酸化膜、窒化膜付シリコンウエハの
950°Cにおける放射熱物性*平澤茂樹^{*1}, 渡辺智司^{*2}, 鳥居卓爾^{*1}
内野敏幸^{*3}, 土井隆明^{*4}Measurement of Thermal Radiative Properties of Silicon Wafers
with Oxide Film and Nitride Film at 950°CShigeki HIRASAWA, Tomoji WATANABE, Takuji TORII,
Toshiyuki UCHINO, and Takaaki DOI

The spectral normal emissivity, reflectance and transmittance of silicon wafers were measured at a temperature of 950°C and wavelengths of 0.7 to 9 μm. Samples were seven silicon wafers with oxide films of 2.2 to 628 nm film thickness and nitride films of 50 to 190 nm film thickness with small dopant density. It was found that the emissivity of specular surfaces of silicon wafers with very thin oxide film at wavelengths of 0.7 to 8 μm were 0.6 to 0.7, the reflectances were 0.1 to 0.3 and the transmittance were 0 to 0.2. The emissivity of silicon wafers with oxide films of more than 75 nm film thickness and nitride films of more than 48 nm film thickness changed from 0.6 to 1.0 according to film thickness and wavelength. The emissivity of the rough surface of a wafer was greater than that of a specular surface by 0.07. The emissivity and reflectance of silicon wafers were calculated using the free carrier absorption theory considering the interference phenomenon. Calculated results agreed with experimental results.

Key Words: Thermal Properties, Thermal Radiation, Silicon Wafer, Oxide Film, Spectral Emissivity, High Temperature

1. 緒 言

半導体製造プロセスではウエハを800~1000°Cに加熱して酸化・拡散処理を行うが⁽¹⁾, 熱処理の均一化, 熱応力欠陥発生防止のために多くの研究が行われている^{(2)~(5)}. ところが, 半導体ウエハの高温状態における放射熱物性のデータが十分になく, 例えば放射率として0.2~0.7のばらばらな値を使用している⁽⁶⁾. また, 放射温度計により加熱中のウエハ温度を直接測定する場合⁽⁷⁾, ウエハの放射率が変化するため温度指示値が最大70°Cも変化することが報告されている⁽⁸⁾. 以上の点から, 各種表面のシリコンウエハについて高温状態における放射熱物性を系統的に測定することが要望されていた.

Allen⁽⁹⁾は単結晶シリコンについて温度730~1410°C(融点)の波長0.65 μmにおける単色放射率 ϵ を測定した. その結果, 950°Cでは平滑面が $\epsilon=0.59$,

サンドブラスト面が $\epsilon=0.79$ であることを示した.

Liebert⁽¹⁰⁾は温度610, 800°Cの波長4~15 μmにおける単色垂直放射率, 透過率を測定した. 試料として不純物濃度の異なるp形, n形シリコンウエハを用いた. その結果, 放射率は波長や不純物濃度によって0.6~0.8で変化し, 透過率は零であり, 二つの温度で放射熱物性が大差ないことを示した. さらに, 放射率をHagen-Rubens理論および自由キャリア吸収理論によって計算し, 後者は実験結果とよく一致することを示した.

Sato⁽¹¹⁾は温度70~800°Cにおける単色垂直放射率 ϵ を測定した. 試料として不純物濃度の異なるn形シリコンウエハを用い, 酸化膜が付着しないように真空中で測定した. その結果, 600°C以上の波長0.4~15 μmにおいて $\epsilon=0.6\sim0.7$ であることを示した. さらに放射率を屈折率と減衰係数を用いた理論計算により求め, 実験結果とよく一致することを示した.

Myers⁽¹²⁾, 小野⁽¹³⁾は温度1000°Cの波長0.7~15 μmにおけるシリコンの単色垂直放射率 ϵ , 反射率 ρ , 透過率 τ を測定した. 測定方法は本研究と同じものである. その結果, $\epsilon=0.7\sim0.8$, $\rho=0.2\sim0.3$, $\tau=0$ であることを示した.

室温中の実験であるが, ウエハ表面に膜が存在する

* 平成元年4月5日 第66期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年7月6日.

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所(〒300 土浦市神立町502).

^{*2} (株)日立製作所機械研究所.

^{*3} 正員, (株)日立製作所武蔵工場(〒187 小平市上水本町5-20-1).

