

# Vom „Ansprenge“ zum „Absprengen“

Smart-cut und Smarter-cut als elegante Methoden zum Übertragen einkristalliner Halbleiterschichten

G. Kästner

**Im Zuge der Miniaturisierung von Halbleiterbauelementen und -systemen sind entscheidende Funktionen auf Dünnschichten übergegangen. Bislang erzeugt man einkristalline Schichten auf hochgradig polierten Kristallscheiben (Wafers) hauptsächlich durch epitaktisches Wachstum. Da eine epitaktische Dünnschicht jedoch nahezu paßfähig zum Kristallgitter des Wafers wächst, bedeutet dies Einschränkungen in der Wahl des Schichtmaterials, seiner Gitterkonstanten und seiner kristallographischen Orientierung. Wesentlich flexiblere Möglichkeiten bietet das sog. Wafer-Direktbonds: Gegen einen Substratwafer wird durch direkten atomaren Kontakt sauberer Oberflächen (also ohne Klebschicht) ein zweiter Wafer „angesprengt“. Er stellt – ganz unabhängig vom Substratwafer – das gewünschte Material der Dünnschicht zur Verfügung und wird bis auf die erforderliche Schichtdicke abgetragen. Dieses Verfahren ist allerdings aufwendig und opfert einen Wafer. Wirtschaftlicher und eleganter ist demgegenüber das „Absprengen“ des Wafers unter Zurücklassen einer vorherbestimmten Schichtdicke. Dies gelingt unter Vorgabe einer definierten Rißebene mit dem sog. Smart-cut-Verfahren.**

Für das Smart-cut-Verfahren ist das Waferbonds insofern entscheidend, als es grundsätzlich erlaubt, beliebige Festkörper und dabei auch beliebige kristallographische Orientierungen zu verbinden. Damit werden neue Freiheitsgrade im Aufbau von Schichtsystemen erschlossen. Zu den Grundlagen und Anwendungen des Waferbonds liegen bereits vielseitige Ergebnisse und Erfahrungen vor [1, 2], daher soll hier nur kurz darauf eingegangen werden.

Wird nach dem Bonds einer der Wafer mechanisch oder chemisch abgetragen, besteht der Nachteil nicht allein im Materialverlust, sondern auch im technologischen Aufwand, um eine restliche Dünnschicht konstanter Dicke und Qualität auf dem gesamten Wafer zu erreichen. Demgegenüber ist das „Absprengen“ durch Smart-cut ein rationelleres Verfahren. Da es bisher nur für Silizium und wenige andere Materialien erarbeitet wurde, bemüht man sich intensiv, die Grundlagen zu verstehen und breitere Anwendungen zu erschließen.

## Waferbonds

Das Waferbonds geht zurück auf das seit etwa 1900 bekannte kleberfreie Ansprenge hochpolierter, paßfähiger Optikteile bzw. metallischer Eichmaße (Endmaße). Grundsätzlich verstanden und bereits vielseitig entwickelt ist heute das Direktbonds von Siliziumwafern, das neue Anwendungsbereiche in Elektronik, Mikrosensorik und Mikromechanik z.T. schon kommerziell erschließt. Ähnlich entwickelt sich derzeit auch das großflächige Bonds von III-V-Halbleiterwafern und Substraten wie Saphir [3, 4]. Entscheidend für das Direktbonds sind neben der geometrischen Paßfähigkeit die mikroskopische Ebenheit der Oberflächen und ihre verfügbaren atomaren bzw. molekularen Bindungszustände. Bei der engen Berührung von Teilen der Oberflächen wirken atomare Kräfte, die sich zwar in ihrer Natur, Stärke

und Reichweite unterscheiden, jedoch in der Regel auch zwischen zwei Oberflächen aus unterschiedlichen Materialien anziehend wirken. Gewöhnlich führt das Bonds in Luft bei Raumtemperatur zu einer relativ schwachen van-der-Waals-Bindung. Um stärkere Bindungen zu aktivieren, werden die Partner nachträglich erwärmt (getempert). Man strebt möglichst geringe Erwärmung an, einerseits aus ökonomischen und technologischen Gründen – etwa um temperaturempfindliche Strukturen zu schonen – und andererseits zum Begrenzen thermischer Spannungen, um die Auswahl unterschiedlicher Materialien möglichst nicht einzuschränken.

