

# μ-PCD 法によるエピタキシャルウェーハ評価の精度に関する検討

真辺 航\* 大村 一郎 (九州工業大学)

附田 正則 (北九州市環境エレクトロニクス研究所)

Investigation of Epitaxial Wafer Evaluation Accuracy with Microwave Photoconductivity Decay

Wataru Manabe\*, Ichiro Omura, (Kyushu Institute of Technology)

Masanori Tsukuda, (Green Electronics Research Institute, Kitakyushu)

We discussed applying the microwave photoconductivity decay ( $\mu$ -PCD) to measure carrier lifetime of silicon epitaxial wafer. This paper clarified the range of evaluable substrate concentration and thickness by construction of conditional expression and TCAD simulation. The result becomes guideline on evaluation accuracy of epitaxial wafer for power device.

**キーワード** : パワーデバイス, エピタキシャルウェーハ, キャリアライフタイム, マイクロ波光導電減衰法, TCAD シミュレーション, 評価精度

(Keywords, Power Device, Epitaxial Wafer, Carrier lifetime, Microwave Photoconductivity Decay, TCAD Simulation, Evaluation Accuracy)

## 1. はじめに

シリコンエピタキシャルウェーハは、シリコン基板上に単結晶シリコン層であるエピタキシャル層（以下エピ層）を成長させたウェーハである。縦型パワーデバイス用の圧膜エピタキシャルウェーハでは、ウェーハの厚さ方向に電流が流れるため、ウェーハ内部の結晶欠陥や金属不純物の少ないものが求められ、特にエピ層内部が重要である。

キャリアライフタイムは結晶欠陥や金属不純物を把握するためのパラメータとして用いられ、ウェーハの段階でキャリアライフタイムを測定することが一般的である。レーザとマイクロ波により非接触、非破壊でウェーハのキャリアライフタイムを測定できる  $\mu$ -PCD (Microwave Photoconductivity Decay) 法<sup>(1)(2)</sup>は、LSI 用ウェーハなどのキャリアライフタイム測定法として広く用いられている。

パワーデバイス用のエピタキシャルウェーハ（以下エピウェーハ）に  $\mu$ -PCD 法を用いる場合、キャリアをウェーハの厚さ方向に深く侵入させる必要がある。その際は、高濃度の基板がエピ層キャリアライフタイムの測定精度に影響することを考慮する必要がある。

本研究では、パワーデバイスに用いられる厚膜エピウェーハを対象とし、 $\mu$ -PCD 法によるエピ層のキャリアライフ

タイム測定を検討した。キャリアライフタイムが測定可能な条件式の構築と  $\mu$ -PCD 法を模擬したシミュレーションにより、評価精度とエピウェーハの構造との関係を明らかにした。

## 2. $\mu$ -PCD 法

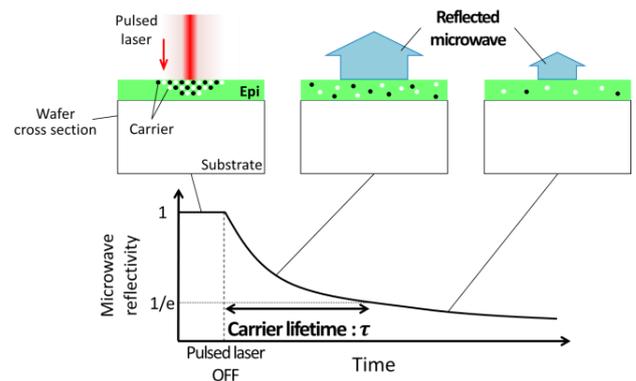


図 1  $\mu$ -PCD 法の原理<sup>(1)</sup>

Fig. 1. Principle of  $\mu$ -PCD<sup>(1)</sup>

シリコンのバンドギャップより大きなエネルギーをもつレーザをシリコンウェーハに照射すると、過剰キャリアが生成する。ウェーハ内部の過剰キャリアはSRH過程<sup>(3)</sup>に従

って再結合し、熱平衡時のキャリア密度まで減少していく。ウェーハの結晶欠陥が多いと過剰キャリアが再結合するまでの時間、すなわちキャリアライフタイムが短くなる。

$\mu$ -PCD 法は、過剰キャリアの再結合によるウェーハの導電率の変化をマイクロ波の反射を使って検出することでキャリアライフタイムを求める方法である。反射マイクロ波にウェーハ内部キャリアの情報が含まれており、マイクロ波の反射強度から直接キャリアライフタイムを求めることができる。

