

電子ビームを用いた Si ウェーハ表面層評価法の検討

佐々木謙孝¹・荻田陽一郎²

¹ 大学院工学研究科電気工学専攻

² 電気電子工学科

A Method on Subsurface Characterization of Silicon Wafers Using Electron Beam

Kanetaka SASAKI¹⁾, Yoh-Ichiro OGITA²⁾

Abstract

Electron-beam excited carrier profiles in Si wafer subsurface are calculated analytically. Carrier profiles can be induced within $1\ \mu\text{m}$ using acceleration voltage $< 3.5\text{keV}$. Spatial resolution of $0.1\ \mu\text{m}$ and $0.2\ \mu\text{m}$ can be obtained using an electron-beam with a pulse-width of 0.01ns and 0.1ns , respectively. The electron-beam excitation is enable to characterize properties in a subsurface within $1\ \mu\text{m}$ of silicon wafers.

Keywords: Electron-beam, Subsurface characterization, Subsurface damage, Conductivity, Si wafer

1. まえがき

ULSI の微細化・高集積化にともないシリコンウェーハ表面層の微小でわずかな結晶欠陥や残留加工歪みが、MOS のゲート酸化膜が薄くなるにつれてデバイスのゲート酸化膜耐性(GOI: Gate Oxide Integrity)を劣化させるという大きな問題がある^{1~2)}。またエピタキシャルウェーハの不純物混入や光散乱体^{3~5)}によるデバイス欠陥の問題がある。そこで、シリコンウェーハ表面層の結晶性を正確にしかも非接触で測定評価することが非常に重要になってきている。さらに、将来の単価の高い直径 300mm 以上のウェーハの表面層評価では、現在以上に非接触・非破壊測定評価法が必要不可欠となる。

我が研究室では、従来、表面および表面層の測定評価法として、UV/ミリ波を用いた光導電振幅(PCA: Photoconductivity amplitude)法と光導電減衰(PCD: Photoconductivity decay)法を提案し、それらによりエピタキシャルシリコンウェーハのエピタキシャル層、通常のシリコンウェーハの表面、表面層を非接触非破壊で測定評価してきた^{6~8)}。しかし、これらの方法は光励起であるため励起キャリア密度が表面で最大となるので表面の影響を受け易いという問題がある。

表面層の欠陥の密度分布を、2 波長光の散乱光強度から求める OSDA という方法がある^{3~5)}。我が研究室では光励起の代わりに電子ビーム励起とすれば、ある深さにキャリアを励起できるので表面の影響を小さくできる。電子ビームの加速

電圧を変えることにより励起キャリア分布を深さ方向に変えることができる。このような電子ビームを用いてキャリアをある深さに励起させ、これによる導電率の変化を非接触非破壊で測定すれば、表面層の深さ方向分布も評価できる可能性がある⁹⁾。そこで、どのくらいの励起エネルギー、どのくらいのパルス幅にすれば深さ方向の情報を測定できるか理論的に検討した。

2. 原理

電子ビームを Si ウェーハに照射すると、過剰キャリア密度のピークは、ある深さに生ずる。そのキャリア濃度が高い領域で、その領域に存在する再結合中心と一層強く相互作用する。電子ビームのピークは加速電圧によって、深さ方向に移動できるので、いろいろな深さ方向での再結合中心と相互作用させることができる。したがって、この相互作用キャリアを電磁波の反射波で検出すれば深さ方向の再結合中心、つまり欠陥、不純物、歪み等の深さ方向分布を測定できる。

3. 励起キャリアの初期分布

z 軸方向に電子ビームが表面($z=0$)に照射されている厚さ w の Si ウェーハを考える。電子ビーム径が厚み w や少数キャリアの拡散長 L と比べて大きいとすると、そのキャリアの拡散を z 軸方向のみの一次的に考えることができる。この

とき、一次電子の後方散乱を考慮に入れた電子ビーム照射直後の深さ z における電子正孔ペアの発生分布 $g_0\phi(z)$ は式(2.1)のように記述できる¹⁰⁾。

$$g_0\phi(z) = (\mu E_0 i / 4q\epsilon_i) (1 + \mu|z - z_d|) \times \exp(-\mu|z - z_d|) \quad (2.1)$$

