



## Winzige Nanoteilchen speichern Ladungen

### Ein Ansatz für neue nichtflüchtige Halbleiterspeicher

Johannes von Borany<sup>1</sup>, Thoralf Gebel<sup>1</sup> und Karl-Heinz Stegemann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung

<sup>2</sup>Zentrum Mikroelektronik Dresden AG

Wer kennt die Situation nicht: Man sitzt vor seinem Computer und will loslegen, aber zunächst ist das gute Stück eine geraume Zeit damit beschäftigt, die für die Arbeit notwendigen Programme und Daten von der Festplatte in den Arbeitsspeicher des Rechners zu laden. Dass es auch anders geht, zeigt die Arbeitsweise von Organizern, Handys oder Digitalkameras. Dort sind alle Daten unmittelbar verfügbar und gehen auch beim Abschalten des Gerätes oder bei einem Stromausfall nicht verloren.

Grund für diesen Unterschied sind zwei völlig verschiedene Speichertypen. Während bei Organizern oder Handys die notwendigen Dateien in nichtflüchtigen Speichern abgelegt sind, ist der Arbeitsspeicher eines konventionellen PCs ein

dynamischer Speicher, bei dem die Information permanent aufgefrischt werden muss.

Das eingangs beschriebene Szenario ist bei PCs lästig, aber technisch vertretbar. Es gibt aber auch viele Anwendungen, für die nichtflüchtige Speicher zwingend erforderlich sind, da betriebs- beziehungsweise sicherheitsrelevante Daten oder nutzerspezifische Informationen jederzeit und dauerhaft verfügbar sein müssen. Ob es sich dabei um das BIOS eines Rechners, das Telefonbuch in einem Handy, die Codenummer eines Autoradios, Zugriffsrechte in Sicherheitssystemen oder Grenz- und Kalibrierwerte in einem Gerät zur medizinischen Überwachung handelt, macht technisch gesehen keinen großen Unterschied.



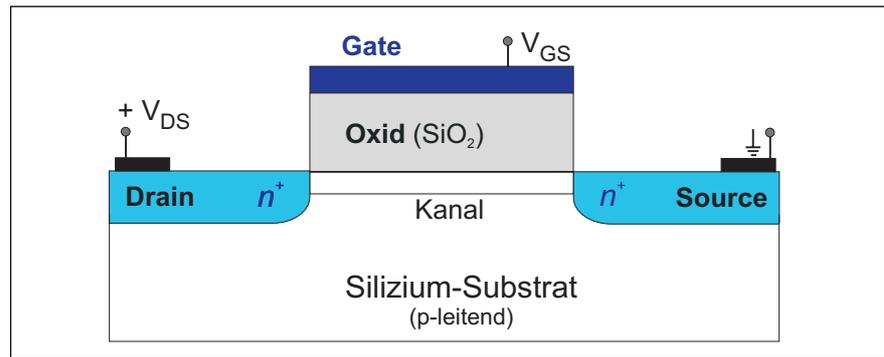
## Speicher mit Langzeitgedächtnis

Für eine dauerhafte Speicherung umfangreicher Datenmengen sind die magnetischen Festplattenspeicher derzeit preislich unschlagbar. Daneben gibt es aber auch einen großen Bedarf an nichtflüchtigen Halbleiterspeichern, die das derzeit am stärksten wachsende Segment auf dem Speichermarkt darstellen (Marktprognose McClean Report 2001). Dies betrifft insbesondere integrierte Systemlösungen im Bereich der Automobil- und Kommunikationselektronik, der Medizintechnik oder der Sensorik. Dort ist das Speicherfeld nur ein Baustein einer komplexen elektronischen Anordnung auf einem Mikrochip, wobei alle Teilkomponenten einheitlich in Silizium-Technik herstellbar sein müssen. Bei magnetischen Speichersystemen ist dies gegenwärtig nicht möglich.

Als nichtflüchtige Halbleiterspeicher dominieren derzeit die (Flash)-EEPROM-Speicher (EEPROM = Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory). Dem Trend der Mikroelektronik folgend, wer-

### Magnetische Speicher versus Halbleiterspeicher

In der Computer- oder digitalen Kommunikationstechnik werden alle Programme oder Daten in Form einer Folge von Bits codiert, wobei ein einzelner Bit jeweils den Zustand 0 oder 1 annehmen kann. In einem Speicherbaustein – welcher Art auch immer – wird dies durch zwei eindeutig voneinander unterscheidbare Zustände (meist physikalischer Natur) dargestellt. Bei magnetischen Massenspeichern wie der Festplatte handelt es sich dabei um die Richtung des magnetischen Flusses von Magnetpartikeln in einer dünnen Metallschicht auf dem Festplatten-träger (Aluminium, Glas), die durch einen Schreib- beziehungsweise Lesekopf programmiert oder ausgelesen werden. Beim Halbleiterspeicher ist das Grundelement einer Speicherzelle eine Feldeffekt-Transistor-Struktur, wobei der durch die Spannung an der Steuerelektrode (Gate) regelbare Stromfluss durch den Transistorkanal (Strom EIN/AUS) den Zustand eines Bits (1 oder 0) charakterisiert.



