

技術論文

紫外光を用いた非接触ウエハ温度計測方法

Non-contact Wafer Temperature Measurement Method with UV Light

塩 耕 史
Koji Shio
若 井 秀 之
Hideyuki Wakai
久保田 和 彦
Kazuhiko Kubota
秋 葉 浩 永
Hironori Akiba

近年半導体プロセス中におけるウエハの温度を計測するニーズが非常に高くなっている。しかし室温から 200°C 程度までの低温真空プロセスでは、さまざまな課題があり実用化された温度計測方法は未だ確立されていない。そこで、この領域のウエハ温度計測方法の確立を目指した。そのために、従来にはなかった紫外光における p, s 偏光の反射を利用した新しい温度計測方法を考案しその有効性を検証した。その結果、Si ウエハの温度計測が可能であること、Si ウエハ上の酸化膜の影響を除去できることが判った。

Recently, the demands for temperature measurement of silicon wafers in the semiconductor manufacturing process have risen strongly. In the low-temperature vacuum process between room temperature and about 200°C, however, a commercially viable temperature measurement method has not been established yet due to various problems. A challenge was made to establish a wafer temperature measurement method in this field. In order to accomplish this, a new temperature measurement method was developed using the reflection of p and s polarization in a UV light, which is a novel method that has not been tested before. Together with this, its effectiveness was verified. This paper introduces the finding from the aforementioned verification that the new method is capable of measuring the temperature of silicon wafers and of removing the impacts of an oxide film on the silicon wafer.

Key Words: ウエハ, 温度, 測定, 紫外光, 非接触, 偏光

1. はじめに

コマツでは半導体産業向けに様々な温調機器の研究・開発・商品化を行っている。その中で Si ウエハの温度を正確に測定するニーズは非常に高い。この点に注目し、温度計測にかかわる商品開発を目的に研究を行った。

室温から 200°C 程度の低温真空プロセスでは実用化された Si ウエハの温度計測方法がないので、この温度計測方法の実用化をターゲットとした。

現在、高温の真空プロセスでは、赤外放射温度計が唯一の測定手段となっている。しかし、低温の真空プロセスでは、Si の放射率 (Emissivity) が赤外できわめて低いいため、ウエハ温度が 200°C 以下になると著しく精度が低下し測定できないのが現状である。そのためこれに代わる方法として、偏光解析法を用いた温度計測方法や干渉法による温度計測方法も提案されているが、前者は装置が大きく、測定時間も長いため実用とはなっていない。後

者も、相対的な温度変化しか知ることが出来ない。その他、ラマン散乱を利用したもの、音波を利用したものなどが提案されているが、どれも課題があり、実用するにはいたっていない。従って、これらの課題を解決すれば、低温真空プロセス中のウエハ温度計測器分野へ参入できると考えた。

そこで著者らは、Si の直接遷移準位 E1, E2 が紫外にあることに注目し、新しい測定原理を提案し、この原理を応用した実用的な温度計測方法の実用化を目指した。一般に物質の直接遷移の準位は光の吸収・屈折に大きくかわることからこの波長付近では光信号の変化として捕捉しやすい。そして Si の直接遷移準位は Si の結晶構造から決まるものであることから、当然温度の影響を受ける。そこで、Si ウエハに E1 準位付近の紫外光を照射し、反射光を p 偏光, s 偏光に分離してそれぞれの光強度を測定す

る方法を考案した。

また、Si ウエハ上に形成されている酸化膜による測定値のずれも、測定波長を複数にすると補正できることがわかった。

本稿では、この測定原理と測定結果について報告する。

2. 測定原理

Si の誘電関数 (dielectric function) ϵ は安達により MDF モデルが提案されており¹⁾、分光偏光解析法ではよく用いられている。下記にそのモデル式を記載する。

$$\epsilon(\omega) = e_1(\omega) + e_2(\omega) + e_3(\omega) + e_4(\omega) + e_5(\omega) + e_6(\omega)$$

