

In situ エリプソメトリの応用と展開

森谷 明弘¹⁾・北村 寿宏²⁾

1) 電子制御システム工学科

2) 材料プロセス工学科

Application and Development of In situ Ellipsometry

Akihiro MORITANI

Department of Electronic and Control Systems Engineering

Toshihiro KITAMURA

Department of Natural Resources Process Engineering

(Received September 19, 1997)

Abstract

In situ ellipsometry has played important roles in analyses of solid surface reaction processes since ellipsometry gives high-resolution and -accuracy information about optical constants of solid surface and/or thickness and refractive indices of deposited films. High-speed ellipsometric instruments are necessary for the in situ measurement. In this paper, instrumentation of some high speed ellipsometers and examples of the applications are reviewed in addition to development of in situ ellipsometric application to the plasma carburization project recently accepted by New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

1. はじめに

偏光解析（エリプソメトリ）は固体表面からの反射光の入射面に対する平行成分と垂直成分の比（振幅比と位相差）を測定し、固体の光学定数または表面に付着した薄膜の膜厚をもとめる光学的測定手法である¹⁾。たとえば、膜厚の分解能として数Åの高精度が得られる。In situ（その場）測定には高速自動偏光解析装置が必要であるが、その構成として、(1)回転検光子型：光源（L）-偏光子（P）-試料（S）-回転検光子（RA）-光検出器（D）と(2)位相変調型：L-P-S-位相変調器（PM）-検光子（A）-Dの2種類に大別される。ここでは、両者の測定系を用いて著者達が行ってきた研究例を中心に紹介するとともに、今回、1997通産省地域コンソーシアム研究開発事業に採択されたプロジェクト「In situ 制御によるプラズマ利用表皮処理プロセスの開発」（統括研究代表者、総合理工学部 片山教授）におけるIn situ エリプソメトリに関する研究計画について述べる。

2. エリプソメトリの測定原理

2.1 複素反射率と測定パラメータ

誘電体界面からの反射光はフレネル係数 r によって記述される．この係数は反射光と入射光の比で表され，入射面に平行 (p) と垂直 (s) 成分はそれぞれ，

$$\begin{aligned} r_p &= E_p''/E_p = |E_p''/E_p| \exp(j(\delta_p'' - \delta_p)), \\ r_s &= E_s''/E_s = |E_s''/E_s| \exp(j(\delta_s'' - \delta_s)) \end{aligned} \quad (2.1)$$

と書ける．ここに二重符号は反射光，符号無は入射光の電界成分に対応する． δ は位相を表す．偏光解析においては，p 成分と s 成分の複素反射係数の比

$$\begin{aligned} \rho &= r_p/r_s = |E_p''/E_s''|/|E_p/E_s| \cdot \exp(j((\delta_p'' - \delta_s'') - (\delta_p - \delta_s))) \\ &= \tan \Psi \exp(j\Delta) \end{aligned} \quad (2.2)$$

が基本式となる．(2.2)より， $\tan \Psi$ は入射光電界の p/s 成分に対する反射光 p/s 成分の比を， Δ は反射によって生ずる位相差の変化分を，それぞれ表していることが分かる．

偏光解析から Ψ と Δ を求めれば，スネルの法則等の電磁気理論を適用することにより，たとえば，誘電体の複素屈折率（光学定数 n と k ）または，光学定数が既知の基板上にある誘電体薄膜の膜厚とその屈折率 n を求めることができる^{1,2)}．

2.2 回転検光子法

回転検光子法は図1に示す L-P-S-A-D 系において，検光子 (A) を回転することによって検光子を透過する光強度の測定より，試料からの反射光の偏光状態，すなわち(2.2)式の Ψ と Δ を求める方法である³⁻⁶⁾．

