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: 74 (1983)

Heft: 17

Artikel: Leistungshalbleiter ohne Silizium?

Autor: Jaecklin, André A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904854

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: 09.12.2025

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

Leistungshalbleiter ohne Silizium?

André A. Jaecklin

Im Anschluss an eine Betrachtung der Bedeutung von Silizium für moderne Leistungshalbleiter werden in vereinfachter Form die Merkmale eines optimalen Werkstoffes für Leistungshalbleiter anhand von drei Kriterien diskutiert: Bandabstand, Trägerlebensdauer und Trägerbeweglichkeit. Hieraus lässt sich ableiten, dass für hohe Leistungen der Thyristor als Schaltelement auf der Basis von hochreinem Silizium auch in weiterer Zukunft nicht angetastet wird. Für mittlere Leistungen jedoch spielen nebst bipolaren Silizium-Leistungstransistoren Feldeffektelemente eine zunehmende Rolle. Auf der Basis von Verbindungshalbleitern wie GaAs sind Leistungshalbleiter vorstellbar, deren Verluste gegenüber der heute verwendeten Siliziumtechnologie um etwa einen Faktor 10 tiefer liegen.

L'importance de l'élément silicium pour les sémiconducteurs de puissance modernes est considerée d'abord. Ensuite, les caractéristiques d'un matériau de base optimal sont discutées de façon simplifiée en tenant compte de trois critères: bande d'énergie, durée de vie des porteurs de charge et mobilité des porteurs de charge. Pour les hautes puissances, on peut en déduire que la position du thyristor sur base de silicium restera dominante, même dans un avenir éloigné. Quant aux puissances moyennes, à côté des transistors bipolaires au silicium, des éléments à effet de champ ont gagné de l'importance. Sur base de matériaux semiconducteurs composés comme la GaAs, des composants de puissance apparaissent possibles, dont les pertes pourront être diminuées d'un facteur d'environ 10 par rapport aux dispositifs actuels au silicium.

Antrittsvorlesung, gehalten am 27. Januar 1983 im Auditorium Maximum der ETH, Zürich.

Adresse des Autors
PD Dr. sc. techn. *André A. Jaecklin*, Abt. EKS
Aktiengesellschaft Brown Boveri & Cie., 5401 Baden.

1. Was sind Leistungshalbleiter?

Als Grundmaterial für Leistungshalbleiter-Bauelemente (kurz Leistungshalbleiter) spielt Silizium eine derart dominante Rolle, dass der Gedanke an andere Werkstoffe selten in Betracht gezogen wird. Da jedoch Fortschritte in der Technologie potentiell neue Möglichkeiten erschliessen, sollen die Einsatzgebiete anderer Materialien gegenüber Silizium aufgrund einiger einfacher Kriterien abgegrenzt werden.

Der spezifische Widerstand von Metallen und Isolatoren unterscheidet sich um einen Faktor $\gtrsim 10^{20}$. Ein wesentlicher Teil des dazwischenliegenden Bereiches wird von Halbleitern überdeckt. Der jeweilige Widerstandswert einer gegebenen Probe wird durch eine geringfügige Menge gezielt eingebrachter Verunreinigungen, der Dotierung, bestimmt. Die Widerstandsbereiche der drei im Rahmen dieser Analyse speziell betrachteten Halbleiter, Germanium (Ge), Silizium (Si) und Gallium-Arsenid (GaAs), zeigt Figur 1.

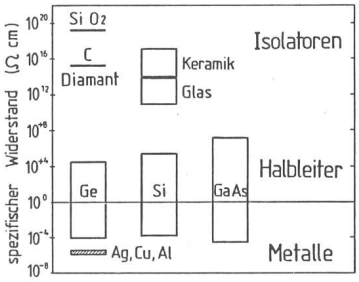


Fig. 1 Spezifischer Widerstand verschiedener Materialien bei Raumtemperatur

Zu unterscheiden sind einerseits die Signalhalbleiter, die sich über die Integration aktiver Bausteine zur Mikroelektronik mit sehr hohen Packungsdichten entwickelt haben, wobei der Schwerpunkt der Arbeiten sich immer mehr auf die Technologie feiner Strukturen verlagert hat. Bei Leistungshalbleitern anderseits hat sich das Interesse vor allem auf eine Steigerung von Stromtragfähigkeit und Spannungsfestigkeit konzentriert – allenfalls in Kombination mit einer Erhöhung der Schaltgeschwindigkeit. Hohe Spannung erfordert eine geringe Verunreinigungsdichte des Ausgangsmaterials, während hoher Strom eine grosse Fläche und damit eine entsprechend geringe Defektdichte pro Flächeneinheit verlangt. Aus diesen Gründen haben die Materialprobleme bei Leistungshalbleitern traditionell einen sehr hohen Stellenwert.

Das Interesse der Elektroindustrie

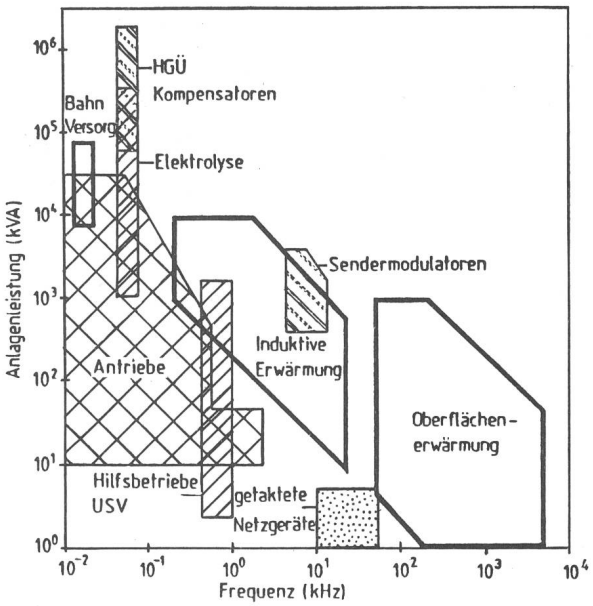


Fig. 2 Bereich von Anlagenleistung und Frequenz verschiedener Anwendungsgebiete

an Leistungshalbleitern konzentriert sich vor allem auf Komponenten höherer Leistung, die mindestens teilweise massgeschneidert für bestimmte Anwendungen bereitgestellt werden. Eine Palette derartiger Anwendungen, die sich durch grosse Unterschiede der Anlagenleistung wie der Impuls-Repetitionsfrequenz unterscheiden, ist in Figur 2 dargestellt. Typischerweise beträgt der Wertanteil der Leistungshalbleiter an einer ganzen Anlage nur etwa 3%, während Konzept und Konstruktion ganz wesentlich von deren elektrischen Eigenschaften abhängen (Beispiel: Thyristor-Lokomotive). Von diesen als Schlüsselkomponenten bezeichneten Elementen hängen beispielsweise 10% des Umsatzes der BBC Konzerngruppe Schweiz ab.

