



## 共焦点走査レーザー顕微鏡による レジスト膜下パタンの検出

川村 直毅・峯岸 一茂

NTT LSI 研究所 〒243-01 厚木市森の里若宮 3-1

(1990年7月11日受付, 1990年11月9日受理)

### Resist Coated Pattern Detection Using Confocal Scanning Laser Microscopy

Naoki KAWAMURA and Kazushige MINEGISHI

NTT LSI Laboratories, 3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi 243-01

(Received July 11, 1990; Accepted November 9, 1990)

This paper describes the analysis of a pattern detection method for resist-coated LSI structures. The analysis is performed theoretically and experimentally for a confocal laser scanning microscope (CLSM) system and a non-confocal system. The CLSM system is found to yield superior results for detecting varied surfaces covered by resist. In applying the CLSM system, setting the focal point below the varied surface improves the S/N ratio of the pattern detection signal.

#### 1. はじめに

半導体集積回路では、半導体基板の上に積層構造で複数のトランジスタやキャパシタなどが形成されている。この構造を実現するための製造工程では、基板上に所望のパターンを1層ずつ形成する工程が繰り返される。したがって、これらの工程では、すでに形成された下層パタンの位置に整合(アライメント)させて上層パターンを形成する必要がある。アライメントが不良であるとLSIの性能劣化や製造歩留まりの低下を招くおそれがある。

そのためLSIパターンをレジスト膜に転写するステップ装置等では、レジスト膜が塗布されたウエハの位置を高精度で検出する必要がある。また、形成されたレジストパターンと下層パタンの相対的な位置の検査は、アライメント不良の場合にリソグラフィのやり直しを可能とする。したがって、レジスト膜下に形成されたパターンを高精度に検出することが必要である。

レジスト膜下のパターンを検出する場合、レジスト膜表面での反射が問題となる。通常、レジスト膜は膜下にパターンがある部分で膜厚が変化する。したがってパターン近

傍の反射光強度は、レジスト膜表面と裏面より反射した光の干渉度合いの変化により変動し、パターンによる反射光強度変化と区別できなくなり、パターン検出のS/N比が低下する。このため干渉効果を低減させる種々の方法が提案されてきた。レジスト膜表面に反射防止膜などを塗布する方法、レジスト膜厚変動が生じにくいパターン形状とする方法<sup>1)</sup>、照射光を多波長多入射角としてコヒーレンシを低下させる方法<sup>2)</sup>などである。しかし、これらの方法では、反射防止膜塗布等の工程の増加や、パターン形状の最適化、あるいは光学系の複雑化等の問題があった。

これらの問題点は、レジスト膜表面の反射光が検出器に入射しない、簡単な構成の光学系を用いることにより解決できる。その実現には共焦点走査レーザー顕微鏡の利用が有望である。共焦点走査レーザー顕微鏡<sup>3)</sup>は、従来の顕微鏡に比して優れた解像力をもつため、多くの研究検討<sup>4)</sup>がなされ、実用化装置が製品化されている。LSIの検査工程への応用についても報告<sup>5-7)</sup>がなされており、寸法形状測定の検討とともに、専用の検査装置が市販されている。しかし、レジスト表裏面の干渉効果低減を目

的とした適用とその検討はなされていなかった。

そこで、共焦点走査レーザー顕微鏡をレジスト膜表面反射光の干渉効果低減方法に適用することを企図し、レジスト膜厚変化に対する反射光強度の計算と測定実験を行った。ここではその検討結果を述べる。

## 2. 共焦点光学系と焦点位置

Fig. 1 は共焦点光学系の構成図である。レーザー光をレンズで絞り込み、試料に照射し、試料からの反射光を、ハーフミラーを介して受光器で受光する。光焦点光学系では、受光器手前のピンホールにより、光ビームの回りに生ずる余分な回折光を遮光するため、試料面内での分解能が高くなる特徴をもつ。さらに焦点がずれた面からの反射光も大部分がピンホールで遮光されるため、検出器には焦点が合った面からの光のみが到達する。Fig. 1 中の点線で描かれた光線は、試料のレジスト膜表面、すなわち焦点がずれた面からの反射光を表している。この場合、光ビームはピンホール面上で大径のスポットとなり、受光器にはわずかの光量しか到達できない。Fig. 2 では、この様子を、わかりやすくするために透過型で示してある。(a)のように、焦点位置に試料がある場合は、試料からの光はピンホールをすべて通過するが、試料位置が焦点位置より遠い場合(b)、および近い場合(c)にはピンホール面上で光ビームスポットが拡大し、受光器まで到達できる光量は減少する。