Vor dem Bonds lassen sich auf jedem Wafer Schichtsysteme herstellen, so daß voneinander unabhängig erzeugte Schichten und damit auch inkompatible Schichttechnologien durch Bonds vereinigt werden. Auch solche komplexeren Schichtsysteme kann man durch Abtragen oder Ablösen eines der Wafer freilegen. Das Abtragen geschieht im einfachsten Fall zunächst mechanisch bis zu einer Polierstufe und anschließend chemomechanisch oder rein chemisch, um keine Kristallstörungen zu hinterlassen. Um die gewünschte restliche Schichtdicke in gleichförmiger Qualität sicherzustellen, werden gewöhnlich Ätzstopp-Schichten eingebaut. Angesichts dieses hohen Aufwands sind alternative Verfahren wie der Smart-cut wünschenswert.

## Smart-cut

Das Smart-cut-Verfahren besteht darin, durch Einschluß von Ionen (Ionen-Implantation) dicht unterhalb der Oberfläche eines Festkörpers Störungen zu erzeugen, die bei anschließender Erwärmung Rißkeime und schließlich einen makroskopischen Riß parallel zur Oberfläche ausbilden. Dadurch wird eine dünne Schicht abgesprengt. Zur Illustration zeigt Abb. 1 die elektronenmikroskopische

Dr. Gerhard Kästner, Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Weinberg 2, D-06120 Halle

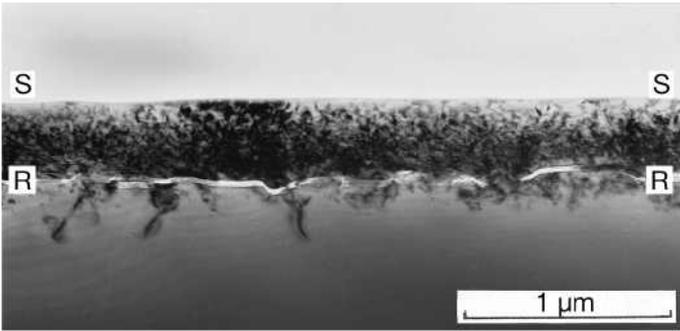


Abb. 1: Elektronenmikroskopische Durchstrahlungsaufnahme eines Querschnitts nahe der Oberfläche eines Germaniumwafers: Durch Einschluß von Wasserstoffionen und Erwärmung wurde parallel zur Oberfläche S-S ein Riß R-R erzeugt (heller Kontrast). Er trennt eine einkristalline Dünnschicht ab, die auf einen anderen Substratwafer gebondet, thermisch ausgeheilt und poliert werden kann. Im hier gezeigten Zwischenstadium sind mit dunklem Kontrast noch die Implantationsdefekte zu sehen, die anschließend thermisch ausgeheilt werden. Präparation und Aufnahme: S. Hopfe, MPI Halle

sche Aufnahme eines Querschnitts nahe der Oberfläche eines Germaniumwafers. Die Dünnschicht kann man durch vorheriges Bonden auf einen im Prinzip beliebigen Wafer aufbringen.