Es soll versucht werden, das elektrische Verhalten repräsentativer Halbleiter mit einigen Materialeigenschaften in Verbindung zu bringen. Das einfachste Beispiel ist die pn-Diode (Fig. 3a), deren Sperrfähigkeit direkt von der gezielt hergestellten Reinheit abhängt; die Restspannung im Durchlassfall, die die statischen Verluste bestimmt, ist im wesentlichen durch den noch zu diskutierenden Abstand zwischen Leitungs- und Valenzband bestimmt.

Der Thyristor hat als gesteuerter Gleichrichter (Fig. 3b) im gezündeten Fall die Eigenschaften einer Diode. Dessen Erfindung im Jahre 1956 hat die heutige Entwicklung der Leistungselektronik auf Halbleiterbasis erst ermöglicht.

Zu diesen klassischen Bauelementen haben sich in den letzten Jahren – nebst dem zu immer höheren Leistungen vorstossenden Transistor – weitere durch ein Steuersignal ausschaltbare Bauarten hinzugesellt (z. B. Gate-turn-off-Thyristor, GTO; Leistungs-Feldeffekt-Transistor, FET). Insbesondere in den unteren und mittleren Leistungssparten (Fig. 2) ist zurzeit eine stürmische Entwicklung im Gange, durch die die Frage nach dem potentiellen Einfluss anderer Werkstoffe besonders aktuell wird.

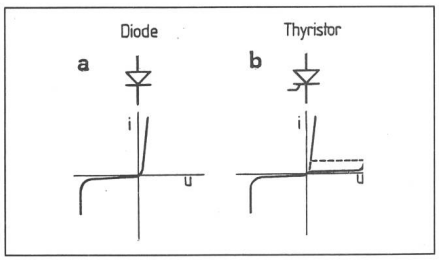


Fig. 3 Symbol und statische Charakteristik für eine pn-Diode (a) und einen Thyristor (b)

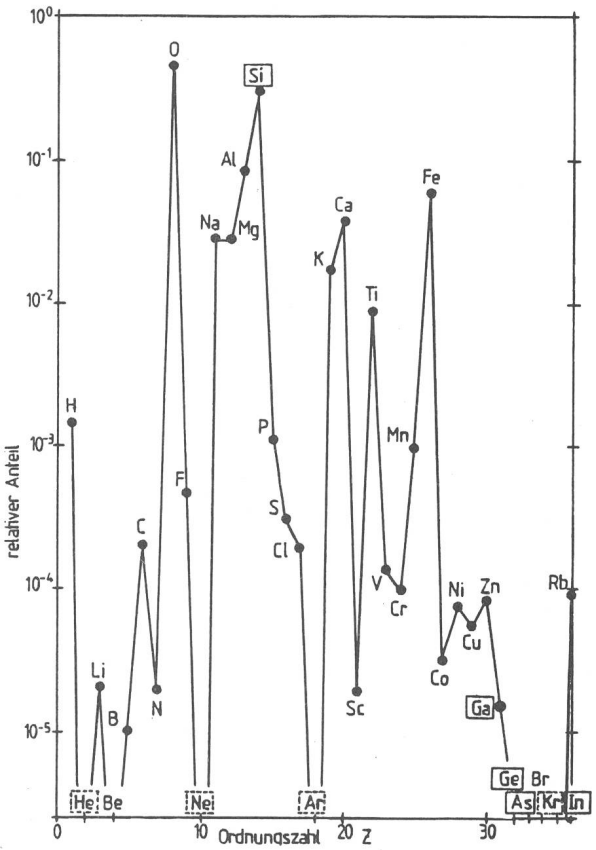


Fig. 4 Relativer Anteil der Elemente mit niedriger Ordnungszahl Z in der Erdkruste
$Z \leq 37$ sowie Indium In

2. Werkstoff Silizium

Die Entwicklung von Halbleiterbauelementen, insbesondere von Leistungsbauelementen, auf der Basis von Silizium darf als beispielhaft betrachtet werden für das erfolgreiche Zusammenwirken von Wissenschaft und Technik, genauer gesagt von Physik und Elektrotechnik. Es lohnt sich daher, die bis anhin dominierende Rolle von Silizium näher zu betrachten.

In Figur 4 ist der Anteil der Elemente niedriger Ordnungszahl relativ zur Gesamtmasse der Erdkruste dargestellt. Zwischen den Edelgasen (punktiert umrahmt), die in der Erdkruste praktisch nicht vertreten sind, ergeben sich Perioden der Häufigkeit, deren Maxima bei höheren Ordnungszahlen aus entstehungsgeschichtlichen Gründen stark abnehmen. Als zweithäufigstes Element nimmt Silizium eine ausserordentlich bevorzugte Rolle ein, insbesondere gegenüber den weiteren wichtigen Halbleitermaterialien (umrahmt). Während Gallium etwas häufiger vorkommt, bewegen sich Germanium, Arsen und Indium im ppm (parts per million)-Bereich und bieten damit entsprechende Beschaffungsprobleme.

Da Silizium in der Natur nur in gebundener Form vorkommt, wird es in einem mehrstufigen Prozess in hochreine, einkristalline Form übergeführt. Dank seiner grossen technischen Bedeutung ist Silizium heute zum reinst herstellbaren und physikalisch bestbekannten Material des periodischen Systems geworden. Dass zur Erreichung dieses Zustandes grosse Anstrengungen notwendig waren, demonstriert die Erhöhung des als Mass für die Reinheit geltenden spezifischen Widerstandes im Laufe der Jahre (Fig. 5). Wie zu erwarten, fällt der steilste Teil dieser Kurve mit der Erfindung des Transistors zusammen. Weniger bekannt dürfte sein, dass in den vergangenen zwei Jahrzehnten die Ent-

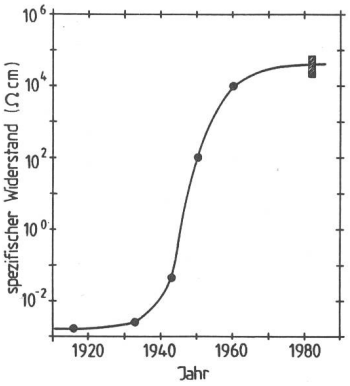


Fig. 5 Zeitliche Entwicklung des spezifischen Widerstandes von polykristallinem Silizium [1]

wicklung der Leistungshalbleiter zu höheren Spannungen und Strömen als eine der wichtigsten Triebfedern für die Verbesserung des Silizium-Ausgangsmaterials gewirkt hat.

Das aus der Gasphase abgeschiedene polykristalline Silizium muss geschmolzen und als hochreiner Einkristall rekristallisiert werden. Mittels einer lokal begrenzten Schmelzzone gelingt eine tiegelfreie, berührungslose Kristallzucht, wobei die ausserordentlich hohe Oberflächenspannung des flüssigen Siliziums (T_m = 1415 °C) das Ausfliessen der Schmelze verhindert. Dieses Verfahren ist für Leistungshalbleiter, nicht aber für die weniger kritischen Signalhalbleiter notwendig.

