

平行デュアルレーザビーム法によるシリコンウェーハ のバルクキャリア寿命評価技術

金田 寛* 大村 一郎 (九州工業大学)

Dual laser beam technique to evaluate bulk lifetime of free carriers in silicon wafers

Hiroshi Kaneta*, Ichiro Omura, (Kyushu Institute of Technology)

A steady-state distribution of free carriers is generated in the silicon wafer by irradiating the 1064-nm YAG laser beam. By measuring the behavior of refraction of another infrared laser beam caused by the generated free carriers, we derive the distribution of the generated free carriers, to finally obtain the diffusion length and lifetime of the free carriers.

キーワード: パワーデバイス, シリコンウェーハ, 評価, キャリアライフタイム, レーザー, 屈折, キャリア濃度分布

(Keywords: power device, silicon wafer, evaluation, carrier lifetime, laser, refraction, carrier density distribution)

1. はじめに

〈1・1〉 **バルクライフタイム** パワーデバイスのうち、いわゆる縦型パワーデバイスと呼ばれるものでは、ウェーハの表面と裏面の間のバルク部分を貫通するように電流が流れることによって、デバイス動作が行われる。それも、ハイエンド・パワーデバイスでは、高電圧かつ大電流密度の電流が流れる。そのため、パワーデバイス製造用のシリコンウェーハには、ウェーハの内部（バルク部分）に高い結晶完全性が求められる。この事情は、いわゆるLSIの場合とは大きく違っている。LSIでは、情報処理のための演算素子や記憶素子、ならびにそれらを結ぶ配線は全てウェーハの表層に作られる。すなわち、LSIの場合は、デバイスの動作領域はウェーハの表層に限られる。よって、表層領域に関する限り、高い結晶完全性が求められる。しかし、ウェーハの内部は、素子の支持基板という役割や、ゲッタリング効果を付与させるために意図的な欠陥導入を行う領域としての役割を果たすが、そこが高い結晶完全性を持つことは、特に求められない。言い換えれば、LSIの場合には、まずは、ウェーハの表層領域さえ結晶完全性が保証されれば、まずは第一関門を通過できる。この課題は結晶成長技術以外にも、ウェーハを作った後の熱処技術によっても、クリアすることができる。

反面、縦型パワーデバイスでは、ウェーハの表層（表面と裏面の両方）はもとより、ウェーハ内部まで非常に高い

結晶完全性が求められる。この面では、パワーデバイス用ウェーハの方が、満たすべき品質要求が多く、そのハードルも高いと言える。特に、ウェーハバルク部の高い結晶完全性を実現することは、LSIのウェーハ技術では遭遇しなかった問題であり、LSIウェーハ技術では対処できない課題である。

このような、ウェーハの結晶完全性の指標となるのは、自由キャリアの寿命である。特に、ウェーハ内部における自由キャリアの寿命(以下では、バルクライフタイムと呼ぶ)は、ウェーハ内部の結晶性を反映するため、バルクライフタイムを精密に評価することが重要な技術課題となっている。

〈1・2〉 **ウェーハ内部に届く探針** バルクライフタイムを測定するためには、測定の探針がウェーハの内部に侵入して、バルクライフタイムが関係する物理量を直接的に捉えるような測定原理によるものでなければならない。これまで、LSI用ウェーハのキャリア寿命評価のために考案され、広く世界に普及しているマイクロ波PCD (Microwave Photo-Conductive Decay)法がある。この方法では、キャリアの寿命を測定するマイクロ波はウェーハの表面から30-50 μ m程度の深さまで親友するが、それより深いところまでは直接の観測領域（探針が到達する領域）にはならない。そのため、この方法では、キャリアに対する表面再結合の影響を除去して、表層域のキャリア寿命がバルクライフタイムに近づくような、抵当な表面処理が必要