Erstmals demonstriert wurde das Smart-cut-Verfahren von der Gruppe um M. Bruel in Grenoble [5], welche die von der Kerntechnik her bekannte, durch intensiven Teilchenbeschuß hervorgerufene Blasenbildung und das entsprechende Ablösen oberflächennaher Materialschichten in folgender Weise nutzte: In einen (100)-orientierten Siliziumwafer wird Wasserstoff durch Ionen-Implantation in einer Tiefe um 200 nm unter der Oberfläche angereichert. Dann wird der Wafer gegen einen Partner gebondet und das Paar getempert. Dies führt zu einer Kondensation des Wasserstoffs unter Bildung von Mikrorissen. Daraus entsteht bei hinreichender Temperatur ein makroskopischer Riß, der parallel zur Bondfläche den Wasserstoff-implantierten Siliziumwafer trennt. So verbleibt eine dünne Siliziumschicht auf dem Bondpartner. Die Schichtdicke ist durch die Tiefe des Maximums im Konzentrationsprofil des implantierten Wasserstoffs gut definiert, so daß sich mit der Implantationsenergie die gewünschte Schichtdicke leicht einstellen läßt.

Die Einzelheiten des Mechanismus wurden von den Autoren mit Hilfe von Infrarotspektroskopie, Sekundärionen-Massenspektroskopie und Elektronenmikroskopie untersucht [6]. Es stellte sich heraus, daß nach der Implantation von  $2 \cdot 10^{16}$  bis  $10^{17}$  Ionen/cm<sup>2</sup> flache Mikrohohlräume oder Mikrorisse von etwa 10 nm Durchmesser und 1 nm Höhe entstehen, die bevorzugt in (100)-Ebenen parallel zur Oberfläche bzw. Bondfläche orientiert sind. Auf den äquivalenten, zur Bondfläche senkrechten Ebenen ist die Kondensation eingeschränkt, wahrscheinlich durch

mechanische Gegenkräfte, die sich parallel zur Waferebene eher aufbauen als senkrecht dazu. Auf den geneigten (111)-Ebenen treten teilweise auch Mikrohohlräume auf. Die flache Form der Hohlräume wird auf Si-H-Bindungen an deren innerer Oberfläche zurückgeführt. Andere Gase wie Helium ergeben eher dreidimensionale, weniger geeignete Hohlräume, jedoch kann Helium die Wirkung des Wasserstoffs unterstützen [7]. Durch Tempern bei 400 bis 600 °C wachsen die Hohlräume im Sinne einer Ostwald-Reifung, d.h. größere Mikrorisse wachsen auf Kosten der kleineren. Experimentell wurden aus dem Temperatur- und Zeitverhalten des Trennprozesses zwei Aktivierungsenergien bestimmt. Diese ordnet man dem Aufbrechen der zuvor erzeugten Si-H-Bindungen und der anschließenden Diffusion des freigesetzten Wasserstoffs zu [6]. Durch das Wachsen der Hohlräume und den sich darin aufbauenden Wasserstoffdruck entsteht schließlich der makroskopische Riß.

Die Position des Risses und damit die verbleibende Schichtdicke ist recht genau (wahlweise im Bereich einiger 100 nm mit einer Unschärfe um 10 nm) von der Ionenenergie vorgegeben. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist die relativ geringe Dosis der Implantation – restliche Implantationsschäden lassen sich durch abschließendes Tempern weitgehend ausheilen.

Nach dem Smart-cut muß die Oberfläche der Schicht noch leicht chemomechanisch nachpoliert werden – ein Verfahren, mit dem man standardmäßig die epitaktische Qualität einer Waferoberfläche erreicht. Letzteres gilt auch für den abgesprengten Wafer, der somit erneut verwendet werden kann. Technologisch hat das Verfahren den Vorteil, daß sich konventionell übliche Ausrüstungen – wie Ionenimplanter mit üblicher Energie und