### Aufbau eines n-Kanal Feldeffekttransistors

Je nach Spannung an der Gate-Elektrode ( $V_{GS}$ ) kann zwischen Quelle (Source) und Senke (Drain) ein leitfähiger Kanal oder eine isolierende Raumladungszone erzeugt werden. Den Übergang vom leitfähigen zum isolierenden Zustand im Transistorkanal charakterisiert die so genannte Schwellspannung. Die beiden Zustände (leitender/nichtleitender Kanal) werden dem „1“- beziehungsweise „0“-Wert einer binären Information zugeordnet.

den auch an EEPROMs ständig steigende Anforderungen gestellt: Eine zunehmende Speicherdichte, immer niedrigere Programmierspannungen sowie die Steigerung der Anzahl möglicher Programmierzyklen stehen dabei genauso im Blickfeld wie eine preiswerte Fertigungstechnologie. Für komplexe Anwendungen kann der EEPROM diese Forderungen zunehmend nur noch bedingt erfüllen [1]. Prinzipielle Nachteile sind seine relativ große interne Programmierspannung zwischen zwölf und achtzehn Volt und die Begrenzung der Anwendung auf etwa einhunderttausend bis höchstens eine Million Schreib-/Löschzyklen.

Es ist absehbar, dass die EEPROM Speicherzelle für höchstintegrierte nichtflüchtige Speicher in der gegenwärtigen Form nicht angewendet werden kann. Deshalb wird schon seit Jahren nach Alternativen zum EEPROM-Speicher gesucht. Praktische Bedeutung hat in diesem Zusammenhang vor allem der ferroelektrische Speicher [2] und der Nitridspeicher erlangt [3]. Die Arbeiten zum seit langem prognostizierten „Universalspeicher“ auf der Grundlage der Magneto-elektronik sind zwar in den letzten Jahren wesentlich vorangekommen, aber ein produktionsreifer Speicher wird frühestens in sechs bis sieben Jahren erwartet [4].

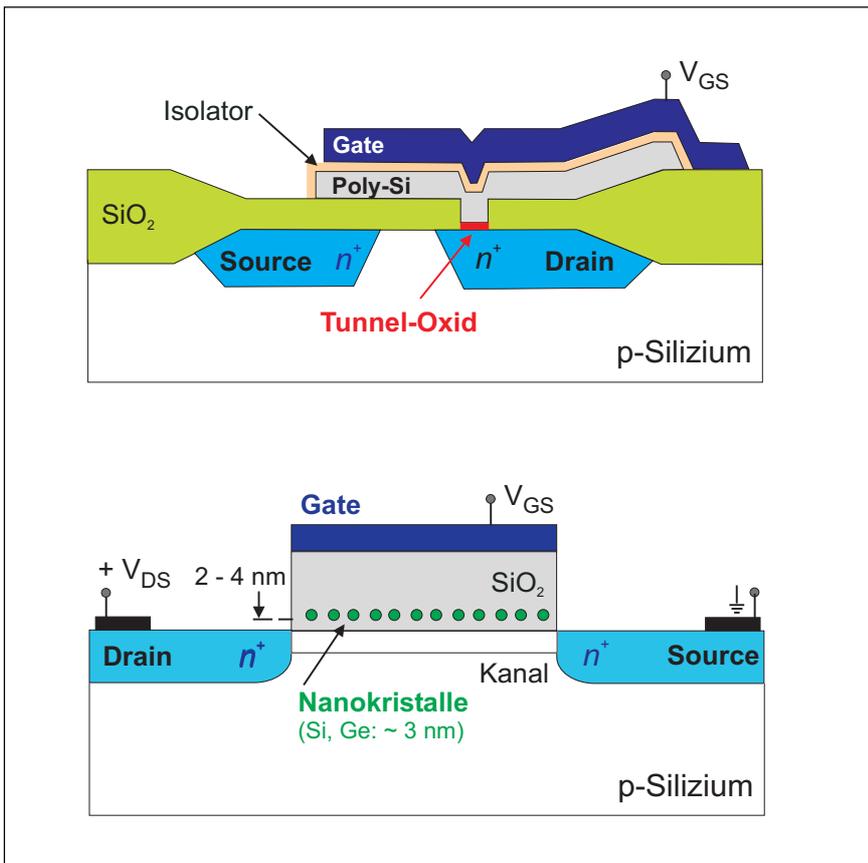
### Nullen und Einsen in der Nanowelt

Es waren wieder einmal Forscher von IBM, die 1996 ein völlig neues Konzept eines skalierbaren, nichtflüchtigen Speichers präsentierten. Dabei wird die Poly-Sili-

zium-Schicht des EEPROM durch eine Vielzahl voneinander separierter, nur wenige Nanometer (millionstel Millimeter) große Germanium- oder Silizium-Nanokristalle ersetzt, die perlenartig in einem schmalen Band in unmittelbarer Nähe der Silizium/Siliziumoxid-Grenzfläche angeordnet sind. Die Beladung dieser Nanoteilchen (Cluster) mit jeweils wenigen Elektronen ist ausreichend, um den Stromfluss im Transistorkanal erheblich zu ändern.