本研究では、マイクロ波の反射強度の時間変化をウェーハのシートコンダクタンスの時間変化で考え、条件式の構築、シミュレーションを行った。ウェーハのシートコンダクタンス $\sigma$ は式(1)で表せる。

$$\sigma = q\mu_n \int n dy + q\mu_p \int p dy \quad \dots\dots\dots(1)$$

$q$ は素電荷、 $\mu_n$ 、 $\mu_p$ は電子、正孔の移動度、 $n$ 、 $p$ は電子、正孔密度である。ウェーハのドーピング濃度が高い場合やウェーハ内の過剰キャリアが多くシートコンダクタンスが大きい場合には、反射マイクロ波の強度が高くなる。反対にウェーハのドーピング濃度が低い、過剰キャリアが少ないときはシートコンダクタンスが小さく、反射マイクロ波の強度も小さくなる。

### 3. 測定可能条件式の構築

パワーデバイスに用いられる厚膜エピウェーハにおいて、 $\mu$ -PCD 法でエピ層のキャリアライフタイムを測定するための条件式を構築した。

**〈3・1〉 基板の濃度を考慮した測定可能条件**  $\mu$ -PCD 法でエピ層のキャリアライフタイムを測定するためには、反射マイクロ波でエピ層のシートコンダクタンスの変化を検出することが必要である。基板の影響を考慮し、エピ層のシートコンダクタンスが検出できる条件を述べる。

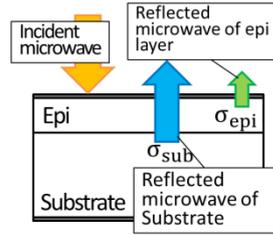
2章で述べたように、 $\mu$ -PCD 法では過剰キャリアによる導電率の変化をマイクロ波の反射で検出できる方法である。キャリアがウェーハの厚さ方向に深く侵入すると考えると、ウェーハ全体のシートコンダクタンスの時間変化からキャリアライフタイムを算出できる。式(1)で与えられるウェーハ全体の導電率は、エピ層と基板のシートコンダクタンスの和と考えることができる。エピ層のシートコンダクタンス  $\sigma_{epi}$ 、基板のシートコンダクタンス  $\sigma_{sub}$  は、式(1)よりそれぞれ式(2)、(3)で表せる。

$$\sigma_{epi} = q(\mu_p p + \mu_n n) \cdot t_{epi} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma_{sub} = q\mu_p N_{sub} \cdot t_{sub} \quad \dots\dots\dots(3)$$

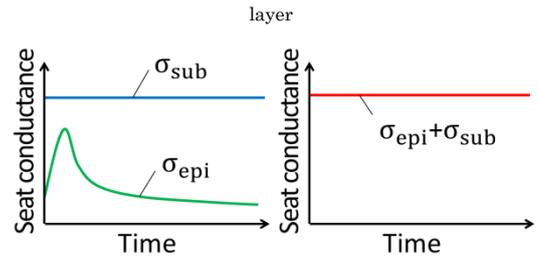
$t_{epi}$ 、 $t_{sub}$  はエピ層、基板の厚さ、 $N_{sub}$  は基板濃度である。

エピ層のシートコンダクタンスの変化を検出可能な条件と検出不可能な条件を図2に示す。



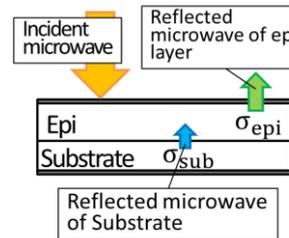
(a) エピ層のシートコンダクタンスが検出不可能なウェーハ構造

(a) Wafer structure that can't detect the sheet conductance of epi layer



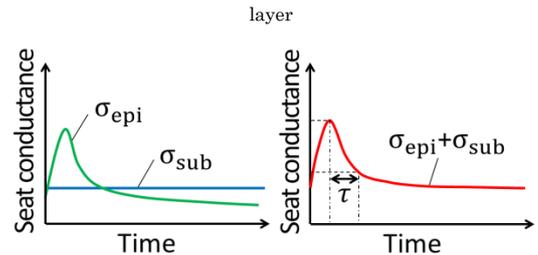
(b) ウェーハ構造(a)でのシートコンダクタンス時間変化

(b) Time variation of the sheet conductance in wafer structure(a)



