Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 87 (1996)

Heft: 9

Artikel: Microsystemtechnik : eine Technologie mit Zukunft : Teil 3 : Technologien

Autor: Buser, Rudolf A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902319

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Dieser letzte von drei Artikeln, von denen die ersten beiden in den Ausgaben 17/95 und 21/95 erschienen sind, soll nun noch einige in den vorangegangenen Beiträgen erwähnte technologische Verfahren etwas genauer erläutern. Betont wird dabei vor allem der mikromechanische Aspekt, da dieser wohl der ungewohnteste ist. Die meisten Verfahren stammen aber aus der Mikroelektronik oder lehnen sich zumindest sehr stark an diese an.

Mikrosystemtechnik – eine Technologie mit Zukunft

Teil 3: Technologien

■ Rudolf A. Buser

Mit der Miniaturisierung ändern auch die Bearbeitungsmethoden. Ausgangsmaterial ist in der Mikrotechnik immer ein Substrat in Scheibenform (Wafer). Damit können planare Prozesse angewendet werden, das heisst im Prinzip alle Prozesse der IC-Fabrikation sowie weitere Beschichtungstechniken der Optik und der Galvanik, in denen dünne Schichten eine lange Tradition haben (Spiegelherstellung oder Korrosionsschutz). Weiter wurden beispielsweise Drahterosionstechniken so verfeinert, dass selbst Silizium damit bearbeitet werden kann, und jene möglicherweise eine interessante, leicht zugängliche Alternative zu den nachfolgend beschriebenen Techniken ist. Ein mikrotechnisches Bauteil wird in einer Kombination von mehreren Verfahrensschritten hergestellt, von denen nachfolgend einige (grundsätzlich) beschrieben werden.

Substrate

Silizium

Silizium ist dank seiner Verfügbarkeit als einkristalline, polierte Scheibe höchster Güte, wie sie auch in der Mikroelektronik benötigt wird, sowie dank seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften nach wie vor das massgebliche Material in der Mikromechanik, wobei zusätzlich positiv zu Buche schlägt, dass die Silizium-Verarbeitungsprozesse sehr vielfältig sind und besser als bei anderen Materialien beherrscht werden.

Silizium ist ein Element der vierten Hauptgruppe im Periodensystem und hat eine kubische Symmetrie. Um bestimmte Ebenen im Kristall zu bezeichnen, bedient man sich der sogenannten Millerschen Indizes. Drei Beispiele von Ebenenbezeichnungen für einen Kristall mit kubischer Symmetrie sind in Bild 19 angegeben.

Einkristallines Silizium wird aus Quarz oder Quarzsand im Lichtbogenofen mit Kohle oder Koks zu metallurgischem Rohsilizium mit einem Reinheitsgrad von 99% reduziert und anschliessend aus der Schmelze gezogen. Es gibt im wesentlichen zwei Verfahren hierzu:

Das Czochralsky(CZ)-Tiegelziehverfahren, bei welchem mit Hilfe eines rotierenden Keimlings ein Einkristall aus der Schmelze gezogen wird, und das Zonenziehverfahren (FZ), bei dem in einer Schutzgasatmosphäre ein polykristalliner Siliziumstab durch induktive Erwärmung abschnittsweise geschmolzen und so in einen Einkristall übergeführt wird. Der Vorteil des FZ-Verfahrens liegt in der grösseren Reinheit, der Nachteil in der grösseren Versetzungsdichte (Fehler im Kristall).

Das elastische Verhalten von einkristallinem Silizium ist naturgemäss anisotrop, so dass immer die Richtung für die angegebenen Ingenieursgrössen Elastizitätsmodul E, Schermodul G und ν angegeben werden muss.

Einkristallines Silizium kann auch epitaktisch hergestellt werden, das heisst

Adresse des Autors:
Prof. Dr. *Rudolf A. Buser*, Institut für Mechanik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

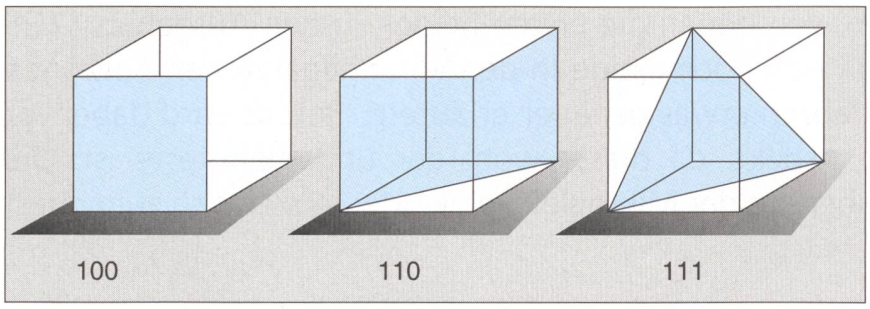


Bild 19 Die Hauptebenen eines Kristalls mit kubischer Symmetrie

durch Aufwachsen von orientierten Schichten auf einen (kristallinen) Träger.

GaAs

Galliumarsenid ist das Grundmaterial im Gebiet der Optoelektronik und der Höchstfrequenztechnik. GaAs-Wafer sind sehr zerbrechlich, und dies machte das Material wenig attraktiv für mechanische Anwendungen. Es ist aber zu erwarten, dass mit kleinen beanspruchten Flächen die relative Dichte der kritischen Defekte so klein wird, dass die Ausfallquote erträglich wird. GaAs ist im Gegensatz zu Si piezoelektrisch, wobei seine piezoelektrischen Koeffizienten mit denen von Quarz vergleichbar sind. Es ist etwa doppelt so schwer wie Silizium, und seine Elastizitätskoeffizienten liegen deutlich unter denjenigen von Si. Auch ist der Wärmeausdehnungskoeffizient mehr als doppelt so gross wie bei Si.

Quarz

Quarz ist chemisch Siliziumdioxid (SiO_2). Er tritt in mehreren, aus Silizium-Sauerstoff-Tetraedern aufgebauten Modifikationen auf. Für piezoelektrische Anwendungen benützt man seine unterhalb von 573 °C vorkommende Tieftemperaturmodifikation. Sie wird normalerweise als α-Quarz (Tiefquarz) bezeichnet.

Keramik

Keramiken, soweit sie nicht als Dünnschichten verfügbar sind, haben in der Mikromechanik bislang noch eine geringe Bedeutung als Ausgangsmaterial, da sie für den typischen Vorgang des Ätzens weitgehend ungeeignet sind. Einzig in der Abformtechnik sieht man Ansätze, diese Materialklasse zu nutzen, und natürlich sind in der Hybridtechnologie Keramiksubstrate, zum Beispiel Aluminiumoxid, weit verbreitet.

