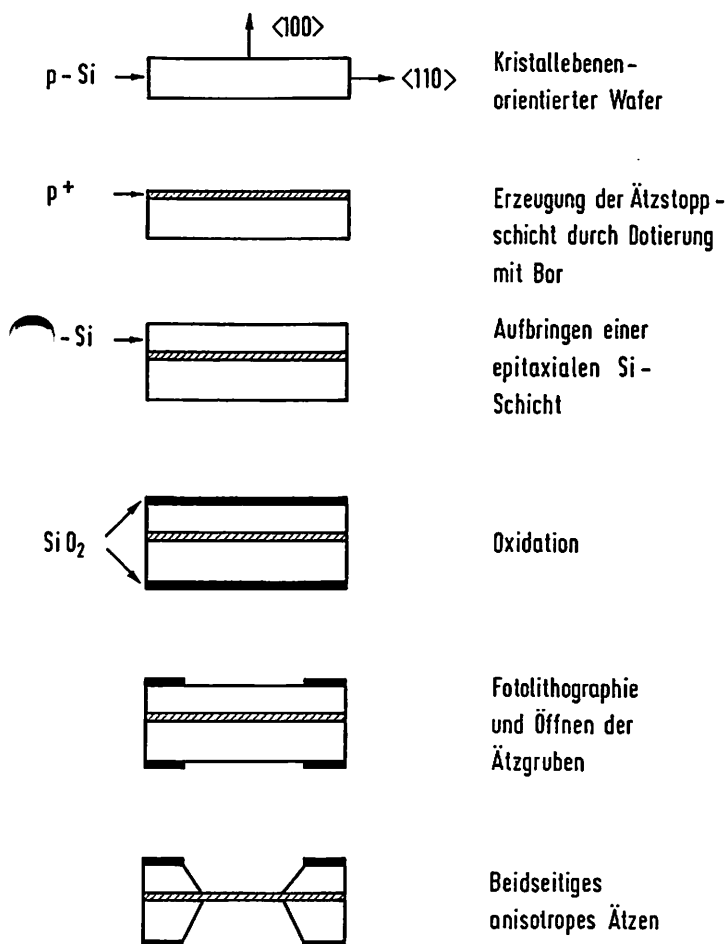


Bild 4
Prozessschritte zur Herstellung einer Membran

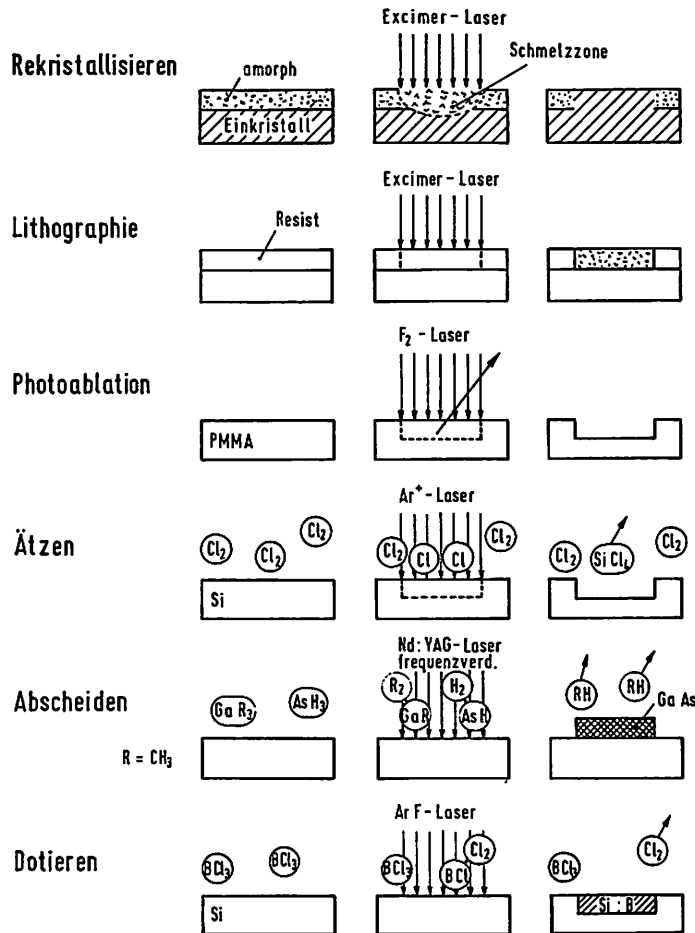


Bild 5
Laserinduzierte Prozesse in der Mikrostrukturtechnik

spiel sei die Kernspurtechnik herausgegriffen. Durch Beschuß mit schweren Ionen hoher Energie (Beschleunigungsspannungen bis 100 MV je nach gewünschter Eindringtiefe) entstehen in der Umgebung der Spur des eindringenden Fremdatoms angeregte ionisierte Atome. Im Gegensatz zu Metallen ist in Isolatoren (Einkristalle, Gläser, Poly-

Bei der ersten Methode handelt es sich um eine Wärmebehandlung, die im Vakuum oder in einer nicht reaktiven Atmosphäre durchgeführt wird. Für die Mikrostrukturtechnik wichtige Prozesse sind das Ausheilen von Defekten in implantierten Halbleiteroberflächen und die Rekristallisation amorpher Schichten.