となる。これに対して、われわれの方法では、測定探針となるレーザビームはウェーハの十分内部まで届く（貫通するため、ウェーハ内部のキャリアの寿命を直接捉える。

〈1・3〉 高速度評価への要求 製造の直前にある受け入れ検査ラインをどれだけ早く通過できるかということが、デバイス製造のイールドに大きく左右する。そのため、キャリア寿命評価に対する高速化の要求が高まり、従来法とは根底的にことなる測定原理の採用によって、キャリア寿命の評価速度を格段に向上させる必要がある。従来法のように、キャリア消滅の時間変化を追跡するという方法から脱却して、原理上は、定常状態を“瞬時に”観測することによって、キャリア寿命を評価できるような技術が望ましい。本評価法開発では、これを試みる。目標値としては、キャリア応答の観測時間にかんして、従来法の1/100程度の時間短縮を狙う。

2. 評価の原理と装置構成

〈2・1〉 原理 半導体や絶縁体における自由キャリアの寿命とは、光照射などの外部刺激によって伝導帯中に励起（生成）された電子、あるいは価電子帯中に励起されたホールが、その外部刺激の遮断とともに時間的に消滅してゆく過程の速度を特徴づける時定数である。しかし、この動的な応答の時定数（キャリアの寿命）は、光照射などの外部刺激を一定の強度で当て続けた場合に起こる定常状態の観測によっても測定することが可能である場合が多い。本評価法の測定原理としては、この定常状態測定の方法を採用する。

本評価技術では、二つのレーザビームを用いる。一つは、

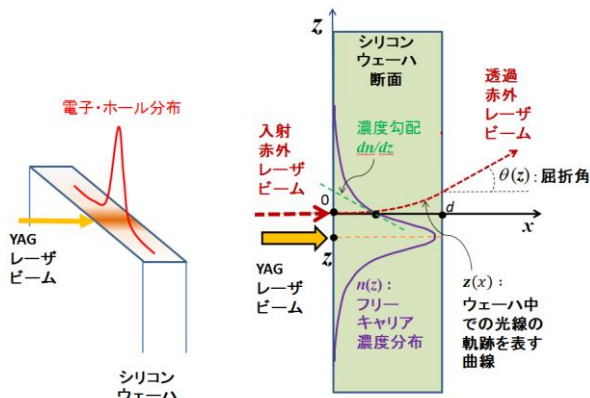


図1. 測定原理を示す模式図. 自由キャリアを生成するためのYAGレーザ（左）と生成された自由キャリアの濃度勾配によって赤外レーザビームが屈折する様子（右）を模式的に示す。

Fig. 1. Schematic description for the operating principle of the dual laser beam technique to evaluate the lifetime of free carriers in the interior of the silicon wafer.

評価対象であるシリコンウェーハに内部に自由キャリアを発生させるための波長 1064 nm（フォトンエネルギー＝1.17 eV）のNd:YAGレーザである。このYAGレーザのエネルギーは、室温におけるバンドギャップ・エネルギー（1.14 eV）よりもわずかに大きいため、レーザビームがウェーハに侵入すると、電子と正孔を生成するため、それによる幾分かレーザ強度低下を生じるが、通常の775 μm厚のウェーハでは、ウェーハ内のビーム進行に伴う強度の低下量は無視できる（ウェーハ内部の光路にそって強度は一定と見ることができる）。

パワーが約800 mWのこのようなYAGレーザビームをレンズで絞り、ウェーハに入射させる。このときの様子を図1の模式図に示してある。図1左側に描いたように、レーザビームは、シリコンウェーハの劈開端面の近く（端面から1 mm以上隔たったところ）に入射し、裏面へと貫通する。（後述のとおり、実際には、光路配置は垂直入射ではないが、原理上は本質的な違いがないので、ここでは簡単化して、垂直入射の場合を描いている）。このとき、ビームの中心軸を対称軸とする自由キャリアの回転対称濃度分布ができる。図1の模式図の中には、この自由キャリア濃度分布の半径方向（ビーム軸に直角な方向）に沿った関数形状が描かれている。上述のとおり、この自由キャリアの濃度分布は、回転対称であり、かつレーザ光の進行方向に沿って一定とみなせる。したがって、この自由キャリアの濃度分布は、レーザのビームの中心軸からの動径距離（ここでは、変数 z や r で表す）だけで記述される（図1右側）。この自由キャリアの濃度分布の形状こそが、自由キャリアの寿命や拡散長などの情報を含んでいる（寿命や拡散長によって決まる量になっている）。したがって、計測された濃度分布関数形状から、実際に自由キャリアの寿命や拡散長の数値を求めることができる。これが、時間無依存の（定常状態にある）自由キャリア濃度分布を利用した我々の新評価技術の特徴の一つである。

