

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560511

研究課題名(和文) 極端な非平衡温度場における放射测温システムの設計構築

研究課題名(英文) Design and construction of radiation thermometry systems under extremely nonequilibrium temperature condition

研究代表者

井内 徹 (IUCHI, Tohru)

東洋大学・工業技術研究所・客員研究員

研究者番号：20232142

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：光を利用して、非接触で物体の温度を正確に測定する手法(放射测温法)は、様々な分野で有効に活用できるものであるが、測定物体とそれを加熱処理するランプなど強烈な加熱源の間に極端な温度差がある場合、高い温度の加熱源からの雑音(これを背光放射という)のために、放射测温法は実質的に適用不可能となる。本研究は、ノイズ係数と名付けたパラメータを導入して、背光放射を定量的に見積もる手法を提案した。この手法によって、研究代表者らによってすでに開発された放射率補正放射测温法を導入した総合的な放射测温システムを構築する設計手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：Radiation thermometry, that is, a non-contact temperature measurement method based on the radiance measurement emitted by an object is available in various fields of science and industry. This method, however, meets difficulties when it is used under the extremely nonequilibrium temperature condition that is caused by the large temperature difference between the object and heaters such as high intensity lamps, because of strong background radiance (optical noise). I proposed a method to evaluate background radiance quantitatively by introducing a parameter defined as a noise factor and to reduce it significantly as well. Based on this method, I established a method for designing an integrated radiation thermometry system including the emissivity-compensated radiation thermometry.

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：放射测温 放射率 背光放射 半導体 偏光 非平衡温度場 反射率 透過率

1. 研究開始当初の背景

放射測温法は、物体から放射される電磁波を検出することによってその物体の温度を計測する非接触温度計測法であり、科学と産業のさまざまな分野で使用されている。しかし、放射測温法は、測定対象の表面の物性、形状その他に関わる放射率が変動する場合には、温度計測精度に関する不確かさも増大し、温度計測の信頼性が大きく損なわれる事態に陥る。放射率問題は、放射測温法にとって宿命的な問題となっている。さらに測定物体の放射輝度以外に加熱源その他周辺からの熱放射も背光放射として検出するために、S/N比を著しく阻害することになる。したがって、背光放射を低減する抜本的な手法なしには実用に供し得る放射測温システムを構築することは極めて困難である。

シリコンウエハ製造プロセスは、半導体デバイスの高品質化、高機能化に対処するために、製造工程におけるウエハ自体の温度計測が不可欠の課題として浮上している。汚染を極度に嫌う半導体プロセスでは非接触温度計測としての放射測温法は有効な測温手法であるが、ウエハ表面に成長する酸化膜、窒化膜、不純物濃度などによって放射率が大きく変動するために、結果として深刻な測温誤差をもたらす。また、半導体特有のバンドギャップにより、温度と測定波長域によってはシリコンウエハは半透明体となるので、放射測温法の適用はますます困難になる。

高速熱処理プロセスで代表されるシリコンウエハ製造プロセスでは、キセノンランプやハロゲンランプなど、数千の高輝度ランプによる放射加熱によってウエハの熱処理がなされる。強烈な背光放射の原因となるこれら加熱ランプと測定物体のウエハを取り巻く環境は、極端な非平衡温度空間となる。この環境下で放射測温法を導入した場合、背光放射と信号となるウエハからの放射輝度の比は、桁違いの大きくなり、S/N比の観点から測温に関しては絶望的な状況になる。

本研究は、このような厳しい環境下での放射測温システムを構築することを課題としたものである。

2. 研究の目的

本研究は、非接触温度計測法としての放射測温法を実用に供す際、その測定対象の空間的環境が極端に異なる非平衡温度場になっているときに、信号となる測定対象からの放射を、加熱源からの強烈な背光放射から十分なS/N比で分離し、かつ測定対象の放射率の影響を受けない「放射測温システム」を、制約された幾何学的空間の条件下で設計構築することを目的とする。具体的には、半導体シリコンウエハを高速熱処理するプロセスを想定し、多種のシリコンウエハの放射率が変化しても、その変動を補正し、かつ加熱源からの背光放射の影響を排除した放射測温システムを設計構築する一般的な方法論

