



(12) Wirtschaftspatent

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1 Patentgesetz

(19) **DD** (11) **227 828 A1**

4(51) H 01 L 21/268
H 01 L 21/44

AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21) WP H 01 L / 265 773 0

(22) 30.07.84

(44) 25.09.85

(71) Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, 9010 Karl-Marx-Stadt, PSF 964, DD

(72) Lippmann, Hans, Prof. Dr. sc. nat.; Häßner, Alfred, Dr. Ing. habil.; Temmler, Dietmar, Dr.-Ing.; Wieser, Egbert, Dr. rer. nat. Dr. sc. nat.; Urwank, Peter, Dr. rer. nat., DD

(54) Verfahren zur thermischen Behandlung von mikroelektronischen Schichtsystemen

(57) Das Verfahren zur thermischen Behandlung von mikroelektronischen Schichtsystemen findet Anwendung in der VLSI-Technik, vorwiegend für die Metallisierung und Kontaktierung. Ziel und Aufgabe der Erfindung bestehen darin, eine homogene, schnelle, großflächige thermische Behandlung von mikroelektronischen Schichtsystemen zur Erzielung hochwertiger, VLSI-gerechter Eigenschaften bereitzustellen. Erfindungsgemäß wird die Aufgabe gelöst, indem großflächig ein Halbleitersubstrat mit einem aufgetragenen mikroelektronischen Schichtsystem einem oder mehreren inkohärenten elektromagnetischen Strahlungsimpulsen, vorzugsweise des sichtbaren und nahen IR-Bereiches, ausgesetzt wird, deren Dauer der Wärmediffusionszeit durch das Halbleitersubstrat entspricht und ein oder mehrere verschiedene thermische Prozesse ausgelöst werden.

Verfahren zur thermischen Behandlung von mikroelektronischen Schichtsystemen

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur thermischen Behandlung von mikroelektronischen Schichtsystemen mittels elektromagnetischer Strahlung, insbesondere für die Metallisierung und Kontaktierung in der VLSI-Technik.

Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

Im Zusammenhang mit der Herstellung von Halbleiterbauelementen kleiner Dimensionen und von integrierten Schaltkreisen hoher Packungsdichte entstehen qualitativ neue Anforderungen an die Werkstoffe und Eigenschaften der mikroelektronischen Schichtsysteme sowie ihre Herstellungs- und Behandlungsverfahren.

Es ist bekannt, daß durch geeignete Temperbehandlung vorher abgeschiedener Schwermetall-Silicium-Schichtkombinationen (Sandwich bzw. alternierende Schichtfolgen) oder entsprechender Mischschichten die Herstellung von Schwermetallsilicidschichten möglich ist. Die i. a. verwendeten Temperzeiten im Bereich zwischen ca. 10 min und 1 h und die zulässigen Temperaturen $\leq 1000^\circ\text{C}$ schränken die Anwendbarkeit derartiger Tempervverfahren in der VLSI-Technik zunehmend ein.

Ähnliche Probleme treten bei der üblichen Temperung anderer Substanzen des vorliegenden Schichtsystems bzw. des darunterliegenden bulk-Si auf.

Einen möglichen Ausweg stellt hier der Übergang zur thermischen Kurzzeitbehandlung dar.

Versuche, die Silicierung im Schmelzregime mittels Laser-Impulse (Einwirkungszeiten 10^{-9} - 10^{-7} s) zu realisieren, führten zu Inhomogenitäten der Silicidschicht (Gemische verschiedener Silicidphasen, Segregationen, zelluläre Strukturen, Oberflächenerscheinungen, die mit dem vorübergehenden Aufschmelzen im Zusammenhang stehen; G.J. van Gorp et al. Appl. Phys. Lett. 35, 273 (1979)). Die gleichen Nachteile besitzt die Elektronen- (G. Majni et al., Vakuum 32, 11 (1982)) und die Ionenimpulsbearbeitung (L.J. Chen et al., Appl. Phys. Lett. 40, 595 (1982)) in diesem Bearbeitungsregime.