Nichtlinearität laserinduzierter chemischer Reaktionen erlaubt außerdem die Herstellung von Strukturen, deren laterale Abmessungen kleiner sind als der beugungsbegrenzte Durchmesser des Laserfokus.

Anwendungsbeispiele der Mikromechanik

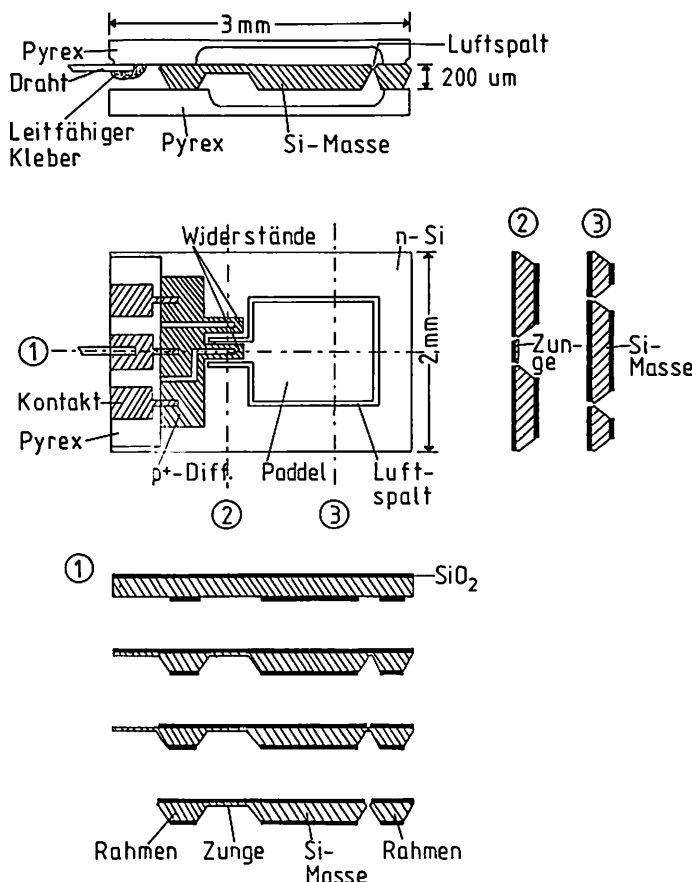
Beschleunigungssensor

Vielseitig verwendbare Sensorstrukturen sind freistehende Zungen und Paddel aus Silizium oder Siliziumdioxid von einigen Mikrometer Dicke, die mittels anisotroper Ätztechnik erzeugt werden. Eine solche Anordnung eignet sich zum Beispiel als Beschleunigungssensor. Die Umwandlung der mechanischen Deformation des Paddels bei Einwirkung einer Beschleunigung in ein elektrisches Signal kann piezoresistiv oder kapazitiv erfolgen. Beim piezoresistiven Sensor sind Piezowiderstände im Paddel integriert. Ihr Widerstand ändert sich in Abhängigkeit von der Biegung des Paddels. Beim kapazitiven Sensor bildet das Paddel die bewegliche Elektrode eines variablen Kondensators.

Bild 6 zeigt einen piezoresistiven Beschleunigungssensor mit einer Glas-Silizium-Glas-Sandwichstruktur. Ein dünner Silizium-Balken ist an einem Ende mit einem 200 µm dicken Rahmen verbunden, am anderen, freien Ende ist er zu einem rechteckigen Paddel erweitert, auf dem zur Erhöhung der Empfindlichkeit eine zusätzliche Masse (Si oder Au) aufgebracht ist. Zur Umwandlung in ein elektrisches Signal dient eine Halbbrückenschaltung aus zwei eindiffundierten Widerständen, einer auf der Oberfläche des Balkens, der andere an einer Stelle des Rahmens, die von der Biegung des Balkens nicht beeinflusst wird. Als Kontakte dienen hochdotierte Zonen auf dem Rahmen.

Die Glasscheiben, in die eine Vertiefung geätzt wird, damit das Paddel sich frei bewegen kann, werden hermetisch dicht und äußerst haftfest mit dem Silizium-Rahmen verbunden. Dies geschieht mit dem Anodic-Bonding-Verfahren. Dabei werden Silizium und Glas durch elektrostatische Kräfte, hervorgerufen durch die Migration von Natrium-Ionen im Glas bei erhöhten Temperaturen und angelegter elektrischer

Bild 6
Piezoresistiver Beschleunigungssensor [9]



mere) durch die geringe Beweglichkeit der Elektronen eine Neutralisierung der Ionen längs dieser Kernspuren nicht möglich. Das Material trägt ein latentes Bild der Ionenbahnen in sich, das durch einen naßchemischen Ätzprozeß, der die angeregten Kernspuren deutlich schneller ätzt als das übrige Material, sichtbar gemacht werden kann.