を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 信号と背光の完全分離の原理探索。
- (2) 偏光放射計の試作(検出波長の多様化、高応答化、視野角を狭小化など)。
- (3) 極端な非平衡温度を実現する狭い計測空間を実現し、背光放射の定量化実験に対処できる実験系の整備、実験実施とその結果の考察・シミュレーション解析。
- (4) 放射測温システム設計構築。

4. 研究成果

(1) 背光と信号の完全分離の原理探索

Fig. 1に本研究の課題を端的に表現したシリコンウエハ熱処理を想定した加熱実験装置における実験状況を示す。

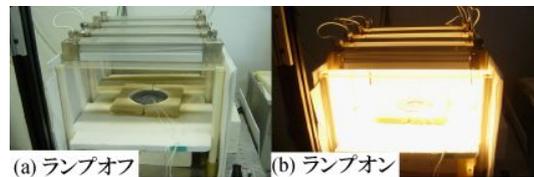


Fig. 1 極端に非平衡な温度場の様子

Fig. 1(a)は、加熱ランプがオフの状態、(b)は、ランプがオンした状態であり、背光放射が充満した状況を示している。本研究は、(b)のような状況下で、背光放射を消去し、測定対象の温度を正確に測定するための放射測温システムを構築することにある。

Fig. 2は、信号と背光を完全分離するための基本的な原理を示したものである。

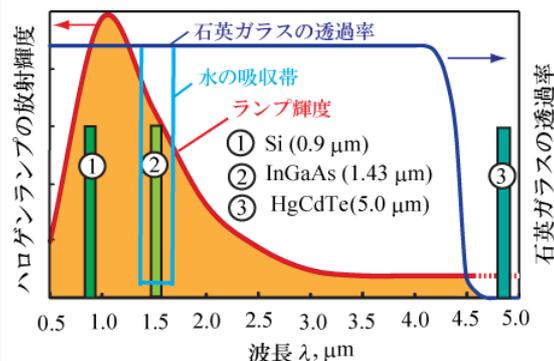


Fig. 2 信号と背光放射の完全分離

Fig. 2において、完全分離を実現するために、以下の2つの手法を提案した。

- (1) 水の吸収を利用する手法、
 - (2) 石英の吸収を利用する手法。
- (1)は検出波長 1.43 μm 前後で水膜の吸収帯を利用し、この波長帯に感度のある InGaAs センサの放射計を利用し、(2)は、4.5 μm 以上の波長帯をほぼ吸収する石英板を利用し、同様にこの波長帯に感度のある HgCdTe センサの放射計を使用することによって、いずれも信号と雑音である背光を分離する。

(2) 偏光放射計の試作

背光放射の定量化のために、3 台の偏光放射計を試作した。Table 1 に仕様を列記する。また、Fig. 3 に、偏光放射計の光学系を示す。

Table 1 偏光放射計の仕様

センサ	Si	InGaAs	HgCdTe
検出波長 (μm)	0.90 ±0.05	1.43 ±0.05	5.00 ±0.20
温度領域 (°C)	550-900	500-900	350-1000
標準不確かさ (°C)	0.12	0.40	3.18
レンズ径 (mm)	20		
距離係数	200 (測定距離/測定面積)		
視野角 (°)	0.287		