Definierte einphasige Silicidschichten konnten dagegen durch Festphasenreaktionen mit Laser- und Elektronenstrahl (T. Shibata et al., J. Electrochem. Soc. 128, 637 (1981)) für spezielle Schichtsysteme erreicht werden. Vorzugsweise wird dabei die Si-Scheibe mit dem Laser- oder Elektronenstrahl abgerastert, wobei die lokale Einwirkungszeit im ms-Bereich liegt.

Bei den genannten Lösungswegen im Schmelz- und Festphasenregime wird jedoch die Strahlungsenergie nur in einer oberflächenschicht von einigen μm deponiert. Das führt zu unterschiedlichen Energiedeponierungen in Abhängigkeit vom Schicht- und Substratmaterial und seiner Dotierung und Strukturierung. Insbesondere verursacht dies bei der Anwendung von Lasern bei Schichtsystemen mit unterschiedlichem Reflexionsgrad, aus denen sich üblicherweise die Bauelementestrukturen aufbauen, Interferenz- und Reflexionserscheinungen und damit die genannten unterschiedlichen Energiedeponierungen (C. Mill Proc. "Lasereffects in ion implanted Semiconductors", Catania, Italien 1978).

Eine Antireflexionsschicht (T. Shibata, s.o.) verbesserte die Situation, stellt aber zumindest einen zusätzlichen Verfahrensschritt dar. Bei Anwendung von Elektronenstrahlen erfordern die Vakuumbedingungen ebenfalls einen zusätzlichen Aufwand. Außerdem besteht in diesem Fall die Gefahr der Erzeugung von Strahlenschäden (speziell an empfindlichen Grenzflächen), die eine zusätzliche Ausheilbehandlung erfordern.

Zur Silicierung mittels thermischer Kurzzeitbehandlungen im Bereich weniger Sekunden, bei denen für die Energiedeponierung inkohärente Lichtquellen oder Wärmestrahler eingesetzt werden können, liegen bisher nur wenige Informationen vor (D.F. Downey, Solid State Technology (1982), 87). Gegenüber der Laser- und Elektronenbestrahlung bestehen Vorteile in bezug auf die Erreichung der Schichthomogenität. Mit Problemen bei der Erhaltung der in vorhergehenden Verfahrensschritten erzeugten Dotierungsprofile muß wegen der schon beachtlichen Behandlungszeiten gerechnet werden. Es muß auch ein merklicher Einfluß der Atmosphäre in Betracht gezogen werden, dessen Beseitigung einen zusätzlichen Aufwand erfordert.

Ziel der Erfindung

Das Ziel der Erfindung ist eine technologisch einfache thermische Behandlung von mikroelektronischen Schichtsystemen zur Erzielung hochwertiger, VLSI-gerechter Eigenschaften.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur homogenen, schnellen, großflächigen thermischen Behandlung von auf Halbleitersubstraten aufgebracht, aus Elementen, Verbindungen oder Gemengen bestehenden dünnen Schichten als Bestandteil eines Schichtsystems auf dotiertem Halbleitergebiet, insbesondere für die Metallisierung und Kontaktierung, zu schaffen, das eine unerwünschte Beeinflussung der Ergebnisse vorhergehender Bearbeitungsschritte vermeidet.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe gelöst, indem großflächig ein Halbleitersubstrat mit einem aufgetragenen mikroelektronischen Schichtsystem einem oder mehreren inkohärenten elektromagnetischen Strahlungsimpulsen, vorzugsweise des sichtbaren und nahen IR-Bereiches, ausgesetzt wird, deren Dauer der Wärmediffusionszeit durch das Halbleitersubstrat entspricht und ein oder mehrere verschiedene thermische Prozesse ausgelöst werden.

Die elektromagnetische Strahlung wird in der Oberflächenschicht absorbiert und in Wärme umgesetzt, ohne daß hierbei Schmelzen an irgendeiner Stelle auftritt.