(c) エピ層のシートコンダクタンスが検出可能なウェーハ構造

(c) Wafer structure that can be detect the sheet conductance of epi layer



(d) ウェーハ構造(c)でのシートコンダクタンス時間変化

(d) Time variation of the sheet conductance in wafer structure(c)

図2 各ウェーハ構造におけるエピ層と基板のシートコンダクタンス

Fig. 2. Sheet conductance of epi layer and substrate in each wafer structure

パワーデバイスに用いられる n/p+のエピウェーハは基板が厚く濃度も高いため基板のシートコンダクタンスが大きくなる。基板のシートコンダクタンスが大きいとウェーハ全体のシートコンダクタンスが一定となってしまうエピ層の変化を検出することができない(図2(a),(b)参照)。基板の厚さが薄いか基板濃度が低く、基板の影響が小さければ、エピ層内のシートコンダクタンスの変化を確認でき、キャ

リアライフタイムを測定できる (図 2(c), (d)参照)。

$$\sigma_{epi} \ll \sigma_{sub} \dots\dots\dots(4)$$

式(4)がエピ層のシートコンダクタンスの変化を検出できる条件である。

レーザによりエピ層に発生させるキャリア密度を  $n_{max}$  とすると、高注入状態での条件  $n = p = n_{max}$  および式(2), (3), (4)を用い、

$$\frac{t_{epi}}{t_{sub}} \ll \frac{N_{sub}}{n_{max}} \cdot \frac{\mu_p}{\mu_p + \mu_n} \dots\dots\dots(5)$$

となる。式(5)を満たさなければエピ層のシートコンダクタンスの変化を検出できない。

### 〈3・2〉 オージェ再結合を考慮した測定可能条件

$\mu$ -PCD 法では、生成したキャリアの SRH 過程による再結合ライフタイムを測定する。しかしながら、レーザによる過剰キャリアの生成量が一定値を超えるとオージェ再結合が影響し、正確なキャリアライフタイムを測定できない。エピ層のライフタイムから、オージェ再結合が影響するキャリア密度を調べた。

式(5)の  $n_{max}$  はオージェ再結合を考慮した条件により変化する。オージェ再結合と SRH 再結合を考慮した際の再結合率  $R^{(4)}$ は、

$$R = G(n^2p + p^2n) + \frac{pn - n^2}{\tau_{p0}(n + n_i) + \tau_{n0}(n + n_i)} \dots\dots\dots(6)$$

$G$  はキャリアの発生率、 $n_i$  は真性キャリア密度であり、 $\tau_{n0}, \tau_{p0}$  は電子、正孔のキャリアライフタイムである。高注入時の条件  $n = p \gg n_i$  とすると、オージェ再結合を含む実効キャリアライフタイムは、次式で表される<sup>(4)</sup>。

$$\tau_{eff} = \left( 2Gn^2 + \frac{1}{\tau_{p0} + \tau_{n0}} \right)^{-1} \dots\dots\dots(7)$$

縦軸をキャリアライフタイム、横軸をキャリア密度として式(7)を図示した(図 3 参照)。図 3 に示すように、 $10^{15} \text{cm}^{-3}$  から  $10^{17} \text{cm}^{-3}$  のキャリア密度では実効キャリアライフタイムは一定だが、 $10^{18} \text{cm}^{-3}$  や  $10^{19} \text{cm}^{-3}$  の高いキャリア密度になるとオージェ再結合の影響により実効キャリアライフタイムが短くなる。電子、正孔のキャリアライフタイムが長い場合は、実効キャリアライフタイムが変化し始めるキャリア密度が小さく、オージェ再結合の影響が大きい。

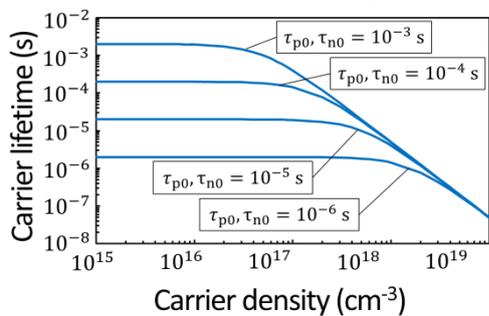


図 3 オージェ再結合の影響による実効キャリアライフタイムの変化

Fig. 3. Effective carrier lifetime changed by auger recombination effect

表 1 では、図 3 からオージェ再結合が影響し、各エピ層のキャリアライフタイムで実効キャリアライフタイムが変化するキャリア密度を示している。

表 1 各エピ層キャリアライフタイムにおける実効キャリアライフタイムのキャリア密度の関係

Table 1. Relationship between the effective carrier lifetime and carrier density in each epi layer lifetime