^{*4} 学生員, 豊橋技術科学大学(〒440 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1).

場合について次のような実験結果が報告されている。
 なお、室温で不純物濃度の小さなシリコンは波長 1.1 ~ 8 μm の範囲において放射率が小さくなるため⁽¹⁴⁾い
 ずれも不純物濃度を大きくした試料を用いている。

Senitzky ら⁽¹⁵⁾は n 形シリコンウエハの表面に厚さ
 0.5 ~ 3 μm のエピタキシャル膜を形成した場合につい
 て波長 5 ~ 50 μm の単色放射率を測定した。その結果、
 膜厚によって放射率が 0 ~ 0.6 の範囲で正弦波曲線的
 な変化をし、それが膜の干渉効果による理論計算と一
 致することを示した。

Pettibone ら⁽¹⁶⁾は p 形シリコンウエハの表面に厚さ
 0 ~ 800 nm の酸化膜を形成した場合について波長 2 ~
 8 μm の単色放射率を測定した。その結果、膜厚によ
 って放射率が 0.7 ~ 0.94 の範囲で正弦波曲線的な変化を
 し、それが膜の干渉効果による理論計算と一致するこ
 とを示した。

本報は半導体製造プロセスに用いる各種表面のシリ
 コンウエハの高温状態における放射熱物性を系統的に
 測定することを目的とし、表面に厚さ 2.2 ~ 605 nm の
 酸化膜 (SiO_2 膜) を形成した 4 種類のシリコンウエハ
 および厚さ 50 ~ 190 nm の窒化膜 (Si_3N_4 膜) を形成し
 た 3 種類のシリコンウエハについて温度 950°C、波長
 0.7 ~ 9 μm における単色垂直放射率、反射率、透過率
 を測定する。また、ウエハの鏡面側と粗面側の放射率
 を比較するとともに、測定精度を検討するため厚さ 1
 mm の石英ガラスの放射率も測定する。さらに、膜の
 干渉効果を加えた自由キャリア吸収理論計算により放
 射熱物性値を求め、実験結果と比較する。

2. 記号の説明

- e : 電子の電荷 1.6×10^{-19} C
- k_2 : シリコン基板の減衰係数
- L : 放射エネルギー W
- m^* : 電子の有効質量 kg
- m_e : 電子の質量 9.11×10^{-31} kg
- N : 自由キャリア濃度 m^{-3}
- n_1 : 膜の屈折率
- n_2 : シリコン基板の屈折率
- r : 直流抵抗率 $\Omega \cdot \text{m}$
- T : 温度 K
- z : ウエハ厚 m
- δ : 膜厚 m
- ϵ : 放射率
- ϵ_0 : 真空の誘電率 $8.85 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$
- ϵ_∞ : 周波数が非常に大きく自由キャリアの影響が
ない場合の比誘電率

- λ : 波長 m
- μ : 電子の移動度 $\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
- ρ : 反射率
- ρ_1 : 空気と膜の界面での反射率
- ρ_2 : 膜と基板の界面での反射率
- τ : 透過率
- ω : 角周波数 s^{-1}

3. 実験装置および測定方法

半透明材料の高温放射物性を測定する方法として、
 小野らが開発した組込黒体法⁽¹⁷⁾を用いた。図 1 は測定
 原理図を示す。両端が開放された管状ヒータ (内部直
 径 60 mm、長さ 550 mm、温度精度 $\pm 1^\circ\text{C}$) の内部中央
 に試料 (直径 12 mm のもの 2 個) を取付けた試料ホル
 ダ (ステンレス製、外径 57 mm、長さ 20 mm) が挿入
 されている。試料ホルダには二つの黒体穴 (直径 10
 mm、深さ 15 mm) と二つの貫通穴 (直径 10 mm) が水
 平方向に並列して設けられている。一つの黒体穴と一
 つの貫通穴に試料を取付ける。分光光度計を用い、四
 つの穴ごとに試料の垂直方向から単色放射エネルギー
 を測定した。分光光度計は日本分光工業(株)製 CT-25
 GT 形であり、検出器として波長 1 μm 未満にシリコ
 ンホトセル、1 μm 以上に真空熱電対を用いた。試料の
 温度は試料ホルダに取付けた PR 熱電対で測定した。
 ある波長において、試料なし黒体穴からの放射エネル
 ギーを L_h 、試料なし貫通穴からの放射エネルギーを
 L_z 、試料付貫通穴からの放射エネルギーを L_s 、試料
 付黒体穴からの放射エネルギーを L_b としたとき、単
 色垂直放射率 ϵ 、反射率 ρ 、透過率 τ は次式で求ま
 る⁽¹⁷⁾。

$$\epsilon = \frac{L_s - L_z}{L_h - L_z} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho = \frac{L_h - L_b}{L_h - L_z} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\tau = 1 - \epsilon - \rho \quad \dots\dots\dots (3)$$