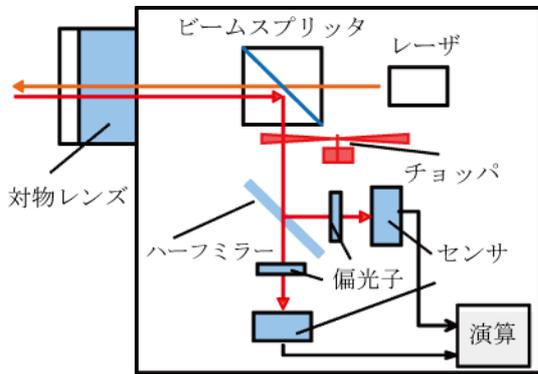


Fig. 3 偏光放射計の光学系

(3) 実験とその結果

Fig. 4 は、背光放射を定量評価するための実験系である。ハロゲンランプの下部に石英板（およびその上に水膜）を配備する。Fig. 4(a) は、ランプの1つが放射計と鏡面対称的な位置に配置されているとき、Fig. 4(b) はランプが対称位置からずれた位置に配置されたときを示している。

ランプオフの状態では、放射計で検出される信号を V_{off} とすると、

$$V_{off} = V_1 = \epsilon_{p(s)}(\theta) V_{\lambda,b}(T) \quad (1)$$

ランプオンの状態での信号を V_{on} とすると、

$$V_{on} = V_1 + V_2 = \epsilon_{p(s)}(\theta) V_{\lambda,b}(T) + \eta V_{\lambda,b}(S) \quad (2)$$

となる。ここで、 T は試料温度、 $V_{\lambda,b}(T)$ は、温度 T 、波長 λ の分光黒体放射輝度に対する放射計の出力電気信号を示す。 $\epsilon_{p(s)}(\theta)$ は、 θ 方向の p- (または s-) 偏光放射率。 S は、ランプの輝度温度。 V_1 と V_2 は、それぞれ試料の放射輝度信号出力および背光放射輝度出力。

ここで、背光放射を定量化するとき重要な役割を果たすノイズ係数 η を、(3) 式で定義

する。

$$\eta = V_2 / V_{\lambda,b}(S) \quad (3)$$

一方、 V_2 は(4)式で求めることができる。

$$V_2 = V_{on} - V_{off} \quad (4)$$

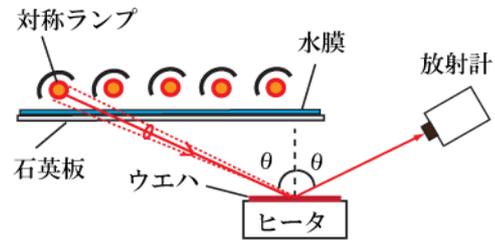
最終的に背光放射によって生ずる放射計の温度指示 T_a と試料温度 T 、ランプの輝度温度 S の間の関係を、次式で見積もることができる。

$$\exp[-c_2/(AT_a + B)] = \exp[-c_2/(AT + B)] + (\eta/\epsilon_{p(s)}(\theta)) \exp[-c_2/(AS + B)] \quad (5)$$

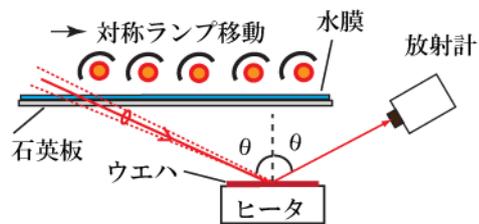
ここで、 c_2 はプランクの第2定数。 A と B は放射計によって決定される定数である。

ノイズ係数が実験的に決定されると、背光放射によって生ずる放射計の温度指示値 T_a と試料温度 T の差 $\Delta T = T_a - T$ を(5)式を用い、任意の T と S を与えて求めることができる。

試料として鏡面ウエハ以外に粗面加工を施したもの、酸化膜を成長させたものなど表面状態の異なる多くの試料を準備した。



(a) 対称ランプ配置



(b) 非対称ランプ配置

Fig. 4 背光放射の定量評価実験系

Fig. 5 は、検出波長をパラメータとしてノイズ係数 η と背光放射によって生ずる温度増加 ΔT の関係を示したものである。条件として試料温度 $T=1273$ K、ランプ輝度温度 $S=3000$ K に設定した。図から明らかなように、同じノイズ係数 η であっても、検出波長 λ が短くなるほど ΔT が増加する。実験によれば、係数 η は、様々なシリコンウエハに対して 10^{-5} から 10^{-2} になることから、図の横軸をこの範囲でプロットしている。