Bei höheren Sperrspannungen lassen sich exakte Dosierung und homogene Verteilung der sehr geringen Verunreinigungskonzentration (z. B. $\lesssim 10^{-9}$ Phosphoratome pro Siliziumatom) durch Neutronenbestrahlung, n, erreichen:

$$^{30}Si\,(n,\gamma) \longrightarrow {}^{31}Si \xrightarrow{2{,}6\,h} {}^{31}P + \beta$$

Das natürlicherweise vorhandene Siliziumisotop ^{30}Si verwandelt sich unter Abgabe eines γ-Quants in das radioaktive ^{31}Si, welches nach kurzer Zeit (2,6 h) unter Emission eines β-Teilchens ein erwünschtes Phosphor-Dotieratom, ^{31}P, bildet. Aufgrund der Statistik dieses Prozesses ist die Verteilung der so erzeugten Störatome äusserst homogen und genau dosierbar, eine unabdingbare Voraussetzung für Bauelemente mit Spannungen $\gtrsim$2 kV.

Wie der Kostenvergleich in Figur 6 zeigt, ist Silizium im Jahr 1970 annähernd mit Gold aufgewogen worden. Heute scheint sich der Preis von tiegelfreiem (float zone, abgekürzt FZ) Silizium bei einem Wert zu stabilisieren, der etwa einen Faktor 30 unter jenem von Gold liegt. Mit Rücksicht auf den weltweit grössten Silizium-Hersteller – Wacker Chemitronic in Burghausen – sind die Preise in DM/g angegeben.

Ebenso interessant ist die historische Entwicklung von Thyristoren höchster Leistung, wie sie im Netzbetrieb (50/60 Hz) verwendet werden: Die Grösse der jeweils verfügbaren FZ-Silizium-Scheiben (Fig. 7) lässt mit guter Näherung ein exponentielles Wachstum erkennen (strichpunktierte Linie). Sollte dieses Wachstumsgesetz immer noch gelten, dann müsste die Einführung von grösseren Scheiben, z. B. mit 125 mm Durchmesser, in unmittelbarer Zukunft erwartet werden. Annähernd proportional zur Siliziumfläche, mit etwa doppelter Steigung im Massstab von Figur 7, ist der mittlere Strom (Dauergrenzstrom) I_{AV} gewachsen. Parallel dazu konnte die zulässige Spannung U_B sukzessive gesteigert werden; sie ist heute bei 5 kV angelangt. Insbesondere der treppenartige Anstieg in U_B (Fig. 8) kann auf verschiedene identifizierbare technische Fortschritte und Durchbrüche, wie z. B. das Neutronen-bestrahlte Silizium, zurückgeführt werden. Die für die Anwendung wichtige Schaltleistung $P_S = U_B \cdot I_{AV}$ (Fig. 8) hat sich im Durchschnitt alle drei Jahre verdoppelt – in jüngster Vergangenheit sogar etwas rascher. Von der Anwenderseite scheint sich allerdings eine Sättigung der geforderten Schaltleistung abzuzeichnen.

Vergleichsweise hat die Verdopplung der Speicherkapazität einer integrierten Schaltung etwa zwei Jahre, bei etwa konstant bleibender Siliziumfläche, benötigt. Obwohl sich diese Entwicklung nicht mit jener der Schaltleistung vergleichen lässt, haben sich während mehr als einem Jahrzehnt ähnliche Zuwachsraten ergeben. Zu den raschen Fortschritten der vergangenen Jahre haben die Eigenschaften des Werkstoffes Silizium ganz wesentlich beigetragen. Soweit technologisch erreichbar, sind diese Vorteile, die von einem neuen Material allenfalls zu übertreffen wären, ausgeschöpft worden.

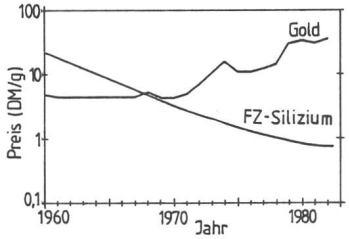


Fig. 6 Zeitliche Entwicklung der Preise von Gold und Float-Zone-Silizium

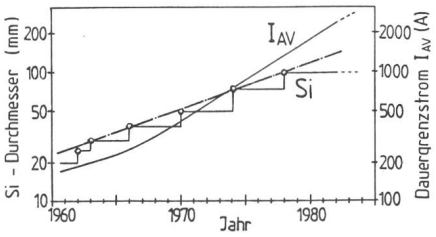


Fig. 7 Zeitliche Entwicklung von Si-Scheibendurchmesser [1] und Dauergrenzstrom I_{AV} ($T_{Gehäuse}$ = 85 °C)

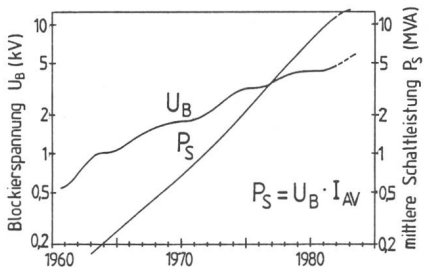


Fig. 8 Zeitliche Entwicklung von Thyristorspannung U_B und Schaltleistung P_s

3. Alternative Werkstoffe

Als Basis für die Diskussion eines optimalen Werkstoffes soll vorausgesetzt werden, dass defektfreie, homogene Kristalle der gewünschten Grösse herstellbar sind, die keine unerwünschten Verunreinigungen bergen und die exakt dotiert werden können. Es sollen also ausschliesslich Materialeigenschaften anhand von drei Kriterien betrachtet werden: Bandabstand, Trägerlebensdauer, Trägerbeweglichkeit. Nebst monoatomaren Halbleitern wie Si, sind auch aus mehreren Elementen zusammengesetzte Verbindungshalbleiter wie GaAs zu berücksichtigen.

3.1 Bandabstand

Im Einflussbereich der Atomkerne eines Kristalls haben Elektronen eine geringe Energie und werden dem sog. Valenzband zugeordnet. Elektronen, die sich durch äussere Energiezufuhr, z. B. durch die Temperaturbewegung, aus diesem Einflussbereich gelöst haben, sind in der Lage, zur elektrischen Leitung beizutragen und werden deshalb als im Leitungsband befindlich bezeichnet. Bei Metallen grenzen beide Bänder lückenlos aneinander (Fig. 9), was einer guten Leitfähigkeit ohne grössere Energiezufuhr entspricht. Da die in der Lücke zwischen Valenzband und Leitungsband E_g befindlichen Energiezustände nicht zulässig sind,

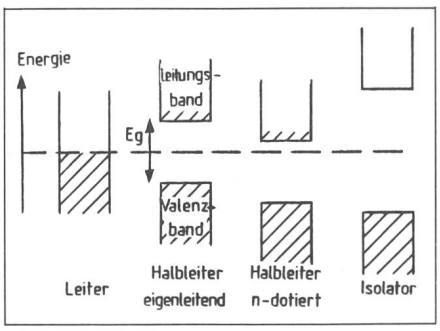


Fig. 9 Vergleich der Bändermodelle für Metalle, Halbleiter und Isolatoren

Die gestrichelte Linie entspricht der mittleren Energie der Ladungsträger (Fermi-Niveau)

bedeutet ein grosser Abstand eine äusserst geringe Wahrscheinlichkeit für ein Elektron, diese Energieschwelle zu überwinden. Eine solche Substanz ist deshalb ein Isolator.

