

Bundesministerium für Forschung und Technologie

Forschungsbericht T 81 -

zu NT 947

Technische Forschung und Entwicklung

- Elektronik -

Kristallfehler in integrierten Schaltkreisen aus
Silizium, insbesondere in Hinblick auf Größtintegration
(VLSI)

von

Dr. Günther Franz

Dr. Bernd O. Kolbesen

Siemens AG

Unternehmensbereich Bauelemente

Grundlagenentwicklung Materialphysik

München

Abteilungsleiter

Dr. Bernd O. Kolbesen

Projektleiter

Dr. Günther Franz

Dr. Bernd O. Kolbesen

April 1981

Berichtsblatt

1. Berichtsnummer BMFT FB	2. Berichtsart Abschlußbericht	3. Elektronik
4. Titel des Berichts Kristallfehler in integrierten Schaltkreisen aus Silizium, insbesondere im Hinblick auf Größtintegration (VLSI)		
5. Autor(en) (Name, Vorname(n)) Franz, Günther Kolbesen, Bernd O.		6. Abschlußdatum Dezember 1980
8. Durchführende Institution (Name, Adresse) Siemens AG Unternehmensbereich Bauelemente Grundlagenentwicklung Materialphysik Balanstraße 73 8000 München 80		7. Veröffentlichungsdatum
		9. Ber. Nr. Auftragnehmer
		10. Forderungskennzeichen NT 947
		11. Seitenzahl
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) Postfach 200706 5300 Bonn 2		13. Literaturangaben 58
		14. Tabellen 4
		15. Abbildungen 28
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Der Einfluß prozeßinduzierter Kristallfehler auf Siliziumbauelemente in bipolaren und MOS-Technologien wurde untersucht. Als Untersuchungsmethoden für Kristallfehler wurden die Ätzung, die Röntgentopographie und die Elektronenmikroskopie eingesetzt. Verunreinigungen wurden durch Infrarotspektroskopie (Kohlenstoff und Sauerstoff) und radiochemische Analyse (Metalle) bestimmt. Neben Bauelementkennlinien waren MOS-Relaxationszeitmessungen wichtige elektrische Beurteilungskriterien. Keime-, Quellen- und treibende Kräfte für die Kristallfehlerentstehung wurden analysiert bestimmten Technologieparametern zugeordnet und Maßnahmen zur Vermeidung ermittelt. Einen wesentlichen Einfluß hatten die bei den Bauelementeprozessen eingeschleppten metallischen Verunreinigungen sowohl auf die Entstehung als auch auf die elektrische Aktivität von Kristallfehlern. Hier wurden Untersuchungen zur Getterung durch Defekte, die bei der Ausscheidung von Sauerstoff in Tiegel-silizium entstehen, durchgeführt.		
19. Schlagwörter Integrierte Schaltkreise, Bipolar-, MOS-Technologie, Emitter-Kollektor-Kurzschlüsse, Speicherzeiten, MOS-Relaxationszeiten, prozeßinduzierte schädliche Kristallfehler, Entstehung, Vermeidung, Getterung, nützliche Kristallfehler, "intrinsisches" Gettern bei CZ-Silizium		
20.	21.	22. Preis

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung und Aufgabenstellung	7
1.1 Begründung des Projekts	7
1.2 Ausbeute bei VLSI-Schaltkreisen	7
1.3 Wissensstand am Beginn des Projektes	9
1.4 Aufgabenstellung	10
1.5 Allgemeines	12
2. Untersuchungsmethoden	13
3. Untersuchte Schaltkreistypen und Technologien	14
4. Detailuntersuchungen zur Entstehung schädlicher Kristallfehler	15
4.1 Einzelbit-Refreshausfälle bei dynamischen MOS-Speichern	15
4.2 Stapelfehler im Isolationsoxid	16
4.3 Kristallfehlerentstehung bei Epitaxieprozessen	18
4.4 Messung der MOS-Relaxationszeit zur Erfassung von Kristallfehlern	19
4.5 Qualitätsbeurteilung von Epitaxieschichten durch MOS-Relaxationszeitmessungen	20
4.6 Metallverunreinigung durch Hochtemperaturprozesse	21
4.7 Kristallfehlerentstehung bei lokalen Oxidationen	22

1. Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Begründung des Projekts

In einem vorangegangenen Projekt /1/ wurden Kristallfehler als Ursache für eine Minderung der Ausbeute untersucht. Dabei erstreckten sich die Untersuchungen auf integrierte Schaltkreise, die in verschiedenen bipolaren oder MOS-Technologien hergestellt wurden. Es konnten Einflüsse auf elektrische Parameter der Bauelemente wie Kennlinien, Sperrströme, Leckströme, Ladungsverlust von Kondensatoren etc. festgestellt und mit Kristallfehlern korreliert werden. Je nach Empfindlichkeit der Bauelemente führten Kristallfehler teilweise zum Totalausfall der Schaltkreise. Prognosen über den Einfluß solcher Kristallfehler beim Übergang zu größtintegrierten Schaltungen (VLSI)* waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich, andererseits gewannen Ausbeuteaspekte zunehmend an Bedeutung, da weltweit insbesondere auch von der japanischen Konkurrenz Anstrengungen unternommen wurden, um im wachsenden Markt für integrierte Schaltkreise einen entsprechenden Marktanteil zu erobern, und so ein rascher Preisverfall für elektronische Bauelemente die Folge war. Beide Gesichtspunkte führten zu einem Anschlußprojekt, in dem der Einfluß von Kristallfehlern auf VLSI-Bausteine und die Kristallfehlerentstehung durch "VLSI-gerechte" Technologien näher untersucht werden sollten.