ここで、 ω は角周波数、 e_1 から e_6 は下記式にて定義される数値である (単位 [eV])。

$$E[eV] = \frac{1}{1.6021892 \times 10^{-19}} \frac{h\omega}{2\pi} \quad X_1 = \frac{E + iG_1}{E_1}$$

$$X_{2m} = \frac{E + iG_2}{E_2} \quad X_{c1} = \frac{E + iG_2}{E_{c1}} = \frac{E + iG_2}{E_1}$$

$$E_{c1} = E_1$$

$$e_1 = -B_1 X_1^{-2} \ln(1 - X_1^2)$$

$$e_2 = \frac{B_{1x}}{E_1 - E - iG_1}$$

$$e_3 = -F \cdot X_{2m}^{-2} \ln\left(\frac{1 - X_{c1}^2}{1 - X_{2m}^2}\right)$$

$$e_4 = \frac{C_4 E_4^2}{E_4^2 - E^2 - iG_4 E \cdot E_4} \quad E_4 = E_2$$

$$e_5 = \frac{C_5 E_0^2}{E_0^2 - E^2 - iG_5 E \cdot E_0}$$

$$e_6 = \frac{C_6 E_{E1}^2}{E_{E1}^2 - E^2 - iG_6 E \cdot E_{E1}}$$

また、これらのパラメータの Si の温度依存性は山口らにより分光エリプソメトリを用いた計測で詳しく実測し

ている²⁾。その実測値から、単純な直線補間により、温度を関数としたパラメータの式を下記のように定めて、Si の誘電関数を求めることにした。

$$E1 = -0.00042 T + 3.49$$

$$B1 = 0.00089 T + 6.07$$

$$G1 = 0.00000984 T + 0.0764$$

$$B1x = -0.00117 T + 1.69$$

$$E2 = -0.00033 T + 4.34$$

$$G2 = -0.0000398 T + 0.105$$

$$F = -0.0043 T + 5.25$$

$$C4 = 0.0029 T + 1.44$$

$$G4 = 0.000144 T + 0.049$$

$$E0 = -0.00042 T + 3.49$$

$$C5 = 0.000245 T + 0.0194$$

$$G5 = 0.0000232 T + 0.00755$$

$$EE1 = 5.33$$

$$C6 = 0.164$$

$$G6 = 0.077$$

Si の複素屈折率 N の実部 n (屈折率)、虚部 κ (消衰係数) は、

$$N = n + i\kappa \cong \sqrt{\epsilon}$$

とあらわされる (透磁率は 1 とした)。Si の温度が 0°C と 200°C の時の屈折率と消衰係数の計算結果を図 1 に示す。

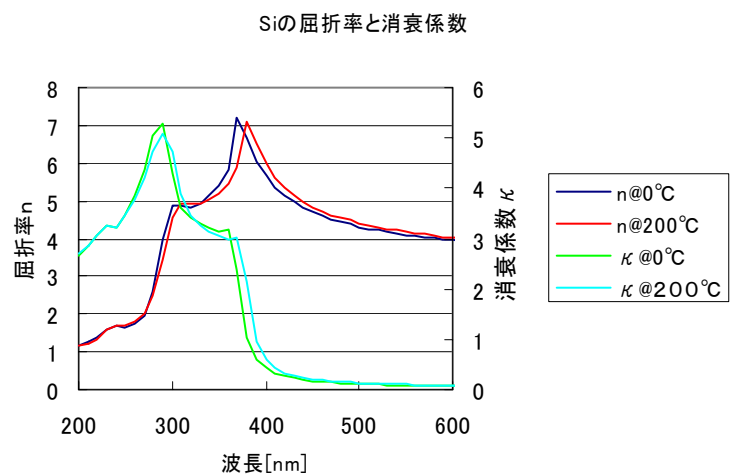


図 1 屈折率と消衰係数の計算結果

計算結果から、400nm 以下の紫外光の波長帯で温度依存性が大きいことがわかる。そこで、一般的な偏向解析法と同様に、入射角 70 度にて入射した場合の、p 偏光、s 偏光の反射率を求めた。このとき Si ウエハ上に形成されている自然酸化膜の影響を考慮するため、多重干渉を考慮した下記の式を用いた。

