

機関番号：32663

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560403

研究課題名（和文） 半導体材料の in-situ 放射測温とキャリブレーションシステムの構築

研究課題名（英文） In-situ radiation thermometry of semiconductor materials and its calibration system

研究代表者

井内 徹（TOHRU IUCHI）

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：20232142

研究成果の概要（和文）：シリコンウエハを対象とした放射測温法として、偏光輝度比による放射率と温度の同時計測法と放射率不変条件による手法が、幅広い比抵抗域、温度域、波長域で成立することを実証した。さらにウエハが半透明体の条件下で、吸収端波長および透過率測定による有望な非接触測温法を見出した。また、エッチング技術により信頼性、精度の高いキャリブレーション用ハイブリッド表面温度センサを開発した。これらの成果により、背光雑音を回避する in-situ 測温システムの構築の準備が完了した。

研究成果の概要（英文）：Two radiation thermometry, namely, the simultaneous measurement of emissivity and temperature by use of the ratio of polarized radiances and the method due to an emissivity-invariant condition have successfully been developed. These methods are available irrespective of different resistivity from 0.01 to 2000  $\Omega\text{-cm}$ , wide spectra from 0.9 to 4.5 micrometers and temperature range over 900 K. Moreover, the two non-contact temperature measurement methods using an absorption edge wavelength shift and a transmittance variation method have been confirmed to be promising for semitransparent silicon wafers under 900 K. A hybrid surface temperature sensor for calibration has been greatly improved with the introduction of a thin film (Hastelloy metal) that is chemically etched. By combining these results, a temperature measurement system for finally mitigating background radiation noise at a real manufacturing process of silicon wafers will be developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：放射測温、放射率、偏光、半導体、酸化膜、窒化膜、バンドギャップ。

## 1. 研究開始当初の背景

シリコン半導体デバイスの高機能化要求に対処するために、プロセスで処理されるシリコンウエハ自体の温度を信頼性ある精度

で直接測定ことが不可欠な条件として要求される段階になった。

放射測温法は非接触温度計測法であるから、汚染を極度に嫌う半導体製造プロセスに

有効な測温法であるが、表面に成長する酸化膜、窒化膜、エピタキシャル膜、ウエハの不純物濃度、表面粗さなどによって放射率が大きく変動するため、結果として深刻な測温誤差をもたらす。また、物性的特徴として、半導体材料は固有のバンドギャップエネルギーを有し、温度および検出波長域によっては光学的に半透明体となるので、放射測温法を含めた光学的な非接触測温法は半導体プロセスで有効に使用されているとは言い難い状況にある。

## 2. 研究の目的

本研究は半導体材料（シリコン）の温度を製造プロセス中、特に RTP（急速熱処理プロセス）において、in-situ かつ非接触で正確に温度計測する手法を開発すること、およびその計測システムが的確に実施できているか確認するためのキャリブレーションシステムを構築することを最終目的としている。

## 3. 研究の方法

これを実現するための具体的な研究課題は、これまでに得られた下記の4件の研究成果を総合・統合することである。

- (1) 偏光放射輝度比によるシリコンウエハの放射率補正放射測温法。
- (2) 放射率不変条件を利用したシリコンウエハの放射測温法。
- (3) バンドギャップ変化に基づく吸収端波長シフト利用のシリコンウエハの非接触温度計測法。
- (4) ハイブリッド表面温度センサによるシリコンウエハの表面温度キャリブレーション。

## 4. 研究成果

(1) ~ (4) に各研究課題に関する新たな知見を記述する。

- (1) 偏光放射輝度比による放射率補正放射測温法について、これまで酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ ) について有効であったが、さらに窒化膜 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) についても同様に極めて有効であることを実証した。また、これまでの検出波長 0.9  $\mu\text{m}$  のみならず、4.5  $\mu\text{m}$  の長波長においても有効であることを実証した。