1.2 Ausbeute bei VLSI-Schaltkreisen

Sicherlich werden auch bei VLSI-Schaltkreisen im wesentlichen die drei Faktoren für Fehlfunktionen verantwortlich sein, die bei Bauelementen mit geringerer Integrationsdichte entscheidend waren, nämlich:

* Als Definition für VLSI gilt: mehr als 10 000 Gatterfunktionen/Chip oder mehr als 64 KBit/Chip und Strukturen < 5 μm

ihrer Entstehung zu bestimmten Prozeßschritten erheblich schwieriger. Ja, ihre Entstehung wird nicht mehr durch einen einzelnen Prozeßschritt, sondern noch mehr als früher durch die Prozeßfolge beeinflußt werden.

1.3 Wissensstand am Beginn des Projektes

Auf eine ausführliche Darstellung des Wissensstandes am Beginn des Projektes kann hier verzichtet werden, da der Abschlußbericht zum Projekt NT 665 /1/ in sehr detaillierter Weise diese Information enthält. Lediglich einige wesentliche Teilaspekte sollen nochmals kurz erwähnt werden.

Beobachtete Kristallfehlertypen sind

- Versetzungen
- Stapelfehler
- Ausscheidungen

und werden fast immer durch nicht optimale Prozeßführung erzeugt. Atomare Punktdefekte können nur indirekt nachgewiesen werden, eine Korrelation zu elektrischen Parametern ist daher meist nicht möglich. Die elektrische Aktivität der Kristallfehler bewirkt eine Erhöhung der Sperrströme von Dioden oder eine Verkürzung der Speicherzeit in MOS-Kondensatoren. Diese Aktivität nimmt mit zunehmendem Dekorationsgrad (Anlagerung von Fremdatomen) zu /2,3/. Eine andere elektrische Auswirkung von Stapelfehlern oder Versetzungen sind Emitter-Kollektor-Kurzschlüsse ('pipes') bei Bipolartransistoren, die durch eine verstärkte Diffusion des Emitterdotierstoffes entlang dieser Kristallfehler und damit durchdiffundierter Basiszone zustande kommen.

Zur Entstehung von Kristallfehlern sind potente Versetzungsquellen bzw. Keime für Stapelfehler und treibende Kräfte nötig. Ein wesentliches Ergebnis des vorangegangenen Projektes war daher neben der Analyse der Kristallfehler die Untersuchung des Keimbildungs-

waren sehr häufig schwierige Zielpräparationen nötig.

b) Detailuntersuchungen prozeßinduzierter Kristallfehler

Die Feinstruktur der prozeßinduzierten Kristallfehler wurde mit dem Transmissionselektronenmikroskop untersucht. Ätzbilder, die wir wegen der höheren Auflösung auch im Rasterelektronenmikroskop analysierten, ergaben Informationen über Entstehungsmechanismen, z.B. Gleitrichtungen von Versetzungen und Dichteverteilung, die Rückschlüsse auf treibende Kräfte zuließen. Verunreinigungen wurden durch radiochemische Analysen (KWU, Erlangen) bestimmt und deren Verteilung mit der Kristallfehlerverteilung verglichen.

c) Aufsuchen von Korrelationen zwischen prozeßinduzierten Kristallfehlern und elektrischen Kenndaten

Der größte Teil dieser Korrelationen war bereits aus früheren Untersuchungen bekannt /1/. Außerdem ergab sich hier die Schwierigkeit, daß die in 1.2 erwähnten anderen Fehlerursachen, die nicht im Detail untersucht wurden, eine teilweise schlechte Korrelation vortäuschten. Es gab also fast immer gleichzeitig veränderte elektrische Kenndaten sowohl durch prozeßinduzierte Kristallfehler als auch andere Fehlerursachen, auf die VLSI-Bausteine empfindlich reagierten, ohne daß aus den Meßwerten direkt auf unterschiedliche Ursachen geschlossen werden konnte. Erst umfangreiche Detailmessungen am montierten Baustein hätten die hierzu notwendige Zusatzinformation liefern können, die bei Analysen auf Scheibenebene nicht erhältlich war.

d) Aufklärung der Entstehungsursachen störender Kristallfehler

Quell- und Keimmechanismen sowie treibende Kräfte für

Antrages ergaben. Die Aussagen, die bei VMOS-Untersuchungen getroffen werden konnten, bezogen sich jedoch fast immer auf Technologieschritte, die auch bei anderen Produkten Anwendung fanden.