$$R_p = \frac{r_{p12} + r_{p23} \exp(-2i\beta)}{1 + r_{p12} + r_{p23} \exp(-2i\beta)}$$

$$R_s = \frac{r_{s12} + r_{s23} \exp(-2i\beta)}{1 + r_{s12} + r_{s23} \exp(-2i\beta)}$$

$$\beta = \frac{2\pi n_2 d}{\lambda} \cos \theta_2 \quad \sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$$

$$r_{pa,b} = \frac{n_b^2 \cos \theta - n_a \sqrt{n_b^2 - n_a^2 \sin^2 \theta}}{n_b^2 \cos \theta + n_a \sqrt{n_b^2 - n_a^2 \sin^2 \theta}}$$

$$r_{sa,b} = \frac{n_a \cos \theta_a - \sqrt{n_b^2 - n_a^2 \sin^2 \theta_a}}{n_a \cos \theta_a + \sqrt{n_b^2 - n_a^2 \sin^2 \theta_a}}$$

ここで、 R_p 、 R_s はそれぞれ p 偏光、s 偏光の複素振幅反射率、 $r_{pa,b}$ 、 $r_{sa,b}$ は、 $a=1$ 、 $b=2$ のときに r_{p12} 、 r_{s12} 、 $a=2$ 、 $b=3$ のときに r_{p23} 、 r_{s23} を表す。 θ_1 は大気からの光の入射角、 θ_2 は酸化膜中の Si 表面への入射角である。 n_1 、 n_2 、 n_3 はそれぞれ空気、Si 酸化膜、Si の複素屈折率である。

これらの式から、ウエハの温度が 0°C、200°C の時の分光反射率を p 偏光、s 偏光についてそれぞれ求めると、図 2 のようになる。ここで酸化膜の膜厚は 5nm として計算した。

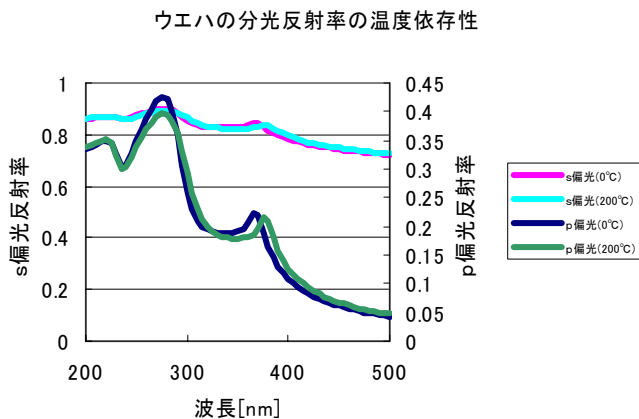


図 2 反射率の分光特性の温度による違い

本グラフより、特に p 偏光は、E2 準位 (波長 286nm 付近)、E1 準位 (波長 355nm 付近) においてピークを形成し、その近傍で反射率の温度による変化が大きいことがわかる。

温度による変化をよく見るため、比較的变化が大きそうな 365nm の波長での、酸化膜厚を 5nm としたときのウエハ温度に対する p 偏光と s 偏光の反射強度のグラフを図 3 に示す。“相対”とあるのは温度による変化がよくわかるように、温度 0°C の時からの相対変化を表したものである。反射率は温度に対してほぼ線形に変化することが読み取れる。ここで重要なのはウエハ温度が 0°C から 200°C の変化で、p 偏光は 20% 近くも変化しているのに対し s 偏光はわずか 2% ほどしか変化していない。これから s 偏光の光強度 I_s をリファレンスとして使用し、p 偏光の光強度 I_p との間の比、 $R=I_p/I_s$ を計測値とすれば、光源の光強度の変化や光路中の吸収などの影響を受けずに精度よく測定が出来ることが期待できる (図 4)。

