

Untersuchung von Defekten in Si und GaAs nach Ionenbestrahlung

L. Palmethofer, J. Reisinger, T. Schmidt
Institut für Experimentalphysik, Johannes Kepler Universität Linz,
4040 Linz

1. Einleitung

Die Ionenimplantation hat in der Halbleitertechnologie zwei verschiedenartige Anwendungen. Zum einen wird sie eingesetzt zur örtlich selektiven Dotierung des Halbleiters mit Fremdatomen. Dabei ist man am richtigen Einbau der Dotieratome in das Kristallgitter interessiert. Die bei der Ionenimplantation auftretenden Defekte wirken störend und müssen durch geeignete Temperverfahren (thermisches Ausheilen, Kurzzausheilen) nach der Implantation beseitigt werden.

Andererseits können die bei der Ionenimplantation auftretenden Defekte technologisch genutzt werden. Die Gitterdefekte stellen tiefe Störstellen dar, die als Rekombinationszentren oder als Haftstellen für Ladungsträger wirken. Bei dieser Anwendung der Ionenimplantation verwendet man üblicherweise leichte Ionen und man spricht im Gegensatz zur Ionenimplantation als Dotiertechnologie in diesem Fall von "Ionenbestrahlung".

In der Siliciumtechnologie wird die Bestrahlung mit leichten Ionen (H, He) zur Lebensdauereinstellung und Schaltzeitverkürzung bei Dioden und Transistoren eingesetzt. Im Gegensatz zur konventionellen Au- oder Pt-Diffusion bietet die Bestrahlungstechnik (Elektronen, Ionen) den Vorteil sehr guter Reproduzierbarkeit und den Vorteil eines Niedertemperaturprozesses. Die Bestrahlung wird erst nach allen Hochtemperaturprozessen durchgeführt, zur Erzielung optimaler Bauelemente-Parameter kann noch ein Tempersschritt bei niedrigen Temperaturen erfolgen. Die Ionenbestrahlung bietet darüber hinaus die Möglichkeit, eine räumlich inhomogene Verteilung der Rekombinationszentren zu erzielen [1]–[3].

In der GaAs-Technologie wird die Ionenbestrahlung zur örtlich selektiven Erzeugung hochohmiger Gebiete in elektrisch leitendem Material eingesetzt. Dies stellt die Basis für die Bauelemente-Isolation dar, da wegen des Fehlens geeigneter Oxide bei III-V Halbleitern die aus der Si-Technologie bekannten Techniken nicht eingesetzt werden können. Bei den meisten Bauelementen aus III-V Halbleitern befinden sich die elektrisch leitenden Gebiete in einer dünnen Oberflächenschicht ($<1\mu\text{m}$) auf einem semiisolierenden Substrat. Zur Isolation der Bauelemente voneinander muß die leitende Oberflächenschicht durch Mesa-Ätzen entfernt werden oder durch Ionenbestrahlung semiisolierend gemacht werden. Die Ionenbestrahlung hat gegenüber der Mesa-Ätzung den Vorteil, daß die Planarität erhalten bleibt [4].

Bei all den genannten Anwendungen der Ionenimplantation ist eine genaue Kenntnis der Eigenschaften von Implantationsdefekten und ihres Temperverhaltens unerlässlich. Im folgenden sollen einige Ergebnisse von Defektuntersuchungen in Si und GaAs nach Ionenbestrahlung näher behandelt werden.

Die Defekte stellen elektronisch tiefe Störstellen dar mit Niveaus in der Energielücke des Halbleiters. Sie sind daher ausgezeichnet durch Störstellenspektroskopie (deep level transient spectroscopy - DLTS) nachweisbar.

2. Defekte in Silicium nach Bestrahlung mit leichten Ionen

Trifft ein hochenergetisches Ion auf einen Festkörper wie Silicium auf, so wird es durch Wechselwirkung mit den Atomen und Elektronen des Targets abgebremst. Bei Stößen mit den Targetatomen (nukleare Abbremsung) wird soviel Energie übertragen, daß die gestoßenen Atome ihrerseits weitere Targetatome stoßen und von den Gitterplätzen verlagern können. Es entsteht eine Stoßkaskade mit einer großen Anzahl von Leerstellen und Zwischengitteratomen (primäre Defekte). Die primären Punktdefekte bilden in der Folge Komplexe mit anderen Defekten (z.B. Doppelleerstelle), mit Dotieratomen (z.B. Phosphor-Leerstellen-Paar) oder Verunreinigungen (z.B. Sauerstoff-Leerstellen-Paar).