2. Untersuchungsmethoden

Die verwendeten Untersuchungsmethoden waren weitgehend dieselben wie in unseren früheren Arbeiten /1/. Wieder bewährte sich je nach Problemstellung der Einsatz von Fehlerätzungen, Röntgentopographie und Elektronenmikroskopie. Tab.I zeigt eine Gegenüberstellung dieser drei Analyseverfahren für Kristallfehler, deren Stärken und Schwächen und damit die Möglichkeit, durch gemeinsamen, ergänzenden Einsatz sämtliche Vorteile, die diese Verfahren bieten, auszunutzen. Die Analyse von Verunreinigungen erfolgte bei lokal hohen Konzentrationen durch energiedispersive (EDX) oder wellenlängendispersive (WDX) Elektronenstrahl-Mikroanalyse im Rasterelektronenmikroskop (REM), bei kleinen Konzentrationen durch Neutronenaktivierungsanalyse mit einer hohen Nachweisempfindlichkeit, aber schlechterer Ortsauflösung. Zur Lokalisierung einzelner ausgefallener Bauelemente in integrierten Schaltkreisen und Teststrukturen wurden anodische oder kathodische Dekorationsverfahren eingesetzt, die bereits detailliert /1/ beschrieben wurden. Der Sauerstoff- und Kohlenstoffgehalt in Tiegelsilizium, das wegen des "intrinsischen Gettereffekts" weltweit für die Herstellung von integrierten Schaltkreisen an Bedeutung gewonnen hat, wurden durch Infrarotspektroskopie an Siliziumscheiben bestimmt. Detailuntersuchungen werden in Abschnitt 5 dargestellt.

Neben diesen bewährten Untersuchungsmethoden wurden solche entwickelt, die eine automatisierte Durchführung von Routineanalysen ermöglichten und weiterhin eine Korrelation von Kristallfehlerverteilungen mit der Verteilung von elektrischen Kenndaten über die Scheibe zuließen. Eine Methode, die diese Kriterien erfüllt, ist die Messung der Relaxationszeit von MOS-Kondensatoren /6/. Details dieses Verfahrens werden in Abschnitt 4 dargestellt.

Ganz wesentlich für unsere Arbeiten waren die Meßdaten, die während der Herstellung der Schaltkreise an Teststrukturen ermittelt wurden und selbstverständlich auch die Scheibenbeurteilung jeweils am Ende des Prozesses.

3. Untersuchte Schaltkreistypen und Technologien

Die von uns untersuchten Schaltkreise waren sowohl MOS- als auch Bipolarschaltungen. Zu Beginn des Berichtszeitraumes wurden auch Scheiben aus der VMOS-Entwicklung untersucht, die neben MOS-Technologien auch Prozeßschritte enthielten, die einem Bipolarprozeß ähnlich sind. In unseren Arbeiten wurden also neben Einzelanalysen im wesentlichen Technologien charakterisiert und ihre Einflüsse auf die Kristallfehlerentstehung bestimmt. Dabei handelte es sich um grundlegende Technologien wie Oxidationen, lokale Oxidationen, Implantationen, Diffusionen und Epitaxie. Gegen Ende des Berichtszeitraumes wurden erste Versuche mit sauerstoffreichem Tiegel-silizium durchgeführt. Dabei wurde die Entstehung der Sauerstoffausscheidungen während der ersten Hochtemperaturschritte eines simulierten Bipolarprozesses analysiert. Details dieser verschiedenen Bauelementprozesse und deren charakteristische Daten wurden bereits früher beschrieben /1/. Erwähnt werden sollte an dieser Stelle nur, daß die höchsten Prozeßtemperaturen bei MOS-Schaltkreisen $\leq 1000^{\circ}\text{C}$ und bei Bipolarschaltkreisen $> 1200^{\circ}\text{C}$ waren.

4.2 Stapelfehler im Isolationsoxid

In den meisten hochintegrierten MOS-Schaltungen beginnt der Herstellungsprozeß mit einer lokalen Oxidation, die die späteren aktiven Bereiche des Chips festlegt und sie voneinander isoliert. Ein ähnlicher, aber modifizierter Prozeß wird verwendet, um in bipolaren Schaltkreisen einzelne Schaltkreiselemente elektrisch zu trennen (siehe 4.7). Damit sich unter dem Oxid keine Inversionskanäle bilden bzw. ein "Dickoxidtransistor" durch Leitbahnen über dem Oxid zwischen zwei Schaltelementen eingeschaltet wird, muß das Silizium unter dem Isolationsoxid dotiert werden. Diese als Channelstopper bekannte Dotierung kann zusammen mit der nachfolgenden Oxidation zur Ausbildung von Stapelfehlern führen, die grundsätzlich für die elektrische Funktion des Schaltkreises unschädlich sind, wenn sie auf den nichtaktiven Isolationsbereich beschränkt bleiben. Häufig jedoch wachsen diese Kristallfehler bis in die angrenzenden Bauelemente und können hier zu Ausfällen führen. Bei MOS-Schaltkreisen kann dies wie in 4.1 zu Refreshausfällen führen /7/ oder veränderte Einsatzspannungen von Transistoren zur Folge haben, wenn sie in den Gate-Bereich hineinwachsen. Daher wurde in mehreren Versuchsreihen an einem Schaltkreis mit UV-löschbaren nichtflüchtigen Speicherstrukturen (EPROM) für diesen Schaltkreis ein Verfahren des Channelstopperkomplexes entwickelt, das keine Stapelfehler zur Folge hat.