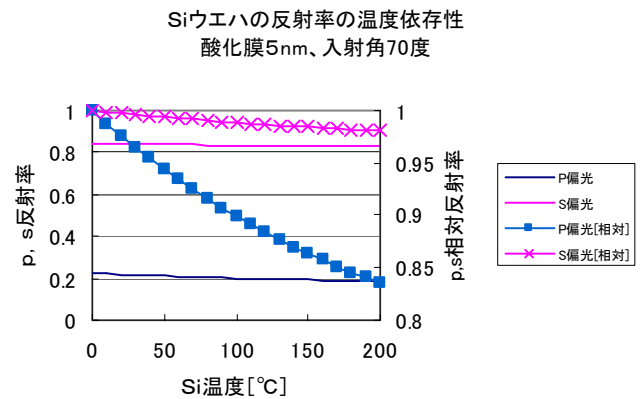


図 3 波長 365nm での p, s 反射率のウエハ温度依存性

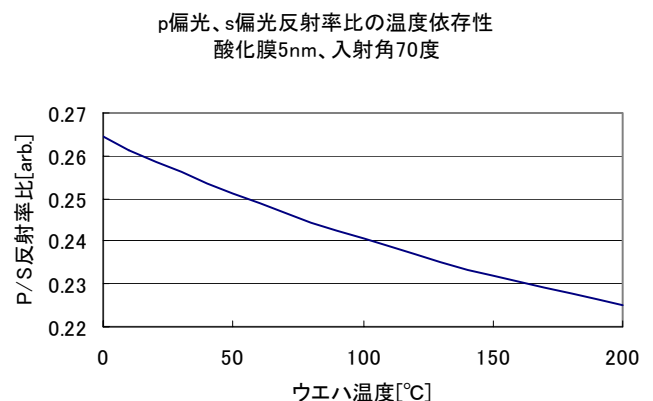


図 4 p/s 偏光比 R とウエハ温度の関係

また、図2に示すグラフからわかるように、波長が異なるとp偏光とs偏光の反射強度の温度依存性は大きく異なる。たとえば436nmでの変化を見ると、図5に示すように、温度に対して傾きが図3に示した365nm時と反対になる。

このことから、もし2つの波長の光の強度が相対的に安定しているのであれば、たとえば365nmのp偏光と436nmのp偏光の比を測定値として温度を求める方法も考えられる。この場合には、測定値はより大きな温度係数を持つことになり、更に測定精度は向上することが期待される(図6)。