Mikrostrukturierung mit Laserstrahlen [7,8]

Die Mikromaterialbearbeitung mit Laserlicht ist ein schnell wachsendes Gebiet mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten. Man unterscheidet die konventionelle, nicht-reaktive und die chemische Lasermaterialbearbeitung.

Bei der chemischen Lasermaterialbearbeitung wird durch pyrolytische oder fotolytische Reaktionen ein chemischer Prozeß aktiviert bzw. seine Reaktionsgeschwindigkeit erhöht. Typische Anwendungen sind: Belichtung von Resistmaterialien, Materialabtragung und -abscheidung, Oberflächenmodifikation (z.B. Oxidation, Reduktion), Dotieren.

Bild 5 zeigt schematisch einige Beispiele für laserinduzierte Prozesse in der Mikrostrukturtechnik. Laser-Mikromaterialbearbeitung kann sowohl über Maskenprojektion wie auch durch direktes Schreiben von Strukturen mit lateralen Abmessungen bis in den Submikrometerbereich erfolgen. Die

Gleichspannung, in innigen Kontakt gebracht und dadurch chemisch verbunden. Die Herstellung des Sensors erfolgt in mehreren fotolithographischen Ätzschritten, wobei die Dicke des Balkens durch die Ätzzeit bestimmt wird.

Drucksensoren

Die bis jetzt am erfolgreichsten eingesetzten mikromechanischen Elemente aus Silizium sind Druckfühler mit einer dünnen Membran als Sensorstruktur, die durch anisotropes Ätzen hergestellt wird. Die Signalabnahme erfolgt wie beim Beschleunigungssensor entweder piezoresistiv oder kapazitiv. Die Dicke der Membran richtet sich nach dem Druckbereich; sie beträgt für einen 2 bar-Sensor mit einer Membran von 2 mm Durchmesser etwa 25 μm .

Chipskühlsystem

Die Verlustleistungen steigen bei zukünftigen Integrierten Schaltungen auf über 100 W je Chip. Diese Schaltkreise müssen bei Multichipsystemen mit hoher Chipdichte flüssigkeitsgekühlt werden. Auch hierbei kann die Mikromechanik wichtige Beiträge leisten, wie das Beispiel eines miniaturisierten Kühlsystems zeigt (Bild 7).

Mit Hilfe der anisotropen Ätztechnik können in die Rückseite eines Siliziumsubstrats, auf dessen Vorderseite sich der aktive Teil der Integrierten Schaltung befindet, schmale Kanäle strukturiert werden. Durch den Einsatz des Anodic-Bonding-Verfahrens wird das Silizium dicht und haftfest mit einer Glasplatte oder einer gesputterten Glasschicht verbunden, so daß geschlossene Mikrokanäle entstehen. Durch diese Kanäle wird eine Kühlflüssigkeit gepreßt. Eine Erhöhung der Wärmeabfuhr aus der aktiven Zone eines Chips kann auch erreicht werden, wenn diese Kanäle mit Metall aufgefüllt und in Verbindung mit einer Wärmesenke gebracht werden.

Anzeigeeinheit

Ein weiteres Beispiel für die Anwendung der Dünnschichttechnik ist die Herstellung von elektromechanischen Klappen, die z. B. in Anzeigeeinheiten genutzt werden. Dabei werden mit einer Anzahl Klappen die einzelnen Punkte

des Rasters gebildet. Die Basis der Anzeige bildet ein Plastiksubstrat. Nach dem Aufdampfen einer 5 nm dicken Aluminiumschicht werden zuerst die Klappen und die Aufhängebrähte herausgeätzt. Die Anzeige wird zwischen einer Frontplatte aus Glas, die Gegenelektroden trägt, und einer geschwärzten Rückwand verkapselt (Bild 8). Durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen Gegenelektrode und Klappe wird letztere in eine vertikale Position gedreht, so daß der Beobachter den schwarzen Hintergrund sieht.

Frequenzanaloge Quarzsensoren

Die Verfügbarkeit von Sensoren, die ohne Analog-Digital-Wandlung ein digitales oder quasidigitales Signal liefern, ist von großer Bedeutung für die weitere Entwicklung digitaler Meß- und

schen Schwingungen möglich ist. Beispiele für miniaturisierte Quarzsensoren sind Dickenscherschwinger in Form schmaler Plättchen, Stimmgabeln und Doppelstimmgabeln.