Glas

Als allgegenwärtiges Material hat Glas auch in der Mikromechanik Eingang gefunden. Isotropes Ätzen ist in flusssäurehaltigen Ätzmischungen möglich. Glas kann aber auch gesägt und (mit Ultraschallbohrern) gebohrt werden. Eine besondere Bedeutung hat das Material Pyrex (#7740) erlangt, da es bei drei Temperaturen die gleiche thermische Ausdehnung wie Silizium besitzt. Damit eignet es sich für das sogenannte Anodische Boden, eine hermetische (dichte) Verbindung von Glas und Silizium, die man bei einer Temperatur von etwa 400 °C und einer quer zur Verbindung angelegten Hochspannung von bis zu 1000 V erreicht. Damit werden die im Glas vorhandenen positiven Ionen vom Interface abgezogen. Die elektrostatische Kraft zieht nun das Si und das Glas so aneinander, dass ein eigentlicher Verschweissungsprozess stattfindet.

Schichtenbildung

Direktes Verändern des Substrates

Oxidation

Der durchschlagende Erfolg von Silizium gegenüber Germanium resultiert aus der Tatsache, dass sein Oxid stabil ist. Zwar bildet auch Germanium ein Oxid (GeO_2); nur ist dieses wasserlöslich. Das glasartige SiO_2 hingegen ist chemisch stabil, ein guter Isolator und kann in situ durch Oxidation in kompakter Form auf dem Wafer direkt hergestellt werden. Wesentlich dabei ist, dass das Oxid-Wachstum an der Grenzschicht und nicht etwa an der Oberfläche abläuft. Damit werden alle Verunreinigungen von der heiklen Zone weggeschafft – ein entscheidender Vorteil für die Herstellung von stabilen Halbleiterbauelementen.

Es gibt zwei grundsätzliche Verfahren, Silizium in einem Quarzrohr bei etwa 1000 °C zu oxidieren: entweder mit Sauerstoff, dann sieht die Reaktion wie folgt aus:

$$Si + O_2 \rightarrow SiO_2$$

oder mit Wasserdampf, dann sieht die Reaktion wie folgt aus:

$$Si + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + 2H_2$$

Dotierung

Unter Dotierung versteht man eine Beimengung bestimmter Stoffe zu einer vorgegebenen Substanz, wobei diese kristallin oder amorph sein kann und aus ein oder mehreren Elementen bestehen kann. Eine Dotierung verfolgt den Zweck, die Substanz in ihren physikalischen, chemischen oder elektrischen Eigenschaften zu verändern. Die Grössenordnung von Dotierungen zur Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit liegt typischerweise bei einigen ppm. Abweichend davon sind in der Mikromechanik Dotierungen bis in die Prozentgegend erwünscht, zum Beispiel zur lokalen Reduktion der Ätzgeschwindigkeiten.

Übliche Dotierungselemente (Dotanten) für die Si-Halbleitertechnologie sind P, As, Sb als Donatoren (sie geben ein Elektron ab, → n-Typ) und B, Ga, Al, In als Akzeptoren (sie nehmen ein Elektron auf, → p-Typ).

Die Dotierung erfolgt durch Diffusion, durch Ionenimplantation oder während

Elastizitätsmodul {100}-Richtung {110}-Richtung	$E = 1{,}300 \cdot 10^{11}$ Pa $E = 1{,}6896 \cdot 10^{11}$ Pa
Schermodul {001}-Oberfläche und {001}- oder {011}-Richtung der Scherkraft Oberfläche und {110}-Richtung der Scherkraft	$G = 0{,}7951 \cdot 10^{11}$ Pa $G = 0{,}5085 \cdot 10^{11}$ Pa
Thermischer Expansionskoeffizient α bei Raumtemperatur	$2{,}4 \cdot 10^{-6}$/K
Temperaturkoeffizient des Schermoduls bei {110}-Oberfläche	$K_G[110] = -91{,}5$ ppm/K
Spezifische Wärme bei Zimmertemperatur	C = 0,678 J/gK
Wärmeleitfähigkeit (isotrop für Si)	W/(K m)
Vickershärte	HV = 1000
Bruchfestigkeit (sehr unterschiedliche Angaben)	3200 N/mm

Tabelle II

α hat ein Minimum bei 80 K: $\alpha = -0{,}472 \times 10^{-6}$/K und ist null bei 120 K. Eine starke Dotierung erhöht die Koeffizienten um etwa 1–1,5%, wobei die diesbezügliche relativ grosse Unsicherheit beim CZ-Verfahren noch etwas höher als beim FZ-Verfahren und etwas kleiner mit Oxid ist.

Tabelle III Physikalische Eigenschaften des α-Quarzes (J. Tichy, Piezoelektrische Messtechnik, Springer, 1980)

Dichte des α-Quarzes bei 20 °C	$2{,}649 \cdot 10^3$ kg m^{-3}
Vickershärte	HV=550
Schmelzpunkt	1710 °C
Druckfestigkeit je nach ihrer Orientierung	$2 \cdot 10^9 \ldots 3 \cdot 10^9$ Pa
Zugfestigkeit (Achse c) – senkrecht zu c	$1{,}2 \cdot 10^8$ Pa $0{,}95 \cdot 10^8$ Pa
Temperaturausdehnungskoeffizienten mit der Temperatur zunehmend	$\alpha_{11} = 13{,}7 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$ $\alpha_{33} = 7{,}4 \cdot 10^{-6}\ K^{-1}$
spezifischer Widerstand Richtung der c-Achse – bei Naturquarzkristallen – bei synthetischen Quarzkristallen – senkrecht zur c-Achse Er nimmt mit zunehmender Temperatur stark ab	 $\rho_c = 5 \cdot 10^{12} \ldots 2 \cdot 10^{13}\ \Omega m$ $\rho_c = 10^{15} \ldots 2 \cdot 10^{16}\ \Omega m$ um zwei Zehnerpotenzen grösser

des Kristallwachstums (Epitaxie). Da durch Diffusion Konzentrationsunterschiede ausgeglichen werden, besteht die Technik darin, an der Oberfläche anfänglich eine hohe Fremdatomkonzentration zu erreichen, welche dann durch Diffusion nach innen abgebaut wird. Der Diffusionsprozess ist näherungsweise ein thermodynamischer Gleichgewichtsprozess. Die durch Diffusion erzeugten Dotantenkonzentrationsprofile verlaufen flach und führen zu relativ breiten pn-Übergängen.