Carrier lifetime of epi layer : $\tau_{epi}$	Carrier density affect by auger recombination : $n_{auger}$
$10^{-3} \text{ s}$	$5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
$10^{-4} \text{ s}$	$1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
$10^{-5} \text{ s}$	$5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
$10^{-6} \text{ s}$	$1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

表 1 より、エピ層のキャリアライフタイムが  $10 \mu\text{s}$  の場合、レーザにより生成するキャリアを  $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  以下にすることでエピ層内の再結合を SRH 過程のみにすることができる。

オージェ再結合が影響するキャリア密度を  $n_{auger}$  とし、 $n_{max}$  の条件を定めた。

$$N_{sub} < n_{auger} \rightarrow n_{max} = N_{sub} \dots\dots\dots(8)$$

$$N_{sub} \geq n_{auger} \rightarrow n_{max} = n_{auger} \dots\dots\dots(9)$$

オージェ再結合が影響するキャリア密度  $n_{auger}$  が基板濃度  $N_{sub}$  より大きい場合、基板濃度と同量のキャリアを生成する。 $n_{auger}$  が  $N_{sub}$  以下の場合、エピ層内でのオージェ再結合を防ぐために  $n_{max}$  は  $n_{auger}$  以下とした。

〈3・3〉  $\mu$ -PCD シミュレーション 1, 2 節で述べた条件式の妥当性と範囲を調査するためシミュレーションを行った。IGBT 用に用いられる厚膜エピウェーハを想定し、 $n$ -エピ層、 $p^+$ 基板の構造で  $\mu$ -PCD 法を模擬した TCAD シミュレーションを行った。エピウェーハにキャリア生成用パルスレーザを照射したと仮定し、エピ層上部にキャリアを生成した後、再結合によりウェーハ内部のキャリアが減少する様子を再現した (図 4 参照)。ウェーハ厚さ方向の挙動のみを考えた 1 次元のシミュレーションである。シミュレーション構造で設定したパラメータを表 2 に示す。

表 2 シミュレーションパラメータ

Table 2. Simulation parameter

エピ層の厚さ : $t_{epi}$	100 $\mu\text{ m}$
基板の厚さ : $t_{sub}$	2 $\mu\text{ m}$ , 500 $\mu\text{ m}$
エピ層濃度 : $N_{epi}$	$1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$
基板濃度 : $N_{sub}$	$1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
エピ層キャリアライフタイム : $\tau_{epi}$	10 $\mu\text{ s}$
界面再結合速度 : $v_s$	100 $\text{ cm/s}$
レーザによる生成キャリア : $n_{max}$	$1.25 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

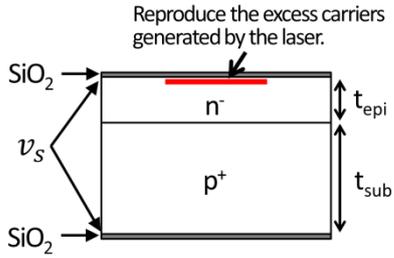
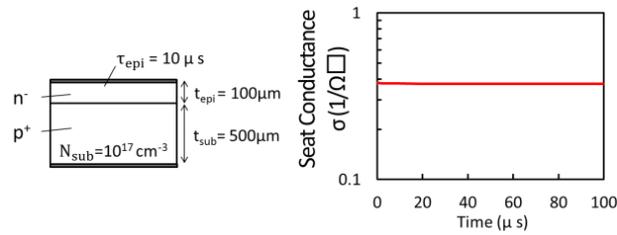
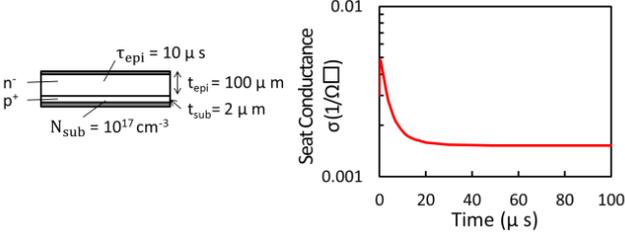