本測定方法は黒体穴が完全な黒体でないと誤差が生

図 1 測定原理図

じるが、酸化したステンレスの直径10 mm、深さ15 mmの穴の放射率は0.97と推定され⁽¹⁸⁾、誤差は3%程度である。また本測定方法は半透明試料の両面が平滑面でないと誤差が生じる。本実験に用いたシリコンウエハはすべて片面が表面粗さ0.1 μm 以下の鏡面、他方の面が表面粗さ1 μm 程度である。しかし、本実験結果から高温でのシリコンウエハの透過率が小さく、この影響は小さいと思われる。

実験に用いた試料を表1に示す。不純物濃度が小さい(10^{21} m^{-3} 程度)p形あるいはn形シリコンを用いた。酸化膜は半導体製造用の酸化拡散装置を用いて形成し、窒化膜はCVD装置を用いて形成した。膜厚はエリプソメータ(偏光解析測定装置)を用いて測定した。空气中で実験したため、実験中にウエハの酸化が進行し、実験前後で酸化膜厚が変化している。No. 1の実験前の酸化膜は室温の空气中で付着する自然酸化膜である。後述の解析を用いると酸化膜厚の変化によって生じる放射率等の測定誤差は ± 0.05 以下である。

4. 実験結果

4.1 石英ガラスの放射熱物性 図2は厚さ1.0 mmの石英ガラスの940°Cにおける単色垂直放射率、

表1 試料の種類

No.	Material	Plate thickness (mm)	Film thickness (nm)	
			Before experiment	After experiment
1	Silicon wafer with oxide film	0.475	2.2	51
2		0.475	75	99
3		0.55	305	323
4		0.475	605	628
5	Silicon wafer with nitride film	0.55	50	50
6		0.475	140	140
7		0.50	190	190
8	Quartz	1	—	—

図2 石英ガラスの単色垂直放射率、透過率の実験結果

透過率の実験結果を示す。小野ら⁽¹⁷⁾の厚さ1.5 mm、1000°Cに対する放射率データを破線で示す。厚さが異なるため放射率が急変する波長3~5 μm にて少し差が生じたが、その他の波長域ではほぼ一致しており、小野らのデータと比較して本実験の放射率等の測定精度は ± 0.05 以下であると言える。

4.2 膜厚の異なるシリコンウエハの放射熱物性

図3 酸化膜付シリコンウエハの単色垂直放射率の実験結果

図4 酸化膜付シリコンウエハの単色垂直反射率の実験結果

図5 酸化膜付シリコンウエハの単色垂直透過率の実験結果

図 3~5 は膜厚の異なる 4 種類の酸化膜付シリコンウエハの 950~960°C における単色垂直放射率 ϵ , 反射率 ρ , 透過率 τ の実験結果を示す。ウエハの鏡面側を測定したものである。膜厚が 2.2~51 nm のウエハ (○印, 以下これを基準ウエハと呼ぶ) は波長 0.7~8 μm において, $\epsilon=0.6\sim0.7$, $\rho=0.1\sim0.3$, $\tau=0\sim0.2$ であることがわかる。膜厚が 75~99 nm のウエハ (△印) は基準ウエハに対して波長 1.5 μm 以下にて放射率が大きく, 反射率が小さい。膜厚が 305~323 nm のウエハ (□印) は基準ウエハに対して波長 1.5~3 μm の範囲で放射率が大きく反射率が小さく, 膜厚が 605~628 nm のウエハ (×印) は基準ウエハに対して波長 3~5 μm の範囲で放射率が大きく反射率が小さいことがわかる。透過率は膜厚が変わってもあまり変化しない。

