偏光解析法による薄膜の自動インライン評価*

林 康明**・松沢 昭生***・福留 理一****

(昭和56年11月4日 受理)

Automatic In-line Evaluation of Thin Films with Ellipsometry

Yasuaki HAYASHI, Akio MATSUZAWA and Riichi FUKUTOME

(Institute for Super Materials, ULVAC CO., Sambu-cho, Chiba)

(Received November 4, 1981)

An ellipsometer is installed in an unloading chamber of in-line plasma CVD system to evaluate film thicknesses and refractive indices. The ellipsometer is a rotating-analyzer type, in which a $\lambda/4$ compensator is always positioned with the fast axis 45° setting a polarizer prism to a proper azimuth. The SiN_x films on silicon substrates prepared by plasma CVD are automatically and successively checked in the system.

1. はじめに

最近、各半導体メーカーは、半導体デバイスの製造ラインにおいて、省力化や、製品の生産性、信頼性の向上をはかるため、一連のプロセスを全て自動化していこうとする動きにある¹⁻³⁾。ここにおいて、制御を精密化する上で、プロセスや膜の評価は重要な課題である。評価の手法としては、プロセス中に評価するインプロセス評価法と、プロセス処理後に行うインライン評価法がある⁴⁾。インプロセス評価法でモニターしながらプロセスを制御する方が、精密な結果が得られる。しかし、ロット毎のばらつきは条件の設定だけで押さえられ、一方、処理機能が経時的に変動し、継続性のある傾向を示す場合はインライン評価法によってモニターし調整するだけで充分であり、また、その方が技術的にも容易である。

ところで、偏光解析法は、従来、半導体デバイス作成ラインにおいて、主に絶縁膜の膜厚や(光学的)膜質の評価に利用されてきたが、製造ラインシステム内に組み込まれるまでには至っていない。それは、装置が大がかりとなりシステム内への組み込みが困難なことや、測定やデータの解析に時間がかかることなどに原因している。近年、計算機を利用した回転検光子型偏光解析装

置⁵⁻⁷⁾が開発されて、測定が速くなり、構成も簡単になってきた。本研究では、従来の回転検光子型偏光解析装置を、さらに構造、測定方法、解析方法において改良を行い、この装置をインラインシステムに組み込んで、半導体デバイスのパッシベーション膜作成プロセスのインライン評価への応用について検討を行った。

2. 偏光解析装置

2.1 測定方法の改良

自動偏光解析装置は、これまで数種報告されている^{8,9)}。このうち、構造の簡単さ、測定時間の速さでは、回転検光子型偏光解析装置が優れ、工業用として適している。

回転検光子型偏光解析装置は、一定の偏光状態にある光を試料に入射し、検光子を回転しながら光電測光により反射光の偏光状態を測定する。入射光と反射光の間の偏光状態の変化は、試料の表面状態に関する情報を含んでいる。そこで、偏光の p 成分(入射面に平行な成分)と s 成分(入射面に垂直な成分)の振幅反射率の比を、 $\tan \Psi$ 、反射により生じる p 成分と s 成分の位相変化の差を Δ とし、 Ψ, Δ を偏光解析法において、試料の表面状態を表わすパラメータとしている。すなわち、 p 成分と s 成分の複素振幅反射率

$$\begin{cases} r_p = r_p \cdot \exp(i\Delta_p) \\ r_s = r_s \cdot \exp(i\Delta_s) \end{cases} \quad (1)$$

の比は次式により表わされる。

* 昭和56年3月30日 第28回応用物理学関係連合講演会にて講演

** 日本真空技術(株)超材料研究所(千葉県山武町)

*** 同上(現在、日本真空技術(株)第三事業部)

**** 同上(現在、タイゴールド(株))

$$\begin{aligned} \frac{r_p}{r_s} &= \frac{r_p}{r_s} \exp \{i(\Delta_p - \Delta_s)\} \\ &= \tan \Psi \cdot \exp(i\Delta) \end{aligned} \quad (2)$$

試料が固体表面上の薄膜であれば、その光学定数と膜厚は、これらのパラメータ Ψ , Δ と一定の関係で結ばれており、計算により求められる。

通常、回転検光子型偏光解析装置において、入射光は、 p 成分と s 成分の振幅が等しく互いの位相差が 0° 、すなわち、入射面より 45° 方向に傾いた直線偏光に設定する (Fig. 1(a))。入射光が直線偏光の場合、パラメータ Δ は反射偏光の p 成分と s 成分の位相差をそのまま表わすことになるため、試料の表面状態が、 $\Delta = 0^\circ$ 又は 180° に対応しているとき、反射光は直線偏光になる (すなわち、 p 成分と s 成分の位相差が 0° 又は 180°)。回転検光子型のような測光型偏光解析装置の欠点は、反射光が直線偏光に近いと測定精度が悪くなり、また偏光の回転方向 (すなわち、位相差の正負) の判別が困難なところにある。

