

鏡面研磨 Si ウェーハ表面層のパルス光導電振幅による評価

黒川昌毅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

Subsurface Characterization of Mirror Polished Si Wafers Using Pulse Photoconductivity Amplitude

Masaki KUROKAWA¹, Yoh-Ichiro OGITA²

Abstract

Theoretical analysis on relationship between pulse photoconductivity amplitude (PPCA), surface recombination velocity (S_0) and back surface recombination velocity (S_w) shows that PPCA is dependent on S_0 but not dependent on $S_w > 3000 \text{ cm/s}$. PPCA and microroughness measured for polishing pressure in a CMP process reveal the minimum of surface microroughness R_{rms} at 65 g/cm^2 and behavior of subsurface damages. PPCA was reconfirmed to well reflect to subsurface damage from the agreement with initial carrier lifetime measured with UV/mm-wave technique.

Keywords: PPCA signal, Continuity equations, Subsurface damage, Photoconductivity, Chemomechanical polishing, Si wafer

1. まえがき

ULSI デバイスの微細化・高集積化にともないシリコンウェーハ表面層のケモメカニカルポリッシングによる研磨ダメージがデバイスのゲート酸化膜耐性(GOI: Gate Oxide Integrity)を劣化させる問題がある^{1~7)}。そこで、シリコンウェーハ表面層の結晶性を正確に測定評価することが非常に重要になってきている。表面層を評価するので、非接触・非破壊測定評価が強く要求される。さらに、将来の単価の高い直径 300mm 以上のウェーハ表面層の評価では、現在以上に非接触・非破壊測定評価法が必要不可欠となる。

我が研究室では、これまでに、表面および表面層の非接触・非破壊測定評価法として、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、それらによりエピタキシャルシリコンウェーハのエピタキシャル層^{8~9)}、通常のシリコンウェーハの表面、表面層を非接触非破壊で測定評価してきた^{5~7,10~11)}。しかし、この 2 つの方法ではキャリア励起光パルスの幅が 1ns と短いために、光導電変化が小さく、測定される光導電振幅(PCA)も小さい。また、長いライフタイムの光導電振幅の影響が小さく、その測定感度が鈍くなると考えられる。そこで、光導電率が飽和する程度に、十分長いパルス幅で励起すれば、光導電変化を大きくでき、長いライフタイムの影響も大きく、測定感度も向上できると考えられ

る。表面層を評価するのであるから表面層にキャリアが集中する短波長励起を用いる必要があると考えた。また表面層を評価するために、非接触が望ましく、マイクロ波で光導電変化を検出することを考えた。そこで、青色レーザを励起光に用い、マイクロ波でパルス光導電振幅(PPCA: Pulse photoconductivity amplitude)を検出する新しい測定評価法を提案してきた。^{12~14)}

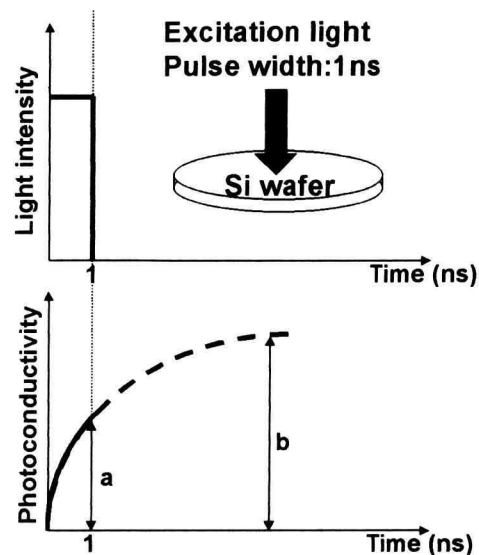


Fig. 1 Photoconductivity transient with short photoexcitation.

