

電子ビームによるシリコン表面層のトモグラフィの検討

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 Study on Tomography of Silicon Subsurface with Electron Beam

Kanetaka SASAKI¹⁾, Yoh-Ichiro OGITA²⁾

Abstract

Detection of defect profile in near surface of Si wafers using an electron beam has been considered with theoretical calculation in order to develop new characterization technique of near surface. Conductivity change induced by carrier excitation electron beam has been calculated based on using two and three layer model under various pulse-width and acceleration energy of the electron beam. Defect profile with $0.1 \mu\text{m}$ can be characterized the pulse-width smaller than 100 ps. The tomography of near surface within Si wafer has been brought by the technique.

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

1. まえがき

ULSI の高速化、低電力化、コスト低減のために微細化・高集積化が進められ、ゲート酸化膜の薄膜化は $10 \sim 1\text{nm}$ の厚さになろうとしている。よって CZ(Czochralski)法結晶成長時に導入される 100nm 以下のボイド (COP : Crystal Originated Particle) などの grow-in 欠陥^{1~2)}や残留加工歪みがデバイスのゲート酸化膜耐圧 (GOI : Gate Oxide Integrity) を劣化させるなど悪影響を及ぼしている^{3~5)}。またエピタキシャルウェーハにおいてもレーザ散乱体^{6~9)}、残留不純物などが存在し、これらの欠陥がデバイスの歩留まりに悪影響があることが報告されている。さらに、将来の単価の高い直径 300mm 以上となるウェーハ大口径化にともないウェーハ表面層の完全性に対する関心がますます高まってくる。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・非破壊での測定評価法が重要になってきている。

我々の研究室では今まで、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、それらによりシリコンウェーハ表面・表面層やエピタキシャルシリコンウェーハのエピタキシャル層を非接触非破壊で測定評価してきた^{10~13)}。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り表面再結合による影響を受け易いという問

題がある。

表面層の欠陥密度分布を、2 波長光の散乱光強度から求める OSDA という方法がある^{6~8)}。我々の研究室では深さ方向の欠陥の情報をキャリアライフタイムの値として得るために、光励起の代わりに電子ビーム励起による評価法の可能性を示した^{14~15)}。電子ビームは入射エネルギー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ので、表面の影響を小さくできる。また、ミリ波の反射波で導電率の変化を非接触・非破壊的に評価することにより表面層の欠陥の深さ方向分布も評価 (断層撮影 : Tomography) できる可能性がある。そこで欠陥層が表面直下と表面層中にある場合に電子ビームでその欠陥層を分解できる電子ビームの条件を目的として、欠陥の深さ方向の分布と入射エネルギーを変えた電子ビームによる導電率の依存性を理論的に検討した。

2. 原理

Fig.1 のように電子ビームを Si ウェーハに照射すると、過剰キャリア密度分布のピークはある深さに生じる。そのキャリア密度が高い領域で、その領域に存在する再結合中心と強く相互作用する。電子ビームの入射エネルギーを変えることによりキャリア分布のピークは深さ方向に移動できるので、いろいろな深さ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、この相互作用による導電率変化を電磁波の

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、歪みなどの深さ方向分布を測定できる。

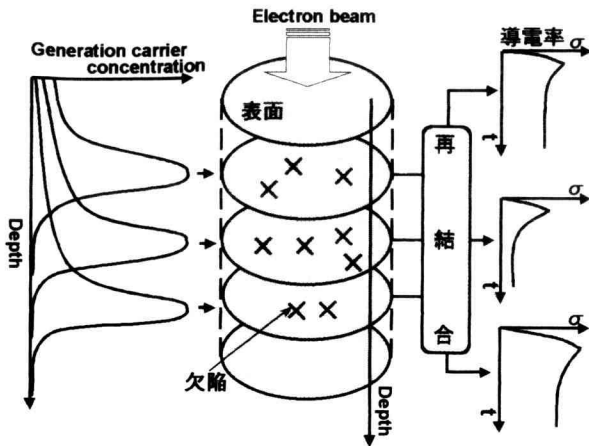


Fig. 1 The figure of the principle.