Für Halbleiter mit einem zwischen den Extremwerten liegenden Bandabstand ist diese Energiedifferenz eine der wichtigsten Kenngrössen. Die geringe Leitfähigkeit des hochreinen Halbleiters wird durch gezielte Einbringung von Störatomen (Dotierung) erhöht, weil bei Störatomen z. B. mit Elektronenüberschuss (Donatoren) die Elektronen nur eine sehr geringe Energie benötigen, um ins Leitungsband zu gelangen. In diesem n-Typ-Halbleiter (Fig. 9) werden die in grosser Zahl im Leitungsband befindlichen Elektronen als Majoritätsträger bezeichnet, während die viel geringere Zahl von Defektelektronen oder Löchern Minoritätsträger genannt werden.

Mit steigender Temperatur wächst die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen Valenz- und Leitungsband, bis bei einer bestimmten Grenztemperatur eine derart hohe Leitfähigkeit erreicht wird, dass die spezifischen Halbleitereigenschaften nicht mehr nutzbar sind. Um möglichst viel Leistung umsetzen zu können, ist einerseits ein grosser Bandabstand erwünscht. Anderseits bestimmt dessen Wert in erster Näherung den Spannungsabfall einer pn-Diode oder eines Thyristors im Durchlassbereich (Fig. 3) und ist deshalb klein zu halten.

Als Beispiel weist Germanium (Ge) dank seinem kleinen Bandabstand E_g ($E_g \approx 0{,}66$ eV) sehr geringe Durchlassverluste auf, erlaubt jedoch wegen der tiefen Temperaturgrenze ($T_{max} \approx 85$ °C) nur eine bescheidene Leistungsabfuhr. Im Gegensatz dazu wäre es denkbar, die halbleitende Modifikation von Kohlenstoff (Diamant II, $E_g \approx 5{,}5$ eV) nahezu bei Weissglut zu betreiben. Da der grosse Bandabstand zu sehr hohen Durchlassverlusten führen würde, könnte ein solches Halbleiterbauelement kaum wirtschaftlich betrieben werden – ganz unabhängig von dessen Herstellungskosten. Der in praktischen Anwendungen notwendige Kompromiss zwischen minimalem Spannungsabfall und zulässiger Maximaltemperatur schränkt den in Frage kommenden Bandabstand ($E_g \approx 1{,}0...1{,}5$ eV) und damit die Auswahl der Werkstoffe stark ein. Materialien wie Si ($E_g \approx 1{,}1$ eV) und Gallium-Arsenid GaAs ($E_g \approx 1{,}4$ eV) liegen im akzeptablen Bereich. Die in Tabelle I angeführten Temperaturgrenzen T_{max} hängen noch von zusätzlichen technologischen Gegebenheiten ab und sind daher als Richtwerte zu betrachten.

Ausgewählte Materialeigenschaften von Ge, Si und GaAs sowie deren Eignung als Leistungshalbleiter aufgrund der diskutierten Kriterien Tabelle I

		Ge	Si	GaAs
Materialeigenschaften				
Bandabstand	E_g	0,66 eV	1,1 eV	1,4 eV
	T_{max}	≈ 85 °C	≈ 125 °C	≈ 200 °C
Trägerlebensdauer	τ	$\gg 10^{-6}$ s	$\gg 10^{-6}$ s	$\ll 10^{-6}$ s
Trägerbeweglichkeit:				
Elektronen	μ_n	3900 cm²/Vs	1500 cm²/Vs	8500 cm²/Vs
Löcher	μ_p	1900 cm²/Vs	450 cm²/Vs	400 cm²/Vs
Eignung als Leistungshalbleiter				
bipolare Strukturen		marginal	sehr gut	ungeeignet
unipolare Strukturen		marginal	gut	sehr gut

3.2 Trägerlebensdauer

Als Lebensdauer eines Elektrons wird die mittlere Zeit bezeichnet, die dieses im Leitungsband verbringt. Wie Figur 10a zeigt, kann ein Elektron einerseits direkt einen freien Platz (Loch) im Valenzband besetzen, was als Band-Band-Rekombination bezeichnet wird und in der Regel mit der Abgabe eines Lichtquants (Photon) verbunden ist. Anderseits kann ein analoger Prozess in zwei Stufen über ein mittleres Energieniveau ablaufen, ein sog. Rekombinationszentrum (Fig. 10b). Die frei werdende Energie wird meistens strahlungslos in Form von Gitterschwingungen (Phonon) abgegeben.

Aufgrund der elektronischen Struktur der monoatomaren Halbleiter Ge und Si verläuft deren Rekombination vorzugsweise über Rekombinationszentren (Fig. 10b) mit relativ langen Trägerlebensdauern $\tau \gg 1$ µs. Da die Transportzeit von Ladungsträgern zwischen den Elektroden eines Leistungshalbleiters ebenfalls in der Grössenordnung von einigen µs liegt, bieten sich sowohl Majoritäts- als auch Minoritätsträger für den Leitungsmechanismus an. Auf der anderen Seite zeigen viele Verbindungshalbleiter wie z. B. GaAs eine hohe Wahrscheinlichkeit der Band-Band-Rekombination, was zu sehr kurzen Lebensdauern führt ($\tau \ll 1$ µs). Ausser bei sehr raschen Vorgängen lassen sich nur die immer vorhandenen Majoritätsträger für die elektrische Leitfähigkeit verwenden, während Minoritätsträger zu kurzlebig sind. Das bedeutet, dass sich die als bipolar bezeichneten Strukturen mit Stromführung über pn-Übergänge in diesem Fall nicht eignen – im Gegensatz zu unipolaren Strukturen ohne pn-Übergang.