〈2・2〉 屈折角曲線 次に、上記のようにしてシリコンウェーハの中に生成された定常状態にある自由キャリア濃度分布を計測する技術を説明する。これを行うには、図1に示したように、シリコンウェーハを容易に透過する波長 1550 μm（フォトンエネルギー＝0.800 eV）の赤外レーザのビームを用いる。この赤外レーザビームは、（シリコンウェーハの内部で）キャリア生成用のYAGレーザビームと平行になるように設定する（下記〈3.3〉項参照）。ただし、これら二つの平行ビームの間隔は連続的に変化させることができるように構成する。いま、図1のように、鉛直線上に z 座標軸を取り、赤外レーザ z 座の原点（ $z = 0$ ）をとおり、水平方向に走るものとする。YAGレーザビームの z 位置が上下に可変であるようにして、その位置を座標 z で表す。今、YAGレーザビームの z 位置を調節して、図1（右）のように、赤外レーザビームが自由キャリア濃度分布のピークの裾を通る場合を考える。赤外領域の屈折

率が自由キャリアの濃度によって変化するため、図1のように、裾を通る赤外レーザービームは、キャリア濃度によって屈折を受ける。このような、自由キャリアの濃度勾配によって赤外レーザービームが屈折を受けることは、パワーデバイス内部に生じたキャリアの場合については報告がある(文献(1) - (3)を参照)。実際には、赤外レーザービームは、キャリアの濃度が薄い方向に向かって屈折する。これは、自由キャリアプラズマの光学特性に起因する。屈折角を θ で表すことにする。屈折角 θ は、YAGレーザービームが透過する z 位置の関数となるから、 $\theta(z)$ と表す。YAGレーザービームの z 位置を連続的に変化させながら屈折角を測定して得られる $\theta(z)$ の曲線を屈折角曲線と呼ぶことにする。理論より、 $\theta(z)$ は次のように表される。

$$\theta(z) \sim \frac{d}{dx} z(x) = -\frac{x}{2} \frac{4\pi e^2}{\omega^2 m} \frac{d}{dz} N(z)$$

ここで、 ω は赤外レーザー光の角振動数、 m は自由キャリアの有効質量である。測定された屈折角曲線 $\theta(z)$ を z について積分することによって、自由キャリア濃度分布 $N(z)$ が求められる。ここから拡散長と寿命の数値が導かれる。

3. 原理実証の実験と結果

〈3・1〉 装置 本実験で用いた装置の写真を図2に、また装置構成を示す平面模式図を図3に示す。図2では、評価対象とするシリコンウェーハ上のYAGレーザーの照射点が“P”で、赤外レーザーの照射店が“S”と印されている。

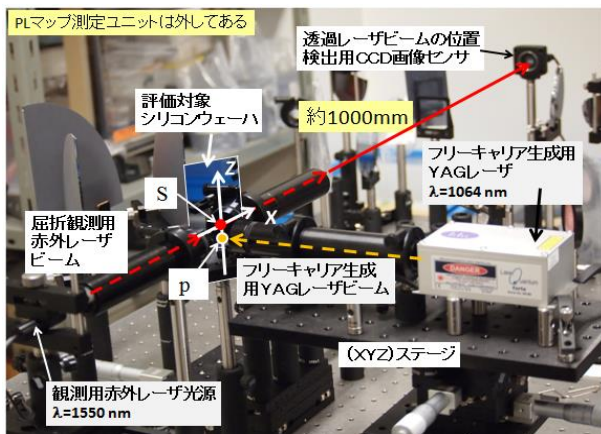


図2. 評価原理の実証と実験的測定に用いた装置の写真. 黄色の補助線(破線)はYAGレーザーを、赤の補助線は赤外レーザービームを示す。ウェーハに対する照射点をそれぞれ、“p”と“S”の印で示してある。