Die Dauer des Strahlungsimpulses t ist gemäß

$$t \geq d^2/D \quad (1)$$

zu wählen. Hierbei sind d die Dicke des Substrats und D die über die Temperatur gemittelte Temperaturleitfähigkeit des Substrats. Die Einhaltung dieser Vorschrift ermöglicht die homogene Verteilung der zugeführten Energie in der kürzest möglichen Zeit. Dadurch werden unerwünschte Rückwirkungen auf die Ergebnisse vorhergehender Teilschritte des Fertigungsprozesses, besonders laterale und vertikale Verschiebungen von Konzentrationsprofilen vermieden.

Die homogene Verteilung der zugeführten Energie bietet den weiteren Vorzug, mehrere notwendige thermische Behandlungen für aufeinanderfolgende Schichten des Schichtsystems durch einen Strahlungsimpuls zu realisieren. Durch diesen kann man in mindestens einer der Schichten eine oder mehrere der folgenden Veränderungen durch die Aktivierung kristallographischer Umwandlungen und/oder chemischer Reaktionen erreichen:

- Umwandlung amorpher oder teilkristalliner Bestandteile einer Verbindung oder eines Gemisches zweier oder mehrerer Komponenten in eine kristalline Phase
- Modifikationswechsel einer kristallinen Phase
- Umwandlung einer noch unbeständigen kristallinen Phase oder eines Phasengemisches in eine beständige Phase.

Im Ergebnis einer oder mehrerer solcher Veränderungen wird zusätzlich die herstellungsbedingte Defektdichte weitgehend beseitigt, erfolgt eine Schichthomogenisierung und werden die elektrischen Parameter verbessert und stabilisiert. Weiter kann der elektrische Kontakt zwischen jeweils zwei Schichten mit leitendem oder halbleitendem Charakter verbessert werden. Gleichzeitig wird für das durch Gl. (1) definierte Bearbeitungsregime eine an sich bekannte Ausheilung von Strahlenschäden und Dotantenaktivierung im halbleitenden Substrat oder in anderen halbleitenden Schichten bewirkt.

Ein wesentlicher Vorzug des Verfahrens besteht auch darin, daß die Bestrahlung von der Substratrückseite erfolgen kann, deren optische Eigenschaften in der Regel homogener als auf der Prozeßseite sind.

Ein weiterer Vorzug des Verfahrens besteht darin, daß bekannte elektromagnetische Strahlungsquellen bereitgestellt und in einer Bestrahlungskammer unter Verwendung von Reflektoren angeordnet werden, so daß die Bestrahlung mit geringer Standardabweichung und guter Reproduzierbarkeit großflächig das gesamte Substrat erfaßt. Bezeichnet man mit P die großflächig absorbierte auf die Fläche bezogene Leistung, so ergibt sich für den Zusammenhang zwischen der eingebrachten Energiedichte $\int_0^t P \cdot dt'$ und der erreichten Maximaltemperatur $T_{\max}$ genähert der Zusammenhang

$$\int_0^t P \, dt' = d \int_{T_0}^{T_{\max}} c \, \varrho \, dT \quad (2)$$

Hier ist c die mittlere spezifische Wärme des Substratmaterials, ϱ dessen Dichte und T_0 die Temperatur vor der Behandlung.

Die Anwendung von Gl. (1) führt zu hohen Geschwindigkeiten des Temperaturanstiegs bzw. im Anschluß an die homogene Erhitzung auch des Abfalls der Substrattemperatur. In solchen Fällen, wo die Gefahr des Entstehens unzulässig hoher mechanischer Spannungen oder von Defekten vorhanden ist, kann dem durch eine großflächige Vor- und/oder Nachheizung be-

gegnert werden. Zweckmäßigerweise legt man die Vor- und/oder Nachheizung in einen solchen Temperaturbereich, in dem gleichzeitig keine kristallographischen Umwandlungen, chemische Reaktionen und/oder Diffusionsvorgänge mit merklicher Geschwindigkeit ablaufen. Bei Anwendung der Vorheizung wird die durch Gl. (2) gegebene Energiedichte anteilig erniedrigt, was auch zu einem schonenderen Betrieb der Strahlungsquellen genutzt werden kann.