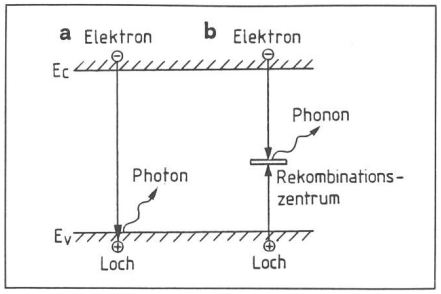


Fig. 10 Rekombinationsprozesse
E_C Leitungsbandkante
E_V Valenzbandkante
a Band-Band-Rekombination
b Rekombinationszentrum

3.3 Trägerbeweglichkeit

In einem Körper mit freien Ladungsträgern, z. B. mit Elektronen im Leitungsband, entsteht bei Anlegen eines elektrischen Feldes ein Stromfluss, dessen Grösse proportional zur Beweglichkeit der Ladungsträger ist. Bei einer durch die Dotierung vorgegebenen Trägerdichte bestimmt die Beweglichkeit den spezifischen Widerstand und damit die Verluste. Eine Übersicht über die Elektronen- und Löcherbeweglichkeiten μ_n und μ_p verschiedener Halbleiter bei Raumtemperatur ist in Figur 11 gegeben. Es fällt auf, dass die Elektronenbeweglichkeiten der angeführten Verbindungshalbleiter deutlich grösser als jene von Si sind. Etwa ein Faktor 6 höher liegt der Wert für GaAs.

Die sehr hohen Werte von GaInAs und InSb (Sb = Antimon) sind in Anbetracht der geringen Bandabstände

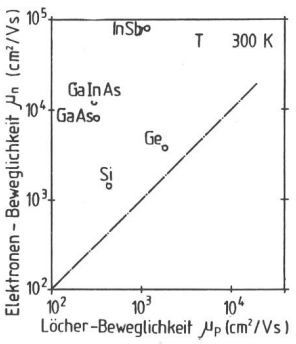


Fig. 11 Elektronen- und Löcherbeweglichkeiten verschiedener Halbleiter

($E_g \approx 0{,}75$ eV bzw. $\approx 0{,}17$ eV) nicht nutzbar. Da die Verschiebung von Elektronen immer eine geringere Energie als jene von Defektelektronen benötigt, liegen die realen Halbleiter oberhalb der strichpunktierten Trennungslinie ($\mu_n = \mu_p$) in Figur 11. Bemerkenswert ist das Verhältnis der Beweglichkeiten, μ_n/μ_p, das bei den monoatomaren Werkstoffen Si und Ge etwa 3 beträgt, während es bei den hier betrachteten Verbindungshalbleitern einen Faktor 10 übersteigt. In der Folge kann die hohe Elektronenbeweglichkeit letzterer nur genutzt werden, wenn deren Löchertransport keine Rolle spielt. Die genannten Verbindungshalbleiter weisen daher nur in unipolaren Strukturen Vorteile auf.

Die wichtigsten Werte, die den diskutierten Materialeigenschaften zugeordnet werden können, sind in Tabelle I für Ge, Si und GaAs zusammengestellt. Obwohl die drei betrachteten Kriterien bei weitem nicht alle Aspekte für die Wahl eines Werkstoffes umfassen, lässt sich daraus schon eine recht zuverlässige Aussage für zukünftige Leistungsbauelemente ableiten.

4. Zukünftige Leistungshalbleiter

Leistungshalbleiter als Schlüsselkomponenten sind auf eine echte Symbiose mit entsprechenden industriellen Anwendungen angewiesen. Es ist zu erwarten, dass deren zukünftige Entwicklung von den in Figur 2 skizzierten Gebieten ausgehen wird, wobei nach Anlagenleistung P und Frequenz f ganz grob zwei Bereiche zu unterscheiden sind:

1. sehr hohe/hohe Leistung: $P \gtrsim 100$ kVA, $f \lesssim 1$ kHz
2. mittlere Leistung: $P \lesssim 10$ kVA, $f \gtrsim 10$ kHz

Die verbleibende Lücke kann als Grauzone bezeichnet werden, für die eine Prognose mit grosser Unsicherheit behaftet ist.

4.1 Hohe und sehr hohe Leistungen

Dieser Bereich wird heute von den traditionellen bipolaren Strukturen – pn-Diode und Thyristor – beherrscht, zu denen z. B. auch der Gate turnoff thyristor (GTO) zu zählen ist.

Die typischen Anwendungen verlangen relativ geringe Frequenzen (Fig. 2), so dass insbesondere die *statischen Verluste* relevant sind. Den grössten Beitrag dazu liefert die Durchlassphase. In Figur 12 ist im unteren Teil der annähernd massstäbliche Schichtaufbau eines Thyristors für hohe Spannungen dargestellt, während im oberen Teil die Ladungsträgerkonzentration der fest eingebauten Störstellen, das sog. Dotierungsprofil, aufgetragen ist (magere Linien). Im Durchlassfall wird der Strom von Ladungsträgern getragen, die in den Halbleiter einströmen, Elektronen von der Kathodenseite und Löcher von der Anodenseite her. Die Computerrechnung (fette Linie in Fig. 12) zeigt, dass sich eine Ladungsträgerdichte einstellt, die die Dichte der eingebauten Störstellen bei weitem übersteigt. Dieser Zustand, der als Trägerüberschwemmung bezeichnet wird, führt über eine erhöhte Trägerdichte zu einer entsprechend verbesserten Leitfähigkeit. Das Coulomb-Gesetz des elektrostatischen Gleichgewichts sorgt in diesem Fall für eine gleiche Zahl von Löchern und Elektronen an jedem Punkt. Zu beachten ist, dass in diesem Betriebszustand kein Unterschied zwischen den Strukturen eines Thyristors und einer pn-Diode besteht.

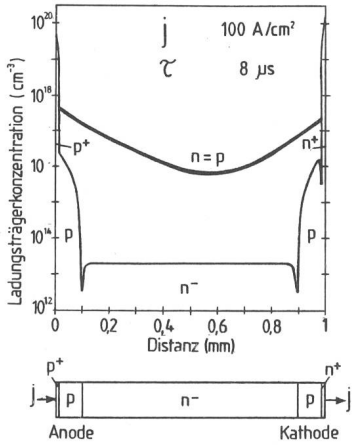


Fig. 12 Dotierungsprofil (magere Linien) und theoretisch berechnete Ladungsträgerverteilung (fette Linie) bei Durchlassbelastung eines Hochspannungsthyristors

Bauelemente, die auf dem Prinzip der Leitfähigkeitsmodulation basieren, verursachen auch bei sehr hohen Stromdichten relativ geringe Verluste und werden deshalb für hohe Leistungen bevorzugt.