3. 解析方法

3.1 励起キャリア空間分布の算出方法

電子ビームの入射方向を z 軸にとり、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 軸方向のみの一次元的に考えることができる。このとき、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 $g_0(z)$ は式(2.1)のように記述できる¹⁶⁾。

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

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。

次に p 形 Si 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。

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

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。低注入を考えて、

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。

$$D \frac{\partial \Delta n(z, t)}{\partial z} \bigg|_{z=0} = s_0 \Delta n(0, t) \quad (2.6)$$

$$D \frac{\partial \Delta n(z, t)}{\partial z} \bigg|_{z=w} = s_w \Delta n(w, t)$$

式(2.1), (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励起キャリアの空間分布が求まる。

3.2 初期キャリアライフタイムと導電率振幅の算出方法

Fig. 2(b) のような極端に短いパルス幅で電子ビームを照射したときの Si ウェーハ表面を考える。このとき求められる励起キャリアの空間分布より導電率変化は式(2.7)で与えられる。

$$\sigma(t) = \frac{q_n \mu_n}{w} \int_0^w \Delta n dz \quad (2.7)$$

ここで、 q_n は少数キャリアの電荷量、 μ_n は少数キャリアの移動度である。

Fig. 2(a) に示すように式(2.7) より求められた導電率変化の振幅部分から導電率振幅を、減衰過程での初期時間領域の傾きの逆数から初期キャリアライフタイム τ_{a0} を求める。

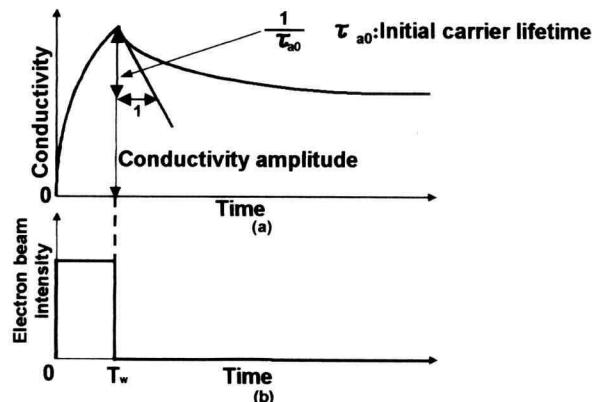


Fig. 2 The definition of initial carrier lifetime and conductivity amplitude.

4. 解析結果および検討

4.1 二層構造モデルでの初期キャリアライフタイムと導電率振幅の値

Fig. 3 のような二層構造モデルを仮定し、初期キャリアライフタイム値と導電率振幅値の不良表面層に対する依存性について検討する。照射時間幅 1 ns、表面 ($z=0$) からの不良表面層幅 $0.2 \mu\text{m}$ で入射エネルギーを 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初期キャリアライフタイムを Fig. 4 に、導電率振幅を Fig. 5 に示す。ここで図の各点は、それぞれの入射エネルギーにおける発生キャリア分布のピークがくる深さと横軸の値が対応するようにとってある。

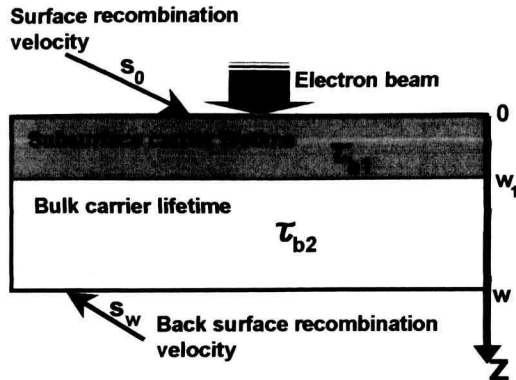


Fig.3 Numerical calculation model of the two-layer structure.