Wegen der durch Gl. (1) festgelegten kurzen Bearbeitungszeit wird die Gefahr der Probenkontamination durch die in der Bestrahlungskammer enthaltenen Restverunreinigungen verringert und sogar unter einschränkenden Forderungen ein Verzicht auf Vakuum oder Schutzgas möglich.

Es ist auch möglich, mehrere Energieimpulse in kurzem zeitlichem Abstand nacheinander auf die Probe einwirken zu lassen. Als vorteilhaft hat sich die Verwendung einer Blitzlampenanlage zur Erzeugung der elektromagnetischen Strahlungsimpulse erwiesen.

Die vorliegende Erfindung läßt sich unter Nutzung der beschriebenen Vorzüge auf die thermische Behandlung von Leitbahn- und Kontaktsystemen der VLSI-Technik anwenden, die Silicide oder - in Kombination mit Poly-Si - Polycide zu ihrer Realisierung auf Si-Substraten vorteilhaft ausnutzt. Für die hochintegrierte MIS-Technik sind dabei die Schwermetalldisilicide der Elemente Mo, W, Ta und Ti von besonderem Interesse. Zunächst ist es notwendig, auf Si eine dünne Schicht des Schwermetalls oder eine alternierende Schichtfolge Schwermetall/Si oder eine entsprechende Mischschicht mit den für die Mikroelektronik üblichen Verfahren auf dem bereits bearbeiteten Si-Substrat abzuschcheiden. Das durch Gl. (1) definierte Bestrahlungsregime gestattet, mit einer durch Gl. (2) grob abgesteckten Energiedichte die Silicierung vorzunehmen oder zu vollenden. Durch diese Behandlung stellen sich die vorteilhaften elektrischen Eigenschaften des MoSi_2 , WSi_2 , TaSi_2 oder TiSi_2 und eine geringe Defektdichte ein,

und es entsteht die notwendige Stabilität gegenüber nachfolgenden technologischen Teilschritten bzw. für eine hohe Betriebslebensdauer und -zuverlässigkeit.

Der Aufbau des gesamten Leitbahn- und Kontaktsystems erfordert leitende (Schwermetallsilicid, Schwermetallpolycid) und isolierende (z.B. SiO_2) Schichten, die z. T. mit dem Halbleitersubstrat (S/D-Gebiete) und untereinander über Durchführungen (Vias) kontaktiert sind. Es ist ein Vorzug der vorliegenden Erfindung, daß durch Wahl einer geeigneten Energiedichte auch mehrere Ebenen gleichzeitig durch einen Strahlungsimpuls behandelt werden können, wobei eine unzulässige Beeinflussung der Lage der pn-Übergänge, z. B. in den S/D-Gebieten vermieden wird.

Ausführungsbeispiel

Die Erfindung soll an zwei Ausführungsbeispielen näher erläutert werden.

Im ersten Beispiel soll eine Leitbahnebene auf der Basis von Molybdändisilicid (MoSi_2) hergestellt werden. Dazu werden auf (100)-Si nacheinander mit bekannten Verfahren hergestellt: $0,15\text{ }\mu\text{m}$ thermisch oxydiertes SiO_2 , $0,3\text{ }\mu\text{m}$ CVD-Poly-Si sowie $0,43\text{ }\mu\text{m}$ einer alternierenden Schichtfolge aus gesputterten Mo- und Si-Schichten der Dicke von jeweils 10 bis 20 nm. Dabei entspricht das Verhältnis von Mo/Si der Stöchiometrie des MoSi_2 .

Die Silicierung erfolgt durch Bestrahlung in einer Blitzlampenapparatur von der unbeschichteten Rückseite des Substrats.