Fig. 1 および Fig. 2 に、被膜がそれぞれ酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ )、窒化膜 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) の場合に対して、検出波長  $\lambda = 4.5 \mu\text{m}$  における偏光放射輝度比  $R_p$  と p-偏光放射率、s-偏光放射率の間の関係の実験結果を示す (角度  $\theta = 75^\circ$ )。

Table 1 は、上記結果を総合し、シリコンウエハの比抵抗が  $\rho = 0.01 \sim 2000 \Omega\text{cm}$ 、膜厚が  $d = 30 \sim 950 \text{ nm}$ 、温度が

$T = 900 \sim 1000 \text{ K}$  まで変化したときの実験結果をまとめ、放射率および温度の測定の不確かさ解析した結果をまとめたものである。  
(雑誌論文 参照)

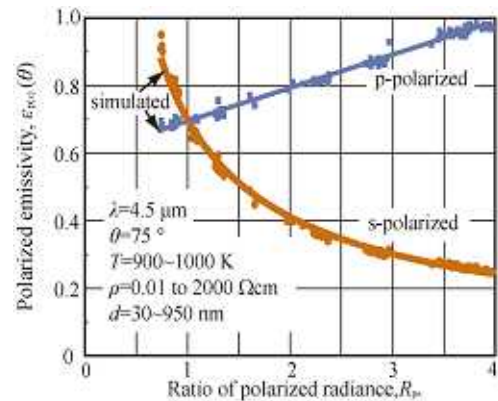


Fig. 1 偏光放射輝度比による放射率補正放射測温法の実験結果 (波長:  $\lambda = 4.5 \mu\text{m}$ , 被膜:  $\text{SiO}_2$ ).

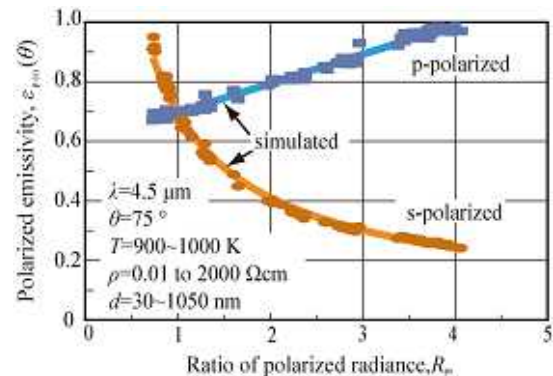


Fig. 2 偏光放射輝度比による放射率補正放射測温法の実験結果 (波長:  $\lambda = 4.5 \mu\text{m}$ , 被膜:  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

表面薄膜の種類		酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ )	窒化膜 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )	
不確かさ	p-polarized	放射率, $\epsilon$	0.011	0.007
		温度, $T$	-4.14[K]	2.53[K]
	s-polarized	放射率, $\epsilon$	0.02	0.0091
		温度, $T$	10.79[K]	5.58[K]

Table 1 偏光放射輝度比による放射率補正放射測温法の不確かさ評価 (波長:  $\lambda = 4.5 \mu\text{m}$ , 被膜:  $\text{SiO}_2$  と  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

- (2) 放射率不変条件が酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ ) だけでなく、窒化膜 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) に対しても成立することを実証した。

この場合、p-偏光で放射率不変条件を満たす角度は酸化膜の場合  $55^\circ$  であるが、窒化膜では  $62^\circ$  である。

Fig. 3 および Fig. 4 に、それぞれ  $\text{SiO}_2$  膜、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  膜の場合に対して、検出波長  $\lambda = 4.5 \mu\text{m}$  における放射率不

変条件の実験結果を示す。  
 Table 2 は、Table1 と同様の条件下  
 (比抵抗  $\rho=0.01\sim 2000\ \Omega\text{-cm}$ 、膜厚  
 $d=30\sim 950\ \text{nm}$ 、温度  $T=900\sim 1000\ \text{K}$ 、検  
 出波長  $\lambda=4.5\ \mu\text{m}$ )での放射率と温  
 度の測定不確かさを解析したもので  
 ある。  
 (雑誌論文 参照)。