シリコンウェーハのケモメカニカルポリッシングプロセスにおいて、冒頭で述べたように、表面層のダメージが問題になっている。そこで、本方法で研磨圧力を変えたときのダメージ評価を試験することにした。最初に、本方法について光導電率の理論解析を行い、PPCA 信号は、表面層の情報を反映することを示す。次に研磨圧力を変えたときに生じる表面層ダメージの変化を見るために、PPCA の測定実験を試みた。研磨圧力に対する AFM 像から求めた表面マイクロラフネス R_{rms} 、空間周波数と PPCA の関係から、研磨圧力を変えることで表面層ダメージ、長周期ラフネスが変わり、PPCA がピークを持つことがわかった。さらに、別法の UV/ミリ波 PCD 法で同一試料に対して測定した初期キャリアライフタイム¹⁵⁾の表面マイクロラフネス R_{rms} 依存性と、本 PPCA の依存性は同様な特性を示すことが分かり、本方法で研磨ダメージを測定評価できることが再確認できた。

2. 短波長励起、定常光導電振幅の理論解析

Fig.2 に計算モデルを示す。シリコンウェーハの表面再結合速度を S_0 、裏面再結合速度を S_w 、バルクライフタイムを τ_b 、シリコンウェーハの厚みを W とする。

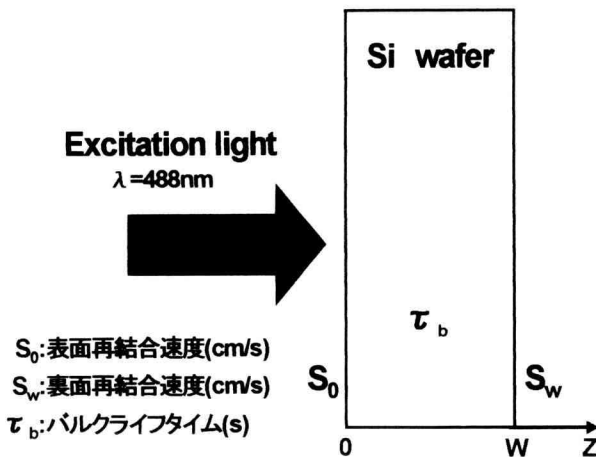


Fig. 2 Calculation model.

表面に短波長の励起光を照射しウェーハ内にキャリアを励起させる。測定に用いる励起光はパルス幅 10ms と、光キャリアの発生が定常状態に達する長いパルス幅である。そこで、励起パルス光を定常光とみなして解析した。少数キャリア連続の式を境界条件のもとに解析的に解き、少数キャリア密度の空間分布を表す式、さらに、光導電率を表す式を求めた。少数キャリア連続の式で、電界は一定で、しかも小さいと考えて電界項を無視すれば、式(2.1)のように与えられる。ここで、 n を少数キャリア密度、 D_n は電子の拡散係数、 Z はウェーハの深さ方向の距離、 n_0 は熱平衡状態におけるキャリア密度、 τ_b はバルクライフタイムである。

$$\frac{dn}{dt} = D_n \frac{d^2n}{dz^2} + G_n - \frac{n-n_0}{\tau_b} \quad (2.1)$$

ここで、 G_n は励起光によるキャリアの発生率であり、式(2.2)で与えられる。

$$G_n = g_0 e^{-\alpha z} \quad (2.2)$$

ここで、 g_0 は $Z=0$ における励起光によるキャリアの発生率、 α は励起光の吸収係数である。

ウェーハ表面と裏面での境界条件は式(2.3)、(2.4)のようにそれぞれ与えられる。

$$D_n \frac{dn}{dz} \Big|_{z=0} = S_0 (n(0) - n_0) \quad (2.3)$$

$$D_n \frac{dn}{dz} \Big|_{z=W} = -S_w (n(W) - n_0) \quad (2.4)$$

初期条件は、励起光を照射する前のキャリア濃度が熱平衡状態であるので、式(2.5)となる。

$$n(z, 0) = n_0 \quad (2.5)$$

ここで、励起光により発生した少数キャリア密度 Δn は式(2.6)で与えられる。

$$\Delta n = n - n_0 \quad (2.6)$$

これらを演算子法で解いて少数キャリア濃度空間分布を求めると、式(2.7)となる。

$$\Delta n(z) = c_1 e^{\frac{z}{L_n}} + c_2 e^{-\frac{z}{L_n}} - \frac{g_0 \tau_b e^{-\alpha z}}{(L_n \alpha)^2 - 1} \quad (2.7)$$