ここで、試料として反射率が1である完全反射平面を用い、照射する光強度を1とすると、試料位置の焦点位

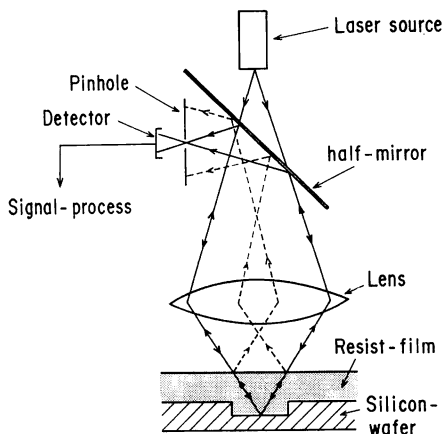


Fig. 1 Schematic diagram of the confocal laser scanning microscope system. Sample is a resist coated silicon wafer. Reflection from the focused plane (silicon wafer surface) is shown by the solid line, and that from defocused plane (resist film surface) is shown by the dashed line.

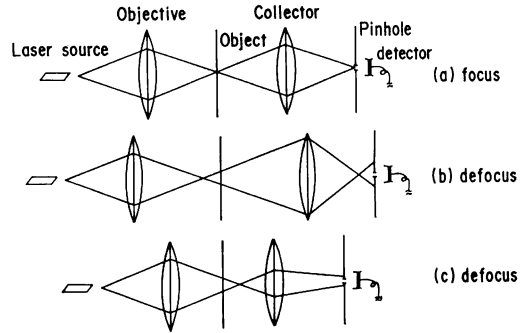


Fig. 2 Effect of defocus in the transmission confocal system.

置からの移動距離  $\Delta$  と、受光器出力  $I_d$  の関係は(1)(2)式で与えられる<sup>9)</sup>。

$$I_d = \int_0^{v_p} |h(2u, v)|^2 v dv \quad (1)$$

$$u = 8\pi\Delta/\lambda \sin^2(a/2) \quad (2)$$

ここで、

$h(u, v)$ : レンズの点像分布関数

$u$ : 光軸方向の規格化距離

$v$ : 光軸と垂直方向の規格化距離

$v_p$ : 規格化ピンホール半径

$\lambda$ : 光波長

$\sin(a)$ : レンズ N. A.

簡単のため、ピンホールの光透過分布をデルタ関数とすると、受光器出力  $I_d$  は次式で表される。

$$I_d = \{ \sin(u/2)/(u/2) \}^2 \quad (3)$$

移動距離  $\Delta$  が長くなる、すなわち試料位置が焦点位置からずれるにしたがい、受光器に入射する光強度が減少する。

## 3. レジスト膜干渉効果

レジスト膜下のパタンを検出する場合、レジスト膜が透明媒体であるために入射した光はレジスト膜の表裏面で多重反射し、光源がレーザー光のような干渉性の高い光であるとする、反射光は干渉効果を受ける。Fig. 3 のように平坦なシリコン基板の上に厚さ  $d$  のレジスト膜が塗布された試料に、波長  $\lambda$  で強度1の平面波が垂直に入射する場合、反射光の強度  $I$  は次式で与えられる<sup>9)</sup>。

$$I = \left| \frac{R_{12} + R_{23} \exp(-i4\pi n_2^* d/\lambda)}{1 + R_{12} R_{23} \exp(-i4\pi n_2^* d/\lambda)} \right|^2 \quad (4)$$

ここで、

$$R_{12} = (n_1^* - n_2^*) / (n_1^* + n_2^*)$$

$$R_{23} = (n_2^* - n_3^*) / (n_2^* + n_3^*)$$

$$n_1^* = n_1 - ik_1, n_2^* = n_2 - ik_2$$

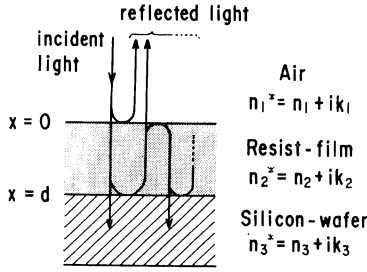


Fig. 3 Interferometric effect in the resist film.