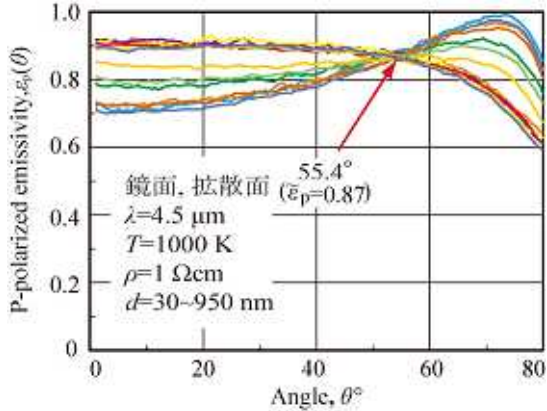


Fig. 3 放射率不変条件の実験結果  
 (波長  $\lambda=4.5\ \mu\text{m}$ , 被膜:  $\text{SiO}_2$ ).

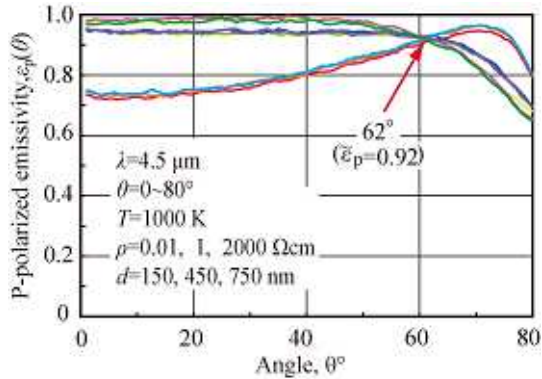


Fig. 4 放射率不変条件の実験結果  
 (波長  $\lambda=4.5\ \mu\text{m}$ , 被膜:  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

Table 2 放射率不変条件による放射測温法の  
 不確かさ

評価(波長:  $\lambda=4.5\ \mu\text{m}$ , 被膜:  $\text{SiO}_2$ と $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

表面薄膜の種類		酸化膜 ( $\text{SiO}_2$ )	窒化膜 ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )
不確かさ	放射率, $\Delta \epsilon_p$	0.012	0.008
	温度, $\Delta T$	4.19[K]	2.71[K]
測定角度		55.4°	62°

(3) シリコンウエハが半透明体となる条  
 件下で、抵抗率の異なる試料(0.1~  
 2000  $\Omega\text{-cm}$ )に対し、常温から 600°C  
 の温度領域において吸収端波長シフト  
 から非接触温度計測できることを  
 確認した。

Fig. 5 に実験結果を示す。吸収端波  
 長は、常温から 600°C の温度範囲で

1000~1300 nm にわたってシフトする。  
 酸化膜や窒化膜など、また表面粗さ  
 などによる影響に関しては、さらに  
 考察が必要であるが、半透明体とな  
 る比較的低温域において、したがっ  
 て放射測温法の適用困難な条件で、  
 本手法の応用可能性が確認された。  
 ただし、多量の不純物ドーピングを  
 有するシリコンウエハは抵抗率が極  
 端に低くなり、実質的に不透明体と  
 なる条件下(たとえば比抵抗値 0.01  
 $\Omega\text{-cm}$ )では、本手法の適用は困難で  
 あり、不透明体を対象とした(1)、  
 (2)の手法の適用可否を今後検討  
 すべきである。(雑誌論文 参照)。