Ionenimplantation bedeutet das Einschiessen von geladenen Partikeln in Substrate mit Hilfe eines Teilchenbeschleunigers. Dieses Verfahren ist ein thermodynamischer Nichtgleichgewichtsprozess. Die Menge der eingebrachten Dotanten kann die Löslichkeitsgrenze überschreiten. Die kristalline Struktur des Halbleitersubstrats kann bis zur völligen Amorphisierung gestört werden. Diese Strahlenschäden müssen durch nachträgliche thermische Behandlung ausgeheilt und die Dotanten elektrisch aktiviert (auf Gitterplätze eingebaut) werden. Mit der Ionenimplantation können wegen der genau bekannten Energie-Reichweite-Beziehungen für die verschiedenen Dotanten-Halbleiter-Kombinationen Dotierungsvorgaben in den Fehlergrenzen von +0,5% realisiert werden.

Die Ionenimplantation kann auch dazu eingesetzt werden, die mechanischen Eigenschaften von Oberflächen zu verbessern (Härte, Abrieb). Die Implantation hoher Sauerstoff- oder Stickstoffdosen erlaubt, sogenannte vergrabene Isolatorschichten (Burried layers) herzustellen (SiO_2, Si_3N_4). Darüber können übliche elektronische Bauelemente hergestellt werden (Silicon-on-insulator-Technik, SOI).

Physikalische Verfahren zur Bildung von Dünnschichten

Einleitung

Dünnschichttechnologie bedeutet, dass die Schichten in situ auf dem Substrat aus Atomen, Ionen, Molekülen oder Clustern aufgebaut werden. Da das Wachstum dünner Schichten oft nicht im thermodynamischen Gleichgewicht erfolgt, weichen ihre physikalischen Eigenschaften im allgemeinen von denen des kompakten Materials ab. Die einfachste Art der Beschichtung ist das Aufschleudern (Auftropfen und anschliessend auf einem Drehteller Schleudern) eines gelösten Stoffes.

Eine PVD (Physical Vapor Deposition) besteht aus drei Schritten:

1. Überführung des Beschichtungsmaterials von der kondensierten Phase (fest oder flüssig) in die Dampfphase
2. Transport des Dampfes von der Quelle zum Substrat
3. Kondensation des Dampfes, gefolgt von Nukleation und Filmwachstum

PVD-Prozesse haben gegenüber anderen Techniken den Vorteil, dass die obgenannten drei Schritte mehr oder weniger unabhängig voneinander kontrolliert werden können. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Dampfphase zu erzeugen.

Aufdampfen

Dabei wird die Dampfphase durch Aufheizen einer Quelle erzeugt, entweder durch Widerstandsheizen, durch Strahlung, Wirbelströme, Elektronenstrahl, Laser oder Lichtbogen. Dies findet üblicherweise im Vakuum statt (typischerweise 10^{-5} bis 10^{-6} Torr), so dass die Atome auf einem direkten, kollisionslosen Weg auf das Substrat gelangen, welches üblicherweise auf Erde liegt.

Aufsputtern

Im Sputterprozess bombardieren positive Gasionen (üblicherweise Argon), welche in einer Glimmentladung erzeugt werden, das zu transportierende Material (Target, Kathode). Die so freigesetzten Atome setzen sich anschliessend auf dem Substrat nieder. Eigentlich ist das Sputtern eine ineffiziente Art der Verdampfung, aber das Verfahren resultiert im allgemeinen in einer besseren Adhäsion der Schichten als beim Verdampfen, weil durch die Bombardierung die Oberfläche laufend gereinigt wird.

Chemische Verfahren zur Bildung von Dünnschichten

Chemical Vapour Deposition (CVD) kann als Methode definiert werden, bei welcher die Komponenten der Gasphase reagieren, um einen Film auf einem Substrat zu formieren (Pyrolyse), also unabhängig vom Substrat. Voraussetzung für einen CVD-Prozess ist die Existenz gasförmiger chemischer Verbindungen, die miteinander so reagieren, dass unter den Reaktionsprodukten der für die Beschichtung gewünschte Stoff in fester Form vorkommt, alle anderen Reaktionsprodukte jedoch gasförmig sind und somit leicht abtransportiert werden können. Die Bedeutung der CVD-Methode liegt hauptsächlich in ihrer Flexibilität, eine breite Palette von Elementen und Verbindungen bei relativ niedrigen Temperaturen sowohl in Form von amorphen als auch polykristallinen Schichten deponieren zu können, welche eine hohe Perfektion und Reinheit haben.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie zum Beispiel Heizen, Plasma- oder Lasereinsatz, die zur Anregung erforderliche Energie einzubringen. Bei der thermischen CVD wird die zur Anregung erforderliche Energie durch Hochfrequenzinduktion, Direktheizung oder Strahlungsheizung zugesetzt, bei der plasmainduzierten CVD (Plasma enhanced CVD) durch Gasentladung und bei der laserinduzierten CVD durch Anregung von Gasmolekülen oder Aufheizung des Substrates. Man unterscheidet zwischen APCDV (Atmospheric Pressure CVD) und LPCVD (Low Pressure CVD, 10–100 Pa). Die Abscheidung epitaxialer Schichten mittels RPVPE (Reduced Pressure Vapor Phase Epitaxy) erfolgt bei Drükken zwischen 1 und 10 kPa.

Beispiel Siliziumdioxid:

$SiH_4 + O_2 \leftrightarrow SiO_2 + 2H_2O$ bei 450 °C und Atmosphärendruck

Typische Aufwachsraten sind 1 bis 2 µm/h.

Beispiel polykristallines Silizium (LPCVD):

$SiH_4 \rightarrow Si + 2H_2$ bei 630 °C

Galvanische Verfahren

Die elektrochemischen Verfahren der Schichtabscheidung sind in der Metallurgie weit verbreitet. Auch in der Mikrotechnik haben sie Eingang gefunden, vor allem, um Schichten mit Dicken über 2–3 µm abzuscheiden. Gold, Kupfer als Kontaktmaterial, Gold auch als Ätzschutz (Maskierung), Nickel als Metall und Eisen-Nickel-Verbindungen als magnetisches Material sind am häufigsten anzutreffen.