回転検光子を透過した光強度 I は，

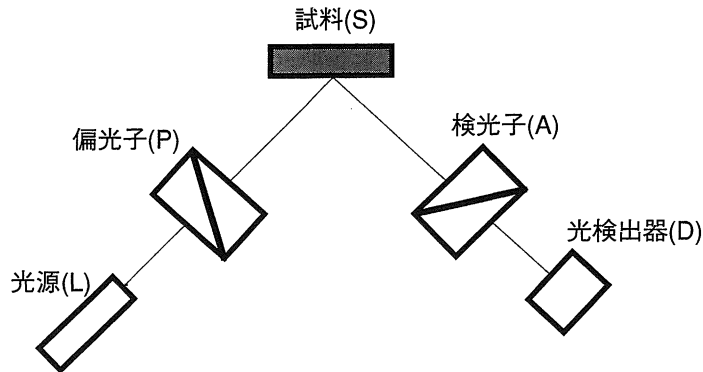


図1 回転検光子法に用いられる光学系

$$I = A_0 + A_1 \cos 2A + B_1 \sin 2A \quad (2.3)$$

と表せる。ここに

$$\begin{aligned} A_0 &= \tan^2 \Psi \cos^2 P + \sin^2 P = \Sigma I(i) / N \\ A_1 &= \tan^2 \Psi \cos^2 P - \sin^2 P = 2 \Sigma I(i) \cos 2A(i) / N \\ B_1 &= \tan \Psi \sin 2P \cos \Delta = 2 \Sigma I(i) \sin 2A(i) / N \end{aligned} \quad (2.4)$$

A, P はそれぞれ検光子, 偏光子の入射面に対する角度を表し, i は 1 から N までのデータ取得点を表す。これより, 各係数が求まれば,

$$\begin{aligned} \tan \Psi &= |\tan P| \sqrt{(A_0 + A_1) / (A_0 - A_1)} \\ \cos \Delta &= B_1 / \sqrt{(A_0^2 - A_1^2)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

より, Ψ と Δ を求めることができる。

一般に, 本方法は検光子の回転速度が 1 回転あたり 25 msec-1 sec と小さいため, 短時間で変化する表面反応の測定には向いていないが, 光学系が単純であることから, 測定精度が高いこと, 変調素子にありがちな温度不安定性や紫外光領域での波長依存性をもたないため, 再現性に優れていること, などの特徴がある。

2.3 位相変調型エリプソメータ

位相変調型エリプソメトリ (Phase Modulated Ellipsometry, PME) の光学系を図 2 に示す。エリプソメータに組み込まれた位相を変調するための代表的な素子として, (1)光弾性変調器 (Photo-Elastic Modulator, PEM) と (2)電気光学変調器 (Electro-Optical Modulator, EOM) の二つがある。PEM は圧電素子に例えば, ガラス板を接着したもので, 圧電素子の共振周波数 f の歪波をガラス板に伝播させ, 複屈折を生じさせる位相変調器である。EOM は KDP や ADP 等の電気光学結晶に電圧を印加することによって, 複屈折を生じさせる位相変調器である。

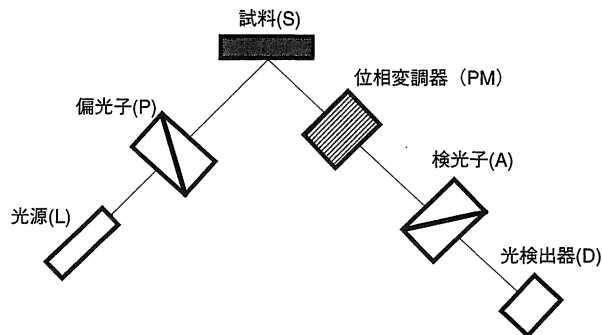


図2 位相変調型エリプソメトリで用いられる光学系

(1)の PEM の場合⁷⁻⁹⁾

光検出器 (D) に達する光強度 $I(t)$ は

$$I(t) = I(I_0 + I_s \sin \delta(t) + I_c \cos \delta(t)) \quad (2.6)$$

ここで $\delta(t)$ は PEM を通過した偏光がうける位相変化分で、変調周波数を f , 振幅を A_m とすると

$$\delta(t) = A_m \sin 2\pi ft \quad (2.7)$$

と表せる。また, A, P, M を検光子, 偏光子, 変調器の入射面に対する方位角とすると, たとえば, $P-M=45^\circ, M=0^\circ, A=45^\circ$ の場合には

$$\begin{aligned} I_0 &= 1, \\ I_s &= \sin 2\Psi \sin \Delta, \\ I_c &= \sin 2\Psi \cos \Delta \end{aligned} \quad (2.8)$$

となり, (2.7)を(2.6)に代入すると, 測定値である S_0 (DC 成分), S_1 ($\sin 2\pi ft$ の係数), S_2 ($\cos 2\pi ft$ の係数) と I_0, I_s, I_c の関係は

$$\begin{aligned} S_0 &= I_0 + I_c J_0(A_m) \\ S_1 &= 2I_s J_1(A_m) \\ S_2 &= 2I_c J_2(A_m) \end{aligned} \quad (2.9)$$