Resonanter Polysilizium-Gassensor

Eine mit Hilfe der Sacrificial-Layer-Methode hergestellte freistehende Polysiliziumbrücke (153 μm lang, 1,35 μm dick) eignet sich z.B. als Gassensor (Bild 9). Die Brücke, auf der eine dünne gassensitive Polymerschicht aufgebracht ist, wird elektrostatisch zu Schwingungen angeregt; die Änderung der Resonanzfrequenz infolge einer Änderung der Massenbelegung der Brücke durch Gasadsorption in der Polymerschicht wird kapazitiv detektiert.

Massenfilter für Aerosole

Bild 10 zeigt schematisch einen mit Poren von 1 μm Durchmesser versehenen scheibenförmigen Quarzoszillator, der nach dem Prinzip der Mikrowägung als Massenfilter für Aerosole eingesetzt werden kann. Dieses Bauelement [14] wurde mit Hilfe der Kernspurtechnik hergestellt. Nach einer Bestrahlung mit ^{208}Pb wurde das Quarzsubstrat ca. 16 Stunden in KOH bzw. NaOH geätzt.

Konzeption von Reinräumen für die Mikromechanik

Notwendigkeit der Reinraumtechnik

Entwicklung und Fertigung in der Mikroelektronik kommen ohne Reinraumtechnik nicht mehr aus: erfahrungsgemäß führen schon Partikel, die größer sind als 1/4 der minimalen Strukturabmessungen mit hoher Wahrscheinlichkeit durch physikalischen Defekt zu einem Ausfall von Bauelementen. Partikel, die größer als 1/10 der minimalen Strukturabmessungen sind, können auf chemischem Wege indirekt einen Defekt auslösen.

Da die kleinsten mikromechanischen Strukturen derzeit in der Größenordnung von 5 μm liegen, d.h. im Bereich der Large Scale Integration (LSI), sind nach der zuvor erwähnten Faustregel in der Mikromechanik bereits Partikel mit einem Durchmesser von 0,5 μm vom Fertigungsprozeß auszuschließen; denn die Ausbeute Y, und damit die Wirt-

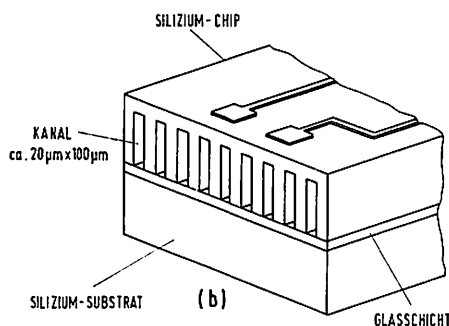


Bild 7
Miniaturisiertes Kühlsystem [10]

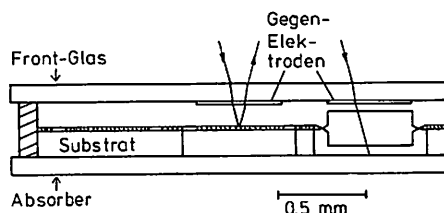


Bild 8
Mikroklappen-Anzeige [11]

Regelsysteme. Eine wichtige Gruppe von Sensoren, die diese Voraussetzung erfüllen, sind Sensoren mit Frequenzgang auf der Basis mikromechanischer Resonatoren, deren Frequenz empfindlich von der zu messenden Größe abhängt.

Einkristalliner Quarz spielt als Werkstoff für mikromechanische Resonatoren eine sehr wichtige Rolle, da er piezoelektrisch ist und damit eine einfache elektrische Anregung der mechani-

schaftlichkeit einer Produktion, hängt ab von den Parametern Defektdichte D , Chipfläche A und der Zahl der kritischen Maskenebenen n (Bild 11).

Eine zunehmende Miniaturisierung in der Mikrosystemtechnik, deren Ziel u.a. die Integration von Mikromechanik und signalverarbeitender Mikroelektronik ist, bedingt allerdings steigende Anforderungen an die Reinheit in direkter Prozeßumgebung (Prozeßfluide, -gase, luftgetragene Partikel).

Kontaminationsquellen im Reinraum [18]

Die Reinraumtechnik beinhaltet zum einen die Vermeidung von Kontaminationen und zum anderen die Beseitigung von Kontaminationen. Wesentliche Kontaminationsquellen in der Mikroelektronik sind (mit zunehmender Gewichtung):

- ☐ Partikel in der Raumluft,
- ☐ Verunreinigung in Prozeßmedien,
- ☐ Prozeß-Equipment (Abrieb) und Verfahren,
- ☐ Kontaktkontaminationen (z.B. durch Pinzetten),
- ☐ Reinraumpersonal.

Eine im Bereich der Mikromechanik unter Reinraumbedingungen zu bearbeitendes repräsentatives Substrat ist der Silizium-Wafer, dessen Kontaminationsbelastung durch Raumluft mit ca. 1 Partikel $> 0,1 \mu\text{m}$ je Liter (das sind nur rund 7 Prozent der Gesamtkontamination) gering ist im Vergleich zur Belastung durch Prozeßflüssigkeiten.