Schichterosion

Definition der Geometrie

Photolithographische Verfahren

Um ein bestimmtes Muster zu erzeugen, das beispielsweise definieren soll, wo geätzt werden muss und wo nicht, wird ein spezielles Verfahren, die sogenannte Photolithographie, angewendet. Das Muster selbst wird nach dem Festlegen des Prozessablaufes auf einem CAD-System erzeugt.

In einem ersten Schritt wird hiezu mit Hilfe eines Spinners (Drehteller) eine photosensible Schicht (Photolack, Photoresist, PR) auf den Wafer aufgebracht. Der Photoresist wird aufgeträufelt, und die Umdrehungszahl (3000–5000 UpM) bestimmt zusammen mit der Viskosität die Schichtdikke, welche typischerweise bei 1,5 µm liegt. Anschliessend erfolgt ein sogenanntes Pre- oder Softbake (typisch: 15 min bei 85 °C, je nach Angabe des Photoresist-Herstellers), wobei das Lösungsmittel vollständig verdampft wird. Nun folgt der Hauptschritt: durch eine Maske, eine Glasplatte mit aufgebrachten Absorberstrukturen (meist Chrom), wird der Wafer mit UV-Licht bestrahlt. Photochemische Prozesse im Resist erhöhen (Positivlack) bzw. verringern (Negativlack) die Löslichkeit der belichteten Bereiche. Dabei muss meist das aufzubringende Muster auf die bereits auf dem Wafer befindliche Struktur oder, besonders wichtig im Falle der Mikromechanik, auf die Kristallrichtung adjustiert werden. Deshalb ist ein Apparat notwendig, welcher diese beiden Funktionen leistet. Dies wird besonders aufwendig, wenn ein Muster auf der Rückseite des Wafers als Referenz dient (double side maskaligner). Im anschliessenden Entwicklungsprozess werden die leichter löslichen Bereiche entfernt. Im folgenden sogenannten Hardbake wird der verbleibende Photoresist vollends polymerisiert (z. B. 135 °C, 20 min). Nun kann geätzt werden, beispielsweise in Flusssäure (HF), um das SiO_2 durchzuätzen. Danach wird der Photoresist wieder entfernt (stripping, Azeton für positiven Resist, rauchende Salpetersäure oder spezielle Resist remover).

Die minimale Strukturbreite b_{min} ist im wesentlichen durch die Wellenlänge der verwendeten Strahlung gegeben. Üblich ist etwa 1 µm, bei verfeinerten Techniken heute sogar bis 0,18 µm. Je kurzwelliger das Licht, desto kleiner die möglichen Strukturen. Röntgenwellen ($\lambda = 0{,}2$ bis 2 nm) bieten sich somit naturgemäss an, wobei allerdings die Röntgenquellen (Synchrotronstrahlung), die speziellen Masken und der spezielle Photoresist (PMMA) einigen Aufwand voraussetzen.

Interessant ist in diesem Zusammenhang die Möglichkeit, dicke Resistschichten parallel zu belichten, mit anderen Worten, hohe Aspektverhältnisse zu erhalten. Dies wird im sogenannten am Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelten Liga(Lithographie, Galvanik, Abformen)-Verfahren ausgenutzt, wo die tiefen Gruben zwischen dem PMMA durch galvanisches Aufwachsen von Metallschichten gefüllt werden und anschliessend das PMMA entfernt wird. Die zurückbleibende Struktur kann als Matrize für nachfolgendes Abformen (Thermopressen oder Spritzgusstechnik) benutzt werden.

Direktes Beschreiben

Zur Herstellung der Masken selbst werden der Genauigkeit wegen meist Elektronenstrahlen verwendet. Da bei diesen die Beugung praktisch keine Rolle mehr spielt, können mit ihnen Strukturen im Sub-Mikrometerbereich übertragen werden. Dies kann sowohl in einem Proximityverfahren mit Silizium-Transmissionsmasken als auch in einem Schreibverfahren mit einem fokussierten Elektronenstrahl erfolgen. Beide Verfahren sind relativ teuer, das eine wegen der Maske, das andere wegen der benötigten Schreibzeit. Im Prinzip kann man natürlich auch die Wafer direkt beschreiben, verliert aber dabei jeden Vorteil der Parallelisierung.

Ätzen

In einem Ätzprozess wird primär das Muster des lithographisch strukturierten Photolacks auf die darunterliegende Schicht (evtl. Schichten) übertragen. Geätzt werden kann entweder nass oder trocken (siehe unten). Ist der Photoresist nicht resistent gegenüber einem Ätzmittel, so muss zuerst (mit den gleichen Mitteln wie nachfolgend beschrieben) eine entsprechende zusätzliche Maskierschicht erzeugt und strukturiert werden. Isotrope Ätzprozesse führen zu einer Unterätzung der Maskierschicht (Bild 20a). Wird nach senkrechtem Durchätzen der Schicht der Prozess nicht abgestoppt, erfolgt eine Überätzung (Bild 20b). Masshaltiges Ätzen kann mit gewissen anisotropen Ätzprozessen erreicht werden (Bild 20c). Im allgemeinen haben auch die Maskierschicht und das Substratmaterial eine endliche Ätzrate. Das Verhältnis der Ätzraten verschiedener Materialien heisst Selektivität. Dies hat Bedeutung für die Wahl der Maskierschicht und die Toleranz gegenüber einer Überätzung. Wird das Überätzen bis zum völligen Wegätzen der Schicht fortgesetzt, bleibt bei geeignetem Design die Maskierschicht freistehend stehen (Opferschichttechnik). Damit können mechanische Balken, Resonatoren, Rotoren für Mikromotoren usw. konstruiert werden.

Nassätzen

Bei den nasschemischen Ätzverfahren werden die Substrate in Bäder geeigneter chemischer Zusammensetzung getaucht oder mit dem Ätzmittel besprüht. Ausser dem weiter unten beschriebenen anisotropen Ätzen von Silizium sind diese Verfahren isotrop. Mit Hilfe eines Lasers kann man lokal eine Anisotropie erzeugen, indem man die belichtete Stelle stärker als die unbelichtete ätzt. Im folgenden werden einige Beispiele aufgeführt.

Silizium

Die isotrope Ätzung von Silizium geschieht in einer HF-HNO_3-Mischung, welche in Wasser oder Essigsäure (CH_3COOH) gelöst wird. Neben unterschiedlicher Ätzrate bestimmt die Zusammensetzung der Ätzlösung auch die Beschaffenheit der Siliziumoberfläche.