In n-typ Si treten nach Ionenimplantation drei dominante Signale im DLTS-Spektrum auf mit Energieniveaus bei $E_c-0,17\text{eV}$, $E_c-0,21\text{eV}$ und $E_c-0,41\text{eV}$. Diese Niveaus werden der Reihe nach dem Sauerstoff-Leerstellen-Paar (O.V), der Doppelleerstelle (V.V) und einer Kombination aus Doppelleerstelle und Phosphor-Leerstellen-Paar (P.V) zugeordnet. Diese Defekte sind unmittelbar mit den Strahlenschäden verknüpft, sie treten nach jeder Art von Bestrahlung mit energetischen Teilchen (Elektronen, Ionen, Neutronen) auf. Sie werden auch als leerstellen-korrelierte Defekte bezeichnet. Neben diesen leerstellen-korrelierten Defekten können nach Ionenbestrahlung weitere Defekte auftreten, die für das implantierte Ion charakteristisch sind. In H-bestrahltem Silicium liegt der dominanteste dieser Ionen-korrelierten Defekte bei $E_c-0,30\text{eV}$ [5]. Nach Bestrahlung mit He-Ionen treten nur leerstellen-korrelierte Defekte auf.

Im folgenden wird über eine systematische Untersuchung von Defekten in H-, D- und He-bestrahltem n-typ Silicium kurz berichtet. Die Si-Proben hatten verschiedene Phosphordotierung und verschiedenen Sauerstoffgehalt (FZ-Si, CZ-Si). Die gewonnenen Ergebnisse sind sowohl für ein grundlegendes Verständnis von Implantationsdefekten als auch für die Anwendung interessant [6], [7].



Abb.1: Links: Profil des Defektes E(0.17), (O.V)-Paar, in verschieden dotierten Si-Proben nach Bestrahlung mit 320 kV H. Rechts: Theoretische Ionen- und Leerstellenverteilung für 320 kV H-Implantation in Si.

Genauere Messungen der Defektprofile und Vergleich mit Computersimulationen der Ionen- und Leerstellenverteilung zeigen, daß das Maximum der Profile von leerstellen-korrelierten Defekten mit der Leerstellenverteilung und nicht mit der Ionenverteilung zusammenfällt. Auch die Profilform der Defekte entspricht dem Leerstellenprofil, wie in Abb.1 für den Defekt E(0,17) gezeigt wird. Die Breite der Defektprofile stimmt aber i.a. nicht mit der Breite

der Leerstellenverteilung überein, sondern hängt stark von der Dotierung der Si-Proben ab. Die Verbreiterung der Defektprofile ist für alle leerstellen-korrelierten Defekte ähnlich; je niedriger die Ladungsträgerkonzentration, umso breiter ist das Profil.

Obwohl die Sauerstoffkonzentration unterschiedlicher Proben um drei Größenordnungen verschieden ist, zeigen Defektprofile keine Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration. Auch die Phosphorkonzentration scheidet als direkter Parameter aus, da die Verbreiterung des (O.V)- und des (P.V)-Defektes analog verläuft. Damit bleibt die Fermienergie als relevanter Parameter. In Abb.2. ist die Maximalkonzentration und die Profilbreite für leerstellen-korrelierte Defekte nach H-Bestrahlung als Funktion der Fermienergie aufgetragen. Die Maximalkonzentration steigt linear mit der Fermienergie, die Profilbreite steigt stark mit abnehmender Fermienergie. Die Defektprofile sind gegenüber der Leerstellenverteilung offenbar diffusionsverbreitert. Die Verbreiterung hängt aber nicht von der Temperatur ab. Bestrahlungen bei niedrigen (15K) und bei hohen Temperaturen (480K) liefern dasselbe Ergebnis wie bei Raumtemperatur.



Abb.2: Abhängigkeit der Maximalkonzentration (a) und der Halbwertsbreite (b) der Defekte E(0.17), E(0.21) und E(0.41) in H-bestrahltem Si von der Fermienergie. Die strichlierte Linie in (b) zeigt die Halbwertsbreite der theoretischen Leerstellenverteilung.