ここで、 E_0 と i は入射電子ビームのそれぞれ加速電圧と輝度であり、 q は電子電荷、 ϵ_i は 1 つの電子正孔対を発生させるために必要なエネルギー、 μ と z_d は式(2.2),(2.3),(2.4) ような 3 つの関係で与えられる。

$$\mu R_b = 11 \quad (2.2)$$

$$z_d = 4 \frac{R_b}{Z + 4} \quad (2.3)$$

$$\rho R_b = 0.125 E_0^{1.65} \quad (2.4)$$

ここで、 Z は原子番号、 ρ は密度(mg/cm^3)であり、発生深さ R_b は (μm) で与えられる。

これらの式を用いて加速電圧を変化した場合の電子または正孔の深さ方向における発生密度分布を Fig.1 に示す。Fig.2 は輝度を変化したときの電子または正孔の深さ方向分布を示す。Fig.1 より電子ビームの加速電圧が大きくなると励起キャリアのピークが表面より深い方向に移動することが分かる。また Fig.2 より輝度を変えるとその密度の大きさは変わるが、深さ方向の分布は変化しないことが分かる¹¹⁾。これによりパルス幅無限小のときの加速電圧および輝度に対する励起キャリアの深さ方向分布がわかる。

4.有限パルス幅での励起キャリア空間分布

電子ビームの照射時間が有限の場合のキャリア分布がどのように分布するかを検討する。p 形ウェーハについて解かれた連続の式は、式(2.5)のように与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \Delta n(z, t) = g_0\phi(z) - \frac{\Delta n(z, t)}{\tau_b} + D \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial z^2}(z, t) \quad (2.5)$$

ここで Δn は過剰キャリア密度、 τ_b は少数キャリアのバルクライフタイムであり、 D は拡散係数である。低注入を考えると、内部電界は無視できるとし電界項は省略してある。また、境界条件は表面、裏面についてそれぞれ式(2.6)で与えられる。

$$\begin{aligned} D \frac{\partial \Delta n(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} &= S_0 \Delta n(0, t) \\ D \frac{\partial \Delta n(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=w} &= S_w \Delta n(w, t) \end{aligned} \quad (2.6)$$

式(2.5)および式(2.6)を差分法で解くことにより電子ビーム励起による過剰キャリアの空間分布を求めた。そこでこの解析方法が正しいかどうかを Fig.4 に示すようなモデルを用いてパルス幅を、0.1ps、0.01ps としたときのキャリアの分布と Dirac パルスでのキャリアの分布を比較することで確かめた。

その結果を Fig.3 に示す。Fig.3 で明らかなようにこの解析によるパルス幅が有限な場合の結果が Dirac パルスでの分布に近づくことがわかる。また表面近くでの差異は、パルス幅が短くなればキャリアの拡散時間が短くなるので表面の影響を受けなくなるためである。したがって、この解析方法はほぼ正しいと考えられる。

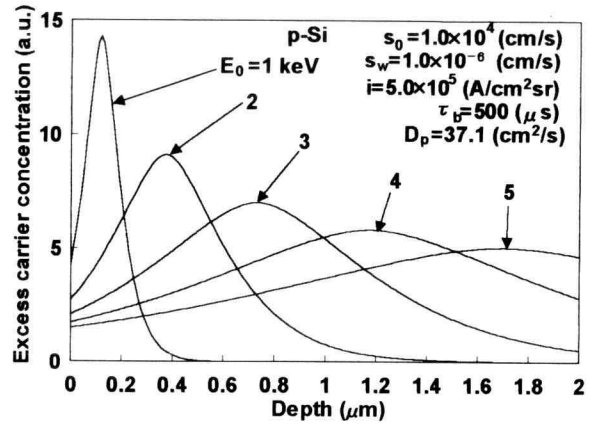


Fig.1 Excess carrier profiles for acceleration voltage in Dirac excitation pulse.