Die Vorteile des Nanoclusterspeichers im Vergleich zum konventionellen EEPROM beruhen auf zwei prinzipiellen Unterschieden: Zum einen wird statt einer geschlossenen Schicht ein Ensemble diskreter Speicherzentren in Form der Nanocluster genutzt. Dies verspricht neben der sehr guten Skalierbarkeit der Speicherzelle auch eine verbesserte Defekt-Toleranz, da beim Ausfall einzelner Cluster die generelle Information der Speicherzelle erhalten bleibt. Zum anderen sollte als Folge des geringen Abstandes der Nanocluster zum Substrat eine Beladung der Cluster bei relativ geringen Programmierspannungen möglich sein – und damit auch die Anzahl nutzbarer Programmierzyklen steigen.

Einer der wesentlichen Knackpunkte bei der Realisierung des Nanocluster-Speichers ist die Lösung der Frage, wie dieses schmale Band mit Clustern definierter Größe, Dichte und Lage erzeugt werden kann. Übliche Verfahren der lithografischen Strukturierung sind bei der geforderten Clustergröße von wenigen Nanometern nicht anwendbar. Daher muss man auf Techniken zurückgreifen, bei denen die Bildung der Nanocluster selbstorganisierend aus der atomaren



#### Vergleich einer EEPROM-Speicherzelle und eines Nanoclusterspeichers

Querschnitt einer EEPROM-Speicherzelle (Bild oben) und der Speicherzelle eines Nanoclusterspeichers (Bild unten). Die unterschiedliche Art der Speicherzentren beim EEPROM (Poly-Silizium-Schicht) und beim Nanoclusterspeicher (Band separierter Nanocluster) ist deutlich zu erkennen. In beiden Fällen führt die Be- oder Entladung der Cluster infolge der Änderung der Kanalleitfähigkeit zu einer Variation des Drain-Source-Stromes und damit der Information der Speicherzelle.

Ebene heraus erfolgt. Viele Forschergruppen nutzen dazu Verfahren, bei denen sich die Cluster durch Kondensation in einer Hochtemperatur-Gasphase bilden. Diese Cluster werden dann auf einem sehr dünnen Tunneloxid (zwei bis vier Nanometer „dick“) abgeschieden und anschließend in einem weiteren Prozessschritt in ein Oxid eingebettet. Die dabei angewandten Techniken sind unter anderem die chemische Gasphasen-Abscheidung (CVD = chemical vapour deposition) oder eine spezielle Aerosoltechnik, bei der gröbselektierte Cluster wie mit einer Sprühpistole auf das Tunneloxid aufgetragen werden. Diese Verfahren sind in der Regel technologisch sehr aufwändig und haben – mit Ausnahme der Aerosoltechnik – den Nachteil, dass sich damit nur relativ geringe Clusterdichten erzeugen lassen.

#### Mit Altbewährtem Neues schaffen

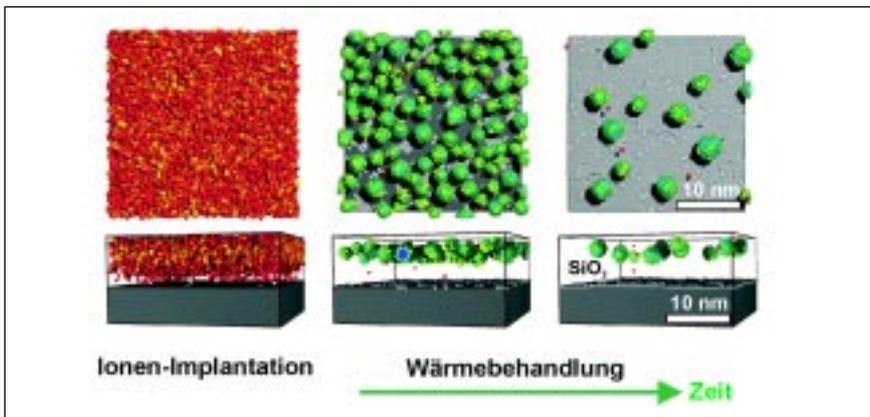
Wir haben einen anderen Ansatz gewählt, der technologisch wesentlich einfacher umsetzbar ist und vollständig auf Verfahren beruht, die bereits in der Chipfertigung eingesetzt werden. Die Erzeugung der Nanoteilchen erfolgt dabei mit Hilfe der Ionenstrahlsynthese. Technisch gesehen ist dies nichts anderes als die Kombination einer Ionenimplantation – Fremdatome werden mit Hilfe von Ionenbeschleunigern in die Oberfläche eines Materials eingebracht – und einer Wärmebehandlung. In den vorangegangenen Jahren hatten wir umfangreiche Erfahrungen bei der Synthese von Silizium-, Germanium- oder Zinnclustern in relativ dicken Siliziumdioxid-Schichten gesammelt. Solche Schichten zeigen eine intensive blaue Lichtemission und sind daher für optoelektronische Anwendungen von großem Interesse.