Zur Erklärung der Profilverbreiterung wurde ein Modell vorgeschlagen, das auf feldunterstützter Diffusion beruht. Die in einer Stoßkaskade primär erzeugten Leerstellen sind tiefe Störstellen mit Niveaus in der Energielücke. In n-typ Silicium können die Leerstellen Elektronen aus dem Leitungsband einfangen und negativ geladen werden. Dadurch wird die freie Ladungsträgerkonzentration im Kaskadenvolumen reduziert, es kommt zur Ausbildung eines

internen $n^{+}n^{+}$ -Überganges. Das dem $n^{+}n$ -Übergang inhärente elektrische Feld ist zum Kaskadenzentrum gerichtet. Die negativ geladenen Störstellen diffundieren mit Unterstützung des elektrischen Feldes aus dem Kaskadenvolumen heraus. Schließlich werden die Leerstellen von anderen Defekten bzw. Verunreinigungsatomen eingefangen, was zur Bildung der beobachteten Defekte führt. Ausgehend von der Zahl der in einer Stoßkaskade erzeugten Leerstellen kann man durch die Lösung der Poissongleichung die Weite w der Raumladungszone berechnen und als Abschätzung für die Diffusionslänge heranziehen. Für alle gemessenen Profile nach H-, D- und He-Bestrahlung wurde ein Verhältnis b/w zwischen 0,3 und 0,5 festgestellt (b : Profilverbreiterung). Bedenkt man, daß durch die Diffusion (und durch Rekombination) der $n^{+}n$ -Übergang abgebaut wird, ist dieses Ergebnis recht gut.

Um das Modell zu testen, wurde die Ionenimplantation in die Raumladungszone eines Schottkykontakts durchgeführt. Dies wird durch Anlegen einer negativen Vorspannung erreicht (-10V). In der Raumladungszone sind keine freien Ladungsträger vorhanden, um die Leerstellen negativ zu laden. Es bildet sich kein $n^{+}n$ -Übergang aus und feldunterstützte Diffusion kann nicht auftreten. Es sollte daher keine Profilverbreiterung auftreten, was auch tatsächlich beobachtet wird.

Der wasserstoff-korrelierte Defekt E(0,30) zeigt ein zunächst recht unverständliches Verhalten. Auch dieses Verhalten wurde weitgehend aufgeklärt, der Defekt wurde darüber hinaus als (H.V)-Paar identifiziert [7].

3. Defekte in GaAs nach Ionenbestrahlung

In Verbindungen gilt über die Erzeugung primärer Defekte zunächst dasselbe wie in einatomaren Festkörpern. Verlagerungen finden aber nun in beiden Untergittern (z.B. As- und Ga-Untergitter) statt. Beim Ionenbeschuß werden auf die verschiedenen schweren Gitteratome unterschiedlich hohe Energien übertragen, was zu lokalen Störungen der Stöchiometrie führt. Die Möglichkeiten für Defektreaktion werden dadurch stark erhöht, insbesondere können sich auch Antistrukturdefekte (z.B. As auf Ga-Platz = EL2-Defekt) ausbilden.

Bei der Dotierung durch Ionenimplantation sollen während des anschließenden Ausheilens die verlagerten Gitteratome wieder auf ihre Plätze zurückdiffundieren. Dies ist bei III-V Verbindungen aufgrund der geringen Diffusionslängen nicht immer möglich. Es bleibt daher ein Reststrahlenschaden bestehen, welcher negative Auswirkungen auf die Aktivierung der implantierten Dotieratome hat. Man ist daher bestrebt, den Strahlenschaden bei der Implantation gering zu halten, insbesondere eine Amorphisierung des Gitters zu vermeiden. Dies bedingt die Verwendung leichter Dotieratome, z.B. Si für n-Dotierung und Be zur p-Dotierung. Aber auch dann ist beim Ausheilen ein defektfreier Zustand nicht zu erreichen.

Ein Beispiel ist in Abb.3 zu sehen. Nach einem Ausheilschritt bei 800°C sind die implantierten Si-Atome im GaAs weitgehend aktiviert, es ist aber noch eine hohe Konzentration an EL2 Defekten vorhanden. Durch Ausheilen bei höheren Temperaturen kann die durch Implantation hervorgerufene EL2-Konzentration zunächst verringert werden, gleichzeitig steigt aber die durch den Ausheilprozeß hervorgerufene EL2-Konzentration so stark an, daß Ausheilen oberhalb einer bestimmten Temperatur mehr Defekte erzeugt als beseitigt. Die durch den Ausheilprozeß bedingte Defektkonzentration ist stark von der beim Ausheilen verwendeten Schutzschicht abhängig. Si_3N_4 oder SiO_xN_y ist wesentlich günstiger als SiO_2 . Dies hängt mit der unterschiedlichen Durchlässigkeit der Schutzschicht für Ga-Atome zusammen [8].