Tabelle II zeigt wesentliche Vor- und Nachteile der Dotierung durch Diffusion oder Implantation. Für die Versuche wurde schließlich die Implantation als Verfahren gewählt, da hier die Dotierdosis exakter vorgebbar war. Das Dickoxid wurde durch feuchte Oxidation bei 970°C hergestellt, die Dicke betrug 1,6 µm.

4.3 Kristallfehlerentstehung bei Epitaxieprozessen

- Wachstumsstapelfehler

Bei der Fertigung integrierter bipolarer Schaltkreise traten zum Teil hohe Dichten an Epitaxiestapelfehlern auf. Auffällig war daran die Stapelfehlerverteilung in "Swirl"-Mustern. Eine detaillierte Analyse und Statistik über Dichte und Verteilung dieser Kristallfehler /9/ ergab, daß in die Scheiben während eines Hochtemperatur-Prozeßschrittes vor der Epitaxie Verunreinigungen eindiffundiert wurden. Mit zunehmender Verweilzeit im Ofen nahm auch die Keimdichte für Epitaxiestapelfehler zu. Außerdem wurden diese Kristallfehler überwiegend nach Diffusionen im SiC-Rohr gefunden /9/, während im Quarzrohr ihre Dichte drastisch reduziert werden konnte. Eine Abhängigkeit von der Betriebsdauer des Ofenrohres wurde nicht gefunden, jedoch war in manchen Rohren eine erhöhte Keimbildung festzustellen, so daß auf Verunreinigungen aus dem Rohrmaterial geschlossen werden mußte und nicht auf von außen hereingeschleppte. Ähnlich wie in anderen Untersuchungen /10/ waren diese Kristallfehler auf nichtdiffundierte Bereiche beschränkt. Abb. 3 zeigt einen solchen Wachstumsstapelfehler nach einer Sirtl-Ätzung an einer Bruchkante. Deutlich erkennbar ist der Keim an der Spitze der Stapelfehlerpyramide. Die Form der Ätzgrube (flach und rund), in der Literatur als "S"-pits oder "saucer"-pits bezeichnet, weist auf eine metallische Ausscheidung als Keim /10/ hin. Ebenso ist bekannt /10/, daß solche oberflächennahen Keime auch durch HCl-Ätzung im Epitaxiereaktor nicht vollständig beseitigt werden können und zu den genannten Wachstumsstapelfehlern führen.

In einem Versuch war die Entstehung von Wachstumsstapelfehlern in Abhängigkeit von verwendetem Reaktionsgas (Trichlorsilan TCS und Dichlorsilan DCS) untersucht worden /12/. Dabei konnten in diesem Versuch trotz HCl-Ätzung vor der Abscheidung mit DCS Stapelfehler

sichtbar gemacht werden. Durch Elektronenmikroskopie können diese kleinen Defekte zwar analysiert werden, sind aber nur durch schwierige Zielpräparation überhaupt erfassbar. Außerdem können beide Methoden kaum Aussagen über die elektrische Aktivität machen. Ein Meßverfahren, das ein relatives Maß für die kristalline Qualität von oberflächennahen und damit für hochintegrierte Schaltkreise entscheidenden Siliziumbereichen liefert, ist die Messung der Relaxationszeit von MOS-Kondensatoren /6/. Insbesondere die automatische Erfassung von Relaxationszeitverteilungen über die Siliziumscheibe erlaubt Aussagen über die laterale Defektverteilung; eine statistische Auswertung ergibt Häufigkeitsverteilungen. Die Scheibenpräparation für solche Untersuchungen ist denkbar einfach, nämlich Gateoxidation ganzflächig, Aluminiumbedampfung und Strukturierung der Aluminiumflecken. Abb. 7 zeigt ein typisches Meßprotokoll einer Scheibe mit inhomogener lateraler Verteilung der Relaxationszeiten, dabei bedeutet xxx ein System mit sehr kleiner ($< 0,5$ s) oder nicht mehr meßbarer Relaxationszeit. Am rechten unteren Teil ist ein Häufigkeitshistogramm aufgetragen. Abweichungen von einer Gaußverteilung geben einen Hinweis auf systematische, nicht statistisch verteilte Defekte oder bei mehreren Schwerpunkten möglicherweise auf verschiedene Fehlerursachen.