Fig. 6 は、 η が一定の条件、すなわちノイズ係数 $\eta=5 \times 10^{-4}$ 、試料温度 $T=1273$ K、ランプの輝度温度 S と ΔT の関係を図示したものである。ランプ輝度温度が上昇するにつれて、

検出波長 λ が短いほど、 ΔT が上昇することが観測される。実際、 ΔT は $\lambda=0.9\ \mu\text{m}$ のSi放射計の場合、ランプ輝度温度 S の増加とともに急激に増加することが確認できる。一方、 $\lambda=5.0\ \mu\text{m}$ のHgCdTe放射計の場合、 S の増大に対して ΔT の増加は微小である。

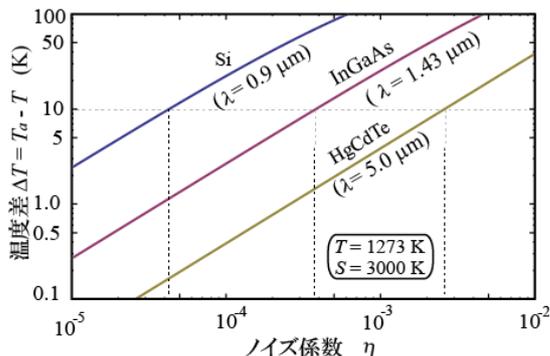


Fig. 5 η と ΔT の関係

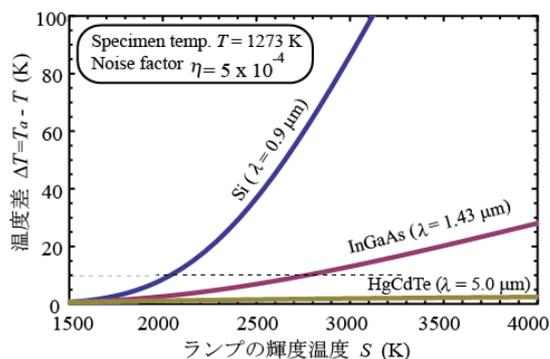


Fig. 6 輝度温度 S と ΔT の関係

Table 2 (a), (b), (c)は、実験によって得られた各種シリコンウエハに対するノイズ係数 η と背光放射による温度増加 ΔT を、放射計と吸収体の組み合わせによって変化する様子を定量化したものである。(a)はHgCdTe(5.0 μm)と石英板の組み合わせ、(b)はInGaAs(1.43 μm)と水膜(石英板上)の組み合わせ、(c)はSi(0.9 μm)と石英板の組み合わせ、による結果である。

(a)の組み合わせでは、背光放射はいずれの試料、条件でも背光放射は完全にブロックされている。(b)の組み合わせでは、多くの試料について背光放射による影響をほぼ消去することができた。しかし一方、(c)の組み合わせでは、いずれの試料も大きな背光放射の影響を受けており、実質的に実用に供することができない。つまり、(c)の場合は信号と背光を分離する組み合わせができていないということである。

この現象は、放射測温において、検出波長を短波長(たとえば0.9 μm のSi放射計)に設定すれば、放射率の影響が小さくなり、測温の不確かさが改善するという常識は、背光放射の存在下では成り立たないことを示唆している。

Table 2 ノイズ係数による背光定量評価

(a) HgCdTe (5.0 μm) + 石英板の組み合わせ

試料	鏡面		スライス		#2000		SiO ₂ 膜		
	R_a	R_a	R_a	R_a	R_a	R_a	R_a	R_a	
	0.02 μm	0.08 μm	2 μm	550 nm					
偏光	p	s	p	s	p	s	p	s	
対称	η	0.02	1.3	0.0	1.46	0.02	0.03	0.69	0.70
	ΔT	0.3	33	0	38	0.4	32	12	54
非対称	η	0.98	0.04	0.98	0.04	0.98	0.05	0.98	0.05
	ΔT	0.1	0.3	0.1	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3