Mit der im Lampenfeld umgesetzten elektrischen Energie von 65 kJ wird am Ende des Lichtimpulses (10 ms) im Si-Substrat mit einer Scheibendicke von $300\text{ }\mu\text{m}$ eine homogene Maximaltemperatur von ca. $1400\text{ }^\circ\text{C}$ erreicht. Die absorbierte Energiedichte ist $135 \pm 7\text{ J/cm}^2$.

Dabei wird einphasiges tetragonales MoSi_2 mit einem spezifischen Widerstand von 80 bis $90 \mu\Omega\text{cm}$ erhalten. Die Zeit von 10 ms ist ausreichend zum Ausgleich von Stöchiometrie-inhomogenitäten in der Ausgangsmischschicht. Im Substrat kommt es zu keiner nachteiligen Diffusionsverbreiterung der flachen, d.h. etwa $\leq 0,3 \mu\text{m}$ tief liegenden pn-Übergänge.

Die Silicierung wurde unter N_2 -Atmosphäre durchgeführt, jedoch konnte kein Unterschied festgestellt werden, wenn die thermische Behandlung in Luft erfolgte.

Im zweiten Beispiel wird die CVD-Poly-Si-Schicht vor dem Aufbringen der alternierenden Mo/Si-Schichtfolge durch Ionenimplantation mit $2 \cdot 10^{16} \text{P}^+/\text{cm}^2$ oder mit $2 \cdot 10^{16} \text{As}^+/\text{cm}^2$ ($W_0 = 150 \text{ keV}$) dotiert. Zu den S/D-Gebieten des Substrats (hergestellt durch Ionenimplantation von $10^{16} \text{As}^+/\text{cm}^2$ ($W_0 = 150 \text{ keV}$)) ist die SiO_2 -Schicht geöffnet.

Nach Bestrahlung des gesamten Schichtsystems mit einem Blitzlampenimpuls der Energiedichte $135 \text{ J}/\text{cm}^2$ erreicht man für das dotierte Poly-Si einen spezifischen Widerstand von $500 \mu\Omega\text{cm}$ (P-dotiert) bzw. $1500 \mu\Omega\text{cm}$ (As-dotiert), während der spezifische Widerstand des MoSi_2 wie in Ausführungsbeispiel 1 80 bis $90 \mu\Omega\text{cm}$ beträgt. Durch denselben Blitzlampenimpuls erfolgt eine Reduzierung des Kontaktwiderstands des Polycid-Leitbahnsystems zu den S/D-Gebieten ohne störende Verlagerung der zu diesen gehörenden pn-Übergänge.

Patentanspruch

1. Verfahren zur thermischen Behandlung von mikroelektronischen Schichtsystemen, insbesondere Schichtkombinationen mit dotierten Halbleitergebieten, mittels elektromagnetischer Strahlung für die VLSI-Technik, beispielsweise für Metallisierungs- und Kontaktierungszwecke, dadurch gekennzeichnet, daß großflächig ein Halbleitersubstrat mit einem aufgebrachtten mikroelektronischen Schichtsystem einem oder mehreren inkohärenten elektromagnetischen Strahlungsimpulsen, vorzugsweise des sichtbaren und nahen IR-Bereiches, ausgesetzt wird, deren Dauer der Wärmediffusionszeit durch das Halbleitersubstrat entspricht und ein oder mehrere verschiedene thermische Prozesse ausgelöst werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzeugung der elektromagnetischen Strahlungsimpulse eine Blitzlampenanlage verwendet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß eine Vor- und/oder Nachheizung des Halbleitersubstrats mit definiertem Temperatur-Zeit-Verlauf durchgeführt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der elektromagnetische Strahlungsimpuls auf der Substratrückseite auftrifft und die Vor- und/oder Nachheizung auf der Substratvorderseite erfolgt.
5. Verfahren nach Anspruch 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Halbleitersubstrat aus einkristallinem Silicium besteht.
6. Verfahren nach Anspruch 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß als Metall ein Schwermetall wie Mo, W, Ti oder Ta verwendet wird.
7. Verfahren nach Anspruch 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß das Schichtsystem Metallschichten und Siliciumschichten oder Metall-Silicium-Mischschichten enthält.