Eine Beurteilung bipolarer Strukturen mit Trägerüberschwemmung aufgrund der drei im vorhergehenden Abschnitt diskutierten Kriterien ergibt:

a) Bandabstand: Mit Si sowohl als auch mit Verbindungshalbleitern wie GaAs ist ein akzeptabler Kompromiss zwischen Durchlassverlusten und maximaler Betriebstemperatur möglich.

b) Trägerlebensdauer: Sie bestimmt die Anfangssteilheit der durchhängenden Verteilung in Figur 12 und damit die Höhe der minimalen Trägerdichte. Um akzeptable Durchlassverluste zu erzielen, muss eine genügend grosse Lebensdauer τ eingestellt werden können ($\tau = 8$ µs in Fig. 12). Verbindungshalbleiter wie GaAs kommen daher nicht in Frage ($\tau \ll 1$ µs).

c) Beweglichkeit: Für die Durchlassverluste ist ein Mittelwert aus Elektronen- und Löcherbeweglichkeit, die sog. ambipolare Beweglichkeit μ, massgebend:

$$\mu = \frac{2\mu_n \mu_p}{\mu_n + \mu_p}$$

Am günstigsten liegt dieser Wert bei Ge, während sich Si und GaAs nur geringfügig unterscheiden (vgl. Tab. I).

Dynamische Verluste entstehen insbesondere während dem mit endlicher Geschwindigkeit erfolgenden Aufbau und Abbau der Ladungsträgerverteilung in Figur 12. Diese dynamischen Effekte begrenzen die Anwendung von Halbleitern hoher Leistung auf der Basis der Trägerüberschwemmung in den meisten Fällen auf relativ geringe Frequenzen ($f \lesssim 1$ kHz).

In der Gesamtbeurteilung des Bereiches hoher Leistungen ist festzuhalten, dass sich aus heutiger Sicht kein Mechanismus abzeichnet, der zu geringeren Durchlassverlusten führen könnte als die Ladungsträgerüberschwemmung. Aufgrund der drei diskutierten Kriterien ist kein real verfügbarer Werkstoff identifizierbar, der auch nur potentiell Vorteile gegenüber Silizium bieten könnte. Für Leistungshalbleiter hoher Leistung wird daher die dominierende Stellung des Siliziums auch in weiterer Zukunft in keiner Weise angetastet werden.

4.2 Mittlere Leistungen

Im Bereich der mittleren Leistung sind in den letzten Jahren verschiedene Konzepte aus dem Signalhalbleiterbereich in die Domäne der Leistungshalbleiter vorgedrungen. Einerseits haben die bipolaren Leistungstransistoren erhebliche Fortschritte verzeichnet. Da deren Beurteilung ähnlich wie bei Thyristoren zu einer Bevorzugung von Silizium führt, werden sie im folgenden nicht näher betrachtet. Anderseits bieten insbesondere die feldgesteuerten Elemente eine interessante Alternative an auf der Basis von mehreren 10 000 monolithisch integrierten Einzelelementen. Das ursprünglich von *W. Shockley* vorgeschlagene Konzept eines Feldeffekt-Transistors (FET) zeigt Figur 13. Durch seitlich erzeugte Raumladungszonen (space charge layer) kann die Breite eines leitfähigen Kanals (channel) und damit ein Strom gesteuert werden. Da dieser Strom durch keinen pn-Übergang fliesst, bezeichnet man das Element als unipolar (Stromtransport durch Majoritätsträger).

Im eingeschalteten Zustand entspricht dieses Element einem Ohmschen Widerstand R_{on}, der massgebend ist für die *statischen Verluste:*

$$R_{on} \approx L / q\,\mu_n N_D$$

Hier bedeuten L die Länge des Kanals, q die Elektronenladung und N_D die Donator-Dotierung (im Fall eines n-Halbleiters). Der reale Widerstand übersteigt den durch obige Gleichung gegebenen Wert etwas, da die Geometrie der Ansteuerung eine volle Nutzung der Halbleiterfläche verhindert.

Beurteilung des FET aufgrund der diskutierten Kriterien:

a) Bandabstand: Eine Vergrösserung des Bandabstandes bringt den Vorteil erhöhter Temperaturbelastbarkeit, während ohne pn-Übergang die mit einer Injektion von Minoritätsträgern verbundenen Verluste nicht relevant sind; die Anwendung von Verbindungshalbleitern wie GaAs ist deshalb im Vergleich zu Si vorteilhaft.

b) Trägerlebensdauer: Da Majoritätsträger für den Stromtransport verantwortlich sind, spielt in diesem Fall die Lebensdauer der Minoritätsträger keine Rolle. Um den im Sperrfall auftretenden Strom gering zu halten, ist jedoch eine gewisse Grösse der Lebensdauer notwendig.

c) Beweglichkeit: Wie aus obenstehender Gleichung ersichtlich, ändern sich die Verluste umgekehrt proportional zur Beweglichkeit. Materialien mit hoher Elektronenbeweglichkeit, wie gewisse Verbindungshalbleiter (z. B. GaAs), weisen eindeutige Vorteile gegenüber Si auf.

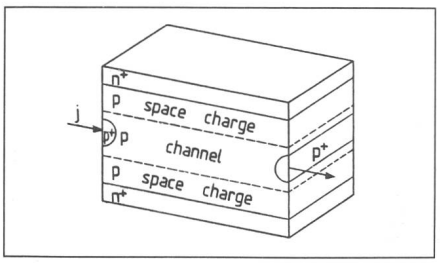


Fig. 13 Feldeffekt-Transistor nach Shockley

Die *dynamischen Verluste* von FET-Strukturen sind, gegeben durch deren annähernd verzögerungsfreies Funktionsprinzip auf der Basis von Majoritätsträgern, sehr gering. Da sie sich im praktischen Fall auf die kapazitiven Verluste der Steuerelektroden reduzieren, sollten alle heute bekannten Leistungsanwendungen von der Schaltfrequenz her befriedigt werden können.

Die Gesamtbeurteilung wird durch Figur 14 illustriert [2], in der die besten in Si-Technologie hergestellten MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor-FET) aufgetragen sind. Die Geraden entsprechen dem durch obenstehende Gleichung gegebenen Grenzwert. Vor allem bei hohen Spannungen werden die theoretischen Grenzwerte für Si angenähert.

Bemerkenswert ist die Kurve für GaAs, die bei gleicher Spannung gegenüber Si einen mehr als zehnfach geringeren Widerstand R_{on} postuliert. Diese Eigenschaft ist einerseits aus der höheren Elektronenbeweglichkeit (etwa Faktor 5), anderseits aus der höheren Temperaturbelastbarkeit (etwa Faktor 2) zu erklären.

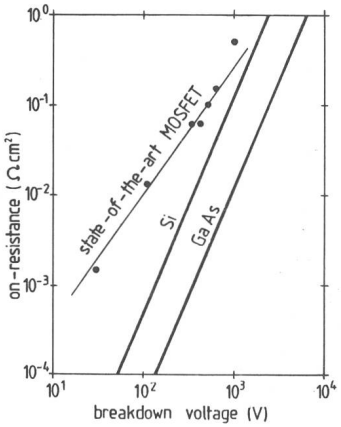


Fig. 14 Reale Werte und theoretische Grenzwerte für den spezifischen Verlustwiderstand R_{on} von Metal-Oxide-Semiconductor-Feldeffekttransistoren (MOSFET) [2]

Im Rahmen dieser einfachen Betrachtungen scheint GaAs ein Potential aufzuweisen, das zweifellos jenes von Si übersteigt. Die Frage nach der technischen Realisierung ist allerdings noch unbeantwortet, da dessen technologische Herstellung ausserordentlich schwierig ist [3]:

- hochgiftige Substanzen
- schwierig einzuhaltende Stöchiometrie
- Diffusion kaum möglich, da As ohne Schutzschicht wegdampft
- Schichtfolge epitaktisch aufwachsen (aus flüssiger oder gasförmiger Phase)
- keine natürliche Oxidmaskierung (wie SiO_2 auf Si)
- kurze Lebensdauer führt zu hohen Leckströmen bei Blockierspannung.