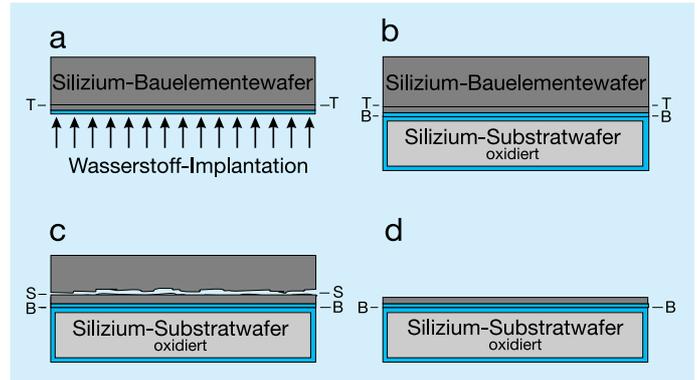


Abb. 2: Herstellung einer einkristallinen Siliziumschicht auf oxidiertem Siliziumsubstrat (SOI-Struktur) mittels Smart-cut-Verfahren. T bezeichnet die Tiefenlage des Maximums der durch Pfeile symbolisierten Wasserstoff-Implantation (a). B gibt die Position der Bondfläche an (b) und S die Lage des längs T erzeugten Smart-cut (c). Mit Blau ist jeweils das Siliziumoxid gekennzeichnet, das einseitig auf dem oberen Wafer und beidseitig auf dem unteren durch thermische Oxidation erzeugt wurde. Abschließend poliert man die Oberfläche der übertragenen Dünnschicht (d).

Strahlstromdichte – nutzen lassen und der implantierte Wafer wiederverwendbar ist.

## Anwendungen

In der Massenfertigung elektronischer Siliziumbauelemente gewinnen die SOI-Wafer (Silicon-On-Insulator) als neuer Substrattyp zunehmend an Bedeutung. Dies sind Siliziumwafer mit einer funktionellen, einkristallinen Siliziumdünnschicht, die durch eine darunterliegende Siliziumoxidschicht gegenüber dem Substrat isoliert ist. Nach bisheriger Technologie erzeugt man diese „vergrabene“ Oxidschicht durch Sauerstoff-Implantation mit hoher Dosis und anschließendes Ausheilen bei Temperaturen über 1000 °C (dabei wird kein Riß ausgelöst). Diese sog. SIMOX-Konfiguration (Separation by IMplanted OXYgen) – neuerdings von IBM in die Pilotproduktion überführt – ergibt für elektronische Schaltkreise zahlreiche Vorteile: Verringerte ohmsche und kapazitive Verluste ermöglichen höhere Arbeitsfrequenzen und Leistungen pro Chipfläche. Gleichzeitig verringern sich der Energiebedarf und die Speisespannung (besonders wichtig bei Batteriespeisung). Hinzu kommen erhöhte Resistenz gegen Temperatur und ionisierende Strahlung.

Noch günstigere Eigenschaften erreicht man nun, wenn man ein analoges Schichtsystem durch Bonden von herkömmlich oxidierten Si-Wafern und anschließendes Smart-cut-Verfahren herstellt (Abb. 2). Der Siliziumbauelementewafer wird thermisch oxidiert, mit Wasserstoff implantiert und anschließend gegen einen Silizium-Substratwafer gebondet, der ebenfalls oxidiert sein kann. Nach dem Bonden isoliert das Oxid die beiden Wafer elektrisch gegeneinander. Anschließend löst die mäßig erhöhte Tempe-

ratur den Smart-cut-Prozeß aus, der die gewünschte Siliziumschicht vom Bauelementwafer abtrennt. Die letzten Schritte sind thermisches Ausheilen und Polieren. Mit Unterstützung der französischen Erfindergemeinschaft wird dieses Verfahren gegenwärtig in Grenoble und Tokio produktionsreif aufgebaut [5]. Wirtschaftliche Vorteile gegenüber dem SIMOX-Verfahren sind die einfache herkömmliche Oxidation und der im Vergleich zur Sauerstoff-Implantation geringe Aufwand für die Wasserstoff-Implantation (wesentlich niedrigere Dosis und Energie) sowie die geringeren Prozeßtemperaturen. Qualitative Vorteile sind gut definierte Oxidgrenzflächen mit geringerer parasitärer Ladung bzw. Degradation und somit besseren elektrischen Eigenschaften.