ここで、 L_n は拡散定数であり、式(2.8)で与えられる。

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_b} \quad (2.8)$$

また、 C_1 、 C_2 はそれぞれ係数で式(2.9)、(2.10)のように与えられる。

$$C_1 = \frac{\frac{g_0 \tau_b}{(L_n \alpha)^2 - 1} \left(S_0 + \frac{D_n}{L_n} \right) (S_w - D_n \alpha) e^{-\alpha W}}{\left(S_0 + \frac{D_n}{L_n} \right) \left(\frac{D_n}{L_n} + S_w \right) e^{\frac{W}{L_n}} - \left(\frac{D_n}{L_n} - S_0 \right) \left(\frac{D_n}{L_n} - S_w \right) e^{-\frac{W}{L_n}}} + \frac{g_0 \tau_b}{(L_n \alpha)^2 - 1} \left(\frac{D_n}{L_n} - S_w \right) (S_0 + D_n \alpha) e^{-\frac{W}{L_n}} \quad (2.9)$$

$$C_2 = \frac{\frac{g_0 \tau_b}{(L_n \alpha)^2 - 1} \left(\frac{D_n}{L_n} - S_0 \right) (S_w - D_n \alpha) e^{-a w}}{\left(S_0 + \frac{D_n}{L_n} \right) \left(\frac{D_n}{L_n} + S_w \right) e^{\frac{w}{L_n}} - \left(\frac{D_n}{L_n} - S_0 \right) \left(\frac{D_n}{L_n} - S_w \right) e^{-\frac{w}{L_n}}} + \frac{g_0 \tau_b}{(L_n \alpha)^2 - 1} \left(\frac{D_n}{L_n} + S_w \right) (S_0 + D_n \alpha) e^{\frac{w}{L_n}} \quad (2.10)$$

光導電率の変化は、キャリア密度空間分布をウェーハ厚みで積分、平均して式(2.11)のように求めた。

$$\Delta \sigma = \frac{I}{w} \int_0^w \Delta n = \frac{L_n c_1}{w} \left(e^{\frac{w}{L_n}} - 1 \right) + \frac{L_n c_2}{w} \left(1 - e^{-\frac{w}{L_n}} \right) + \frac{g_0 \tau_b}{w \alpha (L_n \alpha)^2 - 1} \left(e^{-a w} - 1 \right) \quad (2.11)$$

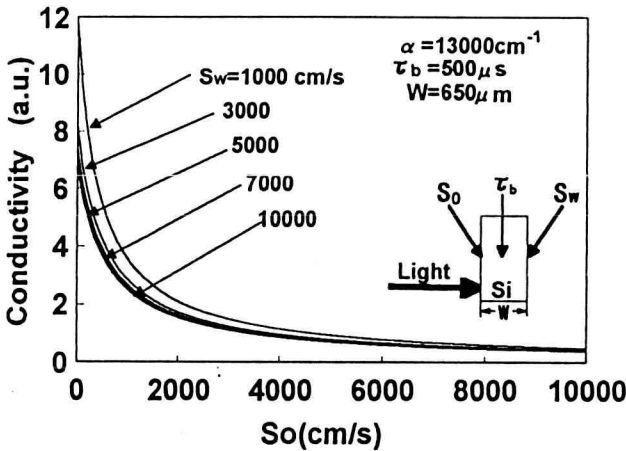


Fig. 3 Dependence of photoconductivity (PPCA) on surface recombination velocity (S_0).

導電率変化の S_0 依存性 S_w をパラメータに取り計算した結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 から光導電率変化は S_w が 3000cm/s 以上ではほとんど S_w には依存せず、 S_0 に強く依存することが分かる。つまり PPCA 信号は S_0 に大きく依存すると言える。1 μm の表面層は 650 μm のシリコンウェーハ全体の厚みに比べると、それは非常に薄く、表面層のキャリアのふるまいは表面再結合速度としてみなせると考えられる。本方法で、表面層を評価するのが目的だが、その意味でこのことは本方法で表面層を評価できることを示していると言える。

