

UV/ミリ波 PCD 法における最大感度条件と Si エピタキシャルウェーハおよび極表面層評価

・荻田陽一郎¹ 願念雄一郎²

¹ 電気電子工学科

² 大学院工学研究科電気工学専攻

Condition for maximum sensitivity in UV/Millimeter-wave PCD technique
and characterization of epitaxial layer and subsurface damage in Si wafers using its technique

Yoh-Ichiro OGITA¹⁾ and Yu-Ichiro GANNEN²⁾

Abstract

The technique for high measurement sensitivity in UV/Millimeter-wave PCD technique with 100 GHz millimeter wave has been discussed theoretically and experimentally. The maximum sensitivity was obtained near the matching between a radiated 100GHz wave and Si wafer samples. The technique detected epilayer contamination as 10^{11} cm^{-3} order of Mo and Fe induced in the epitaxial crystal growth process. The technique also detected very slight subsurface damage induced by mirror polishing in commercial level wafers. The PCA signal with the technique well reflected removal of the damage by SC1 cleaning. The behavior of PCA measured well agreed with the recovery of gate oxide integrity in MOS devices. The damage depth was determined to be 21 nm. PCA in UV/Millimeter-wave technique well revealed the subsurface damage induced by the final mirror polishing

Keywords: UV/millimeter-wave, photoconductivity, Silicon wafer, Subsurface damage, Epitaxial wafer

1. まえがき

ULSI の高集積化につれて、MOS デバイスのゲート酸化膜厚みは薄くなる。その薄膜化により、結晶欠陥、重金属汚染、鏡面研磨残留ダメージ、マイクロラフネスが、MOS トランジスタのゲート絶縁膜の絶縁破壊を引き起こし、酸化膜耐性を劣化させるという重要な問題を引き起こす。それゆえ表面、表面層の厳密な評価が必要となる。また ULSI MOS デバイスは、高速化と低消費電力化への要求により、SOI ウェーハや p/p+(または n/n+) のエピタキシャルウェーハに作製されるトレンドにある。しかも、LSI 用の SOI の Si 活性層は $0.1 \mu\text{m}$ と極端に薄く、またエピタキシャルウェーハでも $1\text{--}10 \mu\text{m}$ と薄い。したがって、表面に連なるこの薄い層の結晶性を評価しなければならず、極表面層の特性評価が強く要求されていると言える。しかしながらそのような極表面層をしかも表面と区別して評価することは極めて難しい。そこで本研究室ではエピ層や表面層を非接触で測定できる UV/ミリ波 PCD 法を提案し、評価してきた^{1~6)}。そのような極く薄い、いいかえれば体積の小さい領域での

情報の検出にはその測定法の更なる測定感度向上が望まれる。感度向上には光励起用の N_2 レーザパワーの増大が考えられるが、現在以上のその増加はオーグジュプロセスに入るので好ましくない。

そこで本研究では、UV/ミリ波 PCD 法のプローブ波と

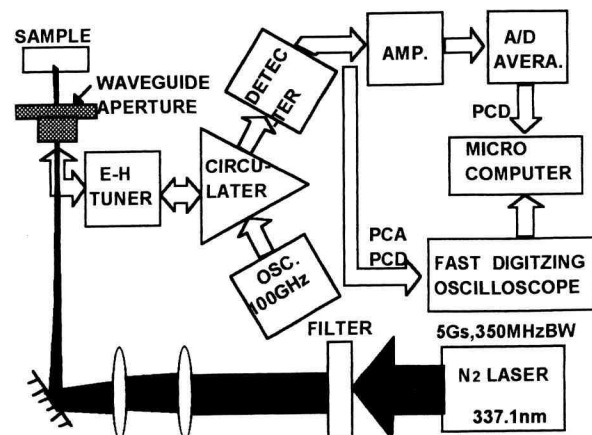


Fig.1 UV/millimeter wave PCD measurement system.