Fig. 2. Photograph of the experimental apparatus used for the experiment. The red and yellow dotted lines drawn in the figure represent the infrared laser beam penetrating the silicon wafer, and the YAG laser beam to generate the free carriers in the wafer, respectively. The positions of irradiation (focusing) of these two beams on the silicon wafer are indicated by the symbols “S” and “p”

〈3・2〉 実験 図2のように、YAGレーザーの照射点Pを十分下方から徐々に上方にシフトさせて行く場合の赤外レーザーの挙動を観測した結果を図4に示してある。図4(a)は、YAGレーザービームの照射点が十分下方であり、事実

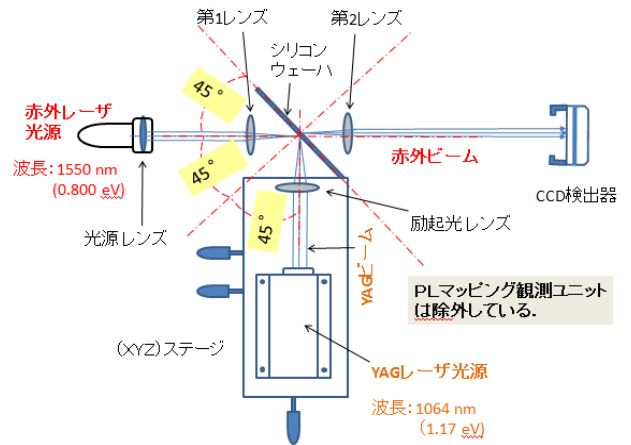


図3. 実験装置の平面模式図. 図2に写真で示した実験装置の構成を表す。

Fig. 3. Schematic description of the top view of the experimental apparatus shown in Fig. 2.

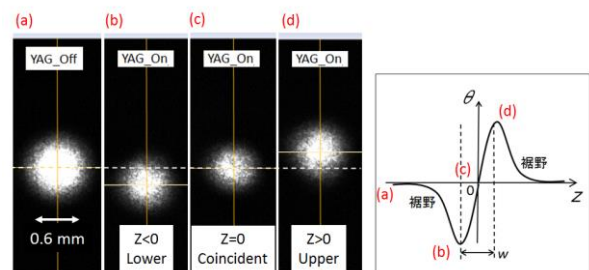


図4. 赤外レーザービームの屈折挙動. CCDセンサの特性上、レーザースポットの上下シフトが逆転している。例えば、図(b)におけるスポットのシフトは、実際には上向きである。

Fig. 4. Result of experiment. Figures (a)-(d) are the photographs of the infrared laser beam detected by the CCD image sensor in Fig. 3. Photograph (a) was taken in the absence of YAG laser irradiation, which is equivalent to the situation of the YAG laser beam far distant from the infrared laser beam. Figures (b) - (d) indicate how the (angle of) refraction of the infrared laser beam changes with change of irradiation position Z (Point P in Fig. 2) of the YAG laser beam. Figure (e) schematically shows the continuous curve of refraction angle $\theta(Z)$: the angle of refraction θ as the function of the irradiation position z of YAG laser beam.