図 6, 7 は膜厚の異なる 3 種類の窒化膜付シリコンウエハの 940~950°C における単色垂直放射率 ϵ , 反射率 ρ , 透過率 τ の実験結果を示す。膜厚が 48 nm のウエハ (○印) は基準ウエハに対して波長 1.5 μm 以下で放射率が大きく反射率が小さく, 膜厚が 141 nm のウエハ (△印) は基準ウエハに対して波長 3 μm 以下で放射率が大きく反射率が小さく, 膜厚が 193 nm のウエハ (□印) は基準ウエハに対して波長 1~3 μm の範囲で放射率が大きく反射率が小さい。このように膜厚によって放射率や反射率が変化する理由は後述のように膜の干渉効果⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾によるものと思われる。

文献⁽¹⁴⁾によれば室温において不純物濃度の小さなシリコンウエハは波長 1.1~8 μm において単色垂直放射率が 0~0.1, 反射率が 0.1~0.3, 透過率が約 0.5 である。ここで合計が 1.0 にならないのは, 同一実験データでないためである。これと本実験結果を比較すると, 高温になると放射率が増加し, 透過率が減少することがわかる。この理由は後述のように温度上昇によって自由キャリア濃度が増加するためと思われる。反射率は温度によってあまり変わらない。

4.3 ウエハの鏡面側と粗面側 図 8 は基準ウエハについて鏡面側と粗面側の単色垂直放射率 ϵ , 反射率 ρ の実験結果を示す。粗面側の放射率は鏡面側より約 0.07 大きく, これは従来の結果⁽⁹⁾と同じ傾向である。

5. 解 析

表面に厚さ δ の薄膜を有する基板の波長 λ における単色垂直反射率 ρ は, 膜の多重反射および干渉効果により, 式 (4) で計算される⁽¹⁵⁾。なお, 膜内での吸収や基板の背面からの反射はないものとしている。

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2 + 2\sqrt{\rho_1\rho_2} \cos(4\pi n_1\delta/\lambda)}{1 + \rho_1\rho_2 + 2\sqrt{\rho_1\rho_2} \cos(4\pi n_1\delta/\lambda)} \quad (4)$$

電磁波理論より, 空気と膜の界面での反射率 ρ_1 および膜と基板の界面での反射率 ρ_2 は光学物性値と次の関係がある⁽¹⁵⁾。なお, 膜の減衰係数は零としている。

$$\rho_1 = \frac{(n_1 - 1)^2}{(n_1 + 1)^2} \quad (5)$$

図 6 窒化膜付シリコンウエハの単色垂直放射率, 反射率の実験結果

図 7 窒化膜付シリコンウエハの単色垂直放射率の実験結果

図 8 酸化膜付シリコンウエハの鏡面側と粗面側の単色垂直放射率, 反射率の実験結果

$$\rho_2 = \frac{(n_2 - n_1)^2 + k_2^2}{(n_2 + n_1)^2 + k_2^2} \dots\dots\dots (6)$$

ここで SiO_2 膜と Si_3N_4 膜の屈折率 n_1 は温度依存性が小さいので室温での値⁽¹⁹⁾を用いる。なお、膜の減衰係数を無視でき上式が適用できる範囲は SiO_2 膜について $0.1 \sim 8 \mu\text{m}$, Si_3N_4 膜について $0.2 \mu\text{m} \sim$ (上限不明)である⁽¹⁹⁾。Si 基板の屈折率 n_2 , 減衰係数 k_2 は自由キャリア吸収理論⁽¹⁰⁾により次式で計算される。なお、波長 $1.1 \mu\text{m}$ 以下では電子の帯間遷移による吸収があり、波長 $9 \mu\text{m}$ にて Si-O の格子振動による吸収がある⁽¹¹⁾。自由キャリアの吸収が支配的で次式が適用できる範囲は $1.1 \sim 8 \mu\text{m}$ である。

$$n_2^2 - k_2^2 = \epsilon_\infty - \frac{Ne^2}{m^* \epsilon_0} \left(\frac{\tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$n_2 k_2 = \frac{Ne^2}{2\omega m^* \epsilon_0} \left(\frac{\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \right) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、周波数が非常に大きく自由キャリアの影響がない場合の比誘電率は $\epsilon_\infty = 13$ とし⁽¹⁰⁾、電子の有効質量は $m^* = 0.27 m_e$ とする⁽¹⁰⁾。自由キャリア濃度 N は温度 T が大きく不純物濃度が小さいときに、式(9)で計算される⁽²⁰⁾。緩和時間 τ は基板の直流抵抗率 r , 電子の移動度 μ (950°C において⁽²¹⁾ $\mu = 0.005 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) を用い式(10), (11)で計算される⁽¹⁰⁾。