して 100GHz のミリ波を用いた場合の最大感度をうる回路条件を理論的、実験的に求めた結果を示す。さらに、UV/ミリ波 PCD 法の PCD 信号を用いて測定評価したウェーハ結晶のうち、エピ成長プロセスでのエピウェーハの汚染レベルでの測定評価の一例を示す。さらに UV/ミリ波 PCD 法の PCA 信号を用いて表面層評価したうちの市販レベルでのシリコンウェーハの鏡面研磨表面ダメージをモニターした結果の一例を示す。

2. 測定原理

Fig.1 に UV/ミリ波 PCD 法の測定システムを示す。通常の測定では導波管(WR-10)の開口面から数ミリ離れたところに Si ウェーハを置く。波長 337.1nm (浸透長 200 Å), パルス幅 1ns, ビーム幅 1.5mm φ の N₂ レーザーを導波管開口面から試料表面に垂直照射し、極表面層にキャリアを励起する。その励起キャリアは表面からバルク中に拡散し、発生、再結合に比例してキャリアの密度が変化する、つまり光導電率が変化する。また発振器から出力したミリ波(100GHz)を、EH チューナーを通して開口面から Si 試料に垂直に放射した。試料からの反射波を、EH チューナー、サーキュレーターを通り検波器で検波され、その検波信号を超高速デジタルオシロスコープ(Lecroy,6320)で観測した。光導電率の変化は反射波の変化として PCD (Photoconductivity deay)、PCA (Photoconductivity amplitude)として検出される。この測定システムによって観測された信号波形の一例を Fig.2 に示す。ここで、|Vd|と PCA はそれぞれ反射波の直流電圧の大きさと光パルス励起で誘起された反射波の変化電圧である。

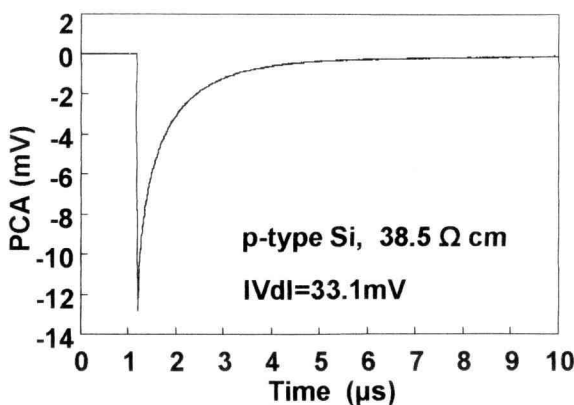


Fig.2 One example of PCA signal measured

3. 反射特性測定

本実験では、Si ウェーハ試料(P 型、抵抗率 38.5 Ω cm)を導波管に接触するように置き、E-H チューナーの E チューナー側の挿入距離を変えて、反射直流電圧 |Vd|と PCA 信号のピーク値を測定した。その結果を、E チューナーの調整相対距離に対して Fig.3 に示す。

Fig.3 の PCA 信号は Fig.2 のピーク値をプロットしたものである。Fig.3 の (a), (b)を比較すると、PCA のピーク値が反射電圧|Vd|の谷にほぼ対応しているという関係があることが分かる。このことは、最大感度がマッチング点付近であることを示している。そこで Si 試料へのミリ波の入射、反射回路系を Fig.4 に示すような等価回路で表現して反射特性を検討した。ここでは、導波管を特性アドミタンス Y₀をもつ線路で表した。また導波管開口面から試料側を見込んだアドミタンス Y_Lを Y_L=G+jB とおいた。また g、b はそれぞれ、正規化コンダクタンス、サセプタンスである。ここで入射波を V_i、反射波を V_r としたときの反射係数 S は、S=(Y₀-Y_L)/(Y₀+Y_L)で与えられる。今、パルス光照射により試料のコンダクタンスが Δg だけ変化したとき、反射係数が ΔS だけ変化する。ここで、サセプタンス変化は小さく、無視できるとする。ここで、Δg << g とすれば、ΔS は S の g による微分から、式(1)のように求まる⁷⁾。式(1)を規格化サセプタンスのパラメーターにとり反射係数に対して描いたのが Fig.5(a)である。Fig.3(b)のピーク値が反射係数の 1 または -1 の点に対応すると仮定して描いたのが Fig.5(b)のデータ点である。図中の実線は b=±0.25 のときであるが、実験と理論は近いカーブを示している。このことにより 100GH のミリ波においても、最大感度はマッチング点