Ein weiteres bedeutendes Anwendungsfeld betrifft Siliziumkarbid (SiC) als Halbleiter für Hochtemperatur-, Hochstrom- und auch Hochfrequenzanwendungen. Die Herstellung des SiC in Form kompakter Wafer ist bislang noch sehr aufwendig und teuer. Daher interessiert man sich auch hier für SiC-Dünnschichten, die chemisch reaktiv direkt auf Siliziumwafern hergestellt werden. Wünschenswert ist jedoch eine isolierende Zwischenschicht analog zu den obengenannten SOI-Schichten, also die Siliziumkarbid-schicht auf oxidiertem Siliziumsubstrat (SiCOI). Ein vielversprechendes Verfahren demonstrierten Tong u. a., indem sie auf Silizium erzeugte SiC-Dünnschichten gegen einen oxidierten Si-Wafer bondeten und anschließend den Trägerwafer der SiC-Schicht abdünnten [8]. Daraufhin setzten sie auch für SiC das Smart-cut-Verfahren ein, wobei die Trennung innerhalb der SiC-Schicht erfolgte, so daß ein ca. 300 nm dicker SiC-Film auf oxidiertem Silizium und auch auf polykristallinem SiC-Substrat übrig blieb [9]. Mit dem polykristallinen Substrat gelang es, die Herstellungskosten im Vergleich zum einkristallinen SiC-Substrat wesentlich zu verringern. Ein entsprechendes Projekt wird derzeit von der Firma Motorola begonnen.

Um für gebondete Schichtsysteme allgemein preisgünstigere Substrate wie Glas verwenden zu können, z. B. für Solarzellen, Leuchtdioden auf Displays und für Ge-Sensoren, verbieten sich die für das abschließende Ausheilen von Implantationsdefekten üblichen hohen Temperaturen (für SiC um 1100 °C). Geringere Temperaturen ermöglichen außerdem eine breitere Auswahl der Materialarten beim Bonden von Partnern mit deutlich unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Tong u. a. haben für SiC wie auch für Silizium gezeigt, daß die höhere Temperatur eher beim Implantieren als nach dem Bonden Vorteile bringt [10]. Implantiert man bei 800 °C für SiC bzw. bei 400 °C für Silizium, so sammelt sich der Wasserstoff bevorzugt in der Tiefenlage maximaler Strahlenschädigung. Dies führt zu einem

schärfer definierten Smart-cut, der bei Temperaturen noch unterhalb der vorangegangenen Implantationstemperatur ausgelöst werden kann. Außerdem ergeben sich weniger Defekte, konzentriert auf die Nähe des Risses, wodurch sie beim abschließenden Polieren leichter entfernt werden.

Am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle gelang es, in Zusammenarbeit mit der Duke University, North Carolina, das Smart-cut-Verfahren auf weitere Materialien auszudehnen, insbesondere auf andere Halbleiter der Gruppe IV (Diamant und Germanium), auf III-V-Halbleiter (Galliumarsenid, Galliumnitrid, Indiumphosphid) und auf isolierende Oxidmaterialien (Saphir, Lanthanaluminat). Als grundlegender Vorgang wurde das blasenförmige Ablösen dünner Schichten an implantierten Oberflächen (vor dem Bonden) temperatur- und dosisabhängig untersucht. Für das Erzeugen der Blasen ergaben sich Aktivierungsenergien, die erwartungsgemäß für Diamant und SiC deutlich höher sind als für Silizium und Germanium. Sie entsprechen den materialtypischen Bindungsenergien und stimmen grundsätzlich auch mit der Aktivierungsenergie des Smart-cut überein [11]. Interessanterweise tritt bei vielen Materialien die Mikrorißbildung nur dann auf, wenn der Wasserstoff innerhalb eines relativ engen Temperaturbereichs implantiert wird.

Besonders interessant ist schließlich auch das Verbinden von Siliziumwafern mit dem für den Mikrowellenbereich und die Optoelektronik wichtigen Halbleiter GaAs. Der Gruppe um M. Bruel gelang es kürzlich, eine GaAs-Dünnschicht (im 3"-Maßstab) auf oxidiertes Silizium durch Bonden und Smart-cut großflächig zu übertragen [12].

