レーザーオリジナル 1

赤外レーザーによるSiウェーハの非接触
ライフタイム測定と工程評価

宇佐美 晶*・佐野賢二**・村井耕治***

Application of the Infrared Lasers to Contactless Measurement of
Minority Carrier Lifetime and Wafer Process Evaluation

Akira USAMI*, Kenji SANO** and Koji MURAI***

(Received November 6, 1980)

A microwave contactless technique is described for measuring the minority carrier lifetime of semiconductor wafer, using the light emitting diodes as the carrier injection source. The minority carrier which is injected in wafer which is placed 40mm from the waveguide end is measured by the reflection signal of microwave. The minority carrier lifetime which is obtained from the reflection microwave signal decay is compared with that obtained by the JIS (Japan Industrial Standard) method. The spatial resolution of the lifetime measurement is considered to be about $200\text{ }\mu\text{m}\phi$ from measurement using a LED with optical fiber system, which is equal to the diameter of the injected light beam plus diffusion length. Minority carrier lifetime is measurable in $0.054\text{ ohm}\cdot\text{cm}$ silicon wafer, which is carrier injected by YAG laser. Physical parameters relative to the excess carrier such as diffusion constants and bulk lifetime are also measured by this contactless method.

1. はじめに

半導体デバイスはIC, LSI, 超LSIへと大容量化, 高集積化を目標としながら着実に進歩して来ている。IC, LSIなどの生産は, 基板としてのシリコン(Si)ウェーハを主として直接観察による検査の後, デバイスの仕上げまでほとんど検査なしで行われている。高集積化を進める際に, 現在あるいは現在以上の歩留りを得るには, 基板ウェーハの高品質化とデバイ

ス・プロセスの出来るだけ初期に検査を行うことが必要である。基板Siではウェーハの厚さの一樣性([1]), 反り, 表面仕上げ状態などの形状の検査, 格子欠陥([2]), 不純物分布([3])等の結晶学的な性質の検査, 比抵抗([4], [5]), 移動度([6]), ライフタイム([7])等の電気的特性の検査が必要である。Siウェーハの電気的特性が構造に敏感である事を考えて, 測定はウェーハに機械的に触れないで, 即ち非接触・非破壊測定が必要である。

*名古屋工業大学電子工学教室(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

* Department of Electronics, Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466

**株式会社レオ技研(〒673 明石市和坂稲荷町55-1, 第二川本ビル)

** Leo Giken Co., Akashi-shi 673

***日本シリコン株式会社技術部(〒278 野田市西三ヶ尾金打 314)

*** Techinical Department, Nihon Silicon Co., Noda-shi 278

半導体工業の初期の頃から非接触測定法は、比抵抗、ライフタイム測定を中心に検討が試みられて来たが、最近になって実用化 ([8], [9], [10]) されるようになった。比抵抗、移動度など多数キャリアに関する非接触測定を中心に詳しい解説があるので参考にされたい [11]。少数キャリアのライフタイム測定に関して、種々の方法が試みられているが、マイクロ波を用いた非接触測定のうち、特に本研究に深いものについて述べよう。

Xバンドのマイクロ波を信号検出プローブとして用いた報告 ([12], [13], [16]) はいずれも、キャリアの注入光源としてキセノン・パルス光源を使用していた。この様なキセノン光源を注入光源として用いる方法は、現在 JIS 規格でも採用されている (JIS H 0604)。キセノン光源は微小パルス巾の制御が困難であり、しかも薄い Si のフィルターを通して波長の短い光 (Si 表面附近で吸収される) をカットして使用するために、注入キャリアは少なく検出信号は小さくなる。JIS 規格では引き上げたインゴット状の Si の両端に電極付けをして、キセノン光源にフィルターを通してキャリアの注入を行い、ライフタイムの測定を行うことが義務付けられていて、LSI 用のウェーハ状の Si のライフタイム測定については全く触れてない。著者らは、ホーン・アンテナを用いたライフタイム測定法 ([13]) をマイクロ波プローブ部分の簡単化および光源に赤外線レーザを採用することにより、ウェーハ状 Si のライフタイム測定装置の試作を行った ([9])。著者らが試作したライフタイム測定装置を用いて、赤外注入光の照射面積が減衰波形に及ぼす影響 ([14]) や Sバンドのマイクロ波を用いた測定 ([15]) など非接触・非破壊のライフタイム測定に関する検討が盛んに行われている。

光導伝減衰法を用いた Si ウェーハのライフタイム測定は、どの様な検出手段を用いても試料表面でのキャリアの再結合があるため、実効的なライフタイムを測定することになる。従って、実効的なライフタイムがより安定して、大