Siliziumdioxid

SiO_2 wird, sofern nicht trockengeätzt wird, fast ausschliesslich in wässerigen Fluoridlösungen mit oder ohne Zusatz von NH_4F geätzt. Der Zusatz von Ammoniumfluorid stabilisiert den pH-Wert (sogenannte gepufferte Flusssäure, BHF) und damit die Ätzrate. Auch wird der Photoresist weniger angegriffen.

Siliziumnitrid

LPCVD Si_3N_4 kann nasschemisch fast nur in siedender Phosphorsäure mit einem CVD-Siliziumdioxid als Maskierschicht geätzt werden. Ebenso Aluminiumoxid (Al_2O_3).

Metalle

Aluminium wird bei etwa 40° Phosphorsäure relativ rasch geätzt, so dass eine Photoresist-Maskierschicht genügt. Gold wird üblicherweise in Kalium-Iod-Iodid mit Photoresist als Maskierschicht geätzt.

Trockenätzen oder Plasmaätzen

Das sogenannte Trockenätzverfahren geschieht in Reaktoren mittels Gasen, welche in einem Plasma angeregt oder ionisiert werden.

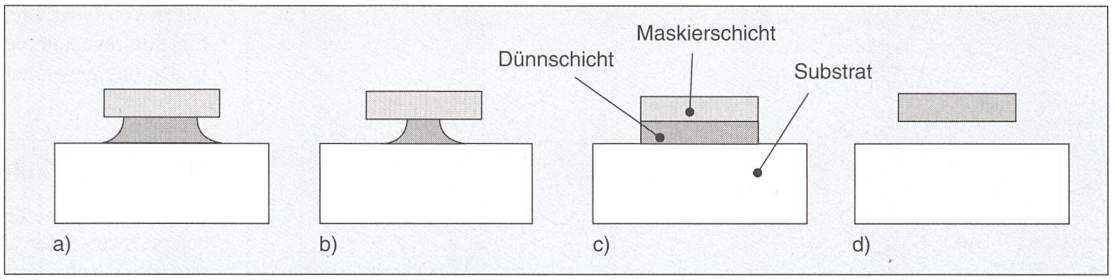


Bild 20 Verschiedene Ätzeffekte und -verfahren
a) Isotropes Ätzverfahren
b) Überätzen
c) Masshaltiges Ätzverfahren
d) Opferschichttechnik

Prinzip

Ein Plasma ist ein ionisiertes Gas mit makroskopisch gleichviel freier positiver wie negativer Ladung. Die Mehrheit der negativ geladenen Teilchen sind normalerweise freie Elektronen; in sehr elektronegativen Gasen wie Chlor können allerdings negative Ionen überwiegen. Der einfachste Plasmareaktor besteht aus zwei parallelen Plattenelektroden in einer Vakuumkammer (1–100 Pa). Bei Anlegen einer Hochspannung an die Elektroden werden freie Elektronen beschleunigt; sie bilden einen Strom, welcher durch Stösse ein Plasma erzeugt (Glimmentladung).

Voraussetzung für eine Plasmaätzung ist, dass die Reaktionsprodukte gasförmig sind. Der Hauptvorteil des Trockenätzens liegt in der Möglichkeit der geringeren Unterätzung (Bild 20c) und damit der feineren Linienbreite der Strukturen. Da in vielen Fällen Photoresist als Maskierung genügt, spart man sich eine zusätzliche Maskierschicht, wie das beispielsweise beim Nassätzen von Siliziumnitrid notwendig ist. Der Nachteil sind die hohen Investitionskosten und zum Teil die geringere Selektivität.

Arten des Plasmaätzens

Die Plasmaätzprozesse können in folgende Gruppen unterteilt werden:

Sputtern: Die Ionenenergie sprengt mechanisch Atome aus dem Substrat. Sputtern erfordert hohe Ionenenergien. Dies wird bei niedrigen Drücken erreicht (< 50 m Torr). Damit sind auch die freien Weglängen gross, und der Verlust durch Wiederanlagerung ans Ursprungsmaterial (Redeposition) ist gering. Sputterätzen wird im allgemeinen in einem planaren Reaktor durchgeführt.

Chemisches Plasmaätzen: Beim chemischen Ätzen erzeugt das Plasma lediglich die Radikale. Neutrale Radikale reagieren chemisch mit dem Substrat und formieren gasförmige Produkte (beispielsweise Fluoratome bei der Fluorätzung von Silizium mit SiF_4 als Reaktionsprodukt). Dieses Verfahren ist meist selektiver, aber meist auch isotrop, was weniger erwünscht ist. Für das plasmachemische Ätzen wird der sogenannte Barrelreaktor benutzt. Er besteht aus einer zylindrischen Vakuumkammer mit Gaseinlass und Vakuumsystem [15]. Die zu ätzenden Scheiben befinden sich in der Mitte der Kammer auf einer geeigneten Halterung (Boot). Mit Hilfe einer hochfrequenten Wechselspannung wird bei einem Druck der Grössenordnung von 100 Pa eine Gasentladung gezündet, die durch einen perforierten Metallzylinder (Tunnel) von den zu ätzenden Substraten ferngehalten wird. In der Gasentladung werden reaktive Radikale erzeugt, die durch Diffusion zur Substratoberfläche gelangen und diese abtragen (rein chemisches Ätzen). Wichtigstes Einsatzgebiet des Barrel-Etchings ist die Entfernung von Photoresist im O_2-Plasma.

Ionenunterstütztes chemisches Plasmaätzen: Ein Ionenbeschuss ändert die Oberfläche, wenn die chemische Reaktion allein nicht ausreicht. Der Ätzvorgang ist eher isotrop mit anisotroper Komponente, weil der Ionenbeschuss ziemlich senkrecht auf die Oberfläche trifft, besitzt aber eine hohe Selektivität. Bei Zimmertemperatur reicht zum Beispiel Cl allein nicht aus, um undotiertes einkristallines Silizium zu ätzen; aber wenn ein hochenergetischer Ionenfluss dazukommt, wird die Ätzrate um vieles höher als beim reinen Sputtern. Plasmaätzen (PE, Plasma Etching) geschieht wie das Sputterätzen in einem planaren Reaktor. Der Gasdruck ist relativ hoch (10–100 Pa).