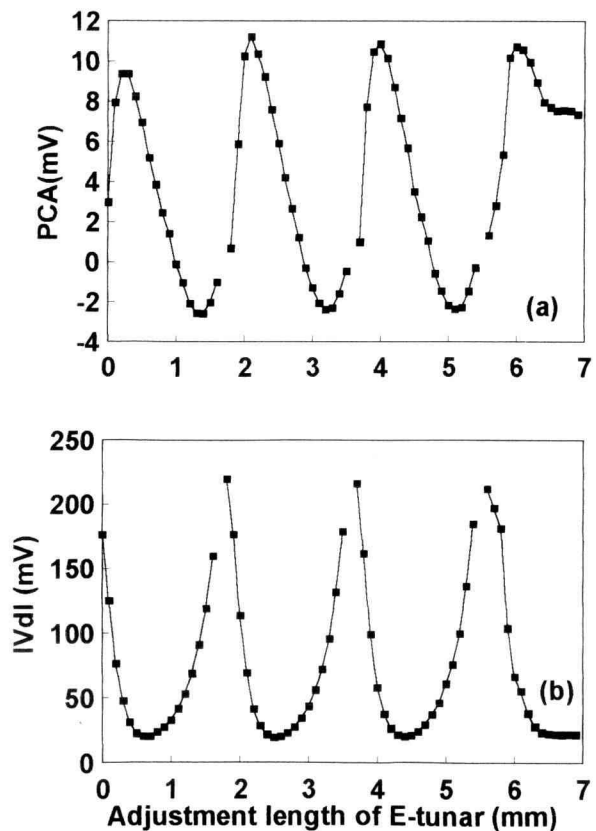


Fig.3 Reflected voltage: (a) Measured PCA signal amplitude, (b) Measured average voltage.

$$\Delta S = \left[\frac{2g(g^2 - b^2 - 1)}{\{(1-g)^2 + b^2\}^{1/2} \{(1+g)^2 + b^2\}^{3/2}} \times \frac{\Delta g}{g} \right] \quad (1)$$

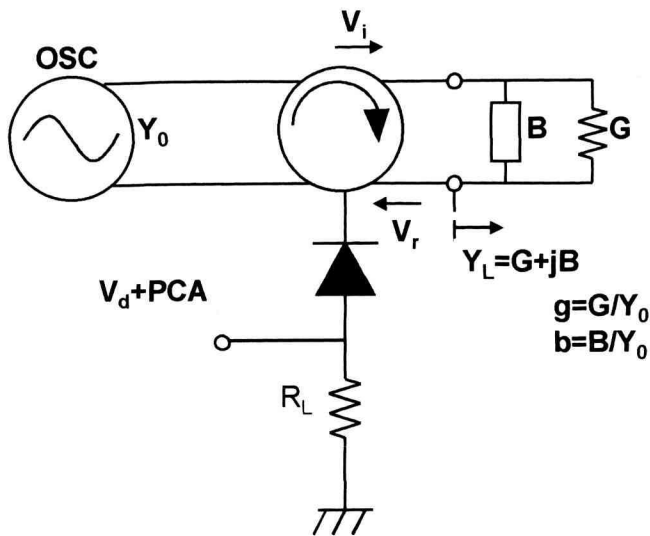


Fig.4 An equivalent circuit for the reflection circuit.