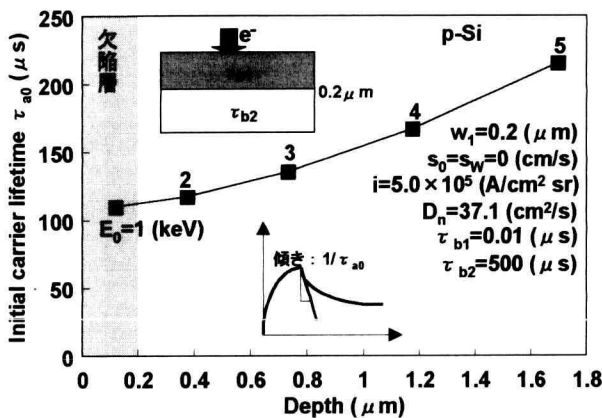


Fig.4 The initial carrier lifetime value for each depth in the two-layer structure model.

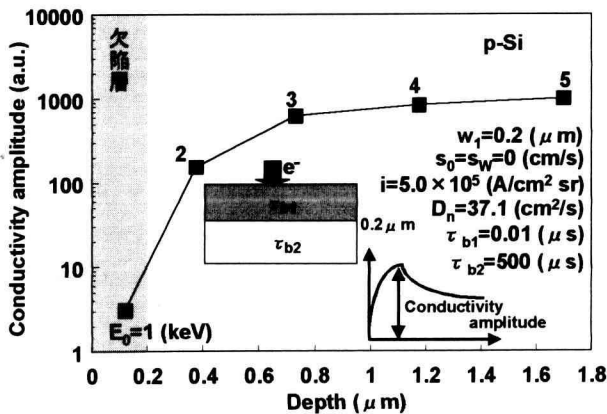


Fig.5 The conductivity amplitude value for each depth in the two-layer structure model.

発生キャリア分布のピークがちょうど欠陥層($z=0\sim0.2\mu\text{m}$)に含まれている入射エネルギー1keV($z=0.12\mu\text{m}$)では、初期キャリアライフタイムと導電率振幅の値はともに小さくなっており、入射エネルギーを上げる(発生キャリア分布のピークが深い方向に移動する)につれて初期キャリアライフタイム、導電率振幅の値が双方とも大きくなるのがわかる。

4.2 三層構造モデルでの初期キャリアライフタイム値

Fig.6 のように三層構造モデルを仮定し、初期キャリアライフタイム値のある深さの領域に存在する欠陥領域に対する依存性について検討する。欠陥領域は入射エネルギー3keVでの励起キャリア分布のピークがくる位置($z=0.75\mu\text{m}$)が中心にくるように両側 $0.05\mu\text{m}$ づつとり、幅を $0.1\mu\text{m}$ とする。照射時間幅は 1, 10, 100ps と変え、それぞれの照射時間幅において入射エネルギーを 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初期キャリアライフタイムを Fig.7 に示す。一方、照射時間幅は 1ps 一定として欠陥領域幅を 0.1, 0.2, $0.5\mu\text{m}$ と変え、それぞれの欠陥領域幅において入射エネルギーを 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初期キャリアライフタイムを Fig.8 に示す。

またそれぞれの照射時間幅での Fig.2 の T_w における 1keV と 5keV についての励起キャリアの空間分布と欠陥領域の関係を Fig.9 と Fig.10 に示す。

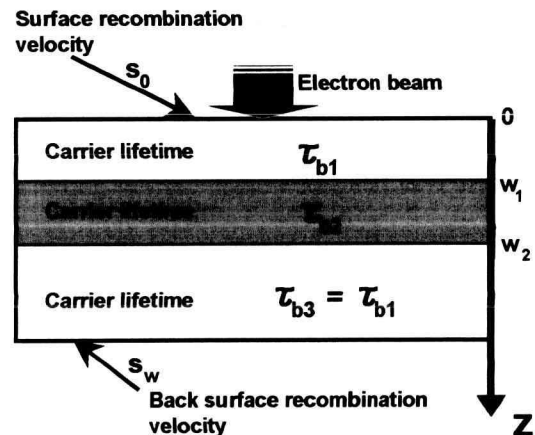


Fig.6 Numerical calculation model of the three-layer structure.