Ionenunterstütztes Ätzen zum Durchbrechen einer ätzhemmenden Schicht: Reaktionsprodukte können sich ätzhemmend auf der Oberfläche anlagern. Ätzhemmende Schichten bilden sich beispielsweise bei der Verwendung von fluorhaltigen Ätzgasen (CF_4, CHF_6) durch Polymerisation von CF_2. Ätzen von Si mit Chlor führt zu SiCl und $SiCl_2$, die sich mit geringer Bindungsenergie an die Si-Oberfläche anlagern. Dieses Verfahren hat eine anisotrope Komponente, da die Schicht die Seitenwände schützt.

Stark ionenunterstütztes chemisch-reaktives Plasmaätzen (Reactive Ion Etching, RIE): Dazu wird ein planarer Reaktor verwendet, bei dem die HF-Spannung kapazitiv an die Substrathalter-Elektrode (Kathode) gekoppelt ist. Dies erhöht die Beschleunigungsspannung durch sogenanntes Selfbiasing. Der Druck ist relativ niedrig (0,1–1 Pa), was zu höheren Ionenenergien führt. Die Anisotropie ist hier sehr ausgeprägt.

Beim Ion Beam Etching (IBE, Ion Milling) werden die Ionen in einer separaten Kammer erzeugt und dann in Richtung Substrate, die sich in einer Hochvakuumkammer befinden, beschleunigt. In einer solchen Anlage können Ionen-Stromdichte und Ionen-Energie unabhängig voneinander eingestellt werden.

Beim Reactive Ion Beam Etching (RIBE) werden wie beim IBE die Ionen ausserhalb der Ätzkammer erzeugt. Interessant sind die ECR-Quellen (Electron Cyclotron Resonance), bei welchen durch das Zusammenwirken eines Mikrowellenfeldes (2,45 GHz) mit einem Magnetfeld ein Plasma hoher Dichte erzeugt wird, aus welchem dann Ionen oder ein neutraler Plasmastrom extrahiert werden können.

Tiefes Trockenätzen von Silizium

Für tiefe Gräben und Löcher, die in der Mikromechanik erforderlich sind, ist ent-

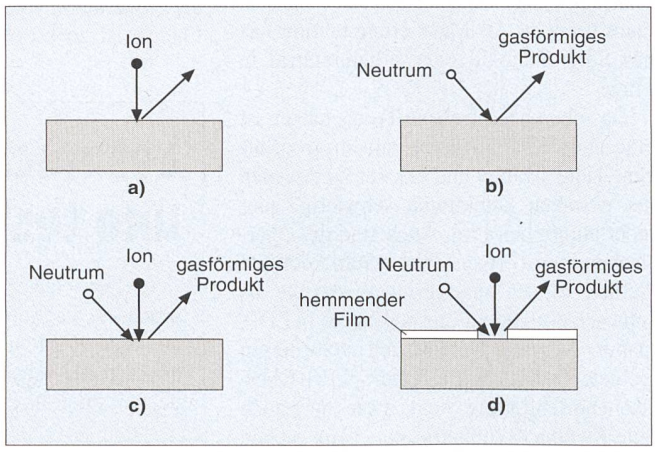


Bild 21 Mögliche Arten des Trockenätzens

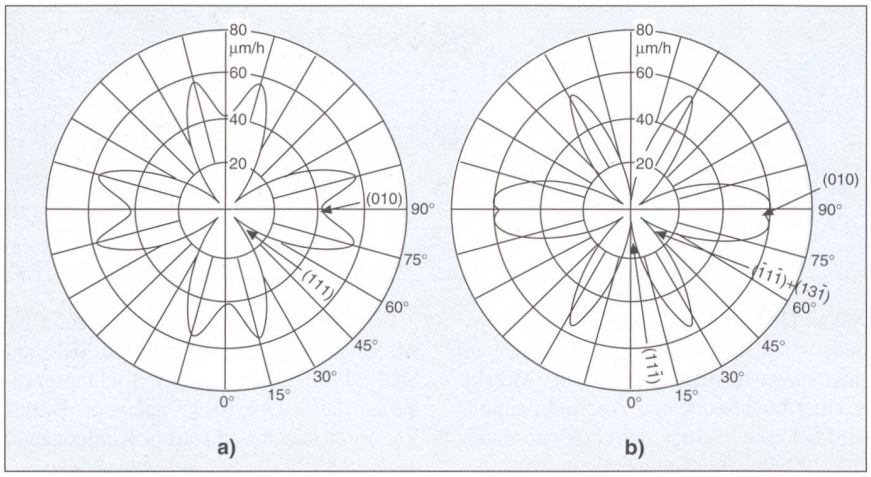


Bild 22 Kristallrichtungsabhängigkeit der lateralen Ätzrate auf {100}- und {110}-Scheiben als Funktion des Justierwinkels bei einer 50-%-KOH-Lösung bei 78 °C [18]

scheidend, wie dick die Maskierschicht sein muss. Photoresist als Maskiermaterial ergibt in einer SF_6/O_2-PE-Anlage Selektivitäten von 20 bis 30, thermisches SiO_2 85 und Al über 300, das heisst mit 1 µm Al als Maskierschicht kann man 300 µm tief ätzen.

In einer C_2ClF_5/SF_6-RIE-Anlage ist die Selektivität zu Photoresist 5,2 und zu thermischem SiO_2 19; aber die Anisotropie erlaubt, nahezu senkrechte Wände zu erzeugen. In gewissen Maschinentypen wird das Substrat sehr stark gekühlt, um die nötige Anisotropie zu erreichen.

Anisotropes (richtungsabhängiges) Ätzen von Silizium

Kalilauge (KOH), Hydrazin sowie auch eine Mischung aus Ethylendiamin und Brenzkathechin (Ethylene Diamine Pyrocathecol, EDP) ätzen die {111}-Ebenen bis zu 500mal langsamer als die {100}-Ebenen. Dies bedeutet, dass die {111}-Ebenen bei einer Ätzung der {100}-Ebenen sozusagen als Ätzstoppebenen betrachtet werden können. Es gibt auch gewisse Ebenen, welche sich schneller als die {100}-Ebenen ätzen lassen. Sie bestimmen im wesentlichen die konvexen Ecken. Dieses Phänomen beinhaltet im wesentlichen das, was man unter «anisotropem Ätzen» von Silizium versteht. Als Maskierung kommt fast nur Siliziumdioxid oder Siliziumnitrid in Frage.