3. 測定原理および測定方法

3.1 測定原理

Fig. 5 のようにシリコンウェーハに波長の短い(488nm)励起光パルス(パルス幅 10ms)を照射し、シリコンウェーハ表面層にキャリアを励起する。光導電率はキャリアの発生再結合により変化し、パルス幅が長ければ定常状態時の振幅値になる。その時の振幅をパルス光導電振幅 (PPCA) と呼ぶことにする。

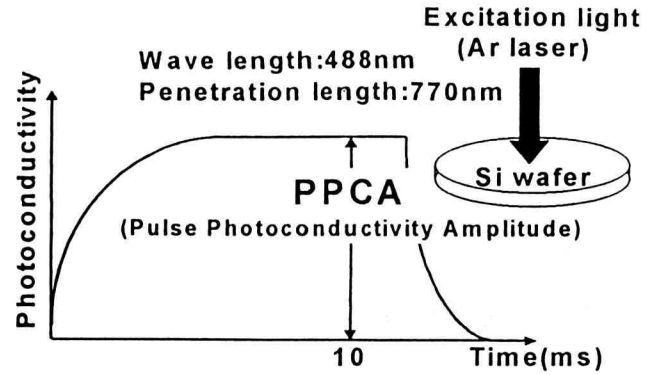


Fig. 4 PPCA signal with long photoexcitation.

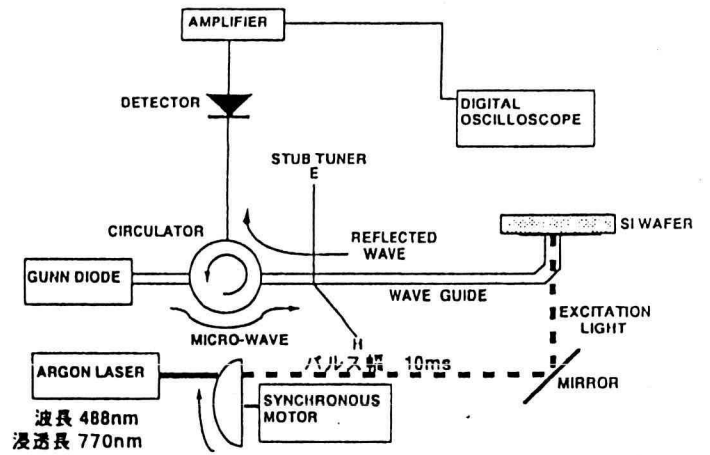


Fig. 5 Measurement system.

その PPCA をマイクロ波の反射波で検出し、その振幅値から、表面層を評価できる。

3.2 測定方法

Fig. 5 に測定系を示す。励起光として、波長 488nm、浸透長約 770nm の Ar レーザ (Spectra-Physics Model 256) を用いた。スポットサイズは約 3mm ϕ 、出力は 100mW 以上とした。長い励起光パルス幅を得るために、50Hz のメカニカルチョップを用いて、パルス幅 10ms の光パルスが発生し、そのパルス光をシリコンウェーハサンプルに照射し、その光導電率変化の PPCA 信号を 10GHz マイクロ波反射プローブで検出した。その反射波を増幅器で 10 倍に増幅し、デジタルオシロスコープで PPCA 信号として観測した。

4. 測定試料の作成および測定

4.1 研磨試料の作製

抵抗率 10 Ωcm 、P 形、面方位(100)のシリコンウェーハを 3 \times 4cm 2 にスクライブしたものを測定サンプルとした。圧力を荷重の重さを変えて、260~30g/cm 2 と変化させ、250 \AA ϕ スラリー研磨液 (pH9.8) で回転速度 60rpm のもと 20 秒間、研磨した。その後、アセトンで 5 分間 3 回有機洗浄し、超純水で 5 分間 5 回洗浄した。

4.2 測定

上記で作製した試料について、青色レーザ・パルス光導電振幅法を用いて PPCA 信号を測定し、また、原子間力顕微鏡 (AFM: Atomic force microscope) で、中心の3点について $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ の AFM 像を測定し、それから、表面マイクロラフネス R_{rms} や PSD (Power spectral density) を求めた。さらに、比較のために別法の UV/ミリ波 PCD 法でも同一試料に対して測定し、初期キャリアライフタイムを求めた。