信号で検出されるためには、Si ウェーハの表面附近にキャリア注入を行うような吸収係数の大きい光を除き、Si の内部にキャリア注入を行う赤外線を用いる必要がある。逆に、Si ウェーハの表面附近の状態を調べるには、吸収係数の大きい光のみを用いればよい。ウェーハ工程で問題となる低抵抗率の Si のライフタイムを測定しようとする場合には、ウェーハ内のドーパント濃度と比較しても、信号として検出可能な程度に少数キャリアを注入出来るような出力の大きい光源が必要である。従来から用いられているキセノン光源にフィルターを併用する方法では、キャリアの注入量は不十分であり、比抵抗の低い Si のライフタイムは測定出来ない ([16])。半導体レーザ・ダイオード (LD)、発光ダイオード (LED) など光源の固体化、大出力化ならびに高信頼化がライフタイム測定装置の改良に見逃せない。

本研究は、LSI 用の Si ウェーハの品質管理およびウェーハ工程の評価を反射マイクロ波とキャリア注入光源として赤外線レーザを用いて、Si ウェーハ内の少数キャリアのライフタイムの非接触・非破壊測定 ([9]) を行ったものである。注入光源としては、GaAs の赤外発光ダイオード、GaAs レーザ・ダイオードおよび、YAG レーザを用い、信号検出にはガンダイオードからの 10GHz の反射マイクロ波を用いた。ウェーハ状 Si のライフタイム測定をはじめとして、ウェーハ表面のキズ、汚れ、格子欠陥 (例えば、スワール状欠陥の分布) などのウェーハ評価とイオン注入などのウェーハ工程の評価も試みた。

2. 測定の理論的背景

光導伝減衰法を用いたライフタイム測定に関する理論的な背景をまとめると以下の様になる。

[A]. 従来の方法は、半導体中に過剰キャリアが一様に注入された場合の解析から、ライフタイムを求めている ([12], [13], [15], [16])。光パルスでキャリアを注入するかぎり深さ方向に一様な注入は実現出来ない。[B]. 本研究の

場合は、キャリアの注入光のパルスはデルタ関数で、Si ウェーハ内部での分布は光の吸収係数 α によって決定される様な非一様注入である。

Boulou と Bois ([18]) が行った、GaAs のライフタイムの決定に用いた、フォト・ルミネッセンスの過渡応答の解析の手法を、非一様注入のSi ウェーハのライフタイム解析に適用した。

半導体中にパルス光で過剰キャリアを注入した際に、パルス光照射後の半導体内での過剰少数キャリア濃度分布 $\Delta p(x, t)$ の時間的变化の様子は、バルク・ライフタイムを τ_b 、拡散係数を D 、ウェーハの深さ方向の距離を x とすると、

$$D \frac{\partial^2 (\Delta p)}{\partial x^2} - \frac{\Delta p}{\tau_b} = \frac{\partial (\Delta p)}{\partial t} \quad (1)$$

の連続の方程式の解として与えられる。ウェーハ表面及び裏面での再結合速度を S 、厚さを W とすると、境界条件は式(2)のように置ける。

$$\left. \begin{aligned} D \frac{\partial \Delta p(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} &= S \Delta p(0, t) \\ D \frac{\partial \Delta p(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=W} &= -S \Delta p(W, t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

また、光のパルス巾がライフタイムに比べて小さい場合、パルス光照射直後($t=0$)の過剰キャリアの試料内での分布は、初期条件として式(3)で与えられる。

$$\Delta p(x, 0) = g_0 \exp(-\alpha x) \quad (3)$$

但し α は吸収係数である。

式(2)、(3)の条件下で式(1)の一般解は級数の和となり、式(4)で表わされる。

$$\Delta p(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i G_i(x) F_i(t) \quad (4)$$

$G_i(x)$ は試料の深さ方向の過剰キャリアの分布を示し式(5)のように書ける。

$$G_i(x) = K_i \cos K_i x + (S/D) \cdot \sin K_i x \quad (5)$$

$F_i(t)$ は過剰キャリアの時間依存性を示し、式(6)で書ける。

$$F_i(t) = \exp \left[- (1/\tau_b + K_i^2 \cdot D) t \right] \quad (6)$$

時間に依存しない振巾項 A_i は、 $t=0$ の過剰キャリアの分布と同じであると考え、式(7)で書ける。

$$A_i = \frac{2}{2(S/D) + W(K_i^2 + (S/D)^2)} \int_0^W \Delta p(x, 0) G_i(x) dx \quad (7)$$

また、 K_i は特性方式(8)の1番目の正根である。

$$\cot K_i W = \frac{K_i^2 - (S/D)^2}{2 K_i (S/D)} \quad (8)$$

試料内の全過剰キャリア $\Delta p_{total}(t)$ は式(4)を試料の厚さ方向(x 方向)に積分して得られる。

$$\begin{aligned} \Delta p_{total}(t) &= \int_0^W \Delta p(x, t) dx \\ &= g_0 \sum \left\{ \frac{2(S/D) K_i ((S/D) + \alpha) + ((S/D) - \alpha)}{(K_i^2 + (S/D)^2) \cdot W + 2(S/D)} \right. \\ &\quad \left. \frac{(K_i + (S/D)^2) \sin(K_i W) \exp(K_i W)}{(\alpha^2 + K_i^2)(S/D)^2} \right\} \\ &\quad \times \left\{ \frac{(S/D)}{K_i} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{(S/D)^2}{K_i^2} \right) \sin K_i W \right\} \\ &\quad \exp \left[- (1/\tau_b + K_i^2 D) t \right] \quad (9) \end{aligned}$$