4.5 Qualitätsbeurteilung von Epitaxieschichten durch MOS-Relaxationszeitmessungen

Das in 4.4 beschriebene Verfahren wurde erfolgreich zur Beurteilung der kristallinen Qualität (dazu gehören auch Verunreinigungen) von Epitaxieschichten eingesetzt. In einer ersten Versuchsserie wurde die Abhängigkeit von der Scheibenfertigung bis zur Epitaxie (VMOS-Prozeß und OXIS-Prozeß) und der Scheibenbehandlung im Epitaxiereaktor untersucht. Das Ergebnis ist in Abb. 8 dargestellt. Der geringfügig schlechtere Mittelwert mit verstärktem

Tab. III: Relaxationszeit als Maß für Epitaxiequalität
- Abhängigkeit von der Scheibenvorbehandlung

Prozeßablauf:

Prozeßschritt	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
1. Standardreinigung	x	x	x
2. 0,6 µm Ätzabtrag im Epireaktor		x	x
3. Standardreinigung			x
4. 0,2 µm Ätzabtrag im Reaktor	x	x	x
5. Siliziumabscheidung	x	x	x
mittlere Relaxationszeit	380 sec	550 sec	220 sec

Mit dem Ziel, die mechanischen Spannungen an der Oxid-Nitrid-Kante näher zu untersuchen, wurden in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut Stuttgart Live-Topographiemessungen durchgeführt /4/. Das Ergebnis ist in Abb. 11 dargestellt und zeigt die Temperaturabhängigkeit der im Silizium feststellbaren Verzerrungen bei unterschiedlichem Maskenaufbau. Obwohl diese Messungen nach Ablösen des Nitrids durchgeführt wurden, lassen sie eine Abhängigkeit von der Dicke des Maskiernitrids erkennen.

Eine zweite Ursache für die Kantenspannung ist in der Volumenvergrößerung beim Aufwachsen des Isolationsoxids zu finden /28/. Diese Volumenvergrößerung führt auch zum Hochschieben des Oxids an der Kante und damit zur Ausbildung des Vogelkopfes. Wird nun das Isolationsoxid bei Temperaturen unterhalb der Fließgrenze des Oxids aufgewachsen, so hat die Volumenvergrößerung "intrinsische" Oxidspannungen zur Folge /31/, die nicht relaxieren können. Empirisch wurde das bereits früher gefunden. So entstehen weniger Oxidrandversetzungen, wenn die Isolationsoxidation bei höheren Temperaturen durchgeführt wird /32/. Als Beispiel zeigt Abb. 12 Topogramme von hochdruckoxidierten Scheiben bei 750°C und 950°C Oxidationstemperatur. Das Fließverhalten von Oxiden kann also die auftretenden Kantenspannungen mit beeinflussen. Mit Hilfe von Live-Topographieuntersuchungen /5/ wurde das Relaxieren der Verzerrungen im Siliziumkristall, die durch Oxidkanten induziert wurden, bei verschiedenen Temperaturen untersucht. Es zeigte sich, daß die Relaxationszeit einem Exponentialgesetz (bei Temperaturen $\geq 900^\circ\text{C}$) gehorcht und von der Strukturgeometrie abhängt. Es konnten Aktivierungsenergien bestimmt werden, die je nach Oxidationsverfahren unterschiedlich waren. So war die Aktivierungsenergie für das plastische Verformen eines feuchten Hochdruckoxids ($\nu_{\text{Ox}} = 800^\circ\text{C}$, 10 bar Sauerstoffdruck, Wasserstoffbrenner) nur etwa halb so groß wie die eines Normaldruckoxids ($\nu_{\text{Ox}} = 950^\circ\text{C}$, H_2O -Blubberer) gleicher Dicke.

Oxid-Nitridrand-Stapelfehler

Stapelfehler, deren Partialversetzung vom Emitterbereich bis zum Kollektor führt, können ebenso wie Versetzungen zu Diffusionspipes führen (Abb. 18). Ab und zu treten hohe Dichten solcher Oxid-Nitridrand-Stapelfehler auf (Abb. 19). Es wurde vermutet, daß Ätzmittelrückstände unter den überstehenden Nitridflügeln nach der Siliziumätzung (siehe Schema der Oxidisolationsherstellung) und Kontamination mit Verunreinigungen durch die Prozeßschritte zwischen Grabenätzung und Oxidationsprozeß die Ursache für die Stapelfehlerkeimbildung sind. Möglicherweise verhindern die Nitridflügel ein wirkungsvolles Spülen und Reinigen des Grabenrandes. In einem speziellen Experiment wurde daher unmittelbar nach der Grabenätzung ein dünnes Oxid aufgewachsen und im Grabenboden wieder weggeätzt. Abb. 20 zeigt das Ergebnis dieses Versuchs. Neben einer drastischen Senkung der Randstapelfehlerdichte wurde erreicht, daß der Keimpunkt des Stapelfehlers von der Siliziuminsel um die Breite des Oxidstreifens wegrückt. Durch eine weitere Verbreiterung des Oxidstreifens kann erreicht werden, daß die Partialversetzung des Stapelfehlers nicht mehr bis in den Emitter verläuft und eine Pipediffusion so ausgeschlossen wird.