(b) InGaAs (1.43 μm) + 水膜吸収の組み合わせ

試料	鏡面		スライス		#2000		SiO ₂ 膜		
	R_a	R_a	R_a	R_a	R_a	R_a	R_a	R_a	
	0.02 μm	0.08 μm	2 μm	550 nm					
偏光	p	s	p	s	p	s	p	s	
対称	η	0.04	0.04	0.03	0.02	0.06	0.04	0.01	0.04
	ΔT	0.4	6.0	2.2	10	1.8	8.3	0.9	5.6
非対称	η	0.15	0.43	0.06	0.46	0.74	0.27	0.26	0.55
	ΔT	0.1	0.6	3.5	7.6	3.2	7.3	1.1	3.6

(c) Si (0.9 μm) + 石英板吸収の組み合わせ

試料	鏡面		スライス		#2000		SiO ₂ 膜		
	R_a	R_a	R_a	R_a	R_a	R_a	R_a	R_a	
	0.02 μm	0.08 μm	2 μm	550 nm					
偏光	p	s	p	s	p	s	p	s	
対称	η	6.83	2.32	6.90	2.64	2.69	1.72	6.98	5.21
	ΔT	413	413	415	437	255	70	417	569
非対称	η	10.9	1.15	6.90	7.99	11.0	50.4	11.8	0.82
	ΔT	22	9.4	15	55	22	197	24	6.8