全過剰キャリアの時間的变化は、振巾、時定数が異なる指数関数の重ね合せになっている。

式(8)、(9)の τ_b 、 S 等に適当な値を代入し、1次モード($i=1$)、及び高次モード($i=2, 3 \dots$)の振巾、時定数を計算し、全過剰キャリアの時間的变化に対する各モードの影響について調べた。

Fig.1には、 $\tau_b=200 \mu \cdot \text{sec}$ 、 $S=1000 \text{ cm/sec}$ 、 $d=1 \text{ mm}$ 、 $D=18 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、 $\alpha=320 \text{ cm}^{-1}$ と仮定して求めた、全過剰少数キャリアの時間的变化を示したものである。図には、偶数モードの振巾が 10^{-6} のオーダーで小さいので、1、3、5次モードの時間的变化のみを示してある。全過剰キャリアの時間的变化は、高次モードの影響

Fig.1 Calculated decay curve of excess carrier and the definition of both τ_{eff} and τ_1 when the injection light has a shape like the delta function.

により、減衰初期に1次モードからずれているが、約40 $\mu \cdot \text{sec}$ 以後では、1次モードの時間的变化に一致している。

Fig2 には、N形、50 ohm-cm、 $d = 1.3\text{mm}$ で

Fig.2 Measured decay curve of excess carrier of chemical etched n-type silicon wafer.

表面を弗酸と硝酸の混液で鏡面に仕上げたSiウェーハに、GaAs レーザ・ダイオードのパルス巾100 $n \cdot \text{sec}$ の光を注入して、実測した(マイクロ波の反射信号の)減衰曲線が示してある。減衰曲線の初期に指数関数からのずれが見られ約60 $\mu \cdot \text{sec}$ 以後は指数関数で減衰している。この結果は、理論解析から求めた全過剰キャリアの時間的变化の傾向とよく一致している。これらの事実に基づき次のような2つのライフタイムを定義した (Fig.1 参照)。

(i)実効ライフタイム (τ_{eff}): 実測される波形で振幅が時刻 $t =$ の $1/e$ に減衰するまでの時間。

(ii)1次モード・ライフタイム (τ_1): 実測される波形の後半部分から読み取った減衰時定数。

τ_{eff} は高次モードの寄与を含む値であり、定量的な取り扱いは出来ない。しかし、同一ウェーハ内のライフタイム分布を測定し、定性的にウェーハ評価を行なう場合には有効な量である。減衰波形の後半のみを用いれば式 (6) より τ_1 は式 (10) のように、バルク・ライフタイム (τ_0) 拡散係数 (D) と関係付けられ定量的な取り扱いが可能である。

$$1/\tau_1 = 1/\tau_0 + K_1^2 \cdot D \quad (10)$$

$$\text{一方、式 (8) より、} \cot K_1 W = \frac{K_1^2 - (S/D)^2}{2 K_1 (S/D)} \quad (11)$$

式 (10) と (11) より K_1 を消去すると式 (12) を得る。

Fig.3-a Block diagram of the lifetime measurement system.

$$S \left\{ D \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_0} \right) \right\}^{1/2} \cdot \tan \left\{ \frac{W}{2} \left(\frac{1}{D} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_0} \right) \right)^{1/2} \right\} \quad (12)$$

$S \gg 2D/W$ の条件下では、 $K_1 \cong \pi/W$ となり、

$$\text{式 (10) は } 1/\tau_1 = 1/\tau_0 + \left(\frac{\pi}{W} \right)^2 \cdot D \quad (13)$$

のようになる。

従って、同一のインゴットから切り出した厚さの異なる三枚のSi ウェーハを同一の処理を行った場合に、それぞれの τ_1 の値を測定すれば、 S 、 τ_0 、 D を算出することが出来る。一枚のウェーハの厚さを変化して、各厚さの時にライフタイム (τ_1) を測定しても同じである。尚、以下本論文では単にライフタイムという場合は(i)で定義した実効ライフタイムを意味している。

3. 試作測定装置の構成

試作ライフタイム測定系のブロックダイアグラム、装置の写真および測定されたオシロスコ

Fig.3-b Photograph of the lifetime measurement instrument, type "WAFFER".

Fig.3-c Typical decay curve of the oxidized silicon wafer. H: 5 $\mu\text{sec/div}$. V: 0.5 V/div.