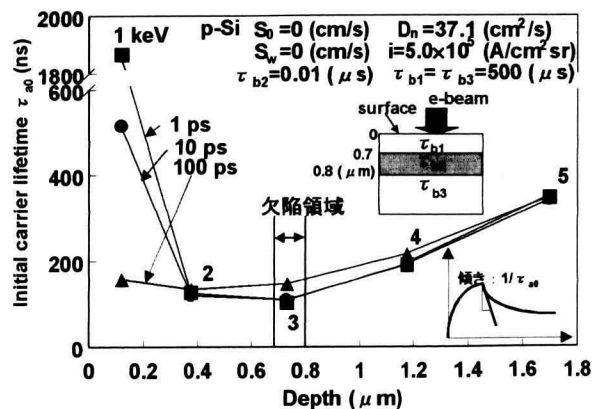


Fig.7 The initial carrier lifetime value for each depth as the pulse width changes. (the three-layer structure model.)

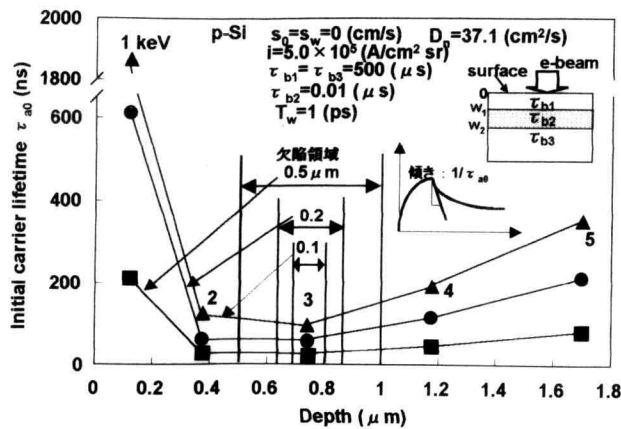


Fig. 8 The initial carrier lifetime value for each depth as the defect region. (the three-layer structure model.)

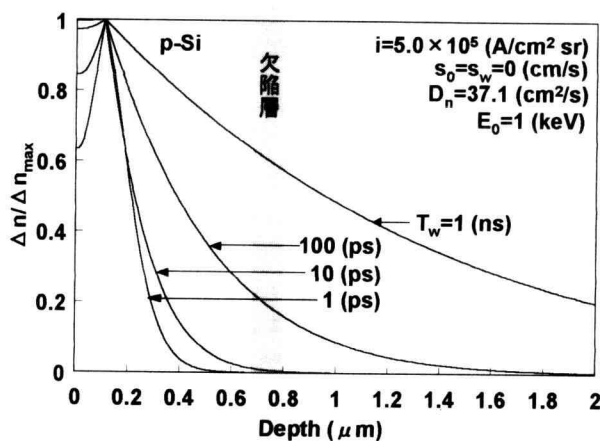


Fig. 9 Excess carrier profiles as the electron beam irradiation duration at 1keV varied. (the curves have been normalized.)

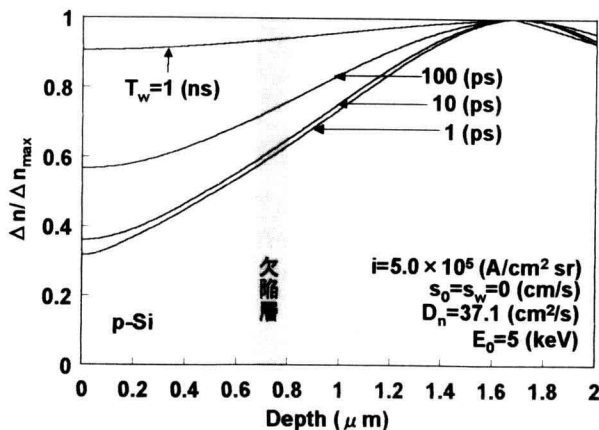


Fig. 10 Excess carrier profiles as the electron beam irradiation duration at 5keV varied. (the curves have been normalized.)