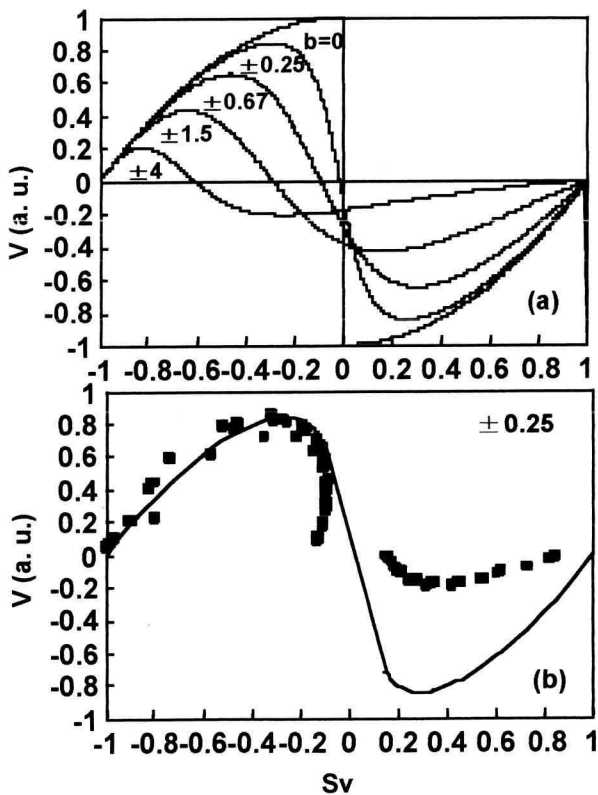


Fig.5 Sensitivity as a function of reflection coefficient (a) Theoretical (b) Comparison between experimental and theoretical ones.

付近で得られると言える。Fig.6 は、試料を導波管開口面から遠ざけた時に、感度がどのように変化するかを測定した結果である。Fig.6(a)は PCA を、Fig.6(b)は反射波の直流電圧の大きさを示している。これらのことから分かるように、 $|Vd|$ の谷間隔は1/2 波長に等しい。このことから開口面と試料の間に定在波が生じていることが分かる。PCA 信号の振幅は、開口面から試料が遠ざかるにつれて減衰し、PCA の最大値は定在波の谷近辺にあることが分かる。このことから、最大感度を得るのに最

適な Si ウェーハ位置があることが分かった。

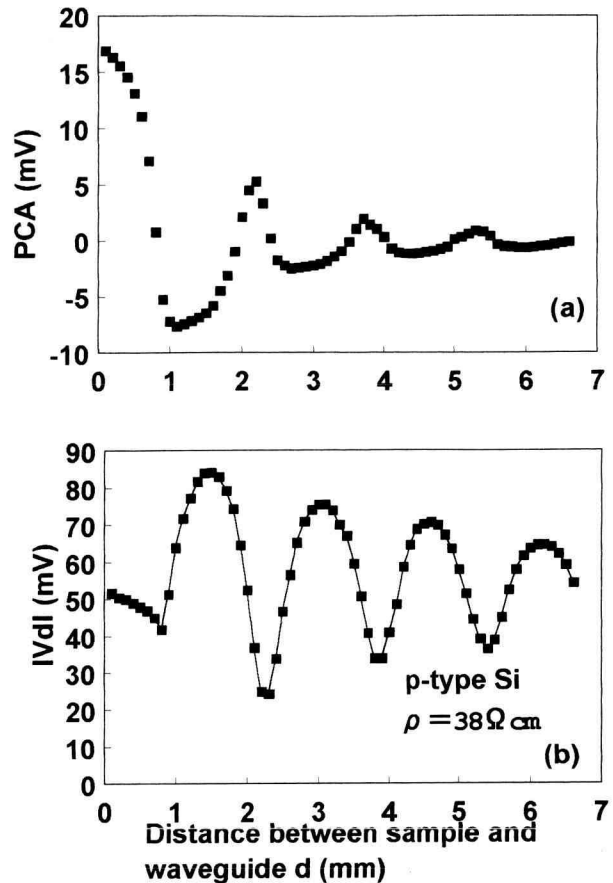


Fig.6 Reflected voltage as a function of sample position, (a) PCA, (b) Detected average voltage.