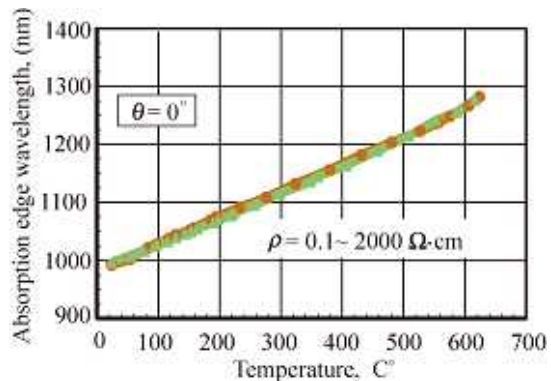


Fig. 5 温度と吸収端波長シフト間の実験結  
 果。

(4) ハイブリッド表面温度センサの接触  
 薄膜(ハステロイ)の部分は、エッ  
 チング技術によって、より安定した  
 制作が可能となった。その結果、精  
 度の向上に大いに寄与した。このセ  
 ンサは、熱電対を溶接することがき  
 わめて困難で、かつコストと労力を  
 要するシリコンウエハに対して、そ  
 の表面温度キャリブレーションセン  
 サとして威力を発揮する。同時に幅  
 広い応用が可能であるので、今後測  
 定対象を拡大することも考慮する。  
 Fig. 6 にセンサ構造の概略を示す。  
 (雑誌論文、参照)。

論文 ではシリコンウエハに埋め込  
 んだ熱電対と本センサの測定精度に  
 関する不確かさ評価を実施し比較考  
 察した。その結果、ハイブリッド表  
 面温度センサは埋め込み熱電対と同  
 等ないし以上の精度を擁しているこ  
 とを確認している。

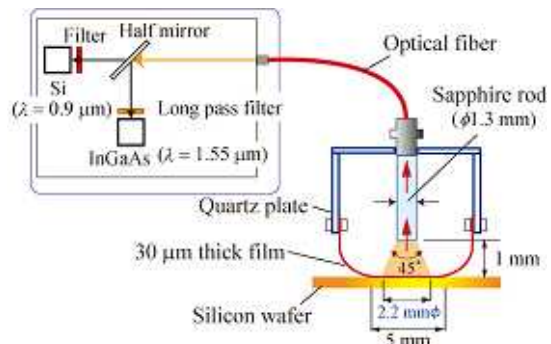




Fig. 6 ハイブリッド表面温度センサの構造概略.

以上、(1)～(4)の個々の研究課題の研究成果を記述したが、これらをもとに、統合・総合化した「*in-situ*計測システム構築」についてまとめる準備ができた。

Fig.7は、その一つの方向性を示したシステム構築の一例である。製造プロセスの現場では、シリコン材料を放射加熱する。たとえばキセノンランプのような強烈な光源があり、これが背光雑音として深刻な誤差要因となる。これを除去することによってはじめて本研究成果が実用に供しえる計測法となる。

今後の研究課題は、この背光雑音をいかにして処理するかが中心となる。

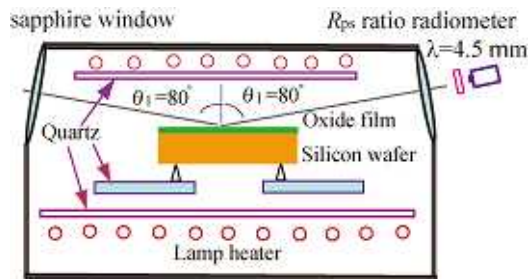


Fig. 7 *in-situ*放射測温システムの一例  
(背光雑音の処理が研究課題).

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

T. Iuchi and T. Seo, Radiation thermometry of silicon wafers based on emissivity-invariant condition, Applied Optics, 査読有, Vol.50, No.3, pp.323-328 (2011).

T. Iuchi and T. Seo, Temperature measurement of semitransparent silicon wafer based upon absorption edge wavelength shift, International Journal of Thermodynamics, 査読有, Vol.31, No.8, pp.1533-1544 (2010).

T. Iuchi and A. Gogami, Simultaneous measurement of emissivity and temperature of silicon wafers using a polarization technique, Measurement, 査読有, Vol.43, No.5, pp.645-651 (2010).

T. Iuchi and A. Gogami, Uncertainty of

a hybrid surface temperature sensor for silicon thermocouple, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 80, No.12, pp.1261091-1261093 (2009).