#### Vergleich EEPROM-Speicher und Nanokristallspeicher

Beides sind nichtflüchtige Speicher, bei denen eine Information dauerhaft verfügbar ist. Dies wird erreicht, indem im Transistor-Gate lokale Speicherzentren geschaffen werden. Der Ladungszustand dieser Speicherzentren (be-/entladen) beeinflusst über die Influenz die Leitfähigkeit im Transistorkanal. EEPROM und Nanokristallspeicher unterscheiden sich durch die Art dieser Speicherzentren. Beim EEPROM ist dies eine zusätzliche Poly-Silizium-Schicht im Gateoxid des Transistors. Durch Spannungsimpulse an der Steuerelektrode des Transistors gelangen Elektronen aus dem Silizium-Substrat durch ein dünnes Tunneloxid in das Poly-Silizium, um danach permanent in dieser Schicht zu verbleiben. Durch einen Spannungsimpuls umgekehrter Polarität werden die Elektronen wieder aus dieser Schicht entfernt.

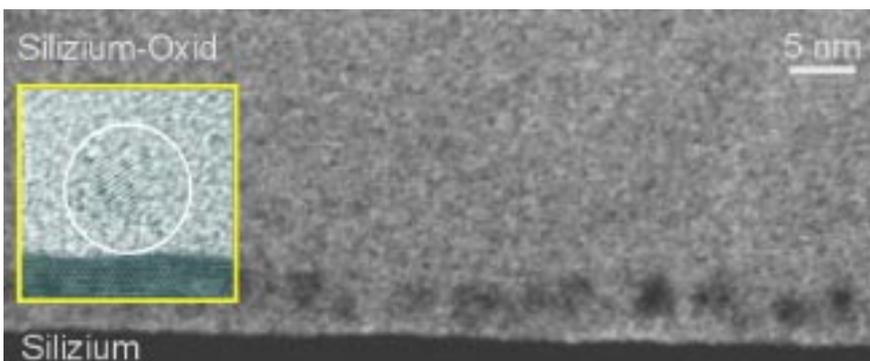
Im Unterschied dazu erfolgt die Ladungsspeicherung im Nanokristallspeicher in einem Ensemble von winzigen Clustern aus Silizium oder Germanium, die in das Gateoxid eines Transistors eingebettet sind. Diese müssen sich in einem geringen Abstand von der Silizium/Siliziumdioxid-Grenzfläche befinden, um beim Anlegen einer Gatespannung einen Ladungstransport von Elektronen aus dem Transistorkanal in die Cluster zu ermöglichen. Die Be- oder Entladung der Cluster führt analog wie beim EEPROM infolge der Änderung der Kanalleitfähigkeit zu einer Variation des Drain-Source-Stromes und damit der Information der Speicherzelle.

Die Frage war nun: Ist diese Clusterbildung in ähnlicher Weise auch in dünnen Gateoxiden möglich? Die Experimente zeigten, dass bei Anwendung der Niederenergie-Ionenimplantation und einer anschließenden Kurzzeit-Temperatur unter bestimmten Prozessbedingungen schmale Clusterbänder in dünnen Oxidschichten entstehen. Nachdem uns dieser Nachweis gelungen war, bestand die nächste Aufgabe in der



#### Simulation der Evolution von Nanoclustern

Das Bild zeigt Ergebnisse der Computersimulation zur Ionenstrahlsynthese von Nanoclustern in einem dünnen Gateoxid (transparent) auf dem Silizium-Substrat (grau). Drei Stadien der Clusterbildung sind dargestellt – jeweils als Draufsicht (oberer Teil) und im Querschnitt (unterer Bildteil): Der linke Bildteil zeigt die Verteilung der durch die Ionenimplantation eingebrachten Fremdatome (Silizium oder Germanium), die bei Überschreitung der Gleichgewichtslöslichkeit präzipitieren. Bei der Wärmebehandlung entsteht zunächst eine hohe Dichte kleiner Cluster (Bildmitte), mit zunehmender Dauer der Wärmebehandlung nimmt die mittlere Größe der Cluster zu und gleichzeitig die Clusterdichte ab (rechts). Infolge des sehr geringen Abstandes zum Substrat kann ein bestimmter Anteil der eingebrachten Fremdatome auch zum Substrat „wandern“ und damit für die Clusterbildung verloren gehen. Die Simulationen wurden von K.H. Heinig und T. Müller (beide FZR) im Rahmen des derzeit laufenden „NEON“-Projektes durchgeführt, das durch die Europäische Union gefördert wird.



#### Grenzflächennahes Germanium Nanocluster-Band

Elektronenmikroskopische Aufnahme eines dünnen grenzflächennahen Bandes von Ge-Clustern in einer  $\text{SiO}_2$ -Schicht, wie sie für nichtflüchtige Speicher genutzt werden kann. Der Nachweis, dass es sich bei diesen Clustern dabei vielfach sogar um Nanokristalle handelt, gelingt durch die Abbildung von Netzebenen bei einer sehr hohen Vergrößerung (etwa 500 000-fach); die im linken Bildausschnitt zu erkennen sind.