4. エピタキシャルウェーハの評価

p/p+あるいは n/n+の Si ウェーハがラッチアップの防止などのために CMOS の ULSI デバイスでは用いられる。エピ層は 1~10 μm と極端に薄く、基板は 650 μm と非常に厚い。それに加え、基板の抵抗率は 0.002~0.08 Ωcm と非常に低い。p/p+や n/n+のウェーハは、基板が低抵抗なのでマイクロ波は、p+や n+の基板側に吸収される。したがってマイクロ波ではエピ層の反射信号を得るのは難しい。ミリ波をエピ層側から照射すると、エピ層で吸収された後、基板抵抗が 0.002 Ωcm のとき、表皮効果のために基板側に 7 μm の深さまで浸透する¹⁾。このようにミリ波のほとんどすべてのパワーは、エピ層を含む 7 μm の基板深さ内に閉じ込められる。ここに N₂ レーザーを照射すると、その浸透長が 200 Åと短いために極表面層にキャリアが励起される。一方、p/p+、n/n+エピウェーハでは、その不純物濃度差により、p/p+、n/n+界面にポテンシャルバリアが生ずる。このバリアは、p、n の双方の型において、少数キャリアのバリアとして作用する。したがって、励起された少数キャリアはエピ層に閉じ込められる。それゆえ、ミリ波の反射波は、エピ層中での光導電率変化を検出すると言える¹⁾。エピ層結晶成長過程でのバッチ回数が異なる3種類のエピウ

エーハサンプル(A,B,C)に対するUV/ミリ波 PCD 法による測定結果を Fig.7 に示す。ここで用いた試料は、エピ層の厚みは約 $10\mu\text{m}$ 、エピ層抵抗率 $10\Omega\text{cm}$ 、基板抵抗率 $0.002\Omega\text{cm}$ の p/p+エピウエーハである。図からバッチ回数の多い順、つまりサンプル C、B、A の順にライフタイムが増加しているのが分かる。これらの 3 種類のサンプルを DLTS で測定した結果、Table.1 に示すような重金属不純物が同定された。サンプル C、B でのライフタイム減少は、Table.1 のように、より高濃度に混入された Mo、Fe のためと考えられる。ここで Mo、Fe は、ポロンドープ P 型 Si 中で強い再結合中心となることが報告されている^{8,9)}。その Mo、Fe は、エピ成長 CVD のサセプターエッチング時にステンレス管や弁からやってくると考えられている¹⁰⁾。バッチ回数が上がるにつれて、B、A と汚染が少なくなっている。これは、バッチ処理によるクリーニングの結果とよく似ている^{11,12)}。

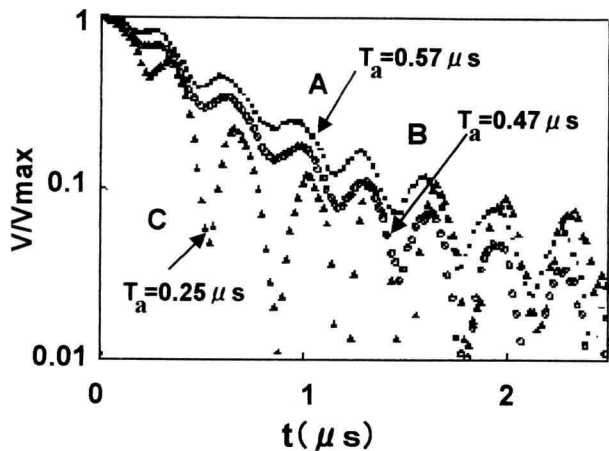


Fig.7 Photoconductivity decay curves measured for epitaxial Si wafers.

Table 1 Contaminant, concentration, and energy levels determined by DLTS.