### Smarter-cut

Das als Smarter-cut bezeichnete Verfahren [13] beruht auf der Implantation von Borionen zusätzlich zur Wasserstoff-Implantation. Damit ist es möglich, den Smart-cut-Prozeß bei wesentlich geringerer Temperatur auszuführen. Für Silizium reichen 200 °C anstelle der sonst üblichen 400–500 °C. Dies bringt technologisch viele Vorteile und erweitert die Palette möglicher zu bondender Materialkombinationen, weil dann Unterschiede in der thermischen Ausdehnung weniger stören. Vor allem Quarz – bekannt durch seine minimale thermische Ausdehnung – wird damit als Substrat vielseitiger nutzbar. Beispielsweise ist es gelungen, Siliziumschichten für Bildschirmwendungen im 4"-Maßstab auf Quarz herzustellen.

Die Wirkung der Bor-Implantation (mit einer um den Faktor 100 bis 1000 geringeren Dosis als die Wasserstoff-Implantation) erklärt sich durch atomare Defekte und elektri-

sche Dotierung, welche die Diffusions- und Kondensationsmöglichkeit des Wasserstoffs verbessern. Die günstigste Wirkung ergab sich bei gleicher Implantationstiefe der maximalen Bor- und Wasserstoff-Konzentration. Außerdem erwies sich ein Tempern vor dem Bonden als wichtig, um die bei geringerer Temperatur längere Zeit für das Einleiten des Smarter-cut drastisch zu verkürzen.

Im Zuge der weiteren Forschung ist zu erwarten, daß sich das Smart-cut-Verfahren auf beinahe beliebige Materialien übertragen läßt. Damit können neue Materialkombinationen vor allem für einkristalline Dünnschichten erzeugt werden – unabhängig von den eingangs genannten Einschränkungen der Epitaxie.

### Literatur

- [1] Philips Journal of Research, **49** (1995) 1–182 (mehrere Übersichtsartikel)
- [2] U. Gösele, Q.-Y. Tong, Ann. Rev. Mater. Sci. **28** (1998) 215
- [3] Y. Okuno, K. Uomi, M. Aoki, T. Tsuchiya, IEEE J. Quantum Electron. **35** (1997) 959
- [4] P. Kopperschmidt, G. Kästner, St. Senz, D. Hesse, U. Gösele, Appl. Phys. **A64** (1997) 533
- [5] M. Bruel, Electron. Lett. **31** (1995) 1201
- [6] B. Aspar, M. Bruel, H. Moriceau, C. Maleville, T. Poumeyrol, A.M. Papon, A. Claverie, G. Benassayag, A.J. Auberton-Hervé, T. Barge, Microelectron. Eng. **36** (1977) 233
- [7] A. Agarwal, T. E. Haynes, V.C. Venezia, O.W. Holland, Appl. Phys. Lett. **72** (1998) 1086
- [8] Q.-Y. Tong, U. Gösele, C. Yuan, A.J. Steckel, M. Reiche, J. Electrochem. Soc. **142** (1995) 232
- [9] L. Di Cioccio, Y. Le Tiec, F. Letertre, C. Jaussaud, M. Bruel, Electron. Lett. **32** (1996) 1144
- [10] Q.-Y. Tong, T.-H. Lee, L.-H. Huang, Y.-L. Chao, U. Gösele, Electron. Lett. **34** (1998) 407
- [11] Q.-Y. Tong, K. Gutjahr, S. Hopfe, U. Gösele, Appl. Phys. Lett. **70** (1997) 1390
- [12] E. Jalaguier, B. Aspar, S. Pocas, J. F. Michaud, M. Zussy, A. M. Papon, M. Bruel, Electron. Lett. **34** (1998) 408
- [13] Q.-Y. Tong, R. Scholz, U. Gösele, T.-H. Lee, L.-J. Huang, Y.-L. Chao, T.Y. Tan, Appl. Phys. Lett. **72** (1998) 49