Siウエハの反射率の温度依存性
酸化膜5nm、入射角70度

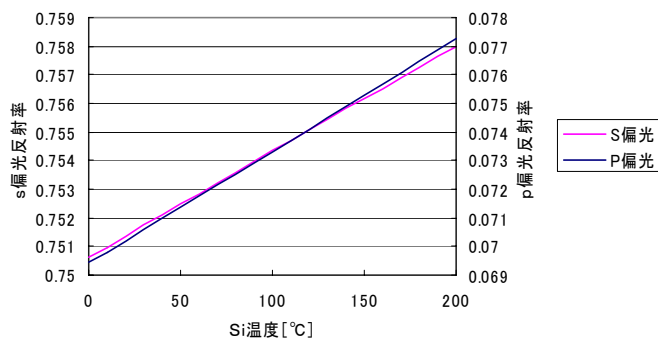


図5 436nmでのp/s偏光比Rとウエハ温度の関係

365nmと436nmのp偏光の比のウエハ温度依存性
酸化膜5nm、入射角70度

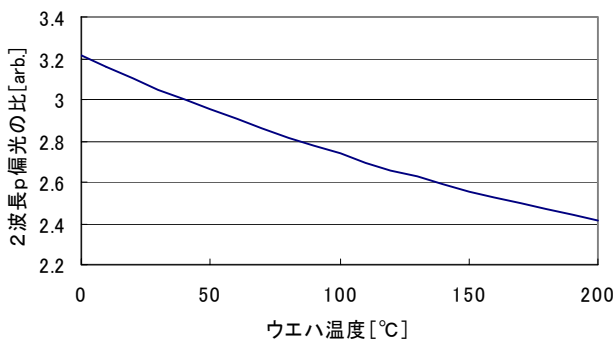


図6 365nmと436nmのp偏光の比の温度特性

またこの近接した2つの波長の温度特性が逆の符号を持つことを利用すると、Si酸化膜厚が異なる場合の測定値の違いと温度による測定値の違いを分離することが出来る。なぜならば、膜厚の違いによる測定値の変化の方向は干渉が原因のため、温度変化の場合と異なり、多少波長が異なっても同じになるからである。波長365nmのp偏光とs偏光の比Raを縦軸に、405nmのp偏光とs偏光の比Rbを横軸にとり、ウエハ温度を0°Cから200°Cに変化させた場合のグラフを図7に示す。酸化膜の膜厚は10nm、20nm、30nm、40nmの4つの水準とした。

Ra,Rbのウエハ温度、酸化膜厚依存性

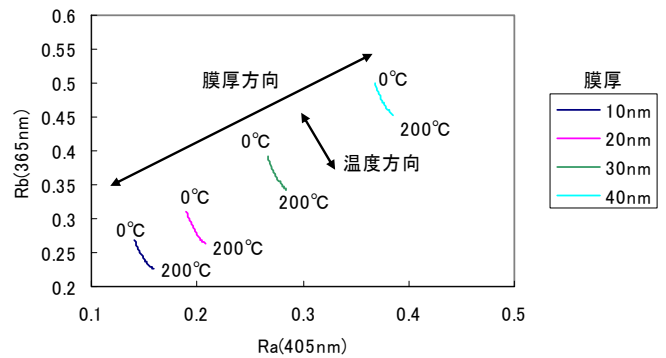


図7 反射率比Rの酸化膜膜厚とウエハ温度依存性

温度による変化の方向と膜厚による変化の方向が異なるため、このような二次元マップとなり、測定値Ra、Rbの2つの測定値から一意にウエハの温度を特定することが可能となる。

3. 試験装置と試験結果

次に計算結果を検証するため実験を行った。
試験装置概略図を図8, 9に示す。

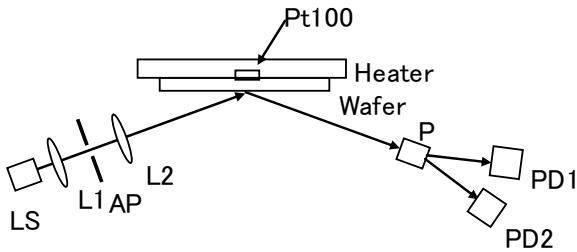


図8 光学系

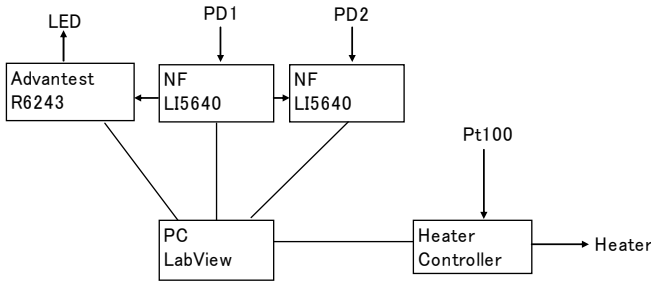


図9 電気系

図8に光学系の模式図を示す。光源LSは水銀ランプ(波長365nmの光をバンドパスフィルタで切り出し)、またはLED(日亜化学工業製, 中心波長365nm)を用いて試験を実施した。

光源LSからの光をL1, AP, L2によるコリメータで平行光線にしたあと、ウエハに入射した。

ウエハはHF洗浄を行い、自然酸化膜のみの状態とした。ウエハで反射した光は、偏光素子Pによりp偏光とs偏光に分離してそれぞれ受光素子PD1, PD2(フォトダイオード, 浜松ホトニクス製S1226)に入射する。

LEDを使用する場合、温度が変化すると光量, 中心波長ともに変化するため、ペルチエ素子により室温(23~25℃程度)で±0.1℃以下に温調した。

ウエハはヒータにより加熱することで温度を変更できるようにした。このときウエハ温度は、ウエハとヒータの間に入れた白金測温抵抗体(Pt100)で測定した。

図9に計測装置の電気系を示す。ロックインアンプ(NF製, LI5460)にPD1, 2の信号を入力, ロックインアンプ

の参照信号を電源(アドバンテスト製R6243)に入力して同一周波数でLEDを駆動した。これらにより取得したPD1, PD2の信号は計測ソフトのLabViewを用いてPCに取り込んだ。