ープで観察される減衰波形を、それぞれ図3—(a), (b), (c) に示した。以下に従来から行われているライフタイム測定方式と比較しながら特徴、改良点などを列記する。

1). 反射マイクロ波を用いるので、Si ウェーハの大きさ、設置位置などに自由度が大きい。透過マイクロ波法式の場合と比較して、導波管内の試料によるマイクロ波の吸収がなく、より一層低比抵抗のウェーハのライフタイム測定が可能である、透過マイクロ波方式 ([7], [12], [13], [16]) の場合のように、導波管に試料の大きさに相当する穴あけなどの加工が不要である。

2). キャリア注入用の光パルスは、マイクロ波と同一方向および反対方向から注入できるようにシステム化してある。マイクロ波を注入光と同一方向にすることによって、比抵抗の低いウェーハのライフタイム測定が可能である。

3). キャリア注入光源に赤外レーザー・ダイオード (LD, レーザ・ラボ社 LD-65, $\lambda=9050 \text{ \AA}$, パルス巾 100 nsec) および赤外発光ダイオード (LED, 東芝 TLN-101, $\lambda=9400 \text{ \AA}$, パルス巾 $2 \mu\text{sec} \sim 1 \text{ msec}$) を用いて、フィルター付きのキセノン光源を用いる場合 ([12], [13], [15], [16]) よりも小形化とキャリア注入量の増大を行った。写真 (c) に示すように減衰波形はノイズが小さく、安定している。YAG レーザ ($\lambda=10600 \text{ \AA}$) など大注入用光源とも組合すことを可能にした。

4). パルス光源と Si ウェーハの間にレンズ系又は光ファイバーを挿入することにより、ライフタイムのウェーハ内分布を非接触の状態に測定を可能にした。

5). キャリア注入用 LED のく動電源の波形と反射マイクロ波の変化分との位相差を用いることにより ([19]), ライフタイム測定のデジタル化を行い、工程管理に使用し易いようにした。

4. Si ウェーハおよび処理

実験に用いた Si ウェーハは、P 形、N 形の単結晶で、比抵抗は 30~400 ohm-cm と、比抵抗

0.0054~0.3ohm-cmの2つのグループである。
工程評価以外の Si ウェーハのライフタイム測定は、次の様な4種類の表面処理を施した。

- (1). サンド・ブラスト処理： Al_2O_3 による研磨
- (2). エッチング処理：硝酸3：フッ酸1の混合液による鏡面仕上げ
- (3). 負電荷膜処理 (Negative Charge Coating, N・C・C)：エッチング処理後に1%の重クロム酸ナトリウム液中で5~10分煮沸後

に更に乾燥を行う。P形 Si ウェーハに行う処理。[19]

- (4). 正電荷膜処理 (Positive Charge Coating, P・C・C)：エッチング後2%の第一塩化スズ溶液中に15~30分侵した後に乾燥する。N形 Si ウェーハに行う処理。[19]

(3), (4)の処理は、Si ウェーハ表面でのキャリアの再結合を抑える効果がある。スワール模様を顕微鏡観察する際は、Si ウェーハを、

Table1. Summarized Table of the experimental apparatus and results

項 目	LD, LED, YAG 光源による比較検討
過 剰 注 入	<p>LD : 定格内動作では10^{14}cm^{-3}の不純物濃度まで過剰注入はない(表面処理—[(1), (2), (3), (4)の場合]。比抵抗を上記より大きくすると過剰注入になるが、表面処理(3), (4)で起りやすい。過剰注入か否かは減衰波形より判定可能。</p> <p>LED : デジタル測定の場合は、LEDをデューティ比50%でく動するので注入量少なく過剰注入は心配ない。</p> <p>パルス光源として用いる場合は比抵抗および表面処理によってパルスの高さと巾を決定する。過剰注入か否かは減衰波形より判定可能。</p> <p>YAG : きわめて低比抵抗の場合のみ使用する。比抵抗によってパワーの制御が必要である</p>
JIS-H0604 及び透過マイクロ 波法との対応	<ul style="list-style-type: none"> ●キセノン光源のJIS法とLD光源の反射マイクロ波法によるライフタイム値は、1.0~2.0mm厚のSiを用いた場合100~200μsecまでのτでよく一致する。 ●LDを用いた透過と反射マイクロ波方式はよく一致する。 ●LED光源を用いたデジタル測定のライフタイムとLEDをパルス光動作で求めたライフタイムは一致する。
面 分 解 能	<ul style="list-style-type: none"> ●LDを用いたライフタイムの測定は、ウェーハをフランジから最大40mm 離れた状態で測定可能。 ●LDからの赤外光をそのままSi ウェーハに照射した場合は600μm、レンズ系又は光ファイバーを用いて200μm離れた部分のライフタイムを分離して測定出来る。正確には(光のスポット径)+(拡散距離)である。レンズ系などを用いれば他の光源でも同じ。
測定可能な比抵抗 の下限	<ul style="list-style-type: none"> ●LEDパルス動作でキャリア注入を行い、0.3ohm-cmのSiのライフタイムが測定可能(透過法では5ohm-cm)…いずれも表面処理(3)の場合。 ●YAGでは0.054 ohm-cmまで可能。
適用可能なウェー ハ工程	<ul style="list-style-type: none"> ●酸化膜付きSiのSi基板のライフタイムの測定、●拡散ウェーハの非拡散部分のSiのライフタイム測定、●イオン注入Siのライフタイムおよびイオン注入パターンの検出、●Siウェーハ表面のキズおよびよごれ。 ●上記の様な工程の評価はLD, LEDいずれの光源を用いても可能。
τ_0 と表面再結合 速度の分離測定	<ul style="list-style-type: none"> ●τ_0の測定を厚さの異なるSiウェーハで行えばτ_0, Sおよび拡散係数Dも求め得る。 ●減衰波形の解析からτ_0とSの分離測定可能。 ●LD, LEDなど光源の種類に関係しない。