SAMPLE NAME	CONTAMINANT	CONTAMINANT CONCENT. (cm^{-3})	ENERGY LEVEL (eV)
A	Mo	5×10^{11}	$E_v+0.3$
B	Mo	6×10^{12}	$E_v+0.3$
C	Mo	7×10^{12}	$E_v+0.3$
	Fe	6×10^{11}	$E_v+0.43$

5. 表面層の評価

N_2 レーザーによってキャリアは初期的には表面から 200\AA 内に励起される。その後バルク中に拡散していく。Fig.8 中に示されるような、2 層モデル(表面層とバルクの 2 層に分けた構造)を考え、キャリアの輸送過程を解析した¹²⁾。その結果を Fig.8 に示す。この図では、PCA

信号の抽出時間 $1\text{ns} \sim 20\text{ns}$ をパラメーターとして、PCA を表面層バルクライフタイム τ_{b1} の関数としてプロットしている。ここで表面層の欠陥やダメージなどは τ_{b1} で表した。この図から、 τ_{b1} が $0.1\mu\text{s}$ 以下なら、PCA が τ_{b1} の減少とともに減少し、表面層を PCA で評価できることが分かる。この方法の鏡面研磨ダメージの評価への適用を試みた。市販レベルの鏡面 Si ウェーハ(P 型、抵抗率 $10\Omega\text{cm}$)に SC1 洗浄を繰り返したものを試料として使い、UV/ミリ波 PCD 法で PCA を測定し、その結果の PCA 信号を図 9 に示す。3 回の SC1 洗浄で信号は増加し、その後は飽和しているのが分かる。同時に作製した MOS ダイオードの C モードデバイス劣化における酸化膜耐性(GOI)の測定結果¹⁴⁾は 3 回の SC1 洗浄で R_s は増加したにもかかわらず回復した。このことより 3 回の SC1 洗浄によって研磨残留ダメージが除去でき、PCA が上昇し、飽和したと考えられる。そのダメージの深さは 210\AA と除去量から決定された。このことから、UV/ミリ波 PCD 法でわずかなダメージも検出できることが分かった。

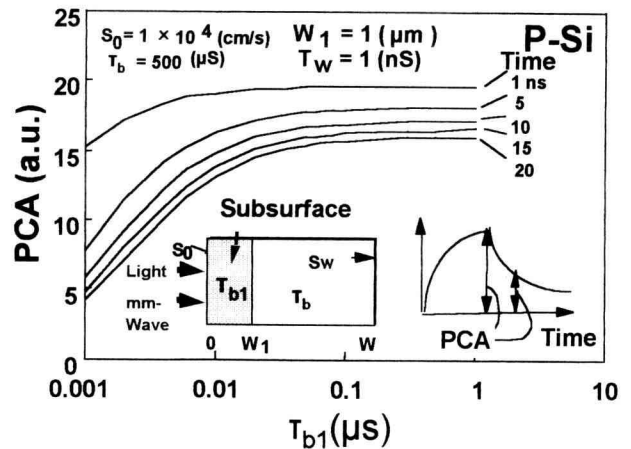


Fig.8 Theoretical PCA as a function of subsurface carrier lifetime.

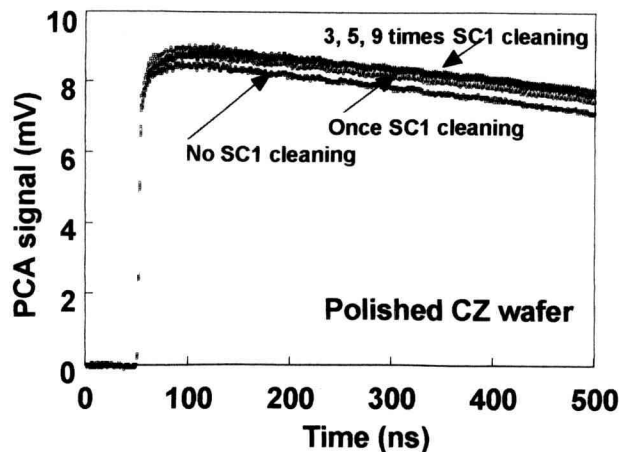


Fig.9 PCA signals measured for repetition of SC1 cleaning.