この計測装置により測定した結果を以下に述べる。

初めに水銀ランプを光源に用いて計測した。ウエハ温度に対するp偏光とs偏光の比Rの変化を図10に示す。

ここで、横軸はウエハ温度(白金測温抵抗体での計測値)、縦軸はウエハ温度60℃の時のRの計測値を1として正規化した。■点が測定値をあらわし、実線は計算値(酸化膜厚3nmとした)である。Rの温度による変化は、計算値より実測値の方が小さくなった。この差異は計算で仮定した酸化膜厚や、実際の測定系での光のウエハへの入射角の誤差, 偏光面の合わせこみなどの調整誤差が原因と思われる。

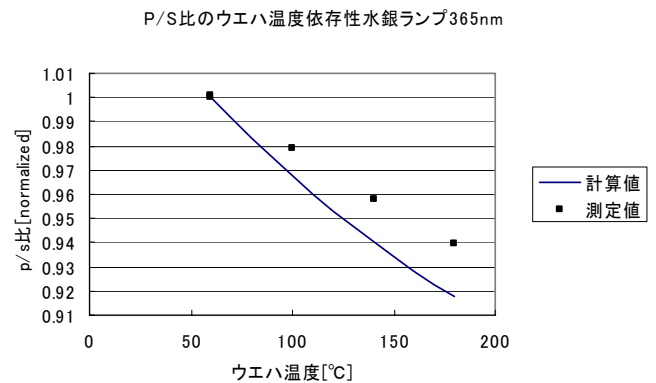


図10 ウエハ温度とp, s比R(光源:水銀ランプ)の関係

次にLEDを光源とし、ウエハの温度を30℃から120℃までステップ状に変化させて最後に40℃まで温度を下げたときのp偏光, s偏光, p偏光とs偏光の比Rの変化を測定した結果を図11に示す。

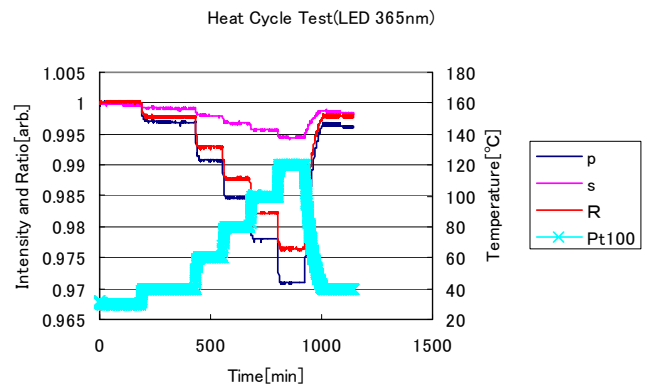


図11 ヒートサイクル試験(光源:LED)

これを見ると、 p 、 s 、 R 共にウエハ温度によく呼応して変化していることがわかる。上記結果をウエハ温度を横軸にして、縦軸に比 R をとったグラフを図 12 に示す。

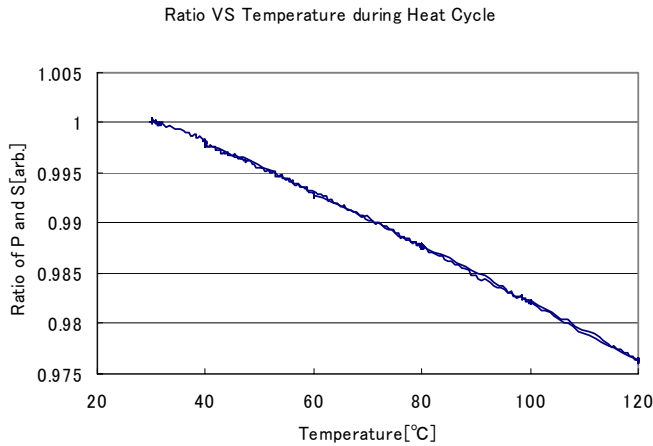


図 12 ウエハ温度と比 R の関係 (校正曲線)