5. 実験結果と検討

Fig. 6 に測定した PPCA 信号のうち代表例として研磨圧力が 65g/cm^2 について示す。

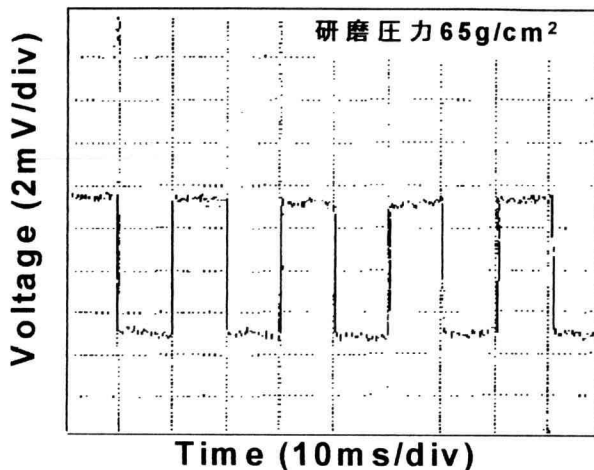


Fig. 6 One example of PPCA signals measured for the Si wafer polished with 65g/cm^2 .

Fig. 7 に研磨圧力と表面マイクロラフネス R_{rms} の関係を示す。研磨圧力 $260 \sim 65\text{g/cm}^2$ では研磨圧力が減少するにつれて R_{rms} が徐々に減少し、圧力 65g/cm^2 で最少となり、その後また表面マイクロラフネス R_{rms} は増加傾向にあることが分かる。

Fig. 8 に PPCA と研磨圧力との関係を示す。研磨圧力が $260 \sim 65\text{g/cm}^2$ と減少すると PPCA は増加し、 65g/cm^2 でピークを示し、 65g/cm^2 以降は減少している。

Fig. 9 に PPCA の表面マイクロラフネス R_{rms} 依存性 (PPCA- R_{rms}) を研磨圧力に対して示す。ここで、この図の表面マイクロラフネス R_{rms} は3点の平均値である。この図から研磨圧力 $260 \sim 65\text{g/cm}^2$ では、研磨圧力が減少していくにしたがって PPCA 信号の値は増加し、表面マイクロラフネス R_{rms} は減少しているのが分かる。PPCA 信号と表面マイクロラフネス R_{rms} は依存しているように見える。しかし、以前に行った測定結果から

PPCA 信号は 1.5nm 以下の表面マイクロラフネス R_{rms} に依存しないことが分かっている^{11~13)}。今回の測定でも圧力 $260 \sim 187\text{g/cm}^2$ の間は、表面マイクロラフネス R_{rms} は変化しないが PPCA 信号は増加しているところから同じことが言えると考えられる。したがって、研磨圧力 $260 \sim 65\text{g/cm}^2$ では、PPCA 信号は研磨ダメージの生成を反映していると考えられる。

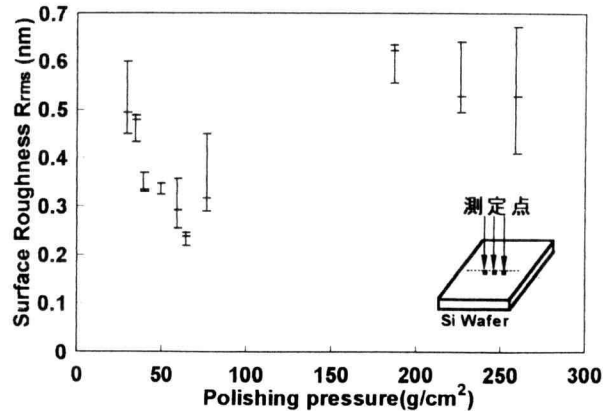


Fig. 7 Relationship between polishing pressure and surface microroughness R_{rms} .