$$n_3^* = n_3 - ik_3$$

各媒質の複素屈折率は図中に示した. 上式をわかりやすくするために, 空気とレジスト膜の消衰定数  $k_1, k_2$  を0とすると, 各式のようになる.

$$I = \frac{r_1^2 + 2r_1r_2 \cos(4\pi n_2 d / \lambda - \theta_2) + r_2^2}{1 + 2r_1r_2 \cos(4\pi n_2 d / \lambda - \theta_2) + r_1^2 r_2^2} \quad (5)$$

ここで,

$$r_1 = (n_2 - n_1) / (n_2 + n_1)$$

$$r_2 = [ \{ (n_3 - n_2)^2 + k_3^2 \} / \{ (n_3 + n_2)^2 + k_3^2 \} ]^{1/2}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} (2 n_2 k_3 / (n_2^2 - n_3^2 - k_3^2))$$

$$n_2 > n_1, n_3 > n_2$$

これよりレジストの膜厚  $d$  が変化すると, 反射光強度は正弦波状に変化することがわかる.

レジスト膜下にパターンが形成された構造では, パタンのエッジ部分ではレジスト膜厚が変化しやすい. したがって, レジスト膜厚変動とその干渉効果による反射光強度の変化と, パターンエッジによる反射光強度の変化の区別がつきにくく, S/N 比の高いパターン検出信号を得ることは困難である.

つぎに, 共焦点光学系を用いた場合のレジスト膜厚の変化に対する反射光強度の計算を行った.

いま共焦点光学系を使用し, シリコン基板表面に焦点を合わせたとすると, レジスト膜表面は, レジスト膜厚が増加するにしたがい, 焦点位置から遠ざかる. したがって, レジスト膜表面からの反射光はピンホール面上で広がり, 受光器に到達する光強度は(1)式で示される強度  $I_d$  まで減少する.  $I_d$  は照射光強度が1の反射光強度であるため, 反射光強度の減少割合を表す. そこで, この減少分を(4)式で便宜的にレジスト膜に吸収されるとすると, 次式が得られる.

$$I'' = \left| \frac{R_{12}' + R_{23} \exp(-i4\pi n_2^* d / \lambda)}{1 + R_{12}' / R_{23} \exp(-i4\pi n_2^* d / \lambda)} \right|^2 \quad (6)$$

ここで,  $R_{12}' = R_{12} \times I_d$

(6)式は, 試料への光入射角度が垂直であり, レジスト膜内で多重反射した光すべての光波合算の場合を表し

ている. しかし, 共焦点光学系では高 NA のレンズでレーザー光を絞り込むため, いろいろな入射角度の光が存在する. 焦点をレジスト膜下のシリコン表面に常に合わせるにより, レジスト膜厚変化に対するレジスト膜通過光の位相変化は膜厚と膜屈折率のみで表すことができるが, レジスト膜内で多重反射した光が入射光と同じ光路をたどり, 受光器に到達するとは考えにくい. 光源から照射された光がレジスト膜を透過し, 最初にシリコン基板で反射する1次反射光のみまでを考慮すると, 受光器出力  $I''$  は(7)式で表される.

$$I'' = |R_{12}' + T_{12} R_{23} T_{21} \exp(-i4\pi n_1 d / \lambda)|^2 \quad (7)$$

ここで,

$$R_{12}' = R_{12} \times I_d$$

$$T_{12} = 2 n_1^* / (n_1^* + n_2^*)$$

$$T_{21} = 2 n_3^* / (n_2^* + n_3^*)$$

(6) (7) 式を用い, 各定数として光源波長  $\lambda = 0.488 \mu\text{m}$ , レンズ N. A. = 0.95, レジスト膜の屈折率 = 1.676 - i 0.004, およびシリコンの屈折率 = 4.356 - i 0.044<sup>9-11)</sup> で計算を行った.