Untersuchung der Speichereigenschaften dieser clusterhaltigen Gateoxide. Hier hat im Rahmen eines vom Land Sachsen geförderten Projektes eine intensive Zusammenarbeit mit dem Zentrum Mikroelektronik Dresden begonnen. Dies hatte zum Ziel, die Forschungsarbeiten nicht auf das akademische Interesse zu beschränken, sondern bereits in dieser Phase wichtige Ergebnisse hinsichtlich der technologischen Machbarkeit eines Nanoclusterspeichers zu erhalten. Daher haben wir Schichtsysteme, Prozessparameter und Strukturen betrachtet, wie sie auch bei Fertigung eines realen Speichers zum Einsatz kommen. Im Mittelpunkt der

Untersuchungen standen dabei die Eigenschaften von Einzel-Transistoren, da diese das Grundelement jeder Speicherzelle bilden. Das Gateoxid dieser Transistoren enthielt dabei eine Schicht mittels Ionenstrahlsynthese erzeugter Germanium- oder Siliziumcluster.

#### Datenerhalt für die Ewigkeit

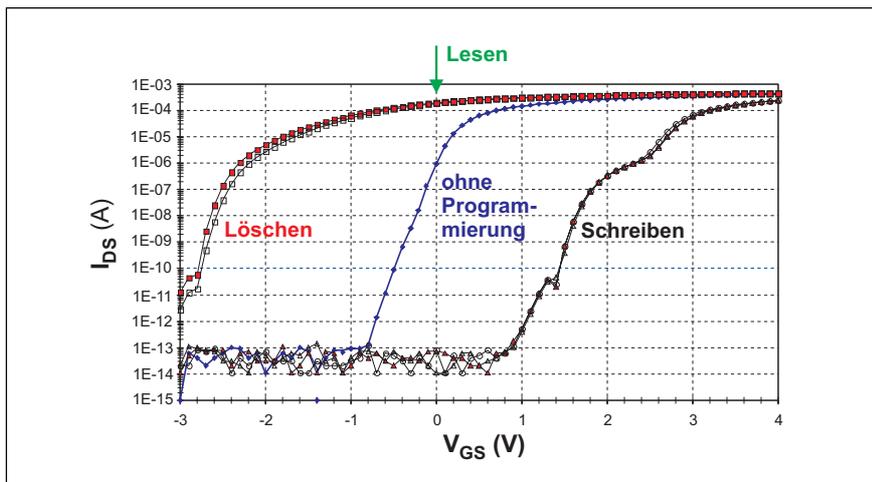
Die Experimente haben gezeigt, dass die Nanocluster tatsächlich Ladungen speichern und dies mit einer signifikanten Verschiebung der Kennlinie des Transistors einhergeht – für uns ein wichtiger

#### Ionenstrahlsynthese

Physikalisch basiert die Ionenstrahlsynthese von Nanoclustern auf der Phasenseparation in einer übersättigten Festkörperlösung. Mittels Ionenimplantation werden in ein dünnes Gateoxid Silizium- oder Germaniumatome in einer Konzentration eingebracht, welche die Löslichkeit des implantierten Elementes im Oxid überschreitet. Dadurch entsteht ein thermodynamischer Nichtgleichgewichtszustand, auf Grund dessen sich zu meist schon während der Ionenimplantation winzige Ausscheidungen (Präzipitate) bilden. Diese besitzen eine spezifische Größenverteilung, die neben den Implantationsbedingungen (Energie, Dosis, Temperatur) auch durch die Diffusionseigenschaften und Löslichkeit des eingebrachten Fremdatoms im Oxid bestimmt wird. Während einer anschließenden Wärmebehandlung bei Temperaturen oberhalb 600 Grad Celsius beginnen Nanocluster zu wachsen. Dieser Prozess ist als Ostwald-Reifen bekannt, wobei als treibende Kraft die Minimierung der Oberflächenenergie der Cluster wirkt. In einem Ensemble unterschiedlicher Clustergrößen wachsen dabei größere Nanocluster auf Kosten der kleineren, die sich nach und nach auflösen. Die Temperatur bei der Wärmebehandlung bestimmt ganz wesentlich die mittlere Clustergröße (typische Werte 2-6 Nanometer) und die Clusterdichte. Mittels Computerrechnungen gelingt es, die Bildung schmaler Clusterbänder in dünnen Oxidschichten zu simulieren.

Meilenstein und zugleich Motivation zur Fortsetzung der Arbeiten.