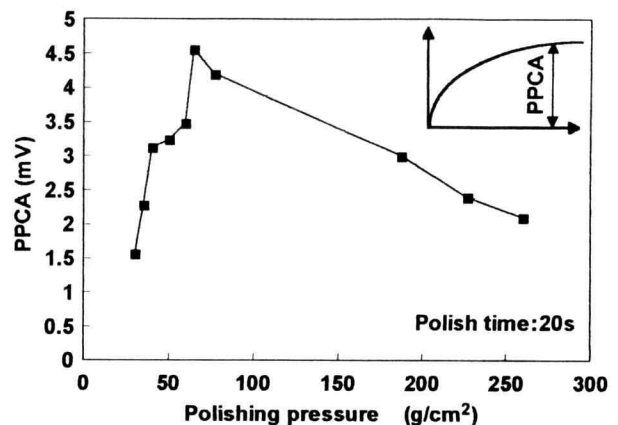


Fig. 8 PPCA signal as a function of polishing pressure.

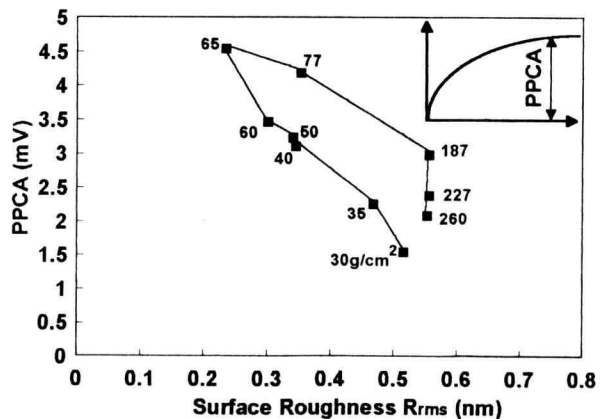
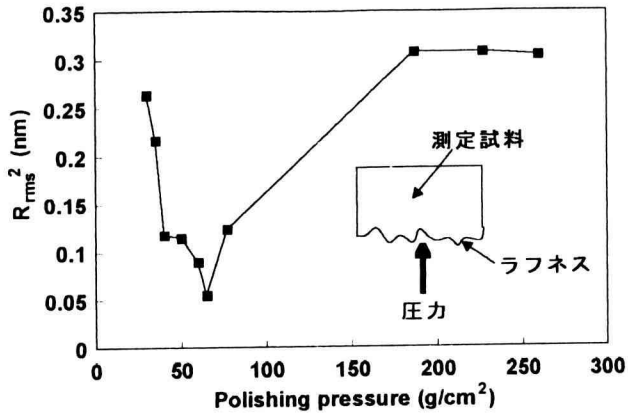
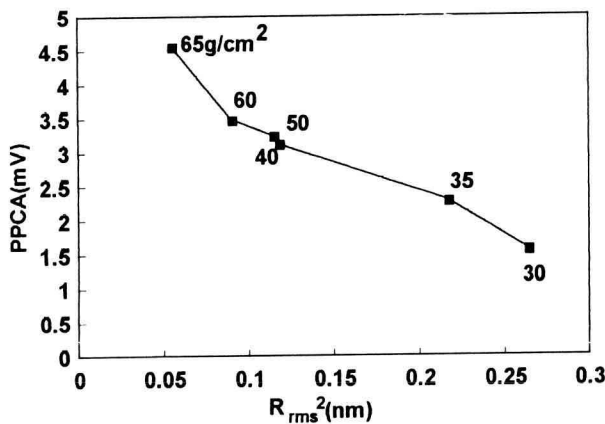