Sirtl [20] エッチした。

5. 実験結果

ライフタイムの測定結果を項目別に詳細に述べる前に、測定結果の総括的なものを述べる。即ち、Table 1 に示すように LD, LED, YAG, の光源の適用の範囲および光源にキセノンを用いた場合との比較、更に透過マイクロ波方式との比較をも示した。

5.1 試作測定装置の評価

Fig. 4 は、過剰キャリアを LD で注入し、注入量と τ_{eff} の関係を示してある。注入量は、LD のパルス電流を制御して変化させ、発光出力とパルス電流との関係はカロリメータにより更生した。P 形の試料はともに表面処理(3)をほぼどこしてある。二つのウェーハともライフタイムは LD の定格内では注入量依存性ない。レーザー光の光子数が $3 \times 10^{12} \sim 2 \times 10^{13} \text{ ph}/\text{cm}^2$ で、キャリアの発生量子効率を 1 と仮定し、計

Fig. 4 Minority carrier lifetime vs. light intensity by a laser diode.

算した場合でも過剰キャリア濃度は熱平衡キャリア濃度 ($\sim 10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) の $1/100 \sim 1/10$ となり、低注入条件を満たしている。Xe ランプ光源を用いた Rama ([12]) の結果とも一致している。また LED についても注入量依存性のない条件で測定した。YAG を用いた場合は、

Si ウェーハの比抵抗がきわめて低く ($0.054 \sim 0.0054 \text{ ohm-cm}$) 過剰注入の心配はない。

Fig. 5 は、試作装置と透過マイクロ波法で測

Fig. 5 Comparison of the minority carrier lifetime measured by transmission and reflection microwave method.

定したライフタイム値を示した。試料は(1)~(4)の条件で仕上げたものを用いた。両方法で測定したライフタイム値はよく一致している。

Fig. 6 は反射マイクロ波を利用する本装置と JIS-H-0604 の標準測定で測定したライフタ

Fig. 6 Relation of the minority carrier lifetime measured by contactless microwave method with that measured by JIS method.

イム値との対応を示してある。JIS法で測定する場合は、F・Z単結晶を棒状のままDeep Etchを施しXeパルス光を用いてキャリア注入を行い、JIS H-0604に従って測定した。本反射マイクロ波法の場合は、JIS法の同一試料のトップ部分より切り出した厚さ1.0~2.0mmのSiをエッチング後と更に表面再結合速度を下げる(S-Lowering)(3)または(4)の処理を施してあるものについて測定した。試作装置による τ_{MICRO} と τ_{JIS} の間には、実験式(14)の関係が得られた。

$$\tau_{\text{MICRO}} = 273 \log \tau_{\text{JIS}} - 413 \quad (\mu \cdot \text{sec}) \quad (14)$$

τ_{eff} が100~200 $\mu \cdot \text{sec}$ では両者は比較的良好一致するが、 τ_{eff} が大きくなるにつれて大巾にずれている。これは拡散長Lが、 $L = \sqrt{D \tau_{\text{eff}}}$ で示されるように τ_{eff} が大きい領域ではLに対してウェーハの厚さが薄いことに原因している((7))。即ち、通常の0.2~0.5mm厚のSiウェーハでは、拡散係数(D)を用いて([21]) τ_{eff} の値を求めると、10~70 $\mu \cdot \text{sec}$ の値が τ_{MICRO} と τ_{JIS} が一致する理論的な上限となる。

Fig. 7は、開口導波管のフランジから試料を離して τ_{eff} を測定した結果である。三つの試

Fig. 7 Minority carrier lifetime vs. the distance from the waveguide end to silicon wafers.
○: FZ-SF-P 240 ohm-cm, ▽: FZ-SF-N 107 ohm-cm, □: FZ-SF-P 74 ohm-cm.

料の τ_{eff} は、フランジからの距離に拘らずほぼ一定であり、最高40mm程度離しても測定可能であった。

5.2 τ_{eff} 測定が可能なSiウェーハの比抵抗の下限

τ_{eff} 測定可能なSiウェーハの下限の比抵抗は、大部分は注入光量によって決定される。注入光源がLDやLEDなどに決められた場合には、ウェーハに注入されたキャリアを出来るだけ保存することによって、すなわち試料の表面での再結合を小さくする“S-lowering”処理によって τ_{eff} の測定可能な比抵抗の下限を小さくすることが出来る。先に示した(3)の表面処理をほどこすことによって、 τ_{eff} 測定可能な比抵抗の下限は、LED光源でP形、0.3ohm-cm。(3)の表面処理をほどこさない場合は2.3ohm-cmのP形Siウェーハであった。