となり, (2.9)と(2.8)より, Ψ と Δ を求めることが出来る。ここで, $J_n(A_m)$ は n 番目のベッセル関数である。

この系の特徴は, 変調周波数が数 10 KHz のオーダーであるため, 測定スピードが回転検光子法に比べて100倍程度大きくとれることにある。したがって, 短時間の in situ 計測に適しているといえる。一方, (2.9)に見られるように, 解析概念が複雑となるため, その精度等が落ちるきらいがある。

(2)の EOM の場合¹⁰⁻¹²⁾,

L-P-S-Q(EOM)-A-D 光学系において, 光検出器 (D) に達する光強度 $I(t)$ は

$$I(t) = I_0(1 + a_1 \cos 4\delta + a_2 \sin 4\delta + a_3 \cos 2\delta + a_4 \sin 2\delta) \quad (2.10)$$

ここで, EOM の位相変化量の基本成分は

$$4\delta = EV(t) + G$$

と表される。E と G は定数で, 試料を除いた直線光学系から決定できる。V(t) は EOM に印加した鋸波形電圧である。2 δ の成分は EOM 内の結晶不完全性によって生ずる項で, これが変調特性の温度不安定性をあらわすパラメータを含んでいる。詳細は文献に譲るが, $Q=45^\circ, A=180^\circ$ では,

$$a_1 = \cos 2\Psi_e$$

$$a_2 = -\sin 2\Psi_e \sin D_e + \alpha$$

と表せ、 α は係数 a_3 と a_4 から求めることが出来る。また、

$$\tan \Psi = \tan P / \tan \Psi_e$$

$$\Delta = -\Delta_e$$

より、試料の Ψ と Δ を決定できる。

本方法の特徴は EOM の変調を MHz のオーダーで行えるため、データの取得時間をマイクロ秒のオーダーとすることができ、数ミリ秒から数秒間に起こる反応過程を観測できる点にある。一方、(2.10)式から分かるように、解析概念が複雑な上、EOM の温度不安定性が大きいいため、逆に、長時間での測定安定性は期待できない。

3. 応 用 例

3.1 化合物半導体 GaAs の陽極酸化過程の研究

陽極酸化は化合物半導体の表面被覆膜を簡単に形成できるため、これまで多くの応用デバイス工程に用いられてきた。ここでは、定電流法による陽極酸化膜成長過程を低電流密度（低速反応）化成に回転検光子法を、高電流密度（高速反応）化成に EOM 位相変調法を適用した場合の実験例を示す。

(1) 低電流密度化成^{6,13)}

GaAs の試料として、Zn ドープ p 型、キャリア密度 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 、(100)面のウエハを $7 \times 7 \text{ mm}^2$ 程度の大きさに切断したものを用いた。試料の裏面に Ag-Zn を真空蒸着し、水素雰囲気中 500°C で十分な熱処理を施すことによって、試料のオーミック接触を形成した。試料表面を鏡面研磨したのち、硫酸系、ついで塩酸系の化学エッチングによって残存酸化物等を表面から除去した。

電解液として、3%酒石酸水溶液とプロピレングリコールを体積比 1:2 で混合したものを用いた。pH 値は 2.2~2.6 であり、とくにアンモニア水をもちいて pH 値の調整はしていない。

回転検光子法により、陽極酸化膜の成長および、溶解過程を観察するための測定系を図 3 に示す。電解液セル系は、白金対向電極 Pt、陽極試料 Sa、電解液、および二つの光学窓をもつセルからなっている。窓材料として、光学研磨面を有する熔融石英板を用いたが、光学窓の不完全性による複屈折効果は測定誤差範囲内で問題とならなかった。入射角 ϕ_1 は、 70.5° に設定した。

使用したエリプソメータでは一組の (Ψ, Δ) を測定するのに要する時間が約 2 秒である。対向電極 Pt に対する陽極電位をセル電圧 V_c として、その反応時間依存性を (Ψ, Δ) のそれと同時に測定した。