Fig. 4 は計算結果を示す. (4)式を利用した平面垂直入射波の場合も示した. 平面垂直入射波の場合 (non-confocal system), レジスト膜厚の変化にともなって反射光強度は大きく正弦波状に変化する. (6) (7) 式を利用した共焦点光学系の場合 (confocal system-1, 2) では, 膜厚が薄い領域ではレジスト膜表面からの反射光強度が十分に減少しないために, 干渉効果が残り, 反射光強度は正弦波状に変化するが, レジスト膜厚が 0.75  $\mu\text{m}$  程度になると, 干渉効果の影響がほとんどなくなる

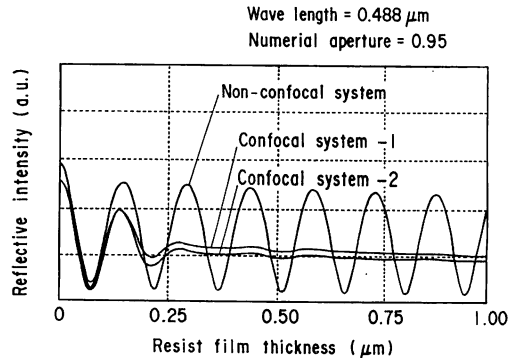


Fig. 4 Reflective intensity versus resist film thickness calculated from Eqs. (4), (6) and (7). The reflective intensity is constant for resists thicker than 0.75  $\mu\text{m}$  with the confocal system. Lines for confocal system-1, confocal system-2 and the non-confocal system are calculated from Eqs. (6), (7) and (4), respectively.

ことがわかる。また、(6)式と(7)式ではほとんど差がないことから多重反射の効果は少ないと判断できる。なお、レジスト膜厚が増加すると、全体的に反射光強度が減少するのはレジスト膜の光吸収を表している。

これより、共焦点光学系を用いて、レジスト膜下のパターンを検出すれば、干渉効果の影響を減少させた測定が可能であると考えられる。

#### 4. 実験と結果

実験は、シリコン基板上にレジスト膜がある場合とない場合の反射光強度分布の違いを比較し、共焦点光学系の特徴を確認する目的で行った。装置は、光源としてアルゴンレーザー (波長  $0.488 \mu\text{m}$ ) を用い、ガルバノミラーによる光ビーム走査方式で像を得る、反射型の共焦点走査レーザ顕微鏡を用いた。

まずパタンのない平坦な部分で、光学系の焦点の位置を変化させた場合の反射光強度を測定した。Fig. 5 は測定結果である。横軸が相対的な光強度を表し、縦軸は焦点位置を表している。シリコン基板表面位置を焦点位置の基準とした。実線は厚さ  $1 \mu\text{m}$  のレジスト膜が塗布された試料、破線はレジスト膜が塗布されていない試料による結果である。レジスト膜が塗布された場合、焦点位置が  $0 \mu\text{m}$  のシリコン基板表面位置と  $1 \mu\text{m}$  のレジスト膜表面位置で反射光強度のピークが確認できるため、焦点の位置を選択すれば、両者を分離して検出器に入射

させることが可能であることを示している。これは Fig. 4 の計算結果より、レジスト膜厚が  $1 \mu\text{m}$  程度では、干渉効果がほとんど見られず、反射光がシリコン基板表面からの反射光のみとなることに対応している。

つぎに、実際にパターンが形成された試料を用いて、反射光強度分布の測定を行った。試料としては、シリコン基板上に形成した高さ  $1 \mu\text{m}$  の凹凸パターンを用いた。この上に、厚さ  $1 \mu\text{m}$  のレジスト膜を塗布した。パターン断面の走査電子顕微鏡 (SEM) 写真を Fig. 6 に示す。パタンのエッジ付近で、レジストの膜厚が変化していることがわかる。

Fig. 7 は凹パタンの測定結果を示している。(a)はレジスト膜が塗布された場合、(b)はレジスト膜が塗布されていない場合である。焦点の位置を変化させて反射光強度分布波形を測定した。(b)の場合には反射光強度分布波形がほぼパターン形状と対応しているのに対し、(a)の場合には対応をとることが困難であることがわかる。とくに焦点位置が  $+1 \mu\text{m}$  から  $0 \mu\text{m}$  の間では、反射光強度が緩やかな正弦波状に変化している。これは焦点位置がレジスト膜中にあるためシリコン基板表面とレジスト表面からの反射光が同程度の割合で受光器に入射することによる干渉効果のためと推定された。焦点位置が、 $-0.6 \mu\text{m}$  程度になると、レジスト膜表面からの反射光は受光器にほとんど入射せず、シリコン基板表面からの反射光のみとなるために(a)と(b)の波形はほぼ同