Abb.3: EL2-Konzentration in Si-implantiertem GaAs (volle Linie) und in homogen Si-dotiertem GaAs (strichliert) als Funktion der Ausheiltemperatur (10 s RTA). Links: SiO₂-Schutzschicht, rechts: SiO_xN_y-Schutzschicht.

Für die Bauelemente-Isolation durch Ionenbestrahlung werden üblicherweise leichte Ionen wie H, B, oder O verwendet. Diese Elemente sind in GaAs ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) chemisch nicht aktiv, die Ionenbestrahlung verursacht vielmehr aufgrund des Strahlenschadens tiefe Störstellen, welche freie Ladungsträger einfangen. Bei den Betriebstemperaturen der Bauelemente werden die tiefen Zentren thermisch noch nicht ionisiert. Der durch Implantation bei Raumtemperatur erreichbare Isolationswiderstand kann durch anschließendes Tempern bei einigen 100°C noch um ein bis zwei Größenordnungen erhöht werden (Abb.4). Bei noch höheren Ausheiltemperaturen sinkt der Widerstand des ionenbestrahlten Materials wieder auf den ursprünglichen Wert. Letzteres Verhalten ist klar, bei den höheren Temperaturen heilen die durch Strahlenschaden erzeugten tiefen Niveaus aus. Weniger klar ist der zunächst beobachtete Anstieg des Isolationswiderstandes. Es wird angenommen, daß unmittelbar nach der Implantation das Material so stark strahlengeschädigt ist, daß Hopping-Leitung auftreten kann. Erst nach leichtem Ausheilen wird eine optimale Defektdichte und maximaler Isolationswiderstand erreicht.

Über die durch die Bestrahlung auftretenden Defekte ist trotz der technologischen Relevanz des Verfahrens noch recht wenig bekannt [4], [9]. Ein Programm zur Untersuchung der Defekte, bei dem außer DLTS-Messungen auch Photolumineszenz eingesetzt werden soll, ist im Gange.

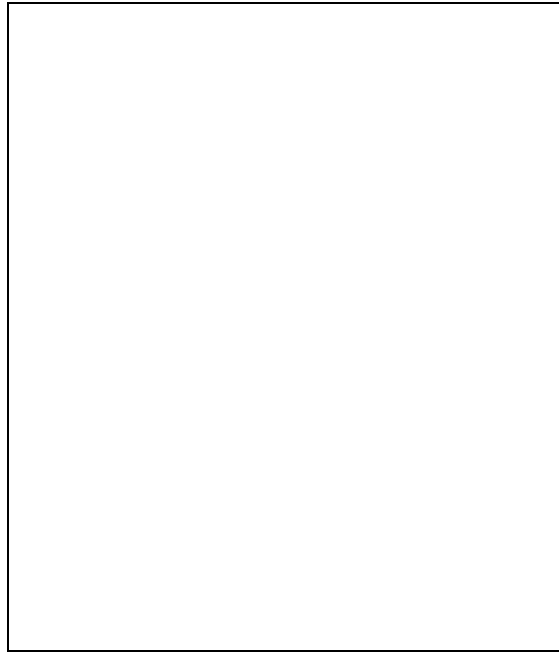


Abb.4: Thermische Stabilität von hochohmigen Schichten, hergestellt durch H-, B- und O-Bestrahlung von GaAs. (Nach Ref. 4).

Literaturverzeichnis

- [1] S.D.Brotherton, P. Bradley, J. Appl. Phys. 53, 5720 (1982)
- [2] L. Palmetshofer, T. Fromherz, AEÜ 44, 194 (1990)
- [3] M.W. Hüppi, J. Appl. Phys. 68, 2702 (1990)
- [4] S.J. Pearton, Mat. Sci. Reports 4, 315 (1990)
- [5] K. Irmischer, H. Klose, K. Maass, J. Phys. C 17, 6317 (1984)
- [6] J. Reisinger, L. Palmetshofer, Appl. Phys. Lett. 59, 3583 (1991)
- [7] L. Palmetshofer, J. Reisinger, J. Appl. Phys. 72, 2167 (1992)
- [8] L. Palmetshofer, J. Kastner, K. Lübke, Nucl. Instr. Methods B59/60, 1081 (1991)
- [9] D.W.E. Allsopp, Solid State Phenomena 182, 211 (1988)