5. Detailuntersuchung zur Entstehung nützlicher Kristallfehler

Im Abschnitt 4 wurde die Entstehung und Auswirkung schädlicher Kristallfehler behandelt und festgestellt, daß deren elektrische Aktivität mit zunehmendem Dekorationsgrad stärker wird /7/. Diese bevorzugte Anlagerung von Verunreinigungen an Kristallfehlern wird als Getterverfahren ausgenutzt. In den nicht aktiven Bereichen der Siliziumscheibe werden bewußt Kristallfehler erzeugt, die Verunreinigungen gettern und sauberere aktive Zonen bewirken. Häufig angewendete Verfahren sind Rückseitendiffusionen /34, 35/ oder -implantationen /36/, die Versetzungen und Stapelfehler erzeugen. Eine andere Möglichkeit zum Gettern ist zum

Tabelle IV:

Versuchsablauf zur Erzeugung von Sauerstoffausscheidungen

1. Reinigung
- 2.^x Damage-Ätzung
- 3.^x 60' Temperung in Stickstoff bei 900°C
4. Oxidation in H₂O-Dampf bei 1020°C,
erreichte Oxiddicke 0,5 µm
- 5.^{xx} Temperung in Stickstoff bei 1220°C
6. Epitaxie bei 1130°C, 2 µm Schichtdicke

^x Diese Prozeßschritte wurden nur bei einem Teil der Scheiben durchgeführt.

^{xx} Die Temperzeit betrug wahlweise 0,30 min, 180 min oder 360 min.

Dieser Vorgang wird unter dem Schlagwort "Denuding" /46/ in der Literatur behandelt und ist ein Hochtemperaturschritt, in dem Sauerstoff ausdiffundieren kann. Die Tiefe der denuded Zone ist von der Temperatur, der Temperzeit und der Gasatmosphäre, in der die Temperung durchgeführt wird, abhängig /46/. Eine typische Ausdiffusionstiefe bei 240 min in Stickstoff bei 1100°C und einer Ausgangskonzentration von $1,8 \cdot 10^{18} \text{ O/cm}^{-3}$ ist $15 \text{ }\mu\text{m}$ /46/.

5.2 Keimbildung für Sauerstoffausscheidungen

Wie alle anderen Kristallfehler bilden sich Sauerstoffausscheidungen nur dann, wenn geeignete Keime vorhanden sind. Die Diskussion um das Keimbildungsphänomen /53/ ist noch nicht abgeschlossen. So wird sowohl homogene Keimbildung durch Clusterbildung als auch heterogene Keimbildung durch Fremdatome wie z.B. Kohlenstoff /46/ angenommen. Auch andere Verunreinigungen können als Keime bei nachfolgenden Prozeßschritten zu Sauerstoffausscheidungen führen. In Abb. 24 sind im Röntgentopogramm nur in den Bereichen Sauerstoffausscheidungen zu erkennen, in denen Verunreinigungen eindiffundiert wurden (helle Kontraste im Topogramm). Ein effektives Gettern ist nur bei einer hohen Defektdichte möglich, die eine möglichst hohe Keimdichte voraussetzt. Die Keimbildung kann durch Temperung bei relativ niedrigen Temperaturen ($550 - 950^{\circ}\text{C}$) erfolgen. Neben dem Sauerstoffgehalt und der Temperatempertemperatur, die wesentlich die Keimbildungsrate bestimmen /52/, ist die Temperzeit ein entscheidender Parameter für die Keimdichte. Je niedriger die Temperatur, um so größer wird die Keimdichte. Allerdings ist bei 550°C und $1,1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Sauerstoffkonzentration erst nach 1000 Stunden Temperung mit einer Sättigung der Keimdichte zu rechnen /52/.

Röntgentopogramm keine Sauerstoffausscheidungen erkennen, hier war die Cu-Anreicherung im Volumen nur schwach angedeutet, ähnlich wie bei den Wacker-Scheiben.

Autoradiogramme in denen die Kupferverteilung über die Scheibenoberfläche sichtbar gemacht wurde, zeigten gegenüber dem Röntgentopogramm verschobene Ringstrukturen (Abb. 25). Dies läßt sich sofort anhand einer Sirtl-geätzten Bruchfläche (Abb. 26) erklären. Die Sauerstoffausscheidungen sind in Bändern angeordnet, die den sphärischen Wachstumsflächen beim Ziehen des Siliziumstabes entsprechen. Durch das Herausschneiden der Scheiben bleiben davon nur ringförmige Abschnitte übrig, die geneigt zur Oberfläche durch die Scheibe laufen /56/.

Im Röntgentopogramm wird die größte Dichte solcher Defekte - häufig durch Überlagerung mehrerer Bänder - sichtbar, im Autoradiogramm dagegen die Schnittkurven der Bänder mit der Scheibenoberfläche.

In Ergänzung zu diesen Untersuchungen wurden MOS-Relaxationszeitmessungen durchgeführt, die jedoch offensichtlich wegen der hohen Oberflächenkonzentrationen an Verunreinigungen schlechte Zeiten lieferten und in keinem Fall einen Zusammenhang zur Verteilung der im Röntgentopogramm erkennbaren Ausscheidungsverteilungen zeigten.

6. Vermeidung schädlicher und Erzeugung nützlicher Kristallfehler

Im Abschnitt 4 wurden Details der Kristallfehlerentstehung und deren schädlicher Einfluß auf die elektrischen Parameter der Bauelemente beschrieben. Gezeigt wurde die Wechselwirkung von Verunreinigungen und Kristallfehlern. So nimmt die elektrische Aktivität von Kristallfehlern mit ihrem Dekorationsgrad zu /7/. Andererseits sind sehr häufig Ausscheidungen metallischer Verunreinigungen Keime und Quellen für Kristallfehler.