そこで、パラメータ Δ が 0° 又は 180° に近いことがわかっているときは、入射光の p 成分と s 成分の位相差を 90° にするために、 $1/4$ 波長板を偏光子と試料の間に進相軸を入射面より 0° 方位に挿入して (Fig. 1(b)) 測定を行う。この場合、反射偏光は、 p 成分と s 成分の位相差が $\Delta + 90^\circ$ になり、 $\Delta \cong 0, 180^\circ$ では位相差は 90° 、 -90° に近い値をとり、直線偏光の場合とは逆に、精度良い測定が可能で、偏光の回転方向の判別も容易である。

以上が、従来の回転検光子型偏光解析装置による測定法である。ここで、最初にいずれかの手段で測定した結果、反射光に近いことがわかり、他の手段により測定をもう一度行う場合、 $1/4$ 板の出し入れは、従来、手動で行われており、これも含めて自動化しようとする、偏光解析装置はやや複雑になる。また、測定に倍以上の時間を要する。

本研究で目的としているのは、一定の条件で作成された薄膜を、インライン方式により評価することである。試料薄膜の膜厚、光学定数は、決められた値の近傍の一定の範囲内にあると考えてよい。これに対応して、パラメータ Δ もある値 Δ_0 前後の値をとる。そこで、 $\Delta = \Delta_0$ で反射偏光の p 成分と s 成分の位相差が 90° (又は -90°) となるように入射光の偏光状態を調整することができれば、 Δ_0 の周辺で精度のよい測定が可能となる。また、従来の方法に比較して、反射光が直線偏光になるまでの Δ の変動についての範囲が広い、膜の膜厚、光学定数の変動が大きいところまで、一回の測定で正しい値を得ることができるようになる。

入射偏光の p 成分と s 成分の位相差を任意に調整でき

Fig. 1 Configurations of rotating-analyzer ellipsometer. P: polarizer, C: $1/4$ compensator, A: analyzer.

(a), (b) conventional way, (c) new way.

るようにするためには、偏光子と試料との間に $1/4$ 波長板を進相軸を入射面より 45° 方位に保って常時挿入しておき (Fig. 1(c))、偏光子の方位角 P を任意に設定できるようにすればよい。この場合、反射偏光の p 成分と s 成分の位相差は、後で示すように、 $\Delta + 2P - 90^\circ$ となるので、偏光子の方位角 P を

$$P = -\frac{\Delta_0}{2} \quad (3)$$

に合わせておけば、反射偏光の位相差は、 $\Delta - \Delta_0 - 90^\circ$ となり、 $\Delta = \Delta_0$ の近傍では -90° に近く、測定精度が良く、特性が基準よりはずれた膜を評価する場合でも、反射偏光は直線偏光になりやすい。

上述の説明を数式を用いて厳密に示すと以下のようになる。

$1/4$ 波長板は、常に不完全さによる誤差を伴っているため、この誤差も考慮に入れて、検光子に入ってくる反射光の偏光状態を求めてみる。反射光の p 成分、 s 成分の複素振幅をそれぞれ、 E_p , E_s とすると、Jones 行列¹⁰⁾を用いて、

$$\begin{pmatrix} E_p \\ E_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_p & 0 \\ 0 & r_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_c \exp(i\Delta_c) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Fig. 2 Relation between Δ and $\beta/\sqrt{1-\alpha^2}$.

$$\times \begin{pmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos P \\ \sin P \end{pmatrix} \quad (4)$$

となる。但し、 r_p, r_s は(1)式の定義のとおり、 T_c, Δ_c はそれぞれ 1/4 波長板の進相軸と遅相軸の間の振幅透過率比と、位相差を表わし、 P は偏光子の方位角である。さらに、回転検光子の方位角を A とすると、光検出器に達する光の強度 I は

$$I = I_0 \left| (\cos A \sin A) \cdot \begin{pmatrix} E_p \\ E_s \end{pmatrix} \right|^2 \\ = I_1 (1 + \alpha \cos 2A + \beta \sin 2A) \quad (5)$$