(4) 放射測温システム設計構築

ノイズ係数 η が何等かの手法で求められると、適切な放射測温システムを構築することができる。

Fig. 7(a), (b)は構築例である。

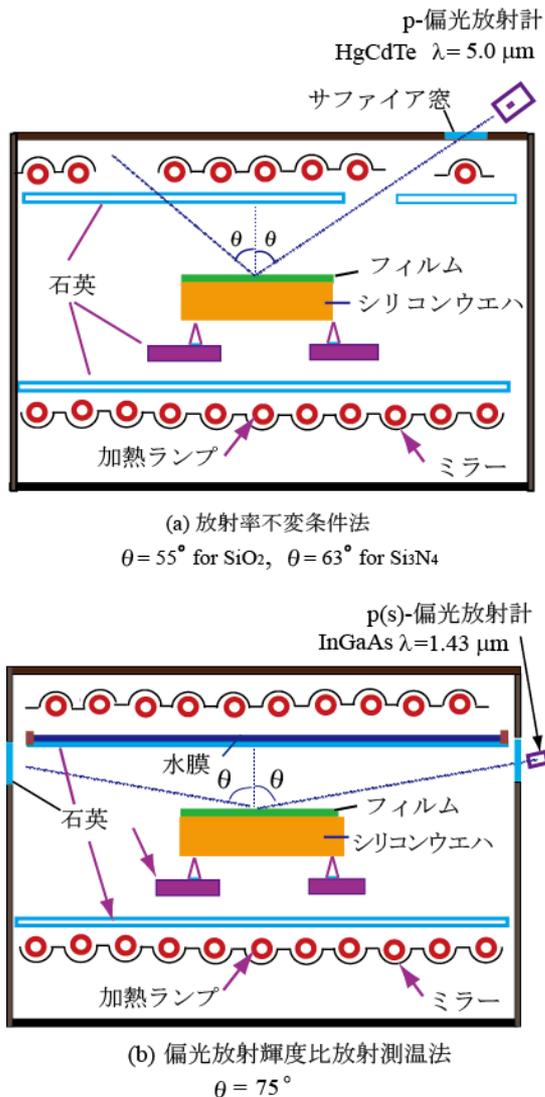


Fig. 7 放射測温システム構築例

Fig. 7(a)は放射率不変条件による放射測温システムの例である。 SiO_2 膜が表面に成長している場合、放射計の角度を $\theta = 55^\circ$ に設定する。成長膜が Si_3N_4 の場合、 $\theta = 63^\circ$ に設定する。放射計は、検出波長 $\lambda = 5 \mu\text{m}$ のHgCdTeセンサ搭載のp-偏光放射計を使用する。角度 θ の鏡面对称方向の一方は、加熱ランプのない状態にし、かつ放射計の設置方向は、石英板のない状態にし、さらに壁面には波長 $5 \mu\text{m}$ の光を透過できるサファイア窓とする。このようなシステム構成によって、Table 2(a)の結果が示すように、ランプ加熱からの強烈な背光放射を回避できる。放射率不変条件は研究代表者らにより、すでに確立した手法であり、p-偏光放射率はさまざまなシリコンウエハの状態に対して一定となるため、正確な放射測温が可能である。

Fig. 7(b)は同様に、研究代表者らによ

て確立された放射測温法、つまり偏光放射輝度比を利用した放射率補正法を適用したときの放射測温システムの構成例を示す。

Table 2(b)の結果を利用して、角度 θ を 75° に設定し、その鏡面对称方向に $1.43 \mu\text{m}$ の光を透過する石英窓を設け、p(s)-偏光放射計として検出波長 $\lambda = 1.43 \mu\text{m}$ のInGaAsセンサを搭載する。ランプ直下の石英面上には水膜を配し、 $1.43 \mu\text{m}$ の光を吸収する。

Fig. 8は、Fig. 7(a)に導入する放射測温法の実例である。シリコンウエハ表面に酸化膜(SiO_2)が成長するプロセスにおける放射率不変条件を利用した放射測温法であり、 $\theta = 55^\circ$ に設定することによって、p-偏光放射率が一定となって正確な放射測温が可能である。

同様に、Fig. 9は、Fig. 7(b)に導入する放射測温法の実例である。ウエハ表面に窒化膜(Si_3N_4)が成長するプロセスにおいて偏光放射輝度比を利用した放射率補正放射測温法が可能となる。

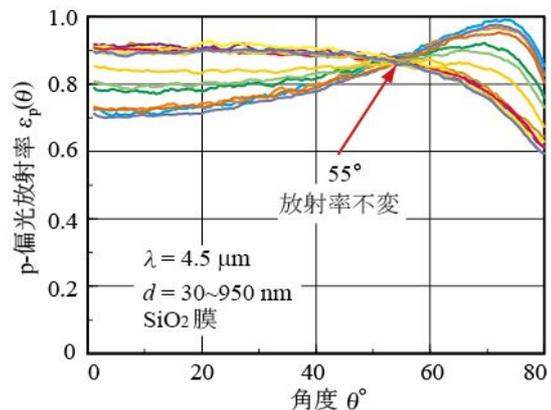


Fig. 8 放射率不変条件

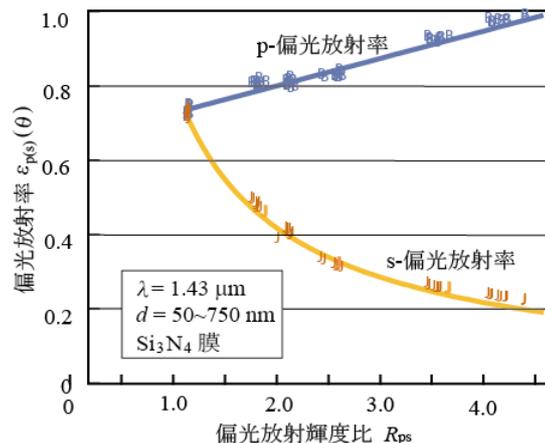


Fig. 9 偏光放射率比を利用した放射測温法

上述の一連の研究成果は、シリコンウエハが不透明体の条件下での内容であり、600以上の温度で活用できるものである。一方、シリコンウエハは、波長と温度の条件によっては、半透明体となる。この条件下における非接触測温法についても並行して研究を進めてきた。すなわち、バンドギャップエネルギー