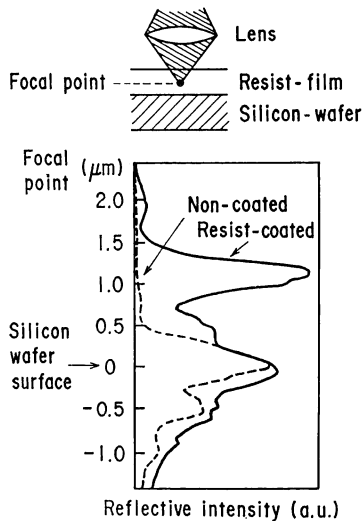


Fig. 5 Experimental results of reflective intensity versus focal point. The sample is a non-patterned silicon wafer. Intensity for the resist-coated sample appears as two peaks caused by the resist film surface and silicon wafer surface.

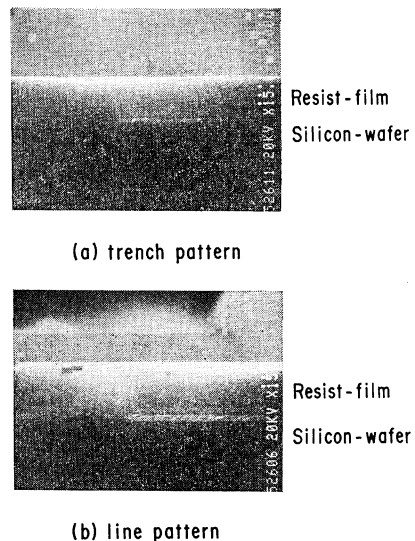
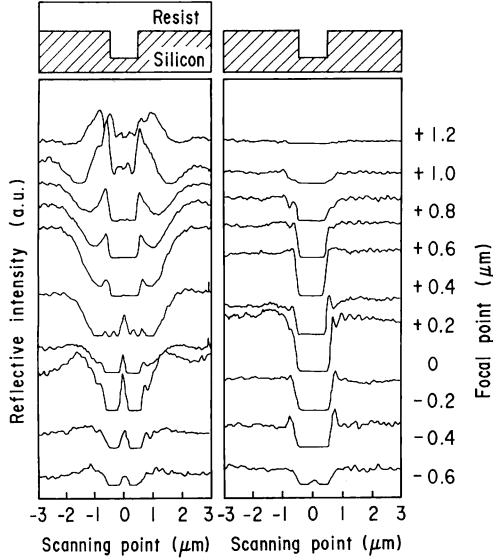


Fig. 6 Cross-sectional SEM photograph of patterned samples.  $1\text{-}\mu\text{m}$ -wide trench and line patterns covered with  $1\text{-}\mu\text{m}$ -thick resist. Resist thickness varies at the silicon pattern edge.

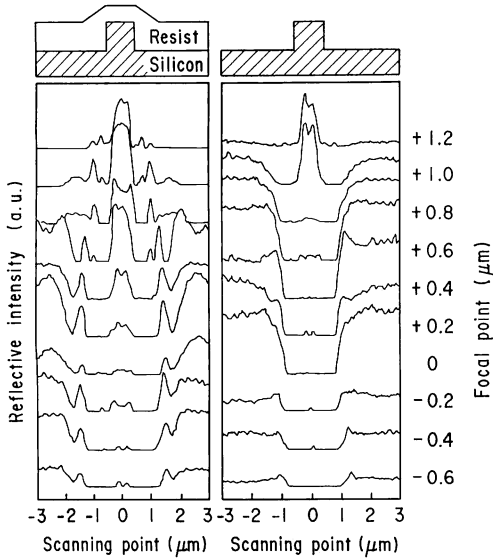
一の波形となるのがわかる。

Fig. 8 は、凸パタンの測定結果を示す。凹パタンと同様に、(a)の場合、パタンのエッジ付近でレジスト膜厚変化による反射光強度分布波形への影響が表れてい



(a) Resist coated sample (b) Non-coated sample

Fig. 7 Reflective intensity from trench pattern scanning at various focal points. Reflective intensity patterns of the samples are similar at a focal point of  $-0.6 \mu\text{m}$ .



(a) Resist coated sample (b) Non-coated sample

Fig. 8 Reflective intensity from line pattern scanning at various focal points.