再現性を見るため、翌日再度ヒートサイクル試験を実施、白金測温抵抗体で計測したウエハ温度と、同時に計測した比 R を前日の校正曲線からウエハ温度に換算した計測値を比較した結果を図 13 に示す。横軸は時間、左の縦軸はウエハ温度、右の縦軸はウエハ温度の計測値と比 R から算出した温度との差をとっている。

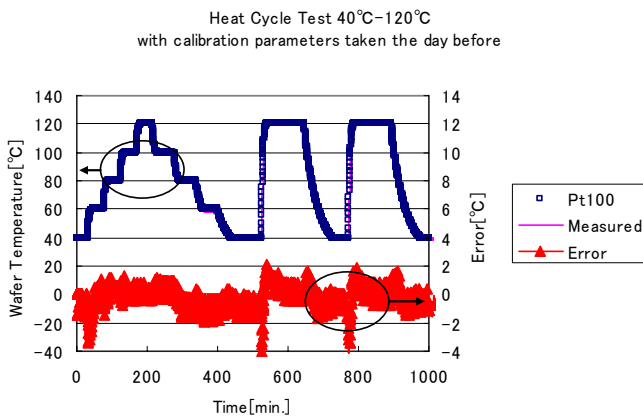


図 13 ヒートサイクル試験結果 (翌日)

白金測温抵抗体の測定値と、測定値 R から温度に換算した値は、再現性もよく、差異もおおむね $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内でよく一致している。なお、ウエハ温度が急上昇するところで、差異が大きくなっているのは、白金測温抵抗体がウエハとヒータの間にあるため、急激な温度変更時は、ヒータ温度とウエハ温度が平衡していないため、白金測温抵抗体が計測しているのは、ヒータの温度になっているためと推測される。

ところで図 12 のグラフの傾きを見ると先の水銀ランプでの試験よりウエハ温度に対する p/s 比 R の変化が小さいことがわかる。その原因は LED の場合、中心波長は 365nm でもスペクトルに広がりがあるため、その影響が出ている可能性が高い。そこでスペクトル広がりを考慮した場合 (LED) と、スペクトルの広がりが 0nm の場合 (単色光) で、ウエハ温度と p/s 比 R の関係に差異があるのかを計算で確認してみた。その結果を図 14 に示す。

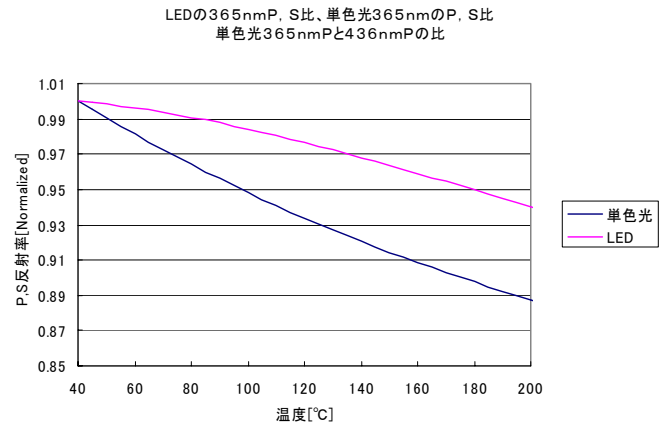


図 14 スペクトルの広がりの影響の計算結果

計算結果も、温度に対する p/s 比 R の変化はスペクトル広がりを考慮した方が小さくなった。したがって光源が水銀ランプの輝線の場合と LED の場合のウエハ温度と p/s 比 R の関係の違いは、スペクトル広がりによるものであると考えられる。

最後にウエハ表面の酸化膜厚による計測値のずれを補正するため、酸化膜厚を変化させた場合についても、ウエハ温度と p/s 比 R の関係を計測してみた。

光源は、水銀ランプの 365nm と 405nm の 2 つの波長で計測した。酸化膜は自然酸化膜 ($\sim 3\text{nm}$)、10nm 程度、25nm 程度の 3 水準とした。その結果を図 15 に示す。