Bei MOS-Schaltkreisen wirken die Kristallfehler direkt auf die elektrischen Parameter der Bauelemente ein.

tritt durch die Volumenvergrößerung bei der Oxidbildung auf. Hier wurde gezeigt /31/, daß durch Oxidationsbedingungen, die das viskoselastische Verhalten des Oxids bei erhöhten Temperaturen berücksichtigen, dieser Beitrag zu den Kräften entlang der LOCOS-Kante vermieden werden kann. Wesentliche Quellen für Oxid-Nitridrand-Versetzungen sind Gleitversetzungen, Stapelfehler, Verunreinigungs Ausscheidungen und damage. Alle diese Quellen lassen sich durch vorsichtige Prozeßführung, sorgfältiges Handtieren der Scheiben und erhöhte Sauberkeit z.B. durch geeignete Reinigungen, Halogenzusätze bei Hochtemperaturprozessen und gegebenenfalls Anwendung von Getterverfahren drastisch reduzieren. Wie aus der Abb. 15 zu sehen ist und wie sich aus dem Vergleich von Epi-OXIS- und 3 D- OXIS-Scheiben /1/ ergab, spielt die kristalline Qualität des Siliziums eine wesentliche Rolle für die Entstehung der Oxid-Nitridrand-Versetzungen. So tragen alle Maßnahmen, die zur Verbesserung der Epitaxieschichten führen auch zur Vermeidung dieser Versetzungen bei.

6.1.3 Oxidationsinduzierte Stapelfehler

Auch hier spielen die treibenden Kräfte - nämlich der Zwischengitteratomhaushalt - eine entscheidende Rolle. Oxidationen bei hohen Drücken und erniedrigten Temperaturen oder Halogenzusätze können hier einen wesentlichen Einfluß ausüben. Unter gewissen Bedingungen können solche Stapelfehler sogar wieder aufgelöst werden /58/. Als Keime für diese Kristallfehler wirken damage durch unvorsichtige Scheibenhantierung oder schlechte Ausheilung nach Implantationen und vor allen Dingen ausgeschiedene Verunreinigungen. Auch hier kann eine Cl-Zugabe bei der Oxidation eine Keimbildung und damit das Wachsen von Stapelfehlern verhindern.

Die Oxid-Nitridrand-Stapelfehler als eine besondere Art von oxidationsinduzierten Stapelfehlern entstehen durch Keimbildung unter dem überstehenden Nitrid nach der

Das beweist das weltweite Interesse an diesem Verfahren. Wesentliche Schritte der Scheibenbehandlung sind

- Denuding, d.h. Schaffung einer sauerstoffarmen Oberflächenzone in den Siliziumscheiben
- Keimbildung durch lange Temperung bei niedrigen Temperaturen (600 - 800°C)
- Ausscheidungsbildung bei Temperaturen > 1000°C.

Schließlich sollte noch auf die Gefahr hingewiesen werden, daß durch Auflösung von Sauerstoffausscheidungen und Diffusion von Sauerstoff bei ungeeigneter Prozeßführung in oberflächennahen aktiven Scheibenbereichen Kristallfehler erzeugt werden können. Es ist daher ganz wichtig, daß das Ausgangsmaterial mit Sauerstoff- und Kohlenstoffgehalt auf den Prozeß abgestimmt und der Prozeß auf dieses Material eingestellt werden muß.

Zum Abschluß muß noch bemerkt werden, daß trotz leistungsfähiger Getterverfahren die Wichtigkeit der Sauberkeit nicht stark genug betont werden kann.

7. Schlußbemerkung

Die vorliegende Arbeit wurde als Anschlußprojekt zu "Kristallfehler in hochintegrierten Schaltkreisen aus Silizium" durchgeführt und hatte das Ziel insbesondere Aspekte der Höchstintegration (VLSI) zu berücksichtigen. Es zeigte sich, daß die früheren Aussagen weiterhin gültig waren, sich aber die Schwerpunkte verlagerten. Ohne Zweifel ist der schädliche Einfluß von Kristallfehlern auf elektrische Parameter der Bauelemente umso größer je kleiner die Strukturen werden, andererseits helfen neuere Prozeßtechniken insbesondere die Absenkung der Prozeßtemperaturen bei der Vermeidung störender Kristalldefekte. So müssen die Einflüsse der verschiedenen Halbleitertechnologien auf die Kristallfehlerentstehung unter geänderten Bedingungen berücksichtigt und auch in der Zukunft intensiv untersucht werden. Daneben werden sicher