となる。ここで、 I, I_1 は A に無関係な定数で、 α, β は、偏光解析パラメータ Ψ, Δ と次のような関係にある。

$$\begin{cases} \tan \Psi = \sqrt{\frac{b}{a}} \cdot \sqrt{\frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \\ \cos (\Delta + \delta) = \sqrt{\frac{ab}{c_1^2 + c_2^2}} \cdot \frac{\beta}{\sqrt{1-\alpha^2}} \end{cases} \quad (6)$$

但し、 a, b, c_1, c_2, δ は定数で

$$\begin{cases} a = T_c^2 + 1 + (T_c^2 - 1) \sin 2P + 2T_c \cos \Delta_c \cos 2P \\ b = T_c^2 + 1 + (T_c^2 - 1) \sin 2P - 2T_c \cos \Delta_c \cos 2P \\ c_1 = T_c^2 - 1 + (T_c^2 + 1) \sin 2P \\ c_2 = 2T_c \sin \Delta_c \cos 2P \\ \delta = \cos^{-1} \frac{c_1}{\sqrt{c_1^2 + c_2^2}} = \sin^{-1} \frac{-c_2}{\sqrt{c_1^2 + c_2^2}} \end{cases} \quad (7)$$

である。

α, β の値は、検光子を回転し、その回転角 A について光強度 I をフーリエ変換すれば、(5)式との対応から求めることができる。これから、(6)式を用いて偏光解析パラメータ Ψ, Δ が求められる。

1/4波長板の誤差を考慮に入れないときは、

$$\begin{cases} T_c = 1 \\ \Delta_c = 90^\circ \end{cases} \quad (8)$$

であり、(6)式は

Fig. 3 Photograph of rotating-analyzer ellipsometer. Left: polarizer block, right: analyzer block.

$$\begin{cases} \tan \Psi = \sqrt{\frac{1+\alpha}{1-\alpha}} \\ \cos (\Delta + 2P - 90^\circ) = \frac{\beta}{\sqrt{1-\alpha^2}} \end{cases} \quad (9)$$

となる。したがって、 $P = -\Delta_0/2$ であれば、(9)式の Δ に関する式は、

$$\Delta - \Delta_0 - 90^\circ = \cos^{-1} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1-\alpha^2}} \right) \quad (10)$$

となり、 Δ は、 $\Delta_0 - 90^\circ$ から $\Delta_0 + 90^\circ$ の範囲においては一価関数であり、曲線の傾斜も小さくなる (Fig. 2)。これは、前述した反射偏光の p 成分と s 成分の位相差が 90° (又は -90°) に近いときには、偏光の回転方向の判別が容易で、測定精度が良いことに対応している。

2.2 偏光解析装置の概要

Fig. 3 は、インライン評価用に試作した偏光解析装置である。

偏光光源部は、2m WHe-Neレーザー、偏光子、1/4波長板より構成されている。

検光受光部は、検光子、パルスモーター、マグネティックスイッチ、光検出器より成り、従来のもの⁵⁻⁷⁾より簡易化されている。検光子は、パルスモーターにより、直接ドライブされる。パルスモーターの軸には、直径 5 mm の穴が軸方向にあけてあり、検光子を通った光は、この穴を通り抜け受光器に達する。パルスモーターは 1.8° 刻みにステップ回転し、一秒間に全周 200 点における光量が、デジタル信号となって計算機へ入力される。マグネティックスイッチからは、一回転毎に一のパルス信号が出され、検光子の回転基準点を決めている。

計算機には、あらかじめ、入射角、基板の光学定数、偏光子の方位角 P や、1/4波長板の T_c, Δ_c などを入力し、(7)式の定数なども求めておく。外部からデータが取

Fig. 4 Cross-sectional view of ellipsometer settled in in-line plasma CVD system.

り込まれると計算を開始し、パラメータ Ψ , Δ および膜厚、屈折率をアウトプットするようになっている。パラメータ Ψ , Δ から膜厚、屈折率を求める計算は、二変数の Newton-Raphson 法を用いて行っている。計算機には、パナファコム C15E パーソナルコンピュータを利用し、膜厚、屈折率を求めるまでに約 5 秒を要する。

3. 偏光解析法による SiN_x 膜のインライン評価

3.1 偏光解析装置のインラインシステムへの組み込み

偏光解析装置を、インラインプラズマ CVD 装置¹¹⁾の取出側中間室下部に組み込んだ例を Fig. 4 に示す。反応室より送り出されたウェハートレイは、ここで一旦停止する。トレイは、反応室内での熱によりかなりひずみを生じているため、測定前にウェハホルダーによりウェハをトレイより少しく持ち上げて、一定の傾き、高さに固定する。次に、偏光解析装置のコントロール部へスタートの信号が送りこまれ、測定が開始されるようになっている。