Das Personal kann durch reinraumgerechte Verhaltensweisen wesentlich

zu einer Verringerung der Kontamination beitragen. Das 1984 von Hewlett-Packard-Mitarbeitern entwickelte SMIF-Konzept (Standard Mechanical Interface) [16,17] will dagegen jeglichen direkten Kontakt Mensch — Produkt vermeiden: nicht mehr der Mensch, sondern nur noch das Produkt und die Maschine befinden sich unter Reinraumbedingungen. Dieses Konzept

Flüssigkeit, mit der die Substrate am intensivsten in direkten Kontakt kommen. An die Qualität des Reinstwassers sind daher besonders hohe Anforderungen zu stellen:

- ☐ Spezifischer Widerstand (25 °C): 18 $\text{M}\Omega \text{ cm}$,
- ☐ Gesamtmetallgehalt: $< 5 \mu\text{g/l}$,
- ☐ Partikel $> 0,2 \mu\text{m}$: $< 50\,000/\text{l}$,
- ☐ Keime (lebend): $< 50/\text{l}$.

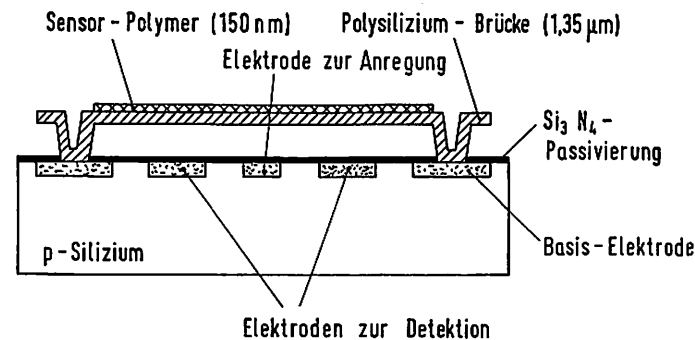


Bild 9
Freistehende Polysiliziumbrücke als Gassensor [13]

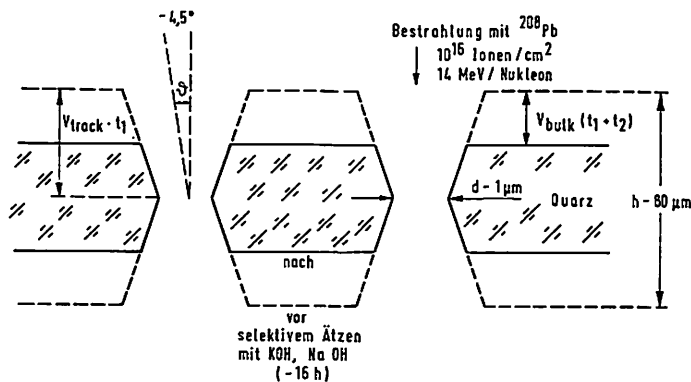


Bild 10
Quarzoszillator als Massensensor für Aerosole [13]

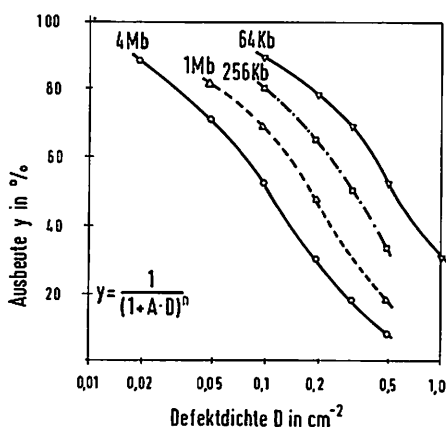


Bild 11
Zusammenhang zwischen Ausbeute und Defektdichte für einige Chipgenerationen [15, Quelle: Hitachi]

setzt vollautomatisches Roboter-Handling, standardisierte Miniaturreinraumboxen und entsprechende Produktaufnahme-Systeme voraus. Dabei bleiben die Kassetten immer in einem geschlossenen System unter Reinraumbedingungen. Die immensen Kosten hierfür stehen in Relation zur Senkung der Betriebskosten für die Aufbereitung der Luftmengen (Filterung, Einhaltung von Temperatur und Feuchte) gegenüber herkömmlichen Reinraum-Konzeptionen.