図 4 に定電流酸化時および化成電流を切った後に測定した (Ψ, Δ) 、 V_c の時間 (t) 変化

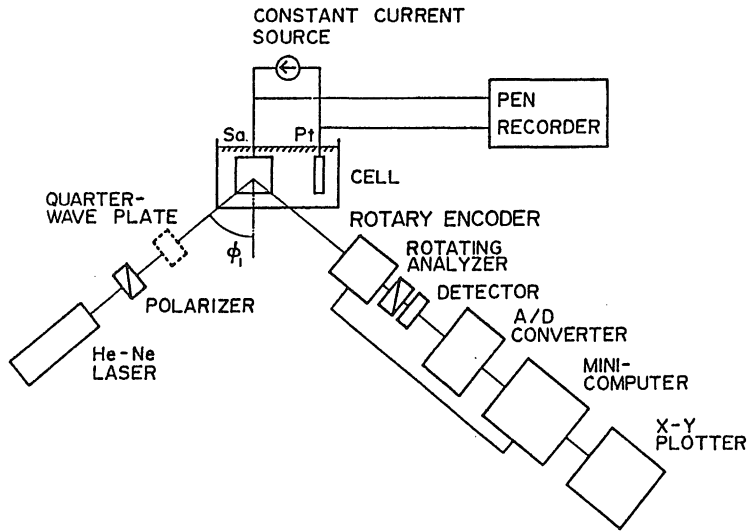


図3 回転検光子法による陽極酸化，溶解過程の観測に用いられる光学系

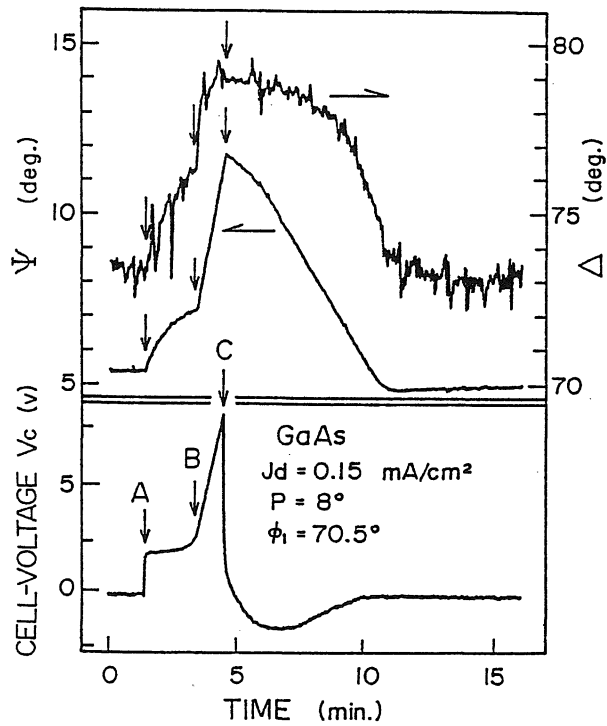


図4 定電流酸化時および化成電流遮断時の $(\Psi, \Delta)-t$, V_c-t 特性

の一例を示す。全観測時間は約15分であった。ただし、実験条件は電流密度 $J_d=0.15 \text{ mA/cm}^2$ 、偏光子の方位角 $P=8^\circ$ である。 V_c-t 特性には、矢印 A と B の間のわずかな増加の部分と BC 間の急激な直線の上昇部分が見られる。 $(\Psi, \Delta)-t$ 特性は V_c-t 特性と良く対応している。島状核が二次元的に成長していると思われる初期部分 (AB 間) でのなだらかな変化と、その後の三次元的皮膜の成長に伴う急激な変化が観測されている。また、化成電流を切った後 (矢印 C 以降) に (Ψ, Δ) の値は徐々に減少して陽極酸化以前の値にほぼ戻っている。これは形成された陽極酸化膜が電解液に溶け出していることを示している。図4から計算された図5に示す初期過程の膜厚の時間依存性より、GaAsの陽極酸化反応は皮膜成長律速ではなく、陽極物質溶解律速による化学反応過程であるといえる。

(2) 高電流密度化成¹¹⁾

(1)と同様な系で電流密度 J_d を 100 mA/cm^2 とした場合、約2秒間で約 1000 \AA の陽極酸化膜が形成されるため、その成長初期過程や成長速度等を調べるためには、マイクロ秒台のデータ取得時間を必要とする。そのため、EOM位相変調型エリプソメータを用いる必要がある。測定法については3.3節で詳述するので、ここでは $(\Psi, \Delta)-t$ 特性を *in situ* 測定した結果のみを示す。図6に電流密度 $J_d=100 \text{ mA/cm}^2$ で定電流陽極酸化した場合の $(\Psi, \Delta)-t$ 特性を示している。ここで、測定条件として、一組の (Ψ, Δ) のデータ取得時間 $T=4 \text{ \mu sec}$ 、データ点数 $N=40$ 、データ取得インターバル $T_i=32 \text{ msec}$ 、偏光子方位角 $P=20^\circ$ 、入射角 $\phi=60^\circ$ を用いた。これより、1.6秒間に 970 \AA の酸化膜が成長速度 0.6 \AA/sec で成長していることが分かる。