インラインプラズマ CVD 装置は、排気系にロータリーポンプ 6 台、メカニカルブースターポンプ 3 台を用い、プラズマ励起は、2~3 kW, 13.56 MHz の RF によって行われる。測定に際しては、これらの機械的、電気的雑音の影響が問題となる。そこで、これを調べるため、トレイ搬送系以外をすべて稼動し、トレイを停止させたまま、偏光解析装置により Si ウェハ上の SiN_x

Fig. 5 Number distribution of observed values 'n' (refractive index) and 'd' (film thickness).

膜の同一点を 60 回測定し、観測値のばらつきを求めた。その結果、 $\Delta = 255.92 \pm 0.03^\circ$, $\Psi = 25.802 \pm 0.016^\circ$ を得、測定上支障のないことを確認している。Fig. 5 は、これらのパラメータから計算された、 d (膜厚)、 n (屈折率) の度数分布を示す。

3.2 SiN_x 膜のインライン評価

プラズマ CVD 法により作成された SiN_x 膜は、IC のパッシベーション膜などとして有用であるが、長時間にわたって連続的に成膜していく場合、プラズマの状態や処理機能が、時間と共に変化して、膜質や膜厚が変わっていく恐れがあり、これを厳密にチェックしていかなければならない。そこで、偏光解析装置を利用して、反応室内でプラズマ CVD 法により作成された Si 上 SiN_x 膜の自動インライン評価の試験を行った。Fig. 6 は、このようにして各トレイ毎に自動的に評価を行った結果の一例である。このときの反応の条件は、窒素をベースにした 4% シランガスをを用い、圧力 23.3 Pa, RF パワー 1.8 kW, 基板温度 350°C に設定した。また、偏光解析装置の偏光光源部には、1/4 波長板を進相軸を 45° 方位にして挿入し、偏光子は、あらかじめ予想される膜厚、屈折率からの計算により、 25° 方位に設定している（この場合、 Δ_0 310° ）。この測定法によれば、今回の例の場合、従来の一回限りの測定と比べて、 Δ に関して解析上の誤りをもたらすことはない。

4. おわりに

半導体デバイスのウェハ処理プロセスの評価法のうち、インライン評価法について検討を行った。インライン評価法は、それほど厳密な要求はないが、長時間、連続的に行うプロセスの経時的変動を調整しなければならない場合に適している。しかし、集積回路のゲート絶縁膜、層間絶縁膜の形成やエッチングプロセス等においては、膜質、膜厚のきわめて精密な制御が要求され、イン

Fig. 6 Result of successive evaluation of SiN_x films formed in in-line plasma CVD system with ellipsometric monitor.

プロセス評価が必要である。偏光解析法は、膜厚や膜質の正確な測定ができるため、インプロセス評価用のモニターとしても簡単に利用できるようなれば、半導体デバイスの高集積化、品質向上の上で、一役を荷うことになるであろう。

謝 辞

本稿を書くに当たって貴重なご助言をお寄せ下さった超材料研究所の伊藤昭夫所長に心より感謝の意を表したい。

〔文 献〕

- 1) 「拍車がかかる LSI 製造ラインの連続自動化」：日経エレクトロニクス，3月31日号 (1980) 54.
- 2) 原田宙幸：電子通信学会誌 **64** (1981) 980.

- 3) 古口栄男，米沢敏夫，裕野重喜：電子材料 11月号 (1979) 29.
- 4) 松川隆行，河津 哲：電子材料 11月号 (1980) 30.
- 5) P. S. Hauge and F. H. Dill: IBM J. Res. Devel. **17** (1973) 472.
- 6) H. H. Bloem, W. E. Goetz, R. N. Jackson and R. W. Kern: Electro-Optical Systems Design **March** (1980) 38.
- 7) D. E. Aspnes and A. A. Studna: Appl. Opt. **14** (1975) 220.
- 8) R. H. Muller: Surface Sci. **56** (1976) 19.
- 9) D. E. Aspnes, in B. O. Seraphin (ed.): *Optical Properties of Solids* (North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1975) p. 799.
- 10) R. C. Jones: J. Opt. Soc. Am. **31** (1941) 488.
- 11) 松沢昭生，伊藤隆生，石川裕一，柳田博司：真空 **23** (1980) 199.