図4 エピウェーハを想定したシミュレーション構造  
Fig. 4. Simulation structure assuming epitaxial wafer



(a) 基板が厚い構造

(a) Structure with thick substrate



(b) 基板の薄い構造

(b) Structure with thin substrate

図5 各ウェーハ構造におけるシートコンダクタンスの時間変化

Fig. 5. Time variation of the sheet conductance in each wafer structure

図5(a)のエピウェーハ構造では、基板のシートコンダクタンスが大きいため、キャリアライフタイムを算出できない。

図5(b)に示すように高濃度のp<sup>+</sup>基板が薄い場合、シートコンダクタンスの変化が確認でき、この変化からキャリアライフタイムを算出すると10μsとなる。

図5(b)のウェーハ構造はFZ法により生成されるウェーハと同様の構造である。基板が薄く高濃度層のシートコンダクタンスがn層に比べて十分小さい場合、ベースとなる部分のキャリアライフタイムが算出できる。

#### 4. キャリアライフタイム測定可能範囲

シートコンダクタンスの比較から得た条件式(5)、オージェ再結合の影響を考慮し、生成するキャリア量を定めた式(8),(9)およびμ-PCD法を模擬したシミュレーション結果から、μ-PCD法によりキャリアライフタイムが測定可能な

ウェーハ構造を明らかにした(図6参照)。

シートコンダクタンスから算出したキャリアライフタイムが、シミュレーション構造で設定した値の10倍から0.1倍の範囲であれば測定可能とした。基板の影響が大きく、上記の範囲以外の値となる場合およびシートコンダクタンスが一定となり、キャリアライフタイムを算出できない場合を測定不能とした。

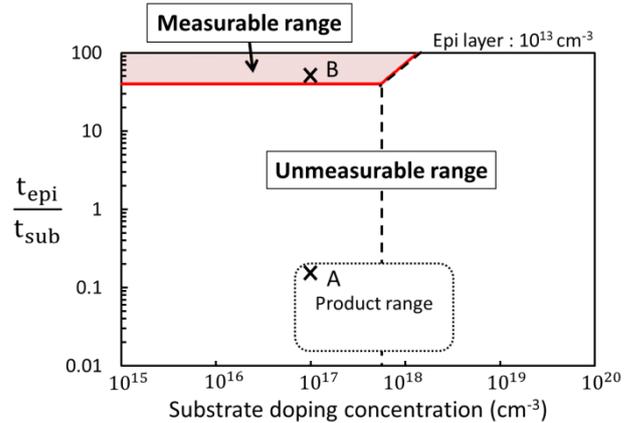


図6 測定可能範囲とエピウェーハ構造の関係

Fig. 6. Relationship between measurable range and epi wafer structure

縦軸はエピ層の厚さ $t_{epi}$ と基板の厚さ $t_{sub}$ の比、横軸は基板のドーピング濃度であり、任意のエピウェーハ構造でキャリアライフタイム測定の可否判定ができるものとなっている。縦軸は、エピ層の厚さを一定とし、基板の厚みを変更していった場合を示している。点Aは図5(a)の構造であり、点Bは図5(b)の構造を示している。図6は、エピ層のキャリアライフタイムが10μsの場合であり、エピ層のキャリアライフタイムが10μsより長くなると、オージェ再結合の影響により測定範囲はさらに狭くなる。

パワーデバイスに用いられるエピウェーハ製品の範囲を図6中に示した。パワーデバイスに用いられる厚膜エピウェーハ構造の場合、高濃度の基板がキャリアライフタイム測定に大きく影響する。

#### 5. まとめ

μ-PCD法を模擬したシミュレーションとキャリアライフタイムが測定可能な場合の条件式を構築し、評価精度とエピウェーハの構造との関係を明らかにした。μ-PCD法によるパワーデバイス用エピタキシャルウェーハ評価の際には高濃度の基板の影響を考慮する必要がある。

## 文 献

- 
- (1) S. Sumie, H. Takamatsu, "Detection of Heavy Metal Contamination in Semiconductor Processes Using a Carrier Lifetime Measurement System," KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS, Vol 52, No. 2, pp. 87-93 (2002)
  - (2) H. Hashizume, F. Ojima, K. Iba, N. Yoshida, H. Takamatsu, S. Sumie, "Lifetime Measurement of Epitaxial Wafers by Differential  $\mu$ -PCD method" TECHNICAL REPORT OF IEICE, ED97-30, CPM97-18, pp.29-34 (1997)
  - (3) W. Shockley, W. T. Read, "Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons", PHYSICAL REVIEW, Vol 87, pp835-842 (1952)
  - (4) M. S. Adler, "Accurate Calculation of the Forward Drop of Power Dissipation in Thyristors," IEEE Trans. Electron Devices, ED-25, pp. 16-22 (1978)