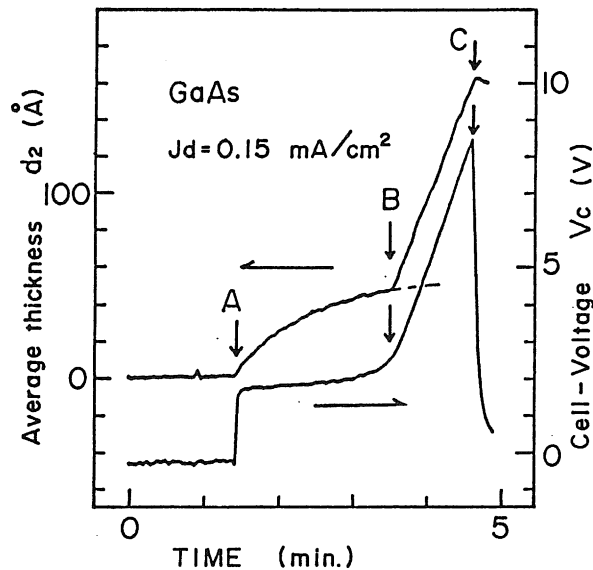


図5 図4から計算された成長膜厚の時間依存性

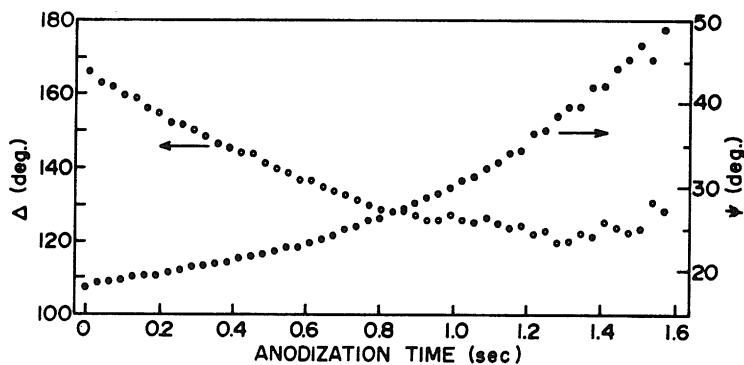


図6 高電流密度で陽極酸化した場合の (Ψ, Δ) - t 特性

以上から、短時間に起こる反応過程の解析に EOM 位相変調型エリプソメトリが有用な手段であることが理解できる。

3.2 プラズマ CVD a-Si:H の成長過程の in situ エリプソメトリ

シランガス (SiH_4) プラズマを利用した非晶質シリコン (amorphous Si, a-Si) は薄膜太陽電池や液晶駆動用薄膜トランジスタ (Thin Film Transistor, TFT) に実用化されている。

ここではその成長過程を PEM 位相変調型 in situ エリプソメトリで調べた Drevillon 達¹⁴⁾ の測定結果を紹介する。光学系の構成は図7に示すようなものであり、使用されている変調器は図8にあるようなピエゾ素子に熔融石英板を接着した構造となっている。この例では測定波長が可変できる、いわゆる分光エリプソメトリとなっている。変調周波数は素子の共振周波数 50 KHz である。その256倍の周期で光検出器 (Photomultiplier, PM) からの信号をデジタル信号に変換してコンピュータにデータを取り込んでいる。

プラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition) による成膜中の (Ψ, Δ) - t 特性の一例を図9に示している。試料基板は石英板で、その上に a-Si が $12\text{\AA}/\text{sec}$ の成長速度で附着していることが分かる。図中、一点のデータ取得時間は 5 msec, +と+の時間間隔は 0.5 sec で、全観測時間は 4.5 sec となっている。

本手法を用いれば、EOM に比べれば遅いものの、数秒間で終わる現象を in situ で捕らえられ、かつ分光特性も得られることから、比較的高速反応に有効に適用できることが分かる。

3.3 イオン注入 Si のレーザーアニール中の高速エリプソメトリ

最も高速変化に应答できる EOM 位相変調型エリプソメトリの応用例として、レーザー照射による a-Si の結晶化過程の研究を取り上げる¹⁵⁾。

As イオンを大量に注入された Si ウエハの表面は結晶が壊れて非晶質となっている。これに高出力のレーザー光を照射すると結晶内部の非晶質—単結晶界面から結晶化が始まり、表面