Das oben beschriebene Trockenätzen ist eine andere Möglichkeit, anisotrop zu ätzen. Tiefe Gräben und Löcher sind wegen der geringen Selektivität schwierig, aber nicht unmöglich [16]. Auch sind die Oberflächen meist etwas rauh. Stark dotierte Gebiete weisen eine geringere Ätzrate als schwach dotierte auf, insbesondere in EDP. Damit ist eine Unterätzung von diesen Gebieten möglich. Bei einer {110}-Oberflächenorientierung liegt zwar nur noch eine Zweifachsymmetrie vor, dafür stehen aber vier {111}-Ebenen senkrecht zur Oberfläche, was schmale, tiefe Gräben zu ätzen erlaubt.

Potentialabhängiges Ätzen

Da es sich beim Ätzen von Silizium um einen elektrochemischen Prozess handelt, ist zu erwarten, dass die Ätzraten durch das Anlegen von Spannung beeinflusst werden können. Ist die Spannung positiv, so kommt der Ätzvorgang zum Erliegen. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, durch Anlegen einer geeigneten Spannung eine ätzstoppende Wirkung an einem pn-Übergang zu erzielen. Dies wurde sowohl für KOH als auch für Ethlylendiamin-Lösungen demonstriert.

Anisotropes Ätzen von anderen HL

Für Germanium wurden bis jetzt keine dem Silizium vergleichbaren anisotropen Ätzverfahren veröffentlicht. Hingegen sind für GaAs anisotrope Ätzmittel erhältlich; sie bestehen aus einer Mischung aus Br_2 und CH_3OH oder CH_3OH, H_2O_2 und H_3PO_4, je nachdem, ob die {111}-Seitenwände oder die {001}-Oberfläche sauber geätzt werden sollen, da offensichtlich das eine das andere ausschliesst. Beispiele von mikromechanischen Strukturen werden in der Dissertation von K. Hjort [17] gegeben. Ebenso ist zu erwähnen, dass anisotropes Ätzen von Quarzkristallen zur Herstellung für Stimmgabeln von Uhren eine grosse Bedeutung gewonnen hat.

Schlussbemerkung

Die oben beschriebenen Prozesse werden beispielsweise für die Herstellung eines piezoresistiven Drucksensors grob wie folgt durchlaufen. Ausgangsmaterial ist Silizium (beispielsweise n-Typ mit einer {100}-Oberflächenorientierung. Nach einer thermischen Oxidation mittels Photolithographie (PL) wird die Öffnung im Oxid für eine Diffusion definiert und geätzt. Nach der Diffusion (Bor = p-Typ) der Piezowiderstände erfolgt eine erneute Oxidation, um die Oberfläche der diffundierten Gebiete zu versiegeln. Mittels einer weiteren PL werden kleine Löcher definiert und in das Oxid geätzt, durch welche die Widerstände elektrisch kontaktiert werden können. Dies geschieht mit einer Aluminiumschicht, welche aufgedampft und anschliessend durch PL zu Leiterbahnen strukturiert wird. Nun findet der eigentliche mikromechanische Schritt statt, bei dem mittels einer PL auf der Rückseite des Wafers ein Fenster in das auch hier vorhandene Oxid geöffnet wird, welches die Membran des Drucksensors definiert. Die Membran selbst wird durch anisotropes Ätzen in EDP erzeugt.

Wie man sich leicht denken kann, sind in einem industriellen Herstellungsprozess viele weitere Details zu beachten, auf welche wir hier nicht eingehen wollen, da diese Prozessbeschreibung nur illustrieren soll, wie die Einzelschritte zu einem Gesamtprozess zusammengestellt werden.

Literatur

[15] *S. Büttgenbach:* Mikromechanik. Teubner, Stuttgart 1991.

[16] *C. Linder, T. Tschan, N. F. de Rooij:* Deep Dry Etching of Silicon – A novel Micromachingn Tool. Sensors and Materials. 3, 6,1992, 311–324.

[17] *K. Hjort:* Gallium Arsenide Micromechanics. Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala 1993.

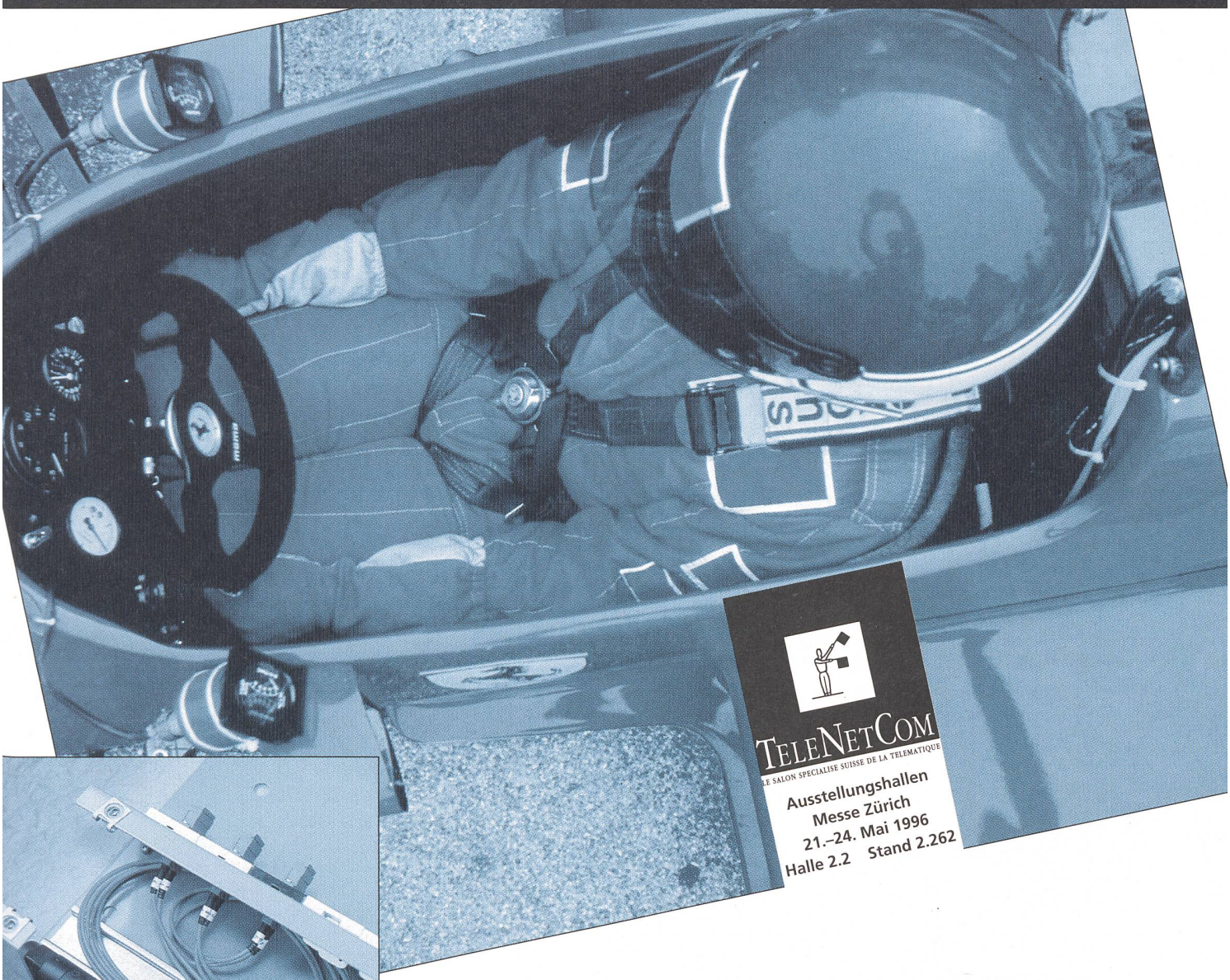
[18] *A. Heuberger:* Mikromechanik. Springer-Verlag, 1991.