ギに基づく限界波長が温度上昇とともに長波長側にシフトする現象や、温度上昇とともにフリーキャリアが増加し、光と電子の相互作用によって光透過が減少する現象を利用した非接触温度計測法である。これらは今回の研究課題の対象とはなっていないが、ウエハが半透明体・不透明体の状態に関わらず、上記透過特性を利用した手法と本研究課題の放射測温法を組み合わせ、常温から1000 を超える温度領域までを包含する測温システムを提案した(下記雑誌論文1参照)。

最後に Si センサを搭載した放射計に対して背光放射と信号を分離する手段が現時点で見い出せていないことである。Si センサは放射測温に優れた特性を有しており、このセンサの有効利用が望まれる。今後の課題として引き続き探索が必要である。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

Y. Toyoda, T. Seo and T. Iuchi, Non-contact temperature measurement of silicon wafers based on the combined use of transmittance and radiance, Measurement, vol. 51, (2014), 393-399. 査読有.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.02.023>

T. Iuchi, Y. Toyoda and T. Seo, A method of reducing background radiance for emissivity-compensated radiation thermometry of silicon wafers, Review of Scientific Instruments, vol. 84, 0249041-1249047 (2013). 査読有.

<http://dx.doi.org/10.1063/1.4791793>

T. Iuchi and T. Seo, Emissivity properties of silicon wafers and application to radiation thermometry, Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, vol. 8, 710-715 (2013). 査読有.

<http://proceedings.aip.org/doi/10.1063/1.4819629>

T. Iuchi and T. Seo, Radiation thermometry of silicon wafers based on emissivity-invariant condition, Applied Optics, vol. 50, 323-328 (2011). 査読有.

<http://dx.doi.org/10.1364/AO.50.000323>

[学会発表](計10件)

井内徹、日本学術振興会 産業計測第36委員会 第60回研究会資料、一研究者による放射測温実用化研究のあしあと、弘済会館、東京、2月14日(2014)。(招待講演)。

T. Iuchi, Y. Toyoda and T. Iwasaki,

Influence of background radiance and the reduction method for radiation thermometry, TEMPMEKO2013, Madeira, Portugal, October 17 (2013).

岩崎友幸、井内徹、放射測温法における背光放射の定量評価、第74回応用物理学会秋季学術講演会 同志社大学、京都、9月16日(2013)。

T. Iuchi and T. Seo, Emissivity properties of silicon wafers and application to radiation thermometry, 9th International Temperature Symposium, Anaheim, USA, March 21 (2013).

Y. Toyoda, T. Seo and T. Iuchi, A combined method of noncontact temperature measurement for silicon wafers, 20th IMEKO World Congress, Busan, Korea, September 10, (2012).

Y. Toyoda and T. Iuchi, Non-contact temperature measurement for silicon wafers under 600°C, SICE2012, Akita Akita University, August 21 (2012).

豊田侑樹、井内徹、シリコンウエハの光学的特性を利用した非接触測温法、第37回光学シンポジウム、東京大学、東京、6月15日(2012)。

Y. Toyoda and T. Iuchi, Temperature dependence of p-polarized transmittance of a semitransparent silicon wafer and its application to non-contact temperature measurement, SICE2011, Waseda University, Tokyo, September 16 (2011).

瀬尾朋博、岩崎友幸、井内徹、シリコンウエハの in-situ 放射測温における背光雑音の遮蔽、第72回応用物理学会学術講演会、山形大学、山形、8月30日(2011)。

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回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、神奈川、3月24日(2011)。

[図書](計2件)

1 . 井内徹、電子ジャーナル、Si ウェーハの in-situ 温度測定技術 徹底解説、54 頁、(2013)。

2 . 井内徹、計測自動制御学会温度計測部会、放射測温法の問題点と実用化へのアプローチ、温度計測基礎講座、71-85 (2013)。

6 . 研究組織

(1)研究代表者

井内 徹 (IUCHI, Tohru)

東洋大学・工業技術研究所・客員研究員

研究者番号：20232142