Neben der so bedeutenden Aufgabe, Kontaminationen in Reinräume bereits am Ort ihrer Entstehung zu beseitigen, ergibt sich die Notwendigkeit, bereits kontaminierte Oberflächen effektiv zu reinigen. Die Qualität der Reinigungsprozesse (Spülen, Schleudern, Abblasen, Trocknen) beeinflusst unmittelbar die Ausbeute. Reinstwasser ist dabei die

Auslegung reinraumtechnischer Anlagen [19]

Für die Konditionierung der Luft und die Anforderungen an das Reinraumgebäude gelten in der Mikromechanik wie auch in der Halbleiterfertigung folgende Richtwerte:

- ☐ Außenluftanteil: 10 - 20%; 50 $\text{m}^3/\text{h}/\text{Person}$,
- ☐ Temperatur: $21 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$,
- ☐ Relative Feuchte: $45\% \pm 5\%$,
- ☐ Geräusche: $< 60 \text{ dB(A)}$,
- ☐ Beleuchtungsstärke: 1000 lx entsprechend 40 W/m^2 ,
- ☐ Überdruck: 5 - 15 Pa,
- ☐ Schwingungen (0 - 10 Hz): max. $0,4 \mu\text{m}$,
- ☐ Luft: weniger als 100 Partikel $> 0,5 \mu\text{m}$ je ft^3 . Diese Spezifikation entspricht der Reinraumklasse 100 [20]. Infolge des Luftüberdrucks kann

	Laborraum und Schleuse Klasse 10 000	Laminar-Flow-Bereich Klasse 100
Lüftungsart	turbulente Mischlüftung	turbulenzarme Verdrängungsströmung
Luftwechsel [h^{-1}]	ca. 40	360 — 500
Luftmenge [$m^3/h \times m^2$]	ca. 120	1000 — 1600
mittl. Luftgeschw. [m/s]	—	0,3 — 0,45
Einblasöffnungen	Deckenauslässe	Filterdecke
Abluftöffnungen	Decke	Tischfläche
Vorfilter	EU 4	B 2 oder C
Endfilter	HOSCH	HOSCH
Überdruck [Pa]	5 — 10	12
Wandbeschaffenheit	abriebfeste Farbe	melaminharzbesch. Platten/Acrylglas
Bodenbeschaffenheit	PVC/Adhäsionsmatten	melaminharzbesch. Platten/Edelstahl- lochbleche

Tabelle 1
Details der Konzeption des Mikromechanik-Reinraumlabor

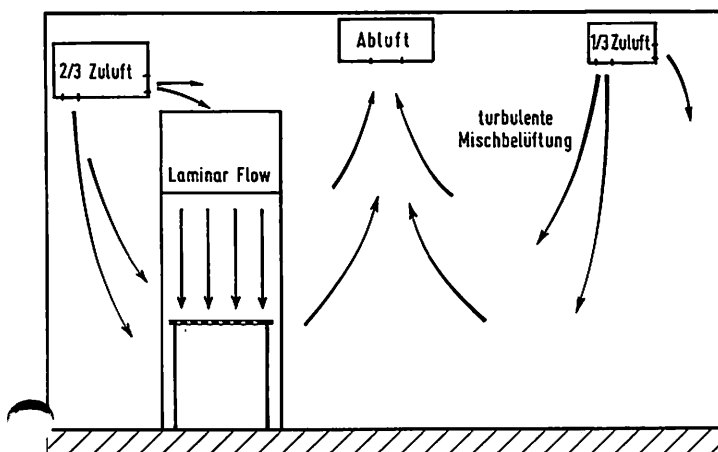


Bild 13
Konzeption des Reinraums mit Deckenluftauslässen (Reinraumklasse 10 000) und Laminar Flow-Bereichen (Reinraumklasse 100)
(Bildquelle: Verfasser)

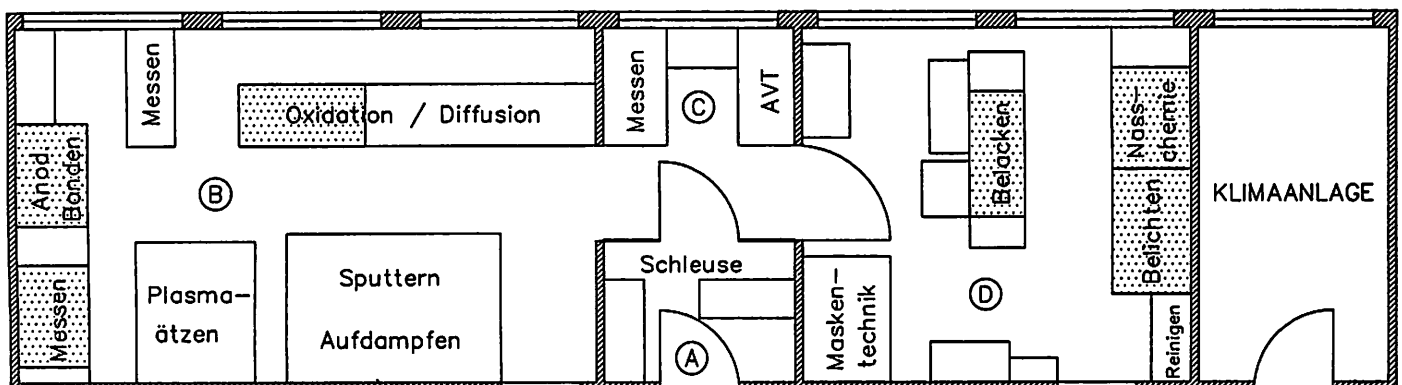


Bild 12
Layout des Mikromechanik-Reinraumlabor. Bereiche A (Schleuse), B, C und D: Reinraumklasse 10 000. Bereich D: Gelblichtbereich. Schraffierte Bereiche: Reinraumklasse 100

Reinluft aus dem Raum entweichen, aber staubbelastete Luft von außen nicht in den Reinraum eindringen. Die Partikelkonzentration n ergibt sich aus dem Verhältnis von Partikelquellstärke E und Zuluftvolumenstrom u , der als partikelfrei angenommen wird zu $n = E/u$.