Fig. 7より、100psよりも10ps、1psと電子ビームの照射時間幅を短くすると、1keV($z=0.12 \mu\text{m}$)の初期キャリアライフタイム値が5keV($z=1.76 \mu\text{m}$)の値より強く照射時間幅に依存する事がわかる。これはFig. 9とFig. 10で示すように1keVでは照射

時間幅が10ps以下では励起キャリア空間分布は欠陥領域を含まないのに対して、5keVでは1psでもまだ欠陥領域を含んでしまっているためである。また、電子ビームの照射時間幅1psでの励起キャリア分布のピークが欠陥領域にないとき($z=0.12 \mu\text{m}$)と、あるとき($z=0.75 \mu\text{m}$)の初期キャリアライフタイムの値がおおよそ18倍違うことがわかるので、照射時間幅1psで幅 $0.1 \mu\text{m}$ の欠陥領域を検出できることがわかる。

最後にFig. 8より、欠陥領域が $0.5 \mu\text{m}$ よりも狭い $0.1 \mu\text{m}$ のほうが欠陥領域に対する初期キャリアライフタイム値の相関関係がはっきりしていることがわかる。これは、欠陥領域が広ければそれだけ、各入射エネルギーに対する励起キャリアの分布がその領域を含んでしまうからである。

5. あとがき

電子ビームによる導電率変化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になる。

- (1) 初期キャリアライフタイムと導電率振幅の双方によって不良表面層(幅 $0.2 \mu\text{m}$)を評価できる可能性があることが分かった。
- (2) 100psよりも10ps、1psと電子ビームの照射時間幅を短くしたほうが三層構造のような欠陥分布を評価するには適していることがわかる。
- (3) 初期キャリアライフタイム値により、ある深さの領域に存在する欠陥領域を評価できる可能性があることが分かった。
- (4) ある深さの領域に存在する欠陥領域(幅 $0.1 \mu\text{m}$)を評価するためには、10ps 以下の照射時間幅が必要であることが分かった。
- (5) 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を深さ方向に評価できる可能性があることが分かった。

6. 参考文献

- 1) J.Ryuta, E.Mrita, T.Tanaka and Y.shimanuki, Crtstal-Originated Singularities on Si Wafer Subsurface and SC1 cleaning, Jpn. Appl. Phys., **29**, L1947 (1996)
- 2) 森田他, 第 37 回応用物理学関係関連連合会講演予稿集 p.621 (1990)
- 3) M.Miyashita, H.Fukui, A.Kubota, S.Samata, H.Hiratsuka and Y.Matsushita, ISSM '96, 157
- 4) Y. Udo, M. Nagura, S. Samata, and H. Kubota, The Physics and Chemistry of SiO_2 and the Si-Si O_2 Interface-3, H. Z. Massoud, E. H. Poindexter, and C. R. Helms, **96-1**, pp. 379-387, the Electrochemical Society, Inc., Pennington, NJ, 1996
- 5) 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**
- 6) 武田、石田、平岩, 1996 年応用物理学会春季講演会予稿, **29a-ZD-10**
 - 7) K. Takeda, H. Ishida, A. Hiraiwa, **Extended Abstract of SSDM pp.151**
 - 8) K. Takeda, H. Ishida, A. Hiraiwa, **Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.442 pp.37**
 - 9) 佐藤 他, 第 59 回応用物理学関係関連連合会講演予稿集, **17a-ZD-5**
 - 10) Y. Ogita, K. Yakushiji, N. Tate, **Semiconductor Silicon/1994, The Electrochemical Society, 94, pp. 1083-1092 (1994)**
 - 11) Y. Ogita, M. Nakano, H. Masumura, **MRS, 378, pp. 591-596 (1995)**
 - 12) Y. Ogita, M. Nakano, H. Masumura, **Defects in Semiconductors 18, 196-201 pp. 1813-1816 (1995)**
 - 13) Y. Ogita, K. Yakushiji, N. Tate, **Semiconductor Silicon/1994, The Electrochemical Society, 94, pp.1083-1092(1994)**
 - 14) 佐々木、荻田, 第 59 回応用物理学会秋季講演会予稿, **18a-ZF-5**
 - 15) 佐々木、荻田, 神奈川工科大学研究報告第 23 号
 - 16) M.Boulou and D.Bois,**Journal of Applied Physics, Vol.48, No.11, pp.4713-4717 (1977)**