$$N = 3.87 \times 10^{22} T^{1.5} \exp\left(\frac{-7020}{T}\right) \dots\dots\dots (9)$$

$$\tau = \frac{m^*}{rNe^2} \dots\dots\dots (10)$$

$$r = \frac{1}{Ne\mu} \dots\dots\dots (11)$$

以上の式より酸化膜付、窒化膜付シリコンウエハの反射率 ρ を求めることができる。

厚さ z の基板を透過する割合は、減衰係数 k_2 を用いて $\exp(-4\pi k_2 z/\lambda)$ で計算される⁽¹¹⁾。950°C における厚さ 0.5 mm のシリコンウエハについて計算すると波長 $0.7 \sim 8 \mu\text{m}$ の範囲ではほとんど透過しないことがわかる。すなわち、透過率 $\tau = 0$ であり、その結果放射率は $\epsilon = 1 - \rho$ となる。

図 9, 10 は酸化膜付シリコンウエハと窒化膜付シリコンウエハの単色垂直放射率 ϵ , 反射率 ρ の計算結果を示す。計算結果は図 3~6 の実験結果と比較して、 ϵ や ρ が最大と最小になる波長や ϵ や ρ の変動幅がほぼ一致している。なお、膜厚 $605 \sim 628 \text{ nm}$ の酸化膜付ウエハの実験結果は波長 $1.5 \mu\text{m}$ 以下でデータ数が少なく変動が十分に測定されていない。

6. 結 言

膜厚の異なる酸化膜、窒化膜付シリコンウエハの

図 9 酸化膜付シリコンウエハの放射率, 反射率の計算結果

図 10 窒化膜付シリコンウエハの放射率, 反射率の計算結果

950°C における単色垂直放射率, 反射率, 透過率を測定し, 以下の点が明らかになった。

(1) 膜厚が 51 nm 以下の酸化膜付シリコンウエハの波長 $0.7 \sim 8 \mu\text{m}$ の範囲の単色垂直放射率は $0.6 \sim 0.7$, 反射率は $0.1 \sim 0.3$, 透過率は $0 \sim 0.2$ である。

(2) 膜厚が 75 nm 以上の酸化膜付シリコンウエハおよび膜厚 48 nm 以上の窒化膜付シリコンウエハは膜厚および波長によって放射率が $0.6 \sim 1.0$, 反射率が $0 \sim 0.3$ の範囲で変化する。

(3) ウエハの粗面側の放射率は鏡面側より約 0.07 大きい。

(4) 膜の干渉効果を加えた自由キャリア吸収理論による薄膜付ウエハの放射物性値の計算結果は実験結果と一致した。

本研究を行うに当たり、通産省工業技術院計量研究所・小野晃主任研究官には、測定方法をご指導いただいた。また、(株)日立製作所武蔵工場・高垣哲也技師には全般的に有益なご議論をいただき、(株)日立製作所機械研究所・小松利広氏には実験を手伝っていただいた。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 鳥居・高垣, 機誌, 89-809 (1986), 396.
- (2) 李屋・ほか3名, 電子通信学会論文誌, J 68-C-6 (1985), 425.
- (3) 平沢・ほか2名, 第24回日本伝熱シンポジウム講演論文集, E 141 (1987-5), 648.
- (4) Schravendijk, B. J. V., ほか2名, *J. Appl. Phys.*, 61-4 (1987), 1620.
- (5) 平沢・内野, 第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2, B 217 (1988-6), 124.
- (6) 丸本・松井, 第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2, B 216 (1988-6), 121.
- (7) 渡辺・ほか2名, 第27回計測自動制御学会学術講演会, SICE'88, JS 29-1 (1988-8), 307.
- (8) 水津・ほか2名, 第35回応用物理関係連合講演会, 春季, 2, 31 a-M-1 (1988-3), 678.
- (9) Allen, F. G., *J. Appl. Phys.*, 28 (1957), 1510.
- (10) Liebert, C. H., *AIAA paper*, No. 67-302 (1967).
- (11) Sato, T., *Japan. J. Appl. Phys.*, 6-3 (1967), 339.
- (12) Myers, V. H., *Master Thesis, Mech. Eng.*, Purdue Univ., (1983).
- (13) 小野, 計量管理, 34-3 (1985), 123.
- (14) Touloukian, Y. S. and Dewitt, D. P., *Thermal Radiative Properties, Thermophysical Properties of Matter*, 7 (1970), 595, IFI/Plenum Data Co.
- (15) Senitzky, B. and Weeks, S. P., *J. Appl. Phys.*, 52-8 (1981), 5308.
- (16) Pettibone, D. W., ほか2名, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 52 (1986), 209.
- (17) Myers, W. H., ほか2名, *AIAA paper*, No. 83-1500 (1983).
- (18) 伝熱工学資料 (改訂第3版), (1975), 133, 日本機械学会.
- (19) Edward, D. P., *Handbook of Optical Constants of solids*, (1985), 749, Academic Press, Inc.
- (20) Sze, S. M., *VLSI Technology*, (1983), 180, McGraw-Hill Book Co.
- (21) Jacoboni, C., ほか3名, *Solid-State Electronics*, 20 (1977), 77.

