電子ビーム照射による不純物ドーピング*

武田 道彦**・和田 隆夫***・増田 晴穂**
種村 誠太**・安田 匡一郎**

(昭和62年1月16日 受理)

Impurity Doping in Semiconductors Using High-Energy Electron Bombardment*

Michihiko TAKEDA**, Takao WADA***, Haruho MASUDA**
Seita TANEMURA** and Kyoichiro YASUDA**

**(Government Industrial Research Institute, Nagoya, Kita-ku, Nagoya)

*** (Department of Electrical and Computer Engineering,
Nagoya Institute of Technology, Showa-ku, Nagoya)

(Received January 16, 1987)

1. はじめに

高エネルギーの放射線を固体に照射するとその固体の構造や性質を変化させることができる。高エネルギー電子によって照射された半導体の物理的性質については多くの研究がなされている¹⁾。一方、イオンインプランテーションの技術は不純物プロファイルの制御にすぐれており、半導体工業には欠くことのできないプロセス技術のひとつとなっている。しかしながら不純物原子の注入に伴って相当の放射線損傷を誘起することは避けられない。

最近、著者のひとりである和田は、高エネルギー電子ビームの照射によって不純物原子のシートから半導体基板の中へ不純物原子を注入することができることを見出した²⁻⁵⁾。この新しい電子ビームドーピング法を利用して、Ge 不純物シートおよび Ge 蒸着膜を水中または真空中において MeV 領域の電子ビームを照射し、Si 基板中へ導入した不純物プロファイルについて報告する。

2. 実験方法

実験で用いた試料を Table 1 にまとめて示す。t は不

純物シート、蒸着膜および基板の厚さを表わす。鏡面側を密着して重ねた Ge 不純物シートと Si 基板、または Ge を蒸着した Si 基板はいずれも Ge 側から高エネルギー電子ビームを照射した。水流中照射の場合は、試料を Al 箔に包んで Fig. 1(a) に示したステンレス鋼製の電子線照射容器にとりつけ、温度調整器を用いて一定温度に保持した循環蒸溜水中において照射した。真空中照射の場合は、不純物シートと基板を重ねたまま Fig. 1(b) の真空チャンバーにとりつけて照射した。照射に用いた電子ライナックからの電子ビームは、エネルギー 7 MeV、ビームパルス幅 3.5 μsec 、繰り返し周波数 200 Hz、平均ビーム電流約 40 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の特性を有する。各試料にたいする水中および真空中における照射実験条件を Table 2 に示す。 ϕ は電子フルエンス (electrons/cm²)、T は照射時の試料温度 (°C) および P は真空度 (Torr) を表わす。

電子ビーム照射後、Si 基板中にドーピングされた Ge 不純物原子 (あるいは Ge シートおよび Ge 蒸着膜にドーピングされた Si) のプロファイルを二次イオン質量分析法 (SIMS) およびオージェ電子分光法 (AES) によって測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 Ge 不純物シート/Si 基板

3.1.1 水中照射

* 昭和61年11月13日 第27回真空に関する連合講演会で講演 (13 Ba-6)

** 名古屋工業技術試験所 (名古屋市北区平手町1-1)

*** 名古屋工業大学電気情報学科 (名古屋市昭和区御器所町)

Table 1 Impurity sheet, evaporated film and substrate used in the experiments

	Material	Conduction type, resistivity, orientation, thickness, area
Impurity sheet	Ge	n type (Sb doped), $\langle 111 \rangle$, $t=0.5$ mm, 5×5 mm ²
Impurity evaporated film	Ge	$t=1,000$ Å
Substrate	Si	p type (B doped), $\rho=25\text{--}50$ Ωcm, $\langle 111 \rangle$, $t=0.35$ mm, 5×5 mm ²

(a)

(b)

Fig. 1 Sample mounts for the irradiation in the water (a) and in vacuum (b).

20°Cに保持された蒸溜水中で 5×10^{17} electrons/cm² 照射したときの、不純物シートと接触している Si 基板の表面からの Ge 濃度の深さ方向分布を SIMS（一次イオン O₂⁺, エネルギー 7 keV）で測定した結果を Fig. 2 に示す。縦軸は ⁷⁴Ge⁺ と ²⁸Si⁺ の強度比で表わす。不純物原子の濃度分布は主に二つの exp (−x/L) 則に従っている。このことは、例えば不純物が結晶中の格子位置を拡散していく状態および格子間位置を拡散していく状態の二つの拡散過程、あるいは異なった二種類の複合欠陥等の状態での拡散過程を示唆するものである⁶⁾。Fig. 3 は Si 基板表面におけるオージェスペクトルを示す。このスペクトルから、電子ビーム照射によって表面に不純物としての Ge の他に O および C が誘起されることを示している。Fig. 4 は、電子フルエンスに対するドーピング量の関係を示す。 8×10^{17} electrons/cm² 以下では電子フルエンスの増加にしたがってドーピング量も増加している。 1×10^{18} electrons/cm² では逆に低下する傾向を示

Table 2 Condition of electron beam irradiation samples

Sample I		Sample II
in the water	in vacuum	in the water
E=7 MeV	E=7 MeV	E=7 MeV
$\phi = (2\text{--}10) \times 10^{17}$ e/cm ²	$\phi = 5 \times 10^{17}$ e/cm ²	$\phi = 1 \times 10^{18}$ e/cm ²
T=20°C	T=167~182°C	T=40°C
SIMS, AES	P $\sim 7 \times 10^{-4}$ Torr SIMS	AES

Fig. 2 Ratio of ⁷⁴Ge to ²⁸Si as a function of depth from the front surface of Si substrate.