Höhere Reinheitsanforderungen verlangen daher größere Reinluftmengen. Für die Reinraumklasse 100 000 benötigt man einen ca. 20-fachen stündlichen Luftwechsel. Dies entspricht turbulenter Mischlüftung. Man kann dies steigern und mit 40 bis 60-fachem Luftwechsel Klasse 10 000 und mit ca. 200-fachem Luftwechsel Klasse 1000 erreichen. Dabei ist die Luftwechselzahl abhängig von der Anzahl der Personen im Reinraum.

Legt man einen Reinraum mit einer Grundfläche von $200 m^2$ zugrunde, so ergibt sich für Klasse 10 000 ein Luftaustauschvolumen von 24 000 bis 36 000 m^3/h . Dies ist ein enormer Luftdurchsatz, dessen Sauerstoffgehalt vom Reinraumpersonal durch Atmung im allgemeinen nicht ausgeschöpft wird. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen führt man deshalb diese Luft nach Staubfilterung und Zugabe von ca. 10 bis 20% Frischluft im Umluftbetrieb wieder zum Reinraum zurück.

Der Frischluftanteil wird als Abluft dem gesamten Austauschvolumen wieder entzogen. Ein Teil dieser Abluft entweicht durch Personenschleusen und Abluftkanäle. Außerdem muß die bei bestimmtem chemischen Prozessen entstehende toxische Abluft separat abgeführt, in der Gaswaschanlage entsorgt und substituiert werden. Leckver-

luste der Gebäudehülle müssen ebenfalls kompensiert werden.

Der Übergang zu Reinheitsklassen besser als Klasse 1000 kann aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht ausschließlich durch Erhöhung der Luftwechselzahl erreicht werden. Statt dessen werden durch turbulenzarme Verdrängungsströmung (Laminar Flow) wirkungsvoll Schmutzpartikel entlang der Stromlinien abtransportiert (meist vertikal nach unten). Damit keine Turbulenzströmungen auftreten, muß eine Luftgeschwindigkeit von $0,45 \pm 0,1$ m/s [19] eingehalten werden.

Die Kosten eines Reinraums hängen direkt von seiner Leistungsfähigkeit ab. Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen Forschungsstätte und Produktionsstätte. Für ein Forschungslabor von 200 m² ist bei mittlerem Standard mit Kosten in der Größenordnung von 6000 bis 10 000 DM/m² zu rechnen, einschließlich Planung und Projektierung.

Für einen wirtschaftlichen Betrieb reinraumtechnischer Anlagen lassen sich mögliche Energieeinsparungen durch geeignete Kombination der folgenden Maßnahmen realisieren:

- ☐ Variationen des Verhältnisses von Außen- zu Umluft, um den Bedarf an künstlicher Kühlung herabzusetzen. Folgende Abwärmeanteile fallen mit spezifischer Gewichtung an: Äquivalente Ventilatorleistung, Personenwärme, Beleuchtungswärme, Prozeßwärme, Maschinenwärme.
- ☐ Verwendung von Abwärme zu Heizzwecken.
- ☐ Wärmerückgewinnung aus der Abluft mit Hilfe von Rekuperatoren und Wärmepumpen.
- ☐ Minimale künstliche Befeuchtung.
- ☐ Anhebung des Temperaturniveaus.
- ☐ Minimierung des Außenluftanteils.
- ☐ Angemessene Systemunterteilung entsprechend der benötigten Raumluftzustände.
- ☐ Variabler Luftvolumenstrom.
- ☐ Drosselung des Luftstroms und des Außenluftanteils außerhalb der Produktionszeit.

Viele der möglichen Energiesparmaßnahmen erfordern zusätzliche Investitionen, die sich nach einer gewissen Zeit allerdings infolge reduzierter Betriebskosten amortisieren.

Mikromechanik-Reinraumlabor

Für Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Mikromechanik wurde im Forschungsinstitut der Forschungsgesellschaft für Feingeräte-, Mikro- und Uhrentechnik in Stuttgart ein Mikromechanik-Labor (ca. 80 m²) unter Low-Cost-Gesichtspunkten geplant und eingerichtet.