LD, LED光源を用いて、比抵抗の小さい拡散層やエピタキシャルSiの基板の τ_{eff} を測定することは出来ない。Fig. 3-(a), (b)の装置で注入光[YAGレーザの第一(10600Å)と第二(5300Å)高調波]とマイクロ波の入射がSiウェーハに対して同一方向から行われる様に設置し、Siウェーハに高注入を行った。P形、0.054 ohm-cm Siウェーハで $\tau_{\text{eff}} = 2 \mu \cdot \text{sec}$ が得られた。YAGレーザのパルス巾は300n·secで、その出力はカロリメータで測定した結果約50KWp/1mmφであった。10600Åの光を用いた時のみ、P形で0.054ohm-cm(Na: $\sim 1.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$)のSiウェーハの τ_e が測定出来るが、これよりも更に低比抵抗Siの τ_{eff} の測定は不可能であった。5300Å光の場合は、Siウェーハの表面附近に注入されるキャリアの割合が増加し、表面でのキャリアの割合が増加し、表面での再結合で消滅する量も増すので τ_{eff} は測定出来ない。ウェーハの表面処理は(2)の場合で、 $S \cong 1000 \text{ cm/sec}$ である。注入キャリアの分布は、5300Åの場合は表面より1 μm , 10600Åの場合は100 μm 程度になる。 $S \cong 1000 \text{ cm/sec}$ と考え合せれば、5300Åの場合0.054ohm-cm Siの τ_{eff} は測定出来ない

ことが理解出来るよう。

5.3 試料面上の加工層（不均一層、欠陥）との対応

Fig. 8 Variation of the minority carrier lifetime by the pair scribed lines.

Fig 8は、鏡面仕上げしたウェーハ表面にスクライバーで傷を作り、(3)の表面処理後にLED光源を用いて τ_{eff} の分布を測定した結果である。2本を一組とした傷（巾 $200\mu m$ ）を4組作り、2本の傷の間隔をそれぞれ1.0, 0.7, 0.5, 0.3mmとした。Siウェーハを左右に走査し、レーザー光の当たる場所を傷と直角方向に移動させ、 $200\mu m$ の間隔で τ_{eff} の分布を測定した。間隔が0.7, 1.0mmの場合は傷による τ_{eff} の変化により、明確に2本の傷が検出されている。しか

Fig. 9 Variation of the minority carrier lifetime by the swirl pattern in silicon wafer.

し、0.5mm間隔の傷は検出が不明確であり、0.3mmの場合は2本の傷がまったく区別出来ない。ウェーハ面での面分解能は、直径約 $500\sim 600\mu m$ と推定される。

Fig. 9は、スワールを含むSiウェーハの τ_{eff} とスワール分布の対応を示している。 τ_{eff} はスワールの存在する部分で低下しており、またスワール濃度が高いほど τ_{eff} は小さい。但し、矢印(↓)で示した部分の τ_{eff} の低下は、測定位置の目印のスクライバー傷のためである。 τ_{eff} 分布とこの様な対応は、既に報告されている様にスワールが活性な再結合中心であることと一致している。

Fig. 10, 11は鏡面仕上げしたSiウェーハにイオン注入層を形成し、 τ_{eff} を測定した結果である。直径 $200\mu m$ の光ファイバーをLEDとウェーハとの間に挿入し、試料面での光照射面積を狭くした。

Fig. 10は、エネルギー120KeVで B^+ を $2 \times 10^{14} \cdot cm^{-2}$ イオン注入した層（図中の線部）を形成

Fig. 10 Detection of the pair lines by the minority carrier lifetime variation. Lines are $2 \times 10^{14} B^+$ implanted over the width of $200\mu m$.

し、(4)の表面処理後に $100\mu\text{m}$ の間隔で τ_{eff} 分布を測定した結果である。1本のラインの間は $200\mu\text{m}$ 、7本のライン間隔は $600\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ づつ狭くなり、最小間隔は $100\mu\text{m}$ である。イオン注入層の部分では τ_{eff} が低下しており、 τ_{eff} の分布とラインの位置はよく対応している。2本ねのライン間隔が $200\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ の場合は、 $300\mu\text{m}$ 以上の場合に比べて2本のラインの識別は不明確である。

Fig.11は、図中の実線で囲んで示されている様なイオン注入パターンを形成し、 τ_{eff} を二次元的に測定した結果である。試料の比抵抗、表面処理、イオン注入条件はFig.10の場合と同様である。測定は横方向 $400\mu\text{m}$ 、縦方向 $500\mu\text{m}$ の間隔で行った。図では、 τ_{eff} 値を4段階に分け、記号で示した。 τ_{eff} 値が小さい領域(#記号で示されている)はイオン注入層のパターンと一致している。

Fig.11 Detection of the ion implanted pattern on n-type 400ohm-cm silicon wafer by the lifetime measurement. $2 \times 10^{14} \text{ B}^+$ implanted region are defined by solid lines.