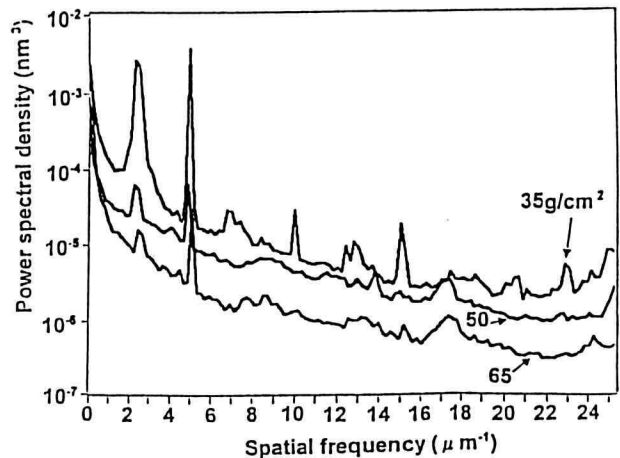
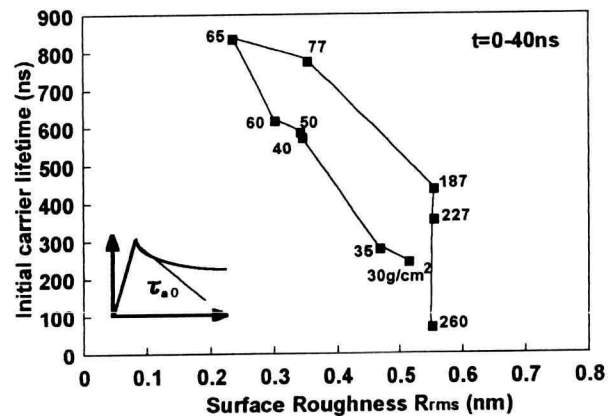
Fig. 9 Relationship between PPCA signals measured as and surface microroughness R_{rms} .

しかし、研磨圧力 $65 \sim 30\text{g/cm}^2$ では、力学的ダメージが減少しているにもかかわらず、研磨圧力が減少していくにつれて PPCA 信号の値は減少している。ここでの PPCA の減少は何を意味しているのかをダメージ以外の可能性も含めて検討した。

Fig. 10 R_{rms}^2 vs. polishing pressure.Fig. 11 PPCA signals as a function of surface microroughness R_{rms}^2 .

ヘイズはマイクロラフネス R_{rms} の二乗と比例する関係にあることが知られている¹⁶⁾。そこで研磨圧力に対してマイクロラフネス R_{rms} の二乗の関係に整理してみたのが Fig. 10 である。研磨圧力 $65 \sim 30 \text{g/cm}^2$ のカーブと、Fig. 8 の同圧力部分でのカーブを比較すると、同じ形をしているのが分かる。そこで、Fig. 11 のように、研磨圧力 $65 \sim 30 \text{g/cm}^2$ で PPCA を表面マイクロラフネス R_{rms} の二乗の関数としてプロットすると、ほぼ直線関係がある。このことから、この部分での PPCA の減少は、長周期の凹凸が関与していると考えられる。

Fig. 12 に研磨圧力に対して測定された PSD の空間周波数分布を示す。研磨圧力が $65 \sim 30 \text{g/cm}^2$ に減少するにしたがって PSD の曲線が上がるのが分かる。つまり表面の長周期ラフネス(波長 $40 \text{nm} \sim \text{数 } \mu \text{m}$)が増加していることを示している。このことから研磨圧力が 65g/cm^2 よりも低い値で研磨したとき表面の長周期ラフネスが増加したことにより、ダングリングボンドが増加し、表面再結合速度が増加したため、研磨による力学的ダメージが減少しているにもかかわらず、PPCA が減少したと思われる。しかし、ケモメカニカルポリッシュにおいてケミカル作用が強くなることにより、表面再結合速度を増加させる可能性もあり、今後検討が必要である。

Fig. 12 PSD curve for polishing pressure 35, 50 and 65g/cm^2 .Fig. 13 Relationship between Initial carrier lifetime and surface microroughness R_{rms} .

一方、別法の UV/ミリ波 PCD 法で測定した PCD ($t=0 \sim 40 \text{ns}$) から求めた初期キャリアライフタイム τ_{a0} と R_{rms} の関係 ($\tau_{a0} - R_{rms}$) を Fig. 13 に示す¹¹⁾。この図は、Fig. 9 と良く一致したカーブであることが分かる。このような一致は別なウェーハ試料においても得られてきた^{11~14)}。初期キャリアライフタイムは初期拡散時間、つまり表面層のキャリアの再結合を主に反映していることが分かっている¹¹⁾。それと、PPCA が一致しているのであるから、今回の実験でも PPCA は表面層の情報を反映していることが確認できた。

6. あとがき

Ar レーザ励起パルス光導電振幅信号(PPCA)による Si ウェーハ表面層の評価法の理論解析とその方法を用いて、Si ウェーハ鏡面研磨圧力を変えたときの Si ウェーハ表面層ダメージの測定評価を行った。その結果をまとめると次のようになる。