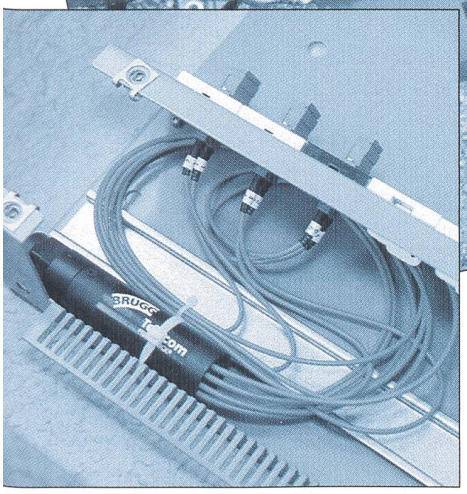
Les microsystèmes – une technologie d'avenir

Ce troisième et dernier article est destiné à exposer plus en détail quelques-uns des procédés technologiques mentionnés aux deux premiers articles parus dans les numéros 17/95 et 21/95. L'accent porte sur l'aspect micromécanique qui est sans doute le plus inhabituel. La plupart des procédés proviennent de la microélectronique ou sont du moins largement basés sur celle-ci.

Spitzenleistungen in der Übertragungstechnik

«Auf»Schalten zur Zielfahrt





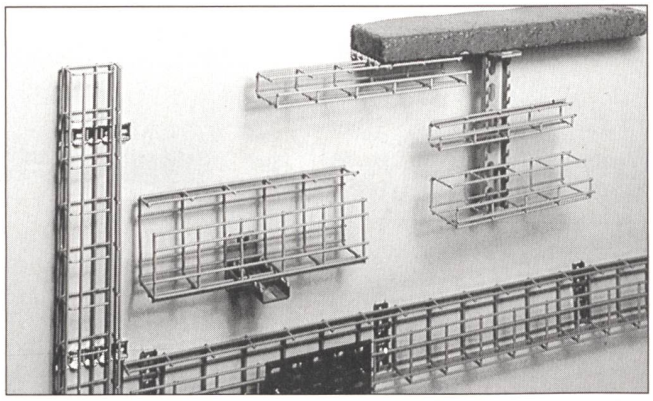
Wer in der Formel 1 schon beim Training schnell ist, startet aus der Pole Position. Immer kürzere Zeiten werden auch beim Bau und Betrieb von Kommunikationsnetzen gefordert. Früher standen bei der Installation und Messung von Glasfaserkabeln nicht der Faktor Zeit als vielmehr Spezialkenntnisse und teure Geräte zur Diskussion. Mit FIBER-QUICK® liefern wir Ihnen Kabelverbindungen mit bis zu 48 Glasfasern und fixfertig montierten Steckern an. Sie bestellen einfach die Kabellänge mit der gewünschten Stekkerzahl und erhalten von uns eine fertige FIBER-QUICK®-Verbindung. Diese ist nach der Montage sofort betriebsbereit. Zeitaufwendige Spleissarbeiten und Messungen entfallen. Mit FIBER-QUICK® schicken wir Ihnen modernste Technik anschlussfertig franko Domizil. Über kürzere und günstigere Montagezeiten freuen sich nicht nur Ihre Monteure, sondern auch Ihre Kunden. Mit FIBER-QUICK® starten Sie aus der Pole Position und stehen schon kurz nach dem «Auf»-Schalten auf einem guten Podestplatz.

100 1896-1996 BRUGG Tradition-Vision

BRUGG Telecom

Brugg Telecom AG · Nachrichtenkabel und Systeme · 5201 Brugg
Telefon 056 460 31 00 · Fax 056 460 35 31

Leistung, die verbindet



G-Kanäle u. kleine Gitterbahnen

Die neuen Installationskanäle (Pat.) aus halogenfrei hellgrau beschichtetem Gitterdraht von LANZ.

- **6 Grössen 50×50 bis 100×150 mm, Länge 2 m.**
- **Platzsparend an Decken ab 56 mm Gesamthöhe.**
- **Montage:**
  Hakenschiene oder Hakenschienen-Stütze anschrauben — G-Kanäle oder kleine Gitterbahnen einhängen — Kabel seitlich einlegen — fertig!

Rascher, sauberer und professioneller montieren mit G-Kanälen und kleinen Gitterbahnen von
LANZ 062/388 21 21 Fax 062/388 24 24
und Ihrem Elektrogrossisten.

☐ **LANZ G-Kanäle und kleine Gitterbahnen** interessieren mich! Bitte senden Sie Unterlagen.

☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!

Name/Adresse/Tel.: _____

13

lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen · Telefon 062 388 21 21

Fribos

STAHL

Im Explosionsschutz kennen wir uns aus

Explosionsgeschützte

- Leuchten
- Installationsgeräte
- Befehlsgeräte
- Meldegeräte
- Steuerungen
- MSR-Geräte
- Feldmultiplexer

Fribos AG, Muttenzerstrasse 125
CH-4133 Pratteln 2, Telefon 061 821 41 41, Fax 061 821 41 53

Jeder dritte BULLETIN-Leser arbeitet auf der obersten Geschäftsebene.

Werbung auf fruchtbarem Boden.
Tel. 01/207 86 34

SEV ASE VSE UCS