5.4 D, τ_b , および S の算出

5.1, 5.2, 5.3では τ_{eff} を用いたが、ここでは τ_1 を測定し、拡散係数(D), バルクライフタイム(τ_b)を算出した。式(13)の関係から明らかに、 $(\pi/w)^2$ 対 $\gamma (=1/\tau_1)$ をプロットした時、直線の傾きからD、 $(\pi/w)^2=0$ への外挿点より τ_b を算出することができる。実験では減衰初期に現われる高次モードの影響を抑えるために、LDより吸収係数の小さいLEDで過剰キャリアを注入した。尚、LD, LEDの吸収係数はそれぞれ 320cm^{-1} 、 200cm^{-1} である。また、 $S \gg 2D/w$ の条件を満足するように、ウェーハ面をきわめて荒いサンド・ブラスト処理を行った。ウェーハの厚さは約 $3 \sim 1\text{mm}$ の範囲内で変化させた。Fig.12, 13は、それぞれN形、P形

Table 2 Compariy carrier lifetime and the diffusion coefficient of the silicon wafers.

SAMPLE	p (Ωcm)	D (cm^2/sec)	τ_b (μsec)
FZ-N	435	18.0(12)	1730
FZ-N	57	16.6(12)	870
FZ-P	240	54.0(35)	300
FZ-P	76	54.0(32)	460

*() : H. F. W "silicon Semiconductor Data"

Fig.12 Plots of $\gamma (=1/\tau_1)$ vs. $(\pi/W)^2$ of n-type silicon.

Fig.13 Plots of $\gamma (=1/\tau_1)$ vs. $(\pi/w)^2$ of p-type silicon.

Si に対する実験結果が示してある。これらのグラフから算出した D , τ_0 の値は表 2 にまとめて示してある。表中の D の値で () 内に示した値は文献 [21] の値である。

p 形, 比抵抗 80 ohm-cm Si ウェーハの表面処理条件によって, 表面再結合速度がどの様に変化するかは次の様な各処理段階での τ_1 と式 (12) を用いて求めた。

#1000 Al₂O₃ 研磨 (厚さと τ_1 の測定) → HF:HNO₃ 混液によるエッチング (厚さと τ_1 の測定) → N・C・C 処理 (τ_1 の測定) → (第 2 回目)
#1000 Al₂O₃ 研磨 (厚さと τ_1 の測定) → HF:HNO₃ 混液によるエッチング (厚さと τ_1 の測定) → N・C・C 処理 (τ_1 の測定)。#1000 Al₂O₃ 研磨, HF:HNO₃ 混液エッチング, N・C・C 処理の各処理に対して, 2 組の (厚さ, τ_1) を用いて D の値を文献の値を代入すれば式 (12) より “S” が求められた S は #1000 Al₂O₃ で, 2400 cm/sec, HF:HNO₃ の混液エッチングで 1350 cm/sec, N・C・C 処理で 150 cm/sec であった。

6. 検討

キャリアの注入光源として, LD, YAG レーザ, LED を用いると, Si 内での光吸収係数は従来用いられている Xe-lamp 光源に Si フィ

ルターを付けた場合よりも大きい。従って, 近似値に用いられている $\alpha \approx 0$ の場合に実現される, キャリアの一樣注入を用いた解析は厳密な意味では妥当でない ([9], [12], [17])。しかし, S がきわめて大きい場合は, 一樣注入の場合と同じように式 (13) で示すことが出来る。

Fig. 1 より, $\tau_{eff.} = 35 \mu\text{sec}$, $\tau_1 = 68 \mu\text{sec}$ となり一本の減衰曲線でも使用する部分によってライフタイムは著しく異なる。解析は, $S = 1000 \text{ cm/sec}$ で行っており, この S の値は通常の HF, HNO₃ の混液で化学処理した場合 (～1350 cm/sec) に近い。従って, この処理の Si ウェーハの減衰曲線から τ_0 を求める場合には, 使用する波形は出来るだけ一次モードが主体となる部分 (信号の大きさは小さくなるが) がよい。

Fig. 5 の反射と透過マイクロ波で測定される $\tau_{eff.}$ の値は同じであるが, 測定可能なウェーハの比抵抗の下限は, LED パルス光源で 0.3 ohm-cm 後者では 5 ohm-cm で, YAG レーザで 0.054 ohm-cm であった。

$\tau_{eff.}$ が 200 μsec 以上での τ_{JIS} と τ_{MICRO} の差は, $\tau_{eff.} = 200 \mu\text{sec}$, $D = 30 \text{ cm}^2/\text{sec}$ とすると $L = 775 \mu\text{m}$ となり, 試料の厚さと同程度になり, 表面での再結合の影響が原因していることが明らかである。