Gleichzeitig haben wir deutliche Unterschiede zwischen Gateoxiden mit Silizium- und Germanium-Nanoclustern festgestellt. Dies gilt vor allem in Bezug auf den Datenerhalt (engl.: Retention), der einer der wichtigsten Parameter eines nichtflüchtigen Speichers ist. Entsprechend der Bauelemente-Spezifikation muss der Datenerhalt bei einem nichtflüchtigen Speicher über mindestens



### Speichereffekt in einer Transistor-Zelle mit Si-Nanoclustern

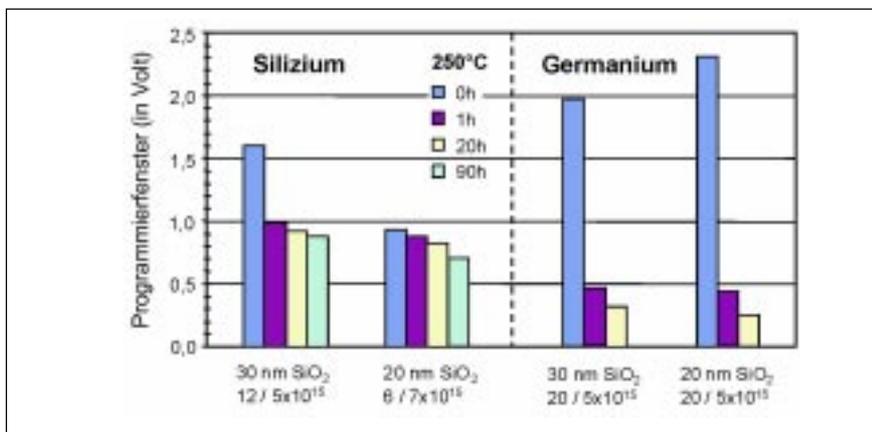
Der Graph zeigt die Kennlinie  $I_{DS}(V_{GS})$  eines n-Kanal-Anreicherungs-Transistors mit Si-Nanoclustern im Gateoxid. Durch die Programmierung (Schreiben:  $V_{GS} = +10$  V, Löschen:  $V_{GS} = -10$  V, jeweils 50 ms) verschiebt sich die Kennlinie gegenüber dem Ausgangszustand („ohne Programmierung“). Die Kennlinie geht nach einem Löschimpuls nicht auf die Ausgangscharakteristik zurück, sondern wird in die entgegengesetzte Richtung verschoben. Dies zeigt, dass neben den Elektronen auch die Löcher die Ladungsspeicherung in clusterhaltigen Gateoxiden beeinflussen. Das Lesen des Speichers erfolgt bei  $V_{GS} = 0$  V. Der Transistorstrom differiert je nach Programmierzustand um neun (!!) Stromdekaden, was eine ausgezeichnete Zuordnung der Information der Speicherzelle ermöglicht. Das Programmierfenster beträgt im gezeigten Beispiel etwa vier Volt, wobei für die Anwendung ein Programmierfenster von einem halben Volt ausreichend ist.

zehn Jahre gewährleistet sein. Wenn man bedenkt, dass ein Computer bereits nach zirka zwei bis drei Jahren Nutzung als veraltet gilt, ist das nahezu eine Ewigkeit.

Um den Datenerhalt zu überprüfen, verkürzt man die Zeit, indem man die Retention bei höheren Betriebstemperaturen misst. Ausgehend von einem Ent-

ladungsverhalten, das durch eine konstante Aktivierungsenergie bestimmt wird (Arrhenius-Gesetz), ist eine Retention von zehn Jahren bei Raumtemperatur gegeben, wenn ein Datenerhalt bei 250 Grad Celsius über zehn Stunden nachgewiesen werden kann. Unsere Untersuchungen haben ergeben, dass Gateoxide mit Germanium-Clustern ein recht

großes Programmierfenster, aber nur eine sehr geringe Retention (bei 250 Grad Celsius nur wenige Minuten) besitzen, während Silizium-implantierte Gateoxide ein geringeres, aber ausreichendes Programmierfenster (ein halbes bis zwei Volt), jedoch eine ausgezeichnete Retention aufweisen (bis zu 100 Stunden bei 250 Grad Celsius).