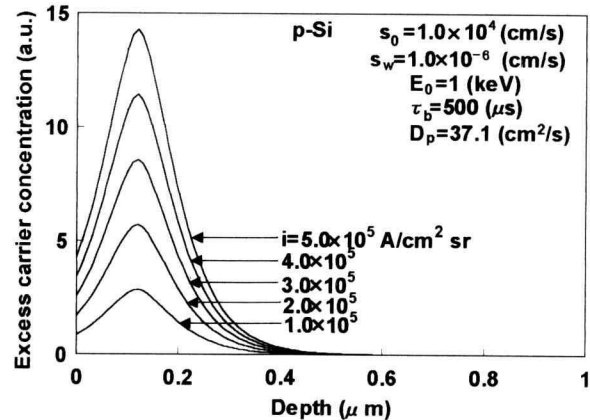


Fig.2 Excess carrier profiles for brightness in Dirac excitation pulse.

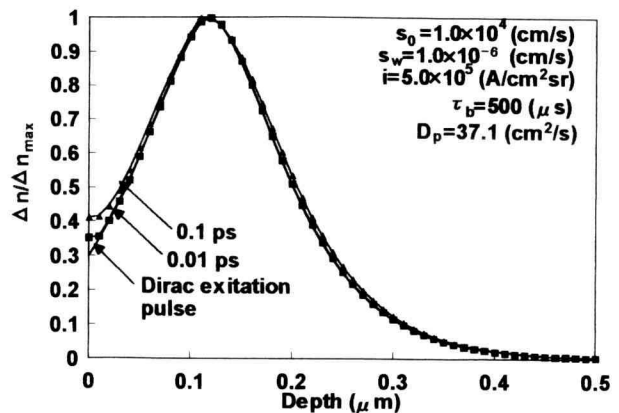


Fig.3 The validity of numerical calculation with compared to that under Dirac excitation pulse.

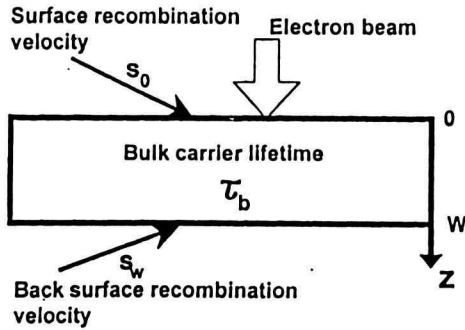


Fig.4 Numerical calculation model.

次に、パルス幅 1ns、輝度 5×10^5 A/cm²sr で加速電圧を 1, 2, 3, 4, 5 keV と変えた電子ビームを p 形 Si ウェーハに照射したときの過剰キャリアの空間分布を、連続の式を境界条件、初期条件のもとに差分法で解くことにより求めた。その結果を Fig.5 に示す。この図よりキャリアのピークが加速電圧の変化により深さ方向に変わることが分かる。次に加速電圧 1keV 一定で、パルス幅を 1ns から 0.1ps まで変えたときの過剰キャリアの空間分布を求めた結果を Fig.6 に示す。この図のようにパルス幅を短くすればある深さにキャリアが集中し、深さ方向のより細かい分解をもつ情報が得られることが分かる。このようなキャリアの分布を例えば導電率の変化として検出すれば、Si ウェーハの深さ方向の情報を検出できる可能性があることが分かった。

本方法を実際に行うためには非常に短い幅のパルスが必要不可欠であり、このような極短パルスの電子ビームを発生させるには縦型及び横型のパルスゲートを単独または組み合わせて用いるか、レーザーパルスで光電陰極を照射し放出される光電子を陽極間電界で加速させるという方法がある¹²⁾。このような発生方法によりパルス幅サブピコ秒の電子ビームを得られる。したがって、電子ビームを用いた Si ウェーハ表面層評価法は現実的に可能であることが分かる。

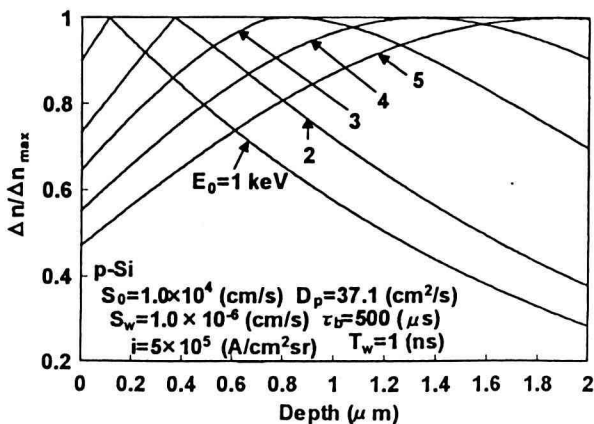


Fig.5 Excess carrier profiles for acceleration voltage pulsewidth of 1ns (the curves have been normalized).