すが、この原因については現在のところ明らかになっていない。

3.1.2 真空中照射

Fig. 3 Observed Auger electron spectrum at Si surface.

Fig. 4 Ratio of ^{74}Ge to ^{28}Si as a function of electron fluence.

水中における照射実験では毛細管現象で Ge シートと Si 基板の間に水が侵入しており、その影響を取り除くために真空中での照射実験を試みた。Fig. 5 は真空中 ($P \sim 7 \times 10^{-4}$ Torr, $T = 167 \sim 182^\circ\text{C}$) において電子ビームを照射し、SIMS で測定した Si 基板表面からの深さ方向の Ge 濃度分布を示す。Ge 濃度分布は水中照射と同様に二つの $\exp(-x/L)$ 則にしたがっており、その傾向も類似している。Ge シートと Si 基板の間に水が存在してもしなくてもその影響は殆んど見当らず、水中照射でも真空中照射でもドーピングの機構は同じであると考えられる。また Si 基板の裏面 (Ge シートと接触していない面) からも Ge が検出されており、その分布を

Fig. 5 Ratio of ^{74}Ge to ^{28}Si as a function of depth from the front and back surface of Si substrate.

Fig. 5 中に示した、水中照射した場合でも同様に裏面から Ge が検出されている。

このことは深さ方向の体積拡散に比べて拡散の速い表面拡散に起因するものと考えられる⁵⁾。Fig. 5 の x 方向目盛を表面から裏面 (Si 基板の厚さ) までにとり、図を書き直してみると Ge の分布が U 字型をしていることがわかる (Fig. 6)。この U 字型プロファイルは、表面近くでは拡散の遅い成分が支配的であり、深いところでは拡散の速い成分が支配的であると考えられる。

3.2 Ge 蒸着膜/Si 基板

Si 基板上に Ge を真空蒸着 ($t = 1000 \text{ Å}$) した試料を循環蒸溜水中 ($T = 40^\circ\text{C}$) において電子線照射し、深さ方向の不純物分布を AES 測定 ($E = 10 \text{ keV}$, $P \sim 2 \times 10^{-9}$ Torr, $\text{Ar}^+ 3 \text{ keV}$) した結果を Fig. 7 に示す。図中、Ge in Si は Si 基板中ヘドーピングした Ge、Si in Ge は Ge 蒸着膜中ヘドーピングした Si を表す。このそれぞれの分布は、蒸着膜および基板の原子が相互に拡散することを示している。Fig. 8 は Ge シートを Si 基板の上に置いた場合と Si 基板に直接 Ge を蒸着した場合の不純物がドーピングされる量の比較を示す。表面からの深さ 100 Å における Si in Ge および Ge in Si のいずれも、

Fig. 6 U-shaped distribution of Ge atoms in the Si substrate.

Fig. 7 Concentration of Ge in the Si substrate and that of Si in the Ge evaporated film as a function of depth from the substrate-film interface.

Ge 不純物シート/Si 基板よりも Ge 蒸着膜/Si 基板の組合せの方が約20倍ほど多くドーピングできることがわかる。

Fig. 8 Comparisons of doped Si and Ge concentration for the two sample configurations.

4. ま と め

循環蓄溜水中および真空中において Ge 不純物シート ($t=0.5 \text{ mm}$)/Si 基板に 7 MeV 電子ビームを照射し、Si 基板中の深さ方向の Ge 原子の濃度分布を測定した。その結果、低温でかつ水中の試料は Ge シートと Si 基板の間に水が侵入しているにもかかわらず、真空中で照射した場合における Si 基板中の Ge 原子のプロファイルと非常に類似していることがわかった。また Ge シートと接触していない Si 基板の裏面からも Ge 原子が検出され、U 字型プロファイルを示した。Ge 蒸着膜/Si 基板では相互拡散が起っており、Ge シート/Si 基板と比較してドーピング効率は約20倍であった。

〔文 献〕

- 1) J. W. Corbett: "Electron Radiation Damage in semiconductors and Metals" Academic Press, New York and London (1966).
- 2) T. Wada: Nucl. Instrum. and Methods, **182/183**, (1981) 131.
- 3) T. Wada: Proc. 3rd Int. Conf. Neutron-Transmutation Doped Si, Copenhagen, 1980, Plenum Press, New York and London (1981), p. 62.
- 4) 和田隆夫: 真空, **24** (1981) p. 635.
- 5) T. Wada and H. Hada: Phys. Rev. **B30**(6), (1984) 3384.
- 6) L. Y. Wei: J. Phys. Chem. Solids, **18**, (1961) 162.