Literatur

- /1/ BMFT Forschungsbericht 403-7291-NT 665:
B.O. Kolbesen, K.R. Mayer, "Kristallfehler in hoch-
integrierten Schaltkreisen aus Silizium" (1979)
- /2/ K.V.Ravi, C.J. Varker und C.E.Volk, J.Electrochem.
Soc. 120, 533 (1973)
- /3/ K.V.Ravi, C.J. Varker, J. Appl. Phys. 45, 263 (1974)
- /4/ G.Franz, W. Hartmann, Appl. Phys. 23, 107 (1980)
- /5/ W. Hartmann, G. Franz, Appl. Phys. Lett. 37,1004(1980)
- /6/ H. Gückel, "Automatische Erfassung von Relaxations-
zeit-Verteilungen auf der Scheibe", Firmeninterne Notiz
vom 28.4.80, Abteilung WIS STL 1
- /7/ H. Strack, K.R. Mayer und B.O. Kolbesen, Solid State
Electron. 22, 135 (1979)
- /8/ 1. Zwischenbericht zu NT 947
- /9/ H. Aulig, Firmeninterner Laborbericht vom 1.9.80
- /10/ P.M.Petroff, L.E. Katz, A.Savage, Semiconductor
Silicon 1977, Ed. Howard R.Huff und Erhard Sirtl,
S.761-772
- /11/ Untersuchungsbericht R 451-51/80, KWU Erlangen,
Firmeninterner Analysebericht vom 22.4.80
- /12/ 2. Zwischenbericht zu NT 947
- /13/ J.A. Appels, E. Kooi, M.M. Paffen, J.J.H. Schatorjé,
W.H.C.G.Verkuijlen, Philips Res. Repts 25, 118 (1970)
- /14/ E. Kooi, J.G. van Lierop, W.H.C.G. Verkuijlen,
R. de Werdt, Philips Res. Repts 26, 166 (1971)
- /15/ D. Peltzer, W. Herndon, Electronics 44, 52 (1971)
- /16/ J. Graul, H. Kaiser, W. Wilhelm, H. Ryssel,
IEEE SC-10, 201(1975)
- /17/ H. Murrmann, Siemens Forschungs- und Entwicklungs-
berichte 5, 353 (1976)

- /36/ H.J. Geipel, W.K. Tice, IBM J. Res. Develop. 24, 310 (1980)
- /37/ P.M. Petroff, G.A. Rozgonyi, T.T. Sheng, J. Electrochem. Soc. 123, 565 (1976)
- /38/ K. Yamamoto, S. Kishino, Y. Matsushita, T. Iizuka, Appl. Phys. Lett. 36, 195 (1980)
- /39/ Y. Matsushita, S. Kishino, M. Kanamori, Japan. J. Appl. Phys. 19, L 101 (1980)
- /40/ J.R. Patel, K.A. Jackson, H. Reiss, J. Appl. Phys. 48, 5279 (1977)
- /41/ P.E. Freeland, K.A. Jackson, C.W. Lowe, J.R. Patel, Appl. Phys. Lett. 30, 31 (1977)
- /42/ H. Takaoka, J. Oosaka, N. Inoue, Japan. J. Appl. Phys. 18 Suppl., 179 (1979)
- /43/ W. Patrick, E. Hearn, W. Westdorp, A. Bohg, J. Appl. Phys. 50, 7156 (1979)
- /44/ C. Plougonven, B. Leroy, J. Arhan, A. Lecuiller, J. Appl. Phys. 49, 2711 (1978)
- /45/ K. Tempelhoff, F. Spiegelberg, R. Gleichmann, D. Wruck, phys. stat. sol. (a) 56, 213 (1979)
- /46/ R.A. Craven, Semiconductor Silicon 1981, Eds. H.R. Huff, R.J. Kriegler und Y. Takeishi, The Electrochem. Soc. Pennington, N.J., p. 254
- /47/ F. Shimura, H. Tsuya, T. Kawamura, J. Appl. Phys. 51, 269 (1980)
- /48/ A. Staudinger, J. Appl. Phys. 49, 3870 (1978)
- /49/ T.Y. Tan, E.E. Gardner, W.K. Tice, Appl. Phys. Lett. 30, 175 (1977)
- /50/ K.H. Yang, H.F. Kappert, G.H. Schwuttke, phys. stat. sol. (a) 50, 221 (1978)
- /51/ A. Murgai, Semiconductor Silicon 1981, Eds. H.R. Huff, R.J. Kriegler und Y. Takeishi, The Electrochem. Soc. Pennington, N.J., p. 113

Herrn Prof. Queisser und Herrn Dr. Hartmann vom Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, danken wir für die Zusammenarbeit, die die Live-Topographiemessungen ermöglichte. Die TEM-Untersuchungen wurden von Herrn Dr. Packeiser, Siemens AG, in Zusammenarbeit mit Herrn Phillip, Max-Planck-Institut für Metallforschung Stuttgart, Institut für Physik (Prof. Seeger), durchgeführt, wofür wir Ihnen herzlich danken. Herrn Haas und Herrn Lichti, KWU R 451 Erlangen, danken wir für die radiochemischen Aktivierungsanalysen, Frau Zeller und Herrn Burger für die REM-Untersuchungen. Nicht zuletzt bedanken wir uns bei allen Mitarbeitern unseres Hauses und insbesondere bei denen aus unserer Abteilung, die durch ihre Unterstützung unsere Arbeiten erst ermöglichten.