- 1) 解析結果から短波長励起光導電振幅は、ウェーハの裏面再結合速度が 3000cm/s 以上ではほとんどそれに影響されず表面再結合速度に依存する。つまり、表面層に依存すると言える。
- 2) 光導電振幅は研磨圧力 65g/cm^2 でピークを示し、同時に、表面マイクロラフネス R_{rms} は 0.2nm と最少を示

- した。
- 3) 研磨圧力 $260 \sim 65 \text{g/cm}^2$ での PPCA の減少は表面マイクロラフネス R_{rms} との関係から研磨ダメージの生成を反映していると言える。
 - 4) 研磨圧力 $65 \sim 30 \text{g/cm}^2$ での PPCA の減少は表面の長周期ラフネス(波長 $400 \text{Å} \sim \text{数 } \mu\text{m}$)が増加したことにより、ダングリングボンドが増加し、表面再結合速度が増加したためと考えられる。
 - 5) PPCA と表面マイクロラフネス R_{rms} の関係(PPCA- R_{rms})と、別法の UV/ミリ波 PCD 法で測定した初期キャリヤライフタイム τ_{a0} と R_{rms} の関係($\tau_{a0} - R_{\text{rms}}$)は同様の特性を示し、このことから本実験において PPCA は表面層の情報を反映することが確認できた。
 - 6) ケモメカニカルポリッシュにおいてケミカルの要素が強く作用した場合、表面再結合速度を増加させる可能性があるのか、今後検討が必要である。
 - 13) 澤登 剛、荻田 陽一郎、青色レーザー/マイクロ波光導電変化を用いたシリコンウェーハ表面層の評価、神奈川工科大学研究報告、**B-22**、(1998)
 - 14) 澤登、黒川、荻田、第 45 回春季応物予稿集、**29a-H-4**、P. 795、(1998)
 - 15) 小林、願念、荻田、近藤、加藤、平成 10 年度神奈川県産学公交流研究発表会、発表予定
 - 16) 鹿島、ウェーハ表面完全性の創成・評価技術、**2.3**、p. 46、(1998)

7. 参考文献

- 1) Y. Udo, M. Nagura, S. Samata, and H. Kubota, The Physics and Chemistry of SiO_2 and the Si-Si O_2 Interface-3, **96-1**, pp. 379-387, The Electrochemical Society, Inc., Pennigton, NJ, (1996)
- 2) Y. Ogita, Y. Hosoda, M. Miyazaki, MRS, Vol.477, pp. 209-214 (1997)
- 3) Y. Ogita, H. Sinohara, T. Sawanobori, and M. Kurokawa, SPIE, (1998) to be published
- 4) 大王、小林、願念、荻田、第 59 回秋季応物予稿集、**17p-ZF-8**、P. 671(1998)
- 5) Y. Ogita, M. Nakano, H. Masumura, MRS, **378**, pp. 591-596、(1995)
- 6) Y. Ogita, M. Nakano, H. Masumura, Defects in Semiconductors 18, **196-201** pp. 1813-1816 (1995)
- 7) Y. Ogita, Y. Hosoda, M. Miyazaki, Procineedg of Science and Technology of Semiconductor Surface Preparation, ed. by G. S. Higashi, M. Hirose, S. Raghavan, Verhaverbeke, MRS, (1997),
- 8) Y. Ogita, Institute of Physics, Semicond. Sci. Technolo, 7, No. 1, pp. A175-179, 1992
- 9) Y. Ogita, The Electrochemical Society, Vol. **91-1**, pp. 692, 1991
- 10) Y. Ogita, K. Yakushiji, N. Tate, Semiconductor Silicon/1994, The Electrochemical Society, **94**, pp. 1083-1092 (1994)
- 11) 篠原 洋、荻田 陽一郎、UV/mm 波光導電振幅法によるシリコンウェーハ研磨時表面/表面層の評価、神奈川工科大学研究報告、**B-22**、(1997)
- 12) 澤登、荻田、第 58 回秋季応物予稿集、**3a-F-8**、p. 784、(1997)