Es besteht die Gefahr, dass die Erfolge von Verbindungshalbleitern in der Optoelektronik zu einer Täuschung führen. Für die Anwendung als Leistungshalbleiter werden Flächen pro Element verlangt, die etwa um einen Faktor 10...>1000 höher liegen. Ausserdem sind Reinheiten des Grundmaterials erforderlich, die um einen Faktor >10 höher sind. Obwohl erste Resultate auf diesem Gebiet bereits vorliegen [4], muss bis zu einem echten Durchbruch noch mit Jahren intensiver Forschung gerechnet werden.

5. Diskussion

Der Werkstoff Silizium bringt als Grundmaterial für Leistungshalbleiter eine eindrückliche Reihe von Vorteilen, die in der Vergangenheit sehr grosse Fortschritte erlaubt haben. Bei hohen Leistungen ist die dominante Rolle von Si auf weite Sicht unumstritten. Bei mittleren Leistungen und höheren Frequenzen hingegen ($\lesssim$10 kV_A, $\gtrsim$10 kHz) bieten Verbindungshalbleiter wie GaAs potentiell wesentliche Vorteile. Mit diesen Werkstoffen sollten feldgesteuerte Leistungshalbleiter hergestellt werden können, die nur etwa 10% der heute erreichbaren Durchlassverluste aufweisen. Da ein solcher Durchbruch jedoch mehrere Jahre intensiver Arbeit beanspruchen wird, scheint auch hier die Rolle des Si in nächster Zukunft gesichert zu sein.

Literatur

[1] *D. Huber* and *W. v. Freiesleben:* Silicon – the perpetual material for micro-, power- and solar-electronics, Solid State Device 1982, Ed. A. Goetzberger, M. Zerbst, Physik-Verlag, Weinheim, 1983, p. 143...153.

[2] *B.J. Baliga:* Switching lots of watts at high speeds, IEEE Spectrum 18(1981)12, p. 42...48.

[3] *C. E. Weitzel* and *J. M. Frary:* A comparison of GaAs and Si processing technology. Semiconductor International 5(1982)6, p. 73...89.

[4] *P. M. Campbell* a. o.: 150 volt vertical channel GaAs FET. International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, 13...18 November 1982. Technical Digest p. 258...260.

NHS-Patronen

DIN 43620 VDE 0636 gL

für heute und morgen!

Sie zeichnen sich durch die folgenden Merkmale aus:

- Korrosionsfest
- Verlustarm
- Selektivitätsabstand 1:1,6 gewährleistet
- Kurzschlussfestigkeit 100 kA
- Entsprechend IEC 269 - 1 gI
- Grössen NSP 00: 6 bis 160 A
  NSP 2 : 63 bis 400 A
  NSP 3 : 160 bis 630 A

Verlangen Sie die ausführliche Dokumentation bei

RUTSCHMANN

Rutschmann AG
8627 Grüningen Tel. 01 935 21 56

Betriebsüberwachungs- und Störmeldegeräte

ineltec Halle 26, Stand 151

UNI TRO

ETG

VARIO-VOLT

Stör- und Betriebsmeldekarten in CMOS-Relaistechnik im Europaformat. Kompakt und anpassungsfähig. NEU: Lift-Alarm-Karte.

ECONOMY-LINE

Neue Gerätefamilie für kostengünstige Meldezentralen. Kompakte Bauform mit Aufschnappsockel und Querverdrahtung über flexible Steckverbinder.

MIPSSY

Mikroprozessorgesteuerte Drucker-Familie mit 24 oder 48 Zeichen Klartext pro Meldung. Auflösung bis kleiner als 1 Millisekunde. 32 bis 1024 Meldelinien. Schnittstellen zum Anschluss externer Drucker oder Monitore.

NEU: dezentrales Protokolliersystem SISSY mit vermindertem Verkabelungsaufwand.

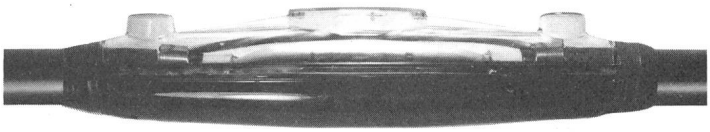
S+K

Schärer + Kunz AG
8021 Zürich, Postfach 820
Telefon 01 - 64 20 44
Telex 822 823 eska ch

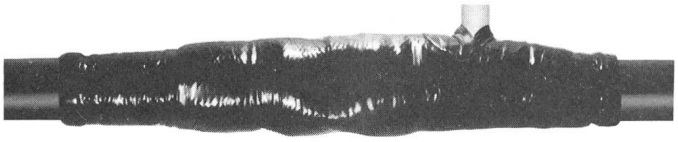
Nie Grund muffig zu sein: Scotch Spleiss-Systeme!

Denn Scotch Spleisssysteme sind in Bezug auf Qualität und
Zuverlässigkeit den höchsten Anforderungen gewachsen.
Gedacht für Jahrzehnte, widerstehen sie Umwelteinflüssen jeglicher Art.
Fünf verschiedene Systeme stehen zur Auswahl,
die den jeweils besonderen Bedürfnissen optimal entsprechen.
Das kann nur 3M bieten!

Giessverfahren



Die bewährten Scotchcast Kabelgarnituren sind
zu einem vollständigen Sortiment weiterentwickelt worden.
Es besteht aus Verbindungs-, Abzweiggarnituren
(für Normal- und Kompaktklemmen) und Endverschlüssen.
Das Scotchcast Giessverfahren garantiert rationelle Spleissungen.



Spritzverfahren

Das bevorzugte Spleisssystem bei den grossen Schweizer
Elektrizitätswerken. Der Kabelmonteur ist der Konstrukteur der Muffe.
Dies ermöglicht schlanke Verbindungen und Abzweige.
Mit dem 3M Spritzverfahren können Sie Kabel in jeder Lage bearbeiten.
Die 3M Sortimentskiste macht Sie unabhängig vom Kabelquerschnitt
und eignet sich sowohl für Verbindungen als auch für Abzweige.