討 論

〔質問〕 牧 野 俊 郎〔京都大学工学部〕

(1) 実験で, L_z は L_s や L_h に比べてどの程度の大きさに測定されるか.

(2) 解析の章でウエハはほとんど透過しないとしておられるが, 図5や図7の τ の値はどう理解すればよいのか.

(3) 式(7)の ϵ_∞ には大きな値が与えられているが, その物理的な原因は何か.

〔回答〕 (1) 酸化膜厚が2.2~51 nmのウエハの測定結果において, 検出器がシリコンホトセルの場合, 波長0.9 μm にて $L_z/L_s=0.0027$, $L_z/L_h=0.0016$ であり, この比は波長によってあまり変わらない. 検出器が真空熱電対の場合, 波長3 μm にて $L_z/L_s=0.076$, $L_z/L_h=0.051$ であり, 波長8 μm にて $L_z/L_s=0.20$, $L_z/L_h=0.16$ となる.

(2) 実験結果について, 石英ガラスの実験から測定精度 ± 0.05 と推定した. さらにシリコンウエハの場合, 波長2~5 μm での放射率が大きいため L_s と L_h を測定する二つの試料にわずかな温度差が生じ, 透過率が約0.05大きく測定される誤差も考えられる. したがって波長1.1~5 μm の透過率はほとんど零と思われる. 波長9 μm で透過率が大きくなる理由はSi-Oの格子振動の影響によるもので, 石英ガラスの透過率が波長9 μm で大きくなる現象と同じと思われる. 一方, 解析について, 計算に用いている ϵ_∞ , m^* , μ などは実験で求めた値であり文献により $\pm 10\%$ 程度ばらばらしている⁽¹⁰⁾⁽²¹⁾. それらの値のとり方によって透過率

が波長1.1~2 μm にて0~0.1となる. 精度の向上が今後の課題である.

(3) ϵ_∞ は周波数が非常に大きく自由キャリアの影響がない場合の比誘電率であり, また式(7)より低温における屈折率 n_2 の二乗である. それは物質に固有な物理量である.

〔質問〕 金 山 公 夫〔北見工業大学〕

(1) 用語としてEmissivityは物質本来の放射率を意味するので, 表面酸化などによる見掛け上の値はEmittanceを用いるべきでないか.

(2) 「表面粗さ」の表示は測定法の種類が必要なのではないか.

(3) 垂直分光放射率と反射率, 透過率の関係を論じ, かつ電磁理論を適用しておられるが, この場合試料表面が方向性のない乱射面であるという仮定をどこかで述べる必要があるのではないか.

(4) したがって図8のSpecular surfaceでなくSmooth surfaceの表現のほうが適切なのではないか.

〔回答〕 (1) 表面が酸化した材料の放射率をEmissivityと表現している文献も多く, それに従った.

(2) 表面粗さは触針式表面粗さ測定器(Rank Precision Industries, Ltd.製 Talysurf 10)によって測定し, その最大高さを示した.

(3) 本報に用いた測定方法は乱射面でなくても垂直放射率, 垂直反射率, 垂直透過率を正確に求めるこ

とができる。指向性放射率の測定は今後の課題である。
またシリコン結晶はダイヤモンド立方構造であり、光
学的に等方性である。

(4) 図 8 ではウェハの鏡面側と粗面側を区別する
ため便宜上 Specular surface と表現した。