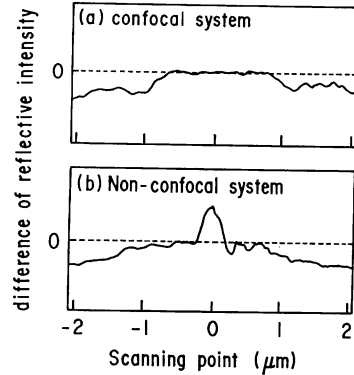


Fig. 9 Experimental results of pinhole effect. Reflective intensity differences of resist-coated and non-coated trench patterns. Focal point is set at  $-0.6 \mu\text{m}$ .

る。ただし、凸パタンの場合には、凹パタンと異なり、レジスト膜厚が  $1 \mu\text{m}$  以上に厚くなる部分がなく、レジスト膜厚変化の影響を取り除ける焦点位置を設定することができなかった。

つぎに共焦点光学系の特徴であるピンホールの効果を調べた。装置の受光器手前のピンホールを取り除き、非共焦点光学系として反射光強度を測定した。凹パタン試料に対して、焦点位置を  $-0.6 \mu\text{m}$  として、レジスト膜が塗布された場合と、されない場合において検出された反射光強度分布の差を (a) 共焦点光学系と (b) 非共焦点光学系について Fig. 9 に示す。(b) ではレジスト膜厚が変化するパタン中央からエッジ付近で大きな差が生じているのに対し、(a) ではほとんど差がなく、共焦点光学系の有用性が確認できる。

### 5. ま と め

レジスト膜下のパタン検出に共焦点走査レーザー顕微鏡を適用する場合の検討を行った。その結果、簡単な構造に対する反射光強度の計算より、共焦点走査レーザー顕微鏡ではレジスト表裏面反射光の干渉効果が抑えられることを示した。また、実験により、共焦点走査レーザー顕微鏡の焦点位置をパタンの下側に設定することにより、レジスト膜が塗布されていない場合とほぼ同じ反射光強度分布が得られ、干渉効果を低減したパタン検出が可能であることがわかった。これよりレジスト膜下パタン検出の際に問題となる干渉効果低減への本方法の有効性を確認することができた。

本研究を進めるにあたり、有益なるご指導、ご協力をいただいた NTT LSI 研究所荒井英輔博士、齋藤和之博士に感謝いたします。また共焦点走査レーザー顕微鏡

を用いた実験では、セイコー電子工業(株)萩原良二氏のご協力をいただきました。記して感謝の意を表します。

### 文 献

- 1) 辻田好一郎, 成松孝一郎, 田中和裕, 菅野 廣: “マーク上のレジストによるアライメント精度への影響”, 第48回応用物理学学会学術講演会講演予稿集 (1987) p. 427.
- 2) Y. Oshida and M. Shiba: “Relative alignment by direct wafer detection utilizing rocking illumination of Ar ion laser,” Proc. SPIE, **633** (1986) 72-78.
- 3) T. Wilson and C. Sheppard: *Theory and Practice of Scanning Optical Microscopy* (Academic Press, London, 1984).
- 4) 河田 聡, 南 茂夫: “光学走査顕微鏡”, 光学, **18**(1989) 380-391.
- 5) R. W. Wijnaendts-van-Resandt and C. Ibrig: “Application of confocal beam scanning microscopy to the measurement of submicron structures,” Proc. SPIE, **809** (1987) 101-106.
- 6) Th. Zapf and R. W. Wijnaendts-van-Resandt: “Confocal laser microscope for submicron structure measurement,” *Microelectron. Eng.*, **5** (1986) 573-580.
- 7) K. M. Monahan and C. Spence: “Submicrometer metrology of patterns in resist,” *Solid State Technol.*, **30**, 9 (1987) 141-146.
- 8) A. R. Carlini and T. Wilson: “The role of pinhole size and position in confocal imaging systems,” *Proc. SPIE*, **809** (1987) 97-100.
- 9) P. H. Berning: “Theory and calculations of optical thin films,” *Physics of Thin Films*, Vol. 1, ed. G. Hass (Academic Press, New York, 1963).
- 10) H. R. Philip and E. A. Taft: “Optical constants of silicon in the region 1 to 10 eV,” *Phys. Rev.*, **120** (1960) 37-38.
- 11) I. Franz and W. Langheinrich: “A simple non-destructive method of measuring the thickness of transparent thin films between 10 and 600 nm,” *Solid-State Electron.*, **11** (1968) 59-64.