上、YAGレーザー照射の影響が赤外レーザーに及んでいない状況である。言い換えると、YAGレーザーを照射していない状況と等価である。この位置からYAGレーザーの照射点をさらに上方にシフトさせていった場合が図4 (b)である。この状況は、図1の右側に描いた状況に相当し、赤外レーザービームは、上方に屈折している。この状態からYAGレーザーをさらに上方に移動させ、赤外レーザーと同じ高さ(z位置)にした時の赤外レーザービームのスポットを示したのが図4 (c)である。このときは、赤外レーザービーム

〈3・4〉 完全平行デュアルレーザービームの実現

図5は、ウェーハ内部における赤外レーザービームとYAGレーザービームの中心線を示している。ウェーハ表面に対して45度の入射角でウェーハ内部に侵入した赤外ビームは、屈折した後に、そのまま透過するビーム(0時ビーム)と裏面で反射して表面に向かうビームに分かれる。後者はさらに表面(内部)で反射し、裏面に向かうビームを生む。このビームは、同様に、裏面から外部に出るビーム(1次ビーム)と、表面に向かうビームに分かれる。このようにして、さらに高次(2次,...)の透過赤外ビームが生み出される。

一方、図5の赤外レーザービームとは反対側から、やはり45度の入射角をもってYAGレーザービームをウェーハに照射し、このビームのウェーハ内部での光路が、ウェーハ裏面で最初に反して、表面に向かう赤外レーザービームと平行になるように設定する。ウェーハ内部におけるこれら二つのレーザービームは、進行方向は逆であるが、互いに平行である。このようにして、ウェーハ内部での反射を利用することによって、ウェーハ内部で互いに平行になるYAGレーザービームと赤外レーザービームを得ることができる。このことによって、図1では模式的に描かれた完全に平行な二つのレーザービームを実現することができる。

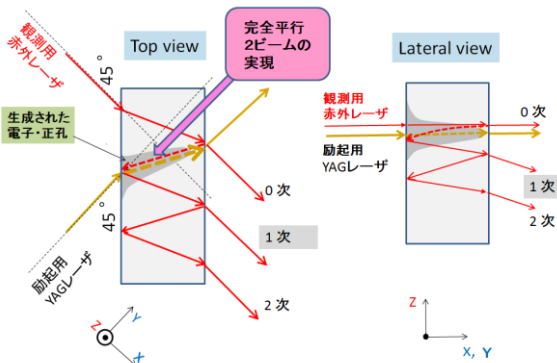


図5. ウェーハ内部の光路において実現させる完全平行デュアルレーザービーム. 平面図(左)と側面図(右).

Fig. 5. Realization of parallel dual laser beams inside the wafer. Both of the infrared and YAG laser beams are on the plains parallel to the (x,y)-plain.

がキャリア濃度分布の中心(頂点)を通過するため(濃度勾配がゼロであるため)、赤外レーザービームは屈折することなく、透過する。この状態からYAGレーザーを更に上方にシフトさせると、赤外レーザービームは自由キャリア濃度の分布の下側の裾(図1参照)を通過することになり、赤外ビームは、下方に向かって屈折する。この挙動を観測した結果が Fig. 4(d)である。(CCD画面で捉えたビームの上下シフトは、実際と逆になることに注意)。この状態からさらにYAGレーザーを上方に移動させると、もはや赤外レーザーに対する自由キャリアの影響はなくなり、屈折はゼロにもどる。このような赤外レーザービームの屈折挙動を滑らかな曲線で結んだのが、図4に示した屈折角曲線である。図4 (a)-(d)の場合に対応する屈折角曲線上の点を同じ記号で示してある。

〈3・3〉 キャリア濃度分布のデータ導出 このようにして得られた図4のような屈折角曲線をzについて積分することによって、図1に示したような、自由キャリアの濃度分布の曲線が得られる。この濃度分布の曲線を理論解析することによって、自由キャリアの拡散長が求まる。その結果にキャリアの拡散定数を呈用すると、キャリアの寿命が求められる。

文 献

- (1) G. Deboy, G. Sölkner, E. Wolfgang and W. Claeys, *Microelec. Eng.* **31**, pp. 299-307 (1996).
- (2) R. Thalhaniiner, G. Deboy, E. Knauf, E. Kuhbandner, G. Wachutka, *IEEE*, pp. 181-184 (1997).
- (3) N. Wachutka, *IEEE*, pp. 181-184 (1997); G. Schrag, A. Korzenietz, J. Oberndörfer, G. Wachutka, in *Proceedings of the 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's*, June 15-19, pp.151-154 (2014), and the references therein.