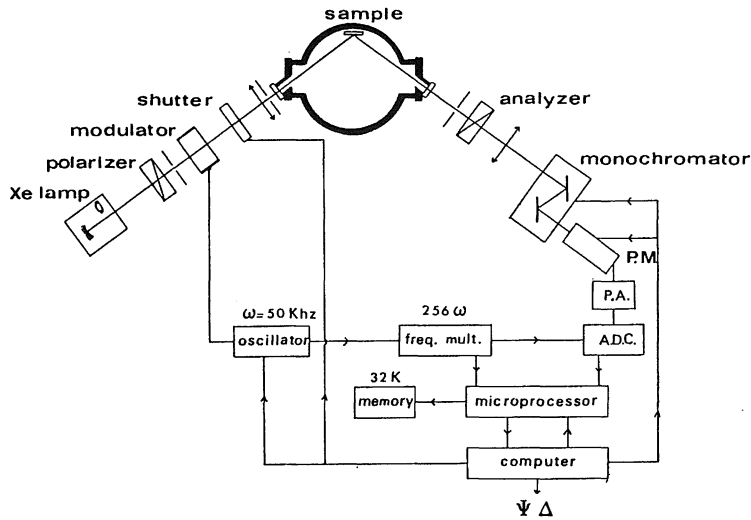


図7 PEM位相変調型 in situ エリプソメータの光学系¹⁴⁾

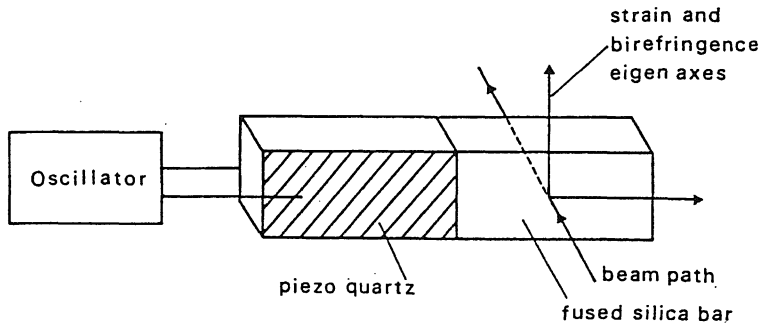


図8 PEM (Photo-elastic modulator). ピエゾ素子に熔融石英板を接着した構造になっている。

まで再結晶化が及ぶ。これをレーザーアニールによる固相成長 (Solid Phase Epitaxy) と呼ぶ。この現象は0.1秒以内に終わるため、データ取得時間としてマイクロ秒台の時間分解能が要求される。

実験に用いた試料はB添加Siウエハの(100)面に加速電圧40 KeVでAsイオンを 2×10^{15} dose/cm² 注入したものである。これを380°Cに保った試料台に設置した。出力20 W, TEM₀₀ モード、ビーム径 (1/e²) 1.9 mm のCW アルゴンイオンレーザーを入射角35°で試料に照射した。照射領域は長軸、短軸がそれぞれ、約320 μm, 約260 μm, である楕円形となっている。

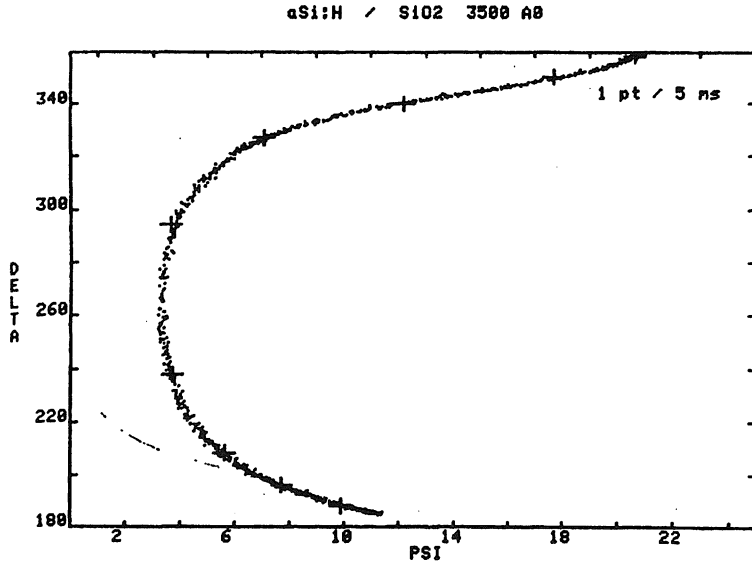


図9 プラズマ CVD による a-Si 堆積過程における (Ψ, Δ) - t 特性¹⁴⁾