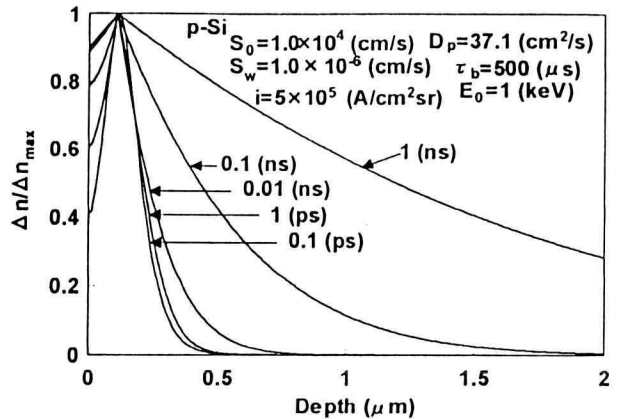


Fig.6 Excess carrier profiles for acceleration voltage varieties pulsewidth in 1keV (the curves have been normalized).

5. あとがき

電子ビームによる励起キャリア分布の数値解析によって明らかになったことをまとめると以下のようになる。

- (1) $1 \mu\text{m}$ 以内の表面層に励起キャリアのピークを持つてくるには、3.5 keV 以下の加速電圧でよいことが分かった。
- (2) 励起キャリアのピークは加速電圧を増すにつれて深いほうへ移動し、ピーク値は小さくなる。しかし輝度調整によりピーク値を同じにできる。
- (3) 深さ方向の分解能を $0.1 \mu\text{m}$ とするには、励起電子ビームのパルス幅を 0.01ns 以下に、 $0.2 \mu\text{m}$ とするには 0.1ns 以下すればよいことが分かった。
- (4) 以上のことから、加速電圧を変えることにより任意の深さにキャリアを励起できる電子ビームを用いて表面層の深さ方向の情報を評価できる可能性があることが分かった。

6. 参考文献

- 1) Y. Udo, M. Nagura, S. Samata, and H. Kubota, The Physics and Chemistry of SiO₂ and the Si-SiO₂ Interface-3, H. Z. Massoud, E. H. Poindexter, and C. R. Helms, 96-1, pp. 379-387, the Electrochemical Society, Inc., Pennington, NJ, 1996
- 2) Y. Ogita, Y. Hosoda, M. Miyazaki, Science and Technology of Semiconductor Surface Preparation, G. S. Higashi, M. Hirose, S. Raghavan, and S. Verhaverbeke, 477, p. 209-214, Materials Research Society, Warrendale PA, 1997
- 3) 武田、石田、平岩, 1996 年応用物理学学会春季講演会 予稿, 29a-ZD-10
- 4) K. Takeda, H. Ishida, A. Hiraiwa, Extended Abstract of SSDM pp.151

- 5) K. Takeda, H. Ishida, A. Hiraiwa, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. **442** pp.37 Y. Ogita, K. Yakushiji, N. Tate, Semiconductor Silicon/1994, The Electrochemical Society, **94**, pp. 1083-1092 (1994)
- 6) Y. Ogita, M. Nakano, H. Masumura, MRS, **378**, pp. 591-596 (1995)
- 7) Y. Ogita, M. Nakano, H. Masumura, Defects in Semiconductors 18, **196-201** pp. 1813-1816 (1995)
- 8) Y. Ogita, K. Yakushiji, N. Tate, Semiconductor Silicon/1994, The Electrochemical Society, **94**, pp.1083-1092(1994)
- 9) 佐々木、荻田, 第 59 回応用物理学会春季講演会予稿, **18a-ZF-5**
- 10) M.Boulou and D.Bois, Journal of Applied Physics, Vol. **48**, No.11, pp.4713-4717 (1977)
- 11) 石垣、神奈川工科大学卒業論文 (1997)
- 12) 裏 著 「電子・イオンビーム工学」 共立出版 pp.194-213