Die Anforderungen der Mikromechanik legten die Einrichtung eines Reinraums der Klasse 10 000 mit turbulenter Mischlüftung und Laminarflowboxen der Klasse 100 für die kritischen Bereiche nahe (Bild 12). Aus Kostengründen wurde auf eine Boden-Luftabführung (Doppelboden) verzichtet. Die Abluftkanäle befinden sich ebenfalls an der Decke (Bild 13). Auch bei Reinraumklasse 10 000 ist eine Reinraum-schleuse erforderlich.

Es wurde darauf geachtet, daß sich die eigentliche Prozeßlinie ausschließlich unter Reinen Werkbänken befindet. Diese Laminarflow-Boxen beziehen ihre Zuluft aus dem Raum der Klasse 10 000 und geben ihre Abluft, sofern diese nicht separat abgeführt werden muß (wie z.B. in Chemie-Flowboxen), wieder in den Raum ab.

Für die Reinraumklasse 10 000 genügen abriebfeste Wandfarbe und gewöhnliche PVC-Bodenbeläge den Anforderungen bezüglich Partikelemission. Für das Personal sind Reinraumkittel, Handschuhe, Überschuhe, Kopfhäube und (bei kritischen Prozessen) Mundschutz obligatorisch. In Tabelle 1 sind einige Details der Konzeption aufgeführt.

Literatur

- [1] Petersen, K.E.: Silicon as a Mechanical Material. Proc. IEEE 70 (1982) 420.
- [2] Angell, J.B.; Terry, S.C.; Barth, P.W.: Mikromechanik aus Silizium. Spektrum der Wissenschaft, Nr. 6, 1983, p. 38.
- [3] Kendall, D.L.; de Guel, G.R.; Torres-Jacome, A.: The wagon wheel method applied around the [011] zone of silicon. The Electrochemical Society Extended Abstracts, 82-1 (1982), 209.
- [4] Howe, R.T.: Polycrystalline Micro-Structures. In: C.D. Fung, P.W. Cheung, W.H. Ko, D.G. Fleming (Hrsg.): Micro-machining and Micro-packaging of Transducers. Elsevier, Amsterdam 1985, p.169.
- [5] Becker, E.W.; Ehrfeld, W.; Hagmann, P.; Maner, A.; Münchmeyer, D.: Fabrication of Microstructures with High Aspect Ratios and Great Structural Heights by Synchrotron Radiation Lithography, Galvanoforming, and Plastic Moulding (LIGA Process). Microelektronik Engineering 4 (1986) 35.
- [6] Fischer, B.E.; Spohr, R.: Teilchenspuren in der Mikroelektronik. I. Grundlagen. Naturwissenschaften 75 (1988) 57, II. Anwendungsbeispiele. Naturwissenschaften 75 (1988) 117.
- [7] Bäuerle, D.: Chemical Processing with Lasers. Springer Series in Materials Science, Vol. 1. Springer-Verlag, Berlin 1986.
- [8] Boyd, I.W.: Laser Processing of Thin Films and Microstructures. Springer Series in Materials Science, Vol. 3. Springer-Verlag, Berlin 1987.
- [9] Roylance, L.M.; Angell, J.B.: A Batch-Fabricated Silicon Accelerometer. IEEE Trans. Electron Devices ED-26 (1979) 1911.
- [10] Reichl, H.: Mikromechanik und Chipverbindungstechnik. In: A. Heuberger (Hrsg.): Mikromechanik. Springer-Verlag, Berlin 1989, p.462.
- [11] Perret, A.; Porret, F.; Vuilleumier, R.: Structures electromecaniques miniaturisees appliquees a l'affichage. XIe Congres International de Chronometrie, Besancon, 4-6 Octobre, 1984, p. 143.
- [12] Büttgenbach, S.: Frequenzanaloge Quarzsensoren. Hard and Soft, Fachbeilage Mikroperipherik, Nr. 10, 1988.
- [13] Howe, R.T.; Muller, R.S.: Resonant-Microbridge Vapor Sensor. IEEE Trans. Electron Devices ED-33 (1986) 499.
- [14] Holländer, W.; Pape, E.; Plachky, M.; Vater, P.; Brandt, R.: Aerosol Mass Determination with Nuclear Track Filters from Quartz Crystals. J.Aerosol. Sci. 17 (1986) 859.
- [15] Reinraumtechnik. Lehrgangsunterlagen der Technischen Akademie Esslingen, 7. Nov. 1986.
- [16] SMIF reduziert Reinraum-Anforderungen drastisch. Productronic Nr.5, 1986, p. 10.
- [17] Harada, H.; Suzuki, Y.: SMIF System Performance at 0,22 µm Particle Size. Solid State Technology, Dec. 1986, p.61.
- [18] Fertigung unter Reinraum-Bedingungen. Seminarunterlagen VDI/IPA Stuttgart, 10./11. Nov. 1988.
- [19] U.S.-Federal-Standard 209b. Clean Room and Work Station Requirements (1973).
- [20] Perspektiven der Reinraumtechnik. VDI Berichte Nr. 654. Düsseldorf: VDI 1987.