K. Hiraka, R. Shinagawa, A. Gogami and T. Iuchi, Rapid response hybrid-type surface temperature sensor, International Journal of Thermophysics, 査読有, Vol.29, No.2, pp.1166-1173 (2008).

井内徹, シリコン半導体ウエハの *in-situ* 温度計測, 査読無、計測と制御, Vol.47, No.5, pp. 395-402 (2008).

[学会発表](計14件)

瀬尾朋博、岩崎友幸、井内徹、背光雑音を分離したシリコンウエハの *in-situ* 放射測温の検討、第58回応用物理学連合講演会、2011年3月24日、神奈川工科大学。

瀬尾朋博、井内徹、シリコンウエハの *in-situ* 放射測温法の考察、第71回応用物理学学会学術講演会、2010年9月14日、長崎大学。

T. Iuchi and T. Seo, Temperature measurement of semitransparent silicon wafers based upon absorption edge wavelength shift, TEMPMEKO \$ ISHM 2010, Portrose (Slovenia), May 31st - June 4th 2010, Portorož, Slovenia.

井内徹、鉄鋼プロセスにおける放射測温技術の温故知新、日本鉄鋼協会、2009年11月13日、加古川(兵庫)。

T. Iuchi, A. Gogami, Uncertainty in the temperature of silicon wafers measured by radiation thermometry based upon a polarization technique, XIX IMEKO WORLD CONGRESS, September 6-11, 2009, Lisbon (Portugal).

岩崎友幸、角谷聡、井内徹、偏光放射率不変条件を利用したシリコンウエハの放射測温法、第70回応用物理学学会学術講演会、2009年9月9日、富山大学。

T. Iuchi and A. Gogami, An emissivity-invariant condition of silicon wafers and its application to radiation thermometry, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, August 18-21, 2009, Fukuoka International Congress Center.

T. Iuchi and A. Gogami, Emissivity compensated radiation thermometry of silicon wafers during the growth of oxide film, International Conference on Temperature and Thermal Measurements, October 21, 2008, Beijing (China),

A. Gogami and T. Iuchi, A hybrid-type surface temperature sensor and its application to the development of emissivity compensated radiation thermometry, ICCAS 2008,, October 17 ,2008, Seoul(Korea)

T. Iuchi and R. Shinagawa, A non-contact temperature measurement of semitransparent silicon wafers with absorption edge wavelength, ICCAS 2008, October 15 ,2008, Seoul(Korea).

後上敦史、井内徹、シリコンウエハの放射率自動補正による非接触測温法、第25回センシングフォーラム、2008年9月25日、佐賀大学。

後上敦史、井内徹、真空加熱炉内におけるハイブリッド型表面温度センサの適用、第69回応用物理学会学術講演会、2008年9月3日、中部大学（春日井キャンパス）

A. Gogami and T. Iuchi, Comparison of surface temperature readings between an embedded thermocouple in a silicon wafer and a hybrid-type temperature sensor, SICE 2008, August 20 ,2008 , Tokyo .

後上敦史、井内徹、偏光放射率補正シリコンウエハの温度計測法、第33回光学シンポジウム、2008年7月5日、東京大学。

〔図書〕(計1件)

T. Iuchi, Y. Yamada, M. Sugiura and A. Torao, Thermometry in Steel Production, in Chapter 4, Experimental Methods in the Physical Sciences, Vol. 43, Radiometric Temperature Measurements, edited by Z. M. Zhang, B. K. Tsai and G. Machin, The Netherlands, Academic Press, 2010, pp. 217-277.

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称 : Radiation thermometry and radiation thermometry system

発明者 : 井内徹、平加健介

権利者 : 学校法人東洋大学

種類 : 特許

番号 : 12/808754

出願年月日 : 2010年6月17日

国内外の別 : 外国(米国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井内 徹 (TOHRU IUCHI)  
東洋大学・理工学部・教授  
研究者番号 : 20232142

(2) 研究分担者 (0)

(3) 連携研究者 (0)