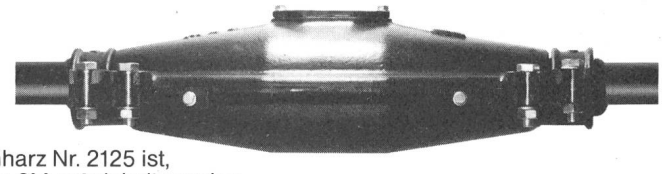
Heissschrumpfen

Die 3M Heissschrumpf-Kabelgarnituren decken einen Bereich
von 4x6 mm² bis 4x240 mm² lückenlos ab. Heissschrumpfen eignet sich
besonders für Spleissungen in Kabelkanälen und für Provisorien.
3M Heissschrumpf-Kabelgarnituren sind mit einem wärmeschmelzenden
Klebstoff beschichtet, der eine ausgezeichnete Längswasserdichtheit garantiert.

Kaltschrumpfen

PST Kaltschrumpf-Kabelgarnituren von 3M sind besonders gut
für flexible Gummikabel geeignet, die es auch nach der Spleissung bleiben müssen.
Ebenfalls gut einsetzbar dort, wo nicht mit der Flamme gearbeitet werden darf.
PST Garnituren für schnelle und problemlose Spleissungen.

Gussmuffenharz



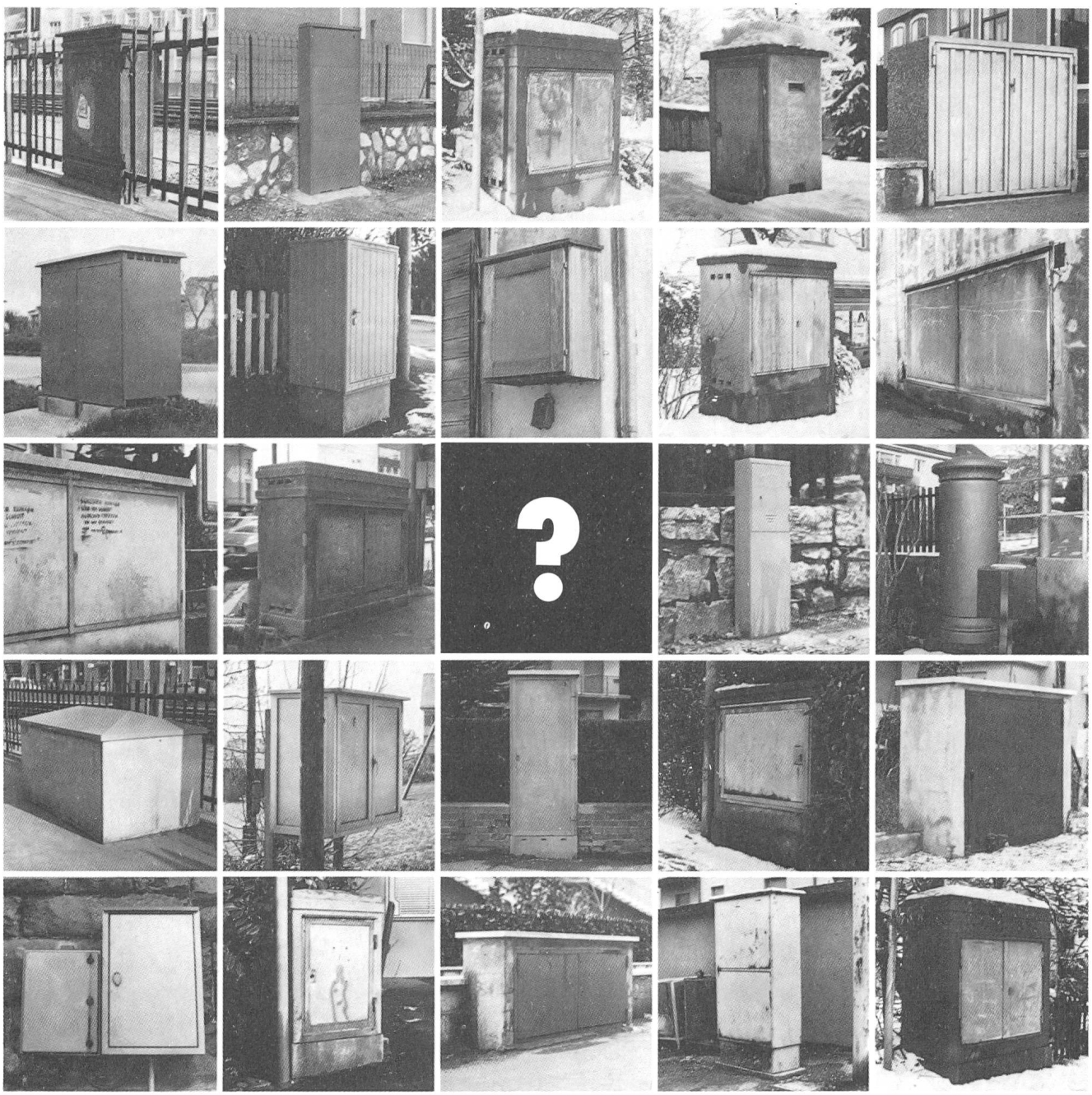
Das Scotchcast Gussmuffenharz Nr. 2125 ist,
als Ersatz für die Bitumenfüllung, von 3M entwickelt worden.
Es ist wiederentfernbar und erfordert kein Nachgiessen mehr.
Scotchcast Nr. 2125 erhöht die Qualität Ihrer Gussmuffen-Spleissung um ein mehrfaches.
Das Gussmuffenharz Nr. 2125 ist SEV-geprüft.

3M (Schweiz) AG
Abt. Elektro/Telcomm
Räffelstrasse 25
8021 Zürich
Telefon 01 724 90 90

Ineltec: Halle 5 - Stand 111

3M

Hier sehen Sie zwei Dutzend Lösungen...



Wie Pilze schossen sie in den vergangenen Jahren aus dem Boden, Kabinen, Verteiler- und Apparatekästen, Zeugen des fortschreitenden Ausbaues der unterirdischen Netze für Energieverteilung, Telekommunikation und Verkehrstechnik.
Konventionelle Lösungen für den sichtbaren Teil der modernen Kabel-Verteil- und Netztechnik.

6.-10.9.83
Basel
ineltec
Halle 5
Stand 421

...Das ist die Lösung!

«PEYER System-Kabine PS», die unkonventionelle, technisch perfekte und ästhetisch schöne Lösung für den weiteren Ausbau und die Modernisierung in der Netzverteilung.
Öffentliche und private Betriebe wie Post, Telefon, Fernsehen, Bahnen und die Elektrizitätswerke in der Schweiz sind unsere zufriedenen Kunden.
Die sehr hohen technischen und ästhetischen Anforderungen wie auch die Wünsche und Anregungen aus der Praxis waren Grundlagen für das Konzept der System-Kabine PS. **Mit Sicherheit PEYER.**

peyer

SIEGFRIED PEYER AG
CH-8832 Wollerau
Telefon 01 784 46 46