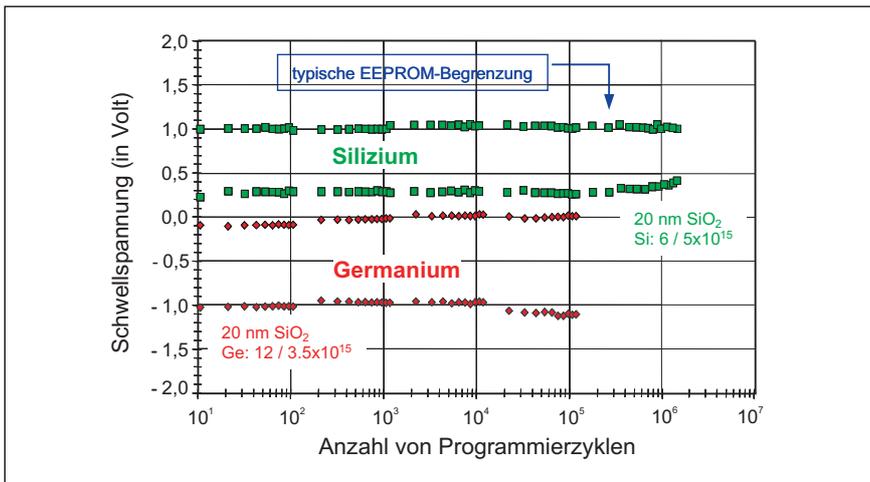


### Ladungserhalt in nanoclusterhaltigen Gateoxiden

Der Ladungserhalt in Gateoxiden mit Ge- bzw. Si-Nanoclustern unterscheidet sich deutlich. Für Si-Nanocluster verringert sich das Programmierfenster für die hier dargestellten Fälle selbst nach einer Wärmebehandlung von 250 °C, 90 Stunden nur geringfügig. Dies entspricht einem Ladungserhalt von mindestens 30 Jahren. Bei Gateoxiden mit Ge-Nanoclustern sinkt das Programmierfenster bereits nach wenigen Minuten unter den für einen praktischen Einsatz relevanten Wert von einem halben Volt. Die Programmierung erfolgte im dargestellten Beispiel einheitlich bei einer Feldstärke von 5 MV/cm mit einem Spannungsimpuls von 10 ms Länge.

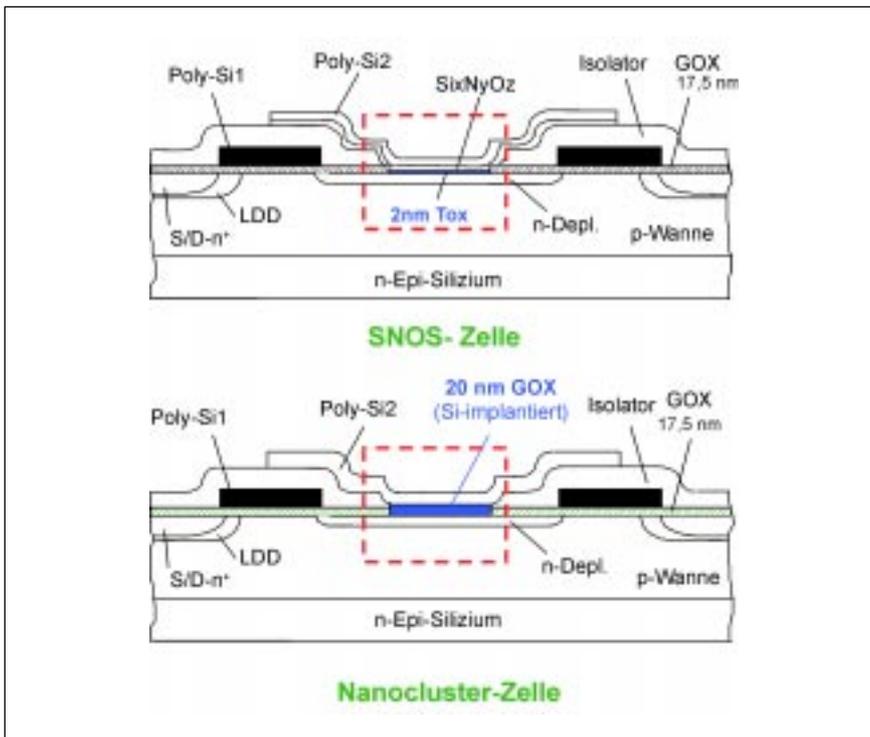
### Silizium- oder Germanium-Cluster?

Genauere Untersuchungen haben gezeigt, dass die beobachteten Differenzen durch einen unterschiedlichen Abstand der Ge- bzw. Silizium-Cluster in Bezug auf die Silizium/Siliziumoxid-Grenzfläche erklärt werden können. Obwohl beide Elemente Halbleiter der vierten Hauptgruppe des Periodensystems sind, unterscheiden sie sich hinsichtlich ihres Verhaltens bei Temperprozessen erheblich. Infolge der geringeren Schmelztemperatur, einer größeren Diffusionsfähigkeit im Oxid und einer ausgeprägten Neigung zur Bildung flüchtiger Komponenten (zum Beispiel Monogerman:  $GeH_4$ ) werden beim Germanium Umverteilungs- und Ausdiffusionseffekte beobachtet. Silizium verbleibt nach der Implantation hingegen weitgehend ortsstabil, wodurch die Lokalisierung der Cluster sehr gut möglich ist. Speziell beim Germanium haben wir die Selbstorganisation sehr grenzflächennaher Clusterbänder beobachtet. Diese lassen sich zwar sehr einfach beladen und führen damit zu einem relativ großen Programmierfenster. Andererseits kommt es ohne angelegtes Gatepotential zu einer spontanen Emission von Ladungsträgern und damit zu einem Datenverlust der betreffenden Speicherzelle. Vergrößert man den Abstand der Cluster zur Grenzfläche, lässt sich die Retention auch für Germanium verbessern. Dieses Verhalten wirft die Frage auf, ob grenzflächennahe Germaniumcluster nicht auch gezielt für einen neuen Typ dynamischer Speicher genutzt werden könnte ...