Fig. 8, 9, 10, 11 に示される様に, LD, LED を光源として用いることにより, 局所的な $\tau_{eff.}$ を測定出来る。この場合, S の影響により測定される $\tau_{eff.}$ は τ_0 とは異なった値になるが, $\tau_{eff.}$ は信号の大きい部分を用いるので測定し易い。実際のウェーハ評価の場合は, 必ずしも τ_0 の値は必要でなく, ウェーハ相互間またはウェーハ内での $\tau_{eff.}$ の相対的な値がわかれば十分である。デバイス工程間の非接触な $\tau_{eff.}$ の測定により, イオン注入層の転写パターンの検出 (Fig. 11 参照) やその活性化の程度などへの応用が見込まれる。

拡散定数, バルクのライフタイムの評価 (Fig. 12, 13 参照) に用いた式 (13) の導出には高次モードの成分が無視され, 試料の光照射面および裏

面での $S = \infty$ が仮定されている。従って、実験では減衰曲線の初期の部分を除くことにより、高次モードの影響を少なくした。Siウェーハは、直径5cmの丸形であり、キャリアの注入面積は、試料表面に比較して小さいので、側面での再結合は無視できる。また、 Al_2O_3 で試料表面を研磨することによって、 $S \gg 2D/d$ の条件を満足させた。従って、式(13)の適用は妥当であると思われる。

拡散定数(D)の値は、p形、N形ともに従来報告されている値よりやや大きい値を示す。これは、試料の厚さdを測定する時に表面の凸凹のために、やや大きく見積っていることが主な原因であろう。外挿点より求めたバルクのライフタイム(τ_b)は、厚さ3mmの試料を負電荷膜処理して求めた τ_b 値(F・Z, P形, 240ohm-cm, 225 μ sec : F・Z, 76ohm-cm, 350 μ sec)とは一致しない。これは、(3)の表面処理を行ってもSを完全に零にすることが出来ないためである。

7. むすび

半導体の赤外LD, LEDを従来のキセノン・ランプに代えて使用することにより、ウェーハ状Siのライフタイム測定系をコンパクト化し、高精度化に成功した。10GHzのマイクロ波を用いた反射方式により、Siウェーハの面上局所部分の τ_{eff} 測定が可能になり、LDでは600 μ mの分解能を、レンズ系又は光ファイバーを用いたLEDでは200 μ mの分解能を得た。反射マイクロ波を用いる方式は、導波管内に試料を挿入する透過方式と比較して試料の固定位置に大きな自由度がある。また τ_{eff} が測定可能な試料の比抵抗の下限は、LD, LED光源を用いる場合は反射方式は透過方式よりも約1桁も小さい。反射マイクロ波方式は光源にも自由度が大きいので、YAGレーザを用いて、0.054ohm-cmのSiウェーハの τ_{eff} が測定可能である。拡散係数(D), τ_b およびSの算出を τ_1 又は減衰波形の解

析によって行った。測定されるライフタイム(τ_{eff})の絶対値の物理的な意味にこだわらないかぎり、本システムはLSIの工程間の非接触チェック手段として十分に適用し得る。

謝辞 本研究に日頃とくに御鞭撻いただいている、大阪大学の犬石嘉雄教授、ならびにYAGレーザ光源の使用ならびにその御指導をたまわった近畿大学理工学部の久保宇市教授に心から謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) G. L. Miller et al.: Rev. Sci. Instrum. **47** (1976) 799.
- 2) H. Föll and B. O. Kolbesen : Appl. Phys. Letts. **8** (1975) 319.
- 3) 杉田・応用物理 **46** (1977) 1056.
- 4) K. Ziegler et al.: Solid State Electron **18** (1975) 189.
- 5) 萩田・堀口・古川 応用物理 **49** (1980) 930.
- 6) F. Horiguchi et al.: J. J. appl. Phys., Supplement-1 **18** (1979) 165.
- 7) 宇佐美・藤井・工藤: 応用物理 **47** (1978) 1024.
- 8) 宇佐美・神立・櫛田・山根: 電子通信学会全国大会, S-1-1 (1979)
- 9) 加藤・神立・宇佐美: 電子通信学会技法 OQE **77-4** (1977) 7.
- 10) 大原・石河・青木: 電子通信学会技法 ED-78-42 (1978) 9.
- 11) 古川: 日経エレクトロニクス (1979) No.205, pp. 94~116.
- 12) A. P. Ramsa : J. appl. Phys. **30** (1959) 1054.
- 13) S. Deb and B. R. Nag : J. appl. Phys. **33** (1962) 1604.
- 14) 原: 応用物理 **49** (1980) 984.
- 15) Y. Mada : Japan J. Appl. Phys. **8** (1979) 2171
- 16) 宇佐美・渡辺・森岡: 応用物理 **44** (1975) 237.
- 17) J. P. McKelvey and R. L. Longini : J. appl. Phys. **25** (1954) 634.
- 18) M. Boulou and D. Bois : J. appl. phys. **48** (1977) 4713.
- 19) 清水・櫛田・神立・宇佐美: 第25回応用物理学会関係学会予稿集 (1978春) P. 310.
- 20) E. Sirtl and A. Adler : Z. Metallk **52** (1961) 529.
- 21) H. F. Wolf. Silicon Semiconductor Data **9** (1969) 92~95 Pergamon Press.