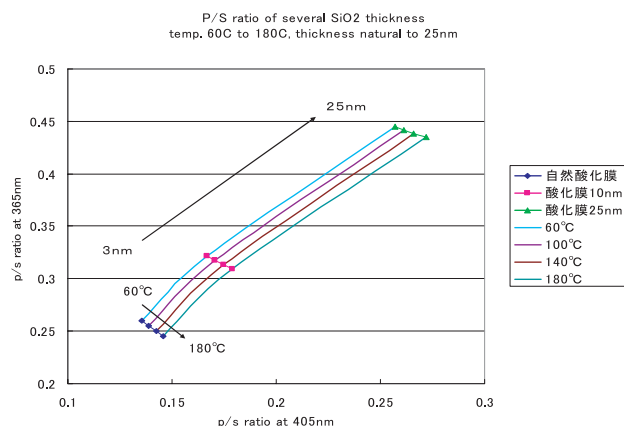


図 15 異なる酸化膜厚のウエハを用いた計測結果

グラフの横軸に 405nm での p/s 比 R 、縦軸は 365nm での p/s 比 R をとった。酸化膜による変化は右上方向であり、温度による変化は右下方向となり、これは先に計算して予測した結果の傾向と同一である。これにより、2つの波長での計測値 R が、このグラフ上のどこにあるのかで、ウエハ温度と酸化膜厚の両方がわかる。よって、膜厚による測定値への影響を排除して温度を計測することが出来るということが確認できた。

4. まとめ

非接触でウエハの温度を計測する方法を考案し、理論検証と実測による確認を行った。その結果、理論どおりに温度計測できること、酸化膜の影響を除去できることを示した。また、以下の知見を得た。

- ・測定精度は LED を用いた場合で $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度までは可能であった。
- ・LED のようなスペクトル幅の広い光源を使用するとウエハ温度に対する信号 (p 偏光と s 偏光の比) 変化は小さくなってしまふ。もしスペクトル幅の狭い水銀ランプを用いれば、測定精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以下は可能だと考えられる。

5. 謝辞

本研究に当たり、理論検証時より、多大なるご助言ご指導を頂くとともに、当初の実証試験にご協力いただいた共同研究者でもある静岡大学電気研究所の山口十六夫教授 (現在退官)、ヤン・ミストリーク博士 (現在退任)、青山満氏に、この場をお借りして深く感謝いたします。

参考文献

- 1) S. Adachi, "Model dielectric constants of Si and Ge", Am. Phys. Soc. Phys. Rev. B, Vol. 38-18, 12966, (1988)
- 2) Zhong-Tao Jiang, T.Yamaguchi, Mitsuru Aoyama and Takahisa Hayashi, "Possibility of simultaneous monitoring of temperature and surface layer thickness of Si substrate by insitu spectroscopic ellipsometry", Jpn. J. Appl. Phys., 37[2], pp. 479-483(1998)

筆者紹介



Koji Shio

塩 耕史 1990 年、コマツ入社。
現在、研究本部 建機第三イノベーションセンター所属。



Hideyuki Wakai

若井 秀之 1976 年、コマツ入社。
現在、研究本部 建機第二イノベーションセンター所属。工学博士。



Kazuhiko Kubota

久保田 和彦 1989 年、コマツ入社。
現在、研究本部 産機研究室所属。



Hironori Akiba

秋葉 浩永 1980 年、コマツ入社。
現在、研究本部 産機研究室所属。

【筆者からのひと言】

半導体の高集積化が進むにつれて、半導体プロセスに求められる温度管理は年々厳しさを増し、また不良率の低減を初めとするコストダウンのためにも温度管理は非常に重要な要素となっています。その中でこれまで有効な方法がなく手付かずであった、低温の真空プロセスでのウエハの In-Situ 温度計測方法の原理確認と実証が出来、今後この技術が半導体製造技術の進歩につながれば幸いです。