### Anzahl der Programmierzyklen

Die Abbildung zeigt die Schwellspannung von Transistoren mit Ge (12 keV,  $3.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) oder Si (6 keV,  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) implantierten Gateoxiden (20 nm) in Abhängigkeit von der Anzahl von Schreib-/Löschimpulsen ( $\pm 10 \text{ V} / 10 \text{ ms}$ ). Die Untersuchungen zeigen, dass mit einem Nanoclusterspeicher im Vergleich mit einem EEPROM-Speicher eine höhere Anzahl von Schreib- und Löschzyklen realisierbar sind. Dadurch werden Anwendungen ermöglicht, bei denen Programme oder Daten oftmals überschrieben werden.



Vergleich der SNOS-Zelle und der Speicherzelle eines Nanoclusterspeichers, wie sie von ZMD bei der Realisierung des nvSRAM genutzt wurden. Die erfolgreiche Präparation des nvSRAM mit einem nanoclusterhaltigen Gateoxid führte zum erstmaligen Nachweis der Funktionsfähigkeit des Nanoclusterspeichers als nichtflüchtiger Speicher an kompletten 256k-Speicherfeldern.

### Megavolt im Schaltkreis

Des Weiteren konnten wir zeigen, dass eine Programmierung in der Tat bereits bei Spannungen von acht bis zehn Volt möglich ist – und damit deutlich unter denen eines EEPROM-Speichers. Da die

Programmierspannung in jedem Speicher aus der Betriebsspannung des Speichers (derzeit zwei bis drei Volt) gewonnen werden muss, bedeutet dies einen erheblich geringeren Aufwand bei der Erzeugung der internen Programmierspannung.

Dies hat auch einen großen Einfluss auf die Anzahl nutzbarer Programmierzyklen. Während die Programmierung bei einem EEPROM-Speicher im so genannten Hochfeldbereich – die elektrische Feldstärke über dem Gateoxid ist dann zumeist größer als zehn Megavolt pro Zentimeter – stattfindet, ist die Programmierung eines Nanocluster-Speichers bereits bei mittleren elektrischen Feldstärken (typisch sind fünf bis acht Megavolt pro Zentimeter) möglich. Dadurch wird beim Stromtransport durch das Gateoxid der Anteil energiereicher („heißer“) Elektronen reduziert und damit die Oxidschädigung vermindert. Bereits erste Messungen zeigten uns, dass die Zahl möglicher Schreib-/Lese-Zyklen (engl.: Endurance) mindestens eine Größenordnung höher ist als beim EEPROM-Speicher und bei einer Verkürzung der Programmierzeit vermutlich sogar noch deutlich höhere Werte erreichen kann.

### ... nur der Speicher zählt

Nach diesen an Transistor-Einzelstrukturen gewonnenen erfolgversprechenden Zwischenergebnissen wollten wir es wissen: Das ZMD hat weltweit erstmalig in einer Prototyp-Serie vollständige nichtflüchtige Speicher vom Typ nvSRAM mit einer viertel Million Speicherzellen pro Chip auf der Basis nanoclusterhaltiger Gateoxide hergestellt. Ausgangspunkt war die so genannte SONOS-Zelle, bei der das Gate des Speichertransistors aus einer Oxid/ Nitrid-Stapelschicht besteht. Dieses Schichtsystem wurde durch ein Gateoxid mit Si-Nanoclustern ersetzt, ansonsten aber Struktur und Technologie unverändert beibehalten. Jetzt zahlte sich aus, dass wir in den vorangegangenen Untersuchungen schon technologierelevante Prozessparameter berücksichtigt hatten. Nach der Fertigstellung der Präparation waren wir auf das Äußerste gespannt, bis wir die Ergebnisse der ersten Prüfung in den Händen hielten: Viele der Speicher waren voll funktionsfähig und erfüllten die Spezifikationen, die von einem nichtflüchtigen Speicher hinsichtlich Programmierfenster (über ein halbes Volt) und Retention (größer als zehn Jahre) gestellt werden. Auch die niedrigere Programmierspannung und die verbesserte Endurance haben sich erneut bestätigt [5].



### **Kein Ende in Sicht**

Wie wird es weitergehen? Ohne Frage wird die Bedeutung nichtflüchtiger Speicher zukünftig zunehmen und der Nanocluster-Speicher kann dabei – neben anderen Speicherkonzepten – eine gewichtige Rolle einnehmen. Erste Anwendungen dieses Speicherprinzips in so genannten „Embedded Systems“ treiben die Ingenieure vom Zentrum Mikroelektronik Dresden kontinuierlich weiter voran – sie sollen in etwa zwei bis drei Jahren produktionsreif sein. Unser spezifisches Know-how bei der Ionenstrahlsynthese

von Nanoclustern und die guten Ergebnisse der bisherigen Arbeiten bildeten die Grundlage für die inzwischen sehr intensive Zusammenarbeit des Institutes mit namhaften Chipherstellern wie ST Microelectronics oder Infineon Technologies im Rahmen europäischer und nationaler Projekte. Bei diesen Projekten stehen vor allem hochintegrierte Speichersysteme auf der Basis nanoclusterhaltiger Schichten im Mittelpunkt. Ob ein Nanoclusterspeicher vielleicht einmal auch als Arbeitsspeicher in einem Rechner eingesetzt wird, bleibt abzuwarten – unmöglich erscheint es nicht.