6. まとめ

UV/ミリ波 PCD 法における、100GHz のミリ波の Si ウェーハからの反射特性を理論的、実験的に検討し、次の結論を得た。

- (1) 100GHzの反射を用いて、PCA を検出するための最大感度はサセプタンスが大きくない限りマッチング近辺で得られることが理論的、実験的にわかった。
- (2) 導波管と Si ウェーハ間に定在波が生じ、最大感度を得るのに最適な Si ウェーハ位置があることが分かった。

この UV/ミリ波 PCD 法を用いて、p/p+エピタキシャル結晶成長中のエピタキシャル層の評価を試みた。

- (3) 結晶成長バッチ回数が多くなるにつれて、測定されたライフタイムは増加し、コンタミネーションの減少と一致した。

さらに、市販レベルの鏡面研磨 Si ウェーハ ($R_a=0.1\text{nm}$ 程度)を UV/ミリ波 PCD 法で PCA により測定評価した結果、次のような結論を得た。

- (4) 3 回の SC1 洗浄で PCA の増加は飽和し、GOI の回復の測定結果と一致した。
- (5) そのダメージ深さは 21nm と決定された。
- (6) UV/ミリ波 PCD 法による PCA 測定は極表面層の鏡面研磨ダメージの除去挙動をよく反映することが分かった。

参考文献

1. Y. Ogita, *Semicond. Sci. Tech.*, **7**, 1, p. A175-179 (1992).
2. Y. Ogita, N. Tate, H. Masumura, M. Miyazaki, and K. Yakushiji, in *Recombination Lifetime Measurements in Silicon*, edited by D. C. Gupta, F R. Bacher, and W. M. Hughes, (ASTM, **STP 1340**, West Conshohocken, PA, 1998) pp. 168-182.
3. Y. Ogita, M. Nakano, and H. Masumura, in *Defect and Impurity Engineered Semiconductors and Devices*, edited by S. Ashok, J. Chevillier, I. Akasaki, M. M. Johnson, and B.L.Sopori, (Materials Research Society, **378**, Warrendale, PA, 1995) pp. 591-596.
4. Katoh, H. Kondo, K. Takaishi, M. Tominaga, Y. Ogita, K. Kobayashi and Y. Gan-nen, in *Extended Abstracts of the 59th Fall Meeting, The Japan Society of Appl. Phys.*, (The Japan Society of Applied Physics, No.2, Tokyo, 1998) P.690
5. 荻田陽一郎、ライフタイム測定によるエピ層の評価、ウェーハ表面完全性の創生・評価技術、サイエンスフォーラム (1998)
6. Y. Ogita, *Recombination Lifetime Measurements in Silicon*, **STP 1340**, ASTM (1998)
7. Y. Ogita, *Jap. J. Appl. Phys.*, **19**, No. 11, pp.2309-2310 (1980).
8. Hamaguchi and Y. Hayamizu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**, p. L837 (1991)
9. G. Zoth and W. Bergholz, *J. Appl. Phys.*, **67**, 11, p. 6754 (1990)
10. K.Ryoo, *Proc. Diagnostic Techniques for Semiconductor Materials and Devices*, The Electrochemical Society, **PV92-2**, P.133 (1992)
11. 速水、星、加藤、北川原、竹中、シリコンウェーハ表面近傍のライフタイム評価技術、第47回集積回路シンポジウム, pp.73-77 (1994)
12. Y.Hayamizu, R. Hoshi, Y. Kitagawara and T. Takenaka, *SPIE*, **2638**, p. 113 (1995)
13. Y. Ogita, H. Shinohara, T. Sawanobori, M. Kurokawa, 3509, in *In-Line Characterization Techniques for Performance and Yield Enhancement in Microelectronic Manufacturing II*, (SPIE, **3509**, Bellingham, Washington) pp. 65-74 (1998)
14. Ogita, Kobayashi, and Daio, *J. Crystal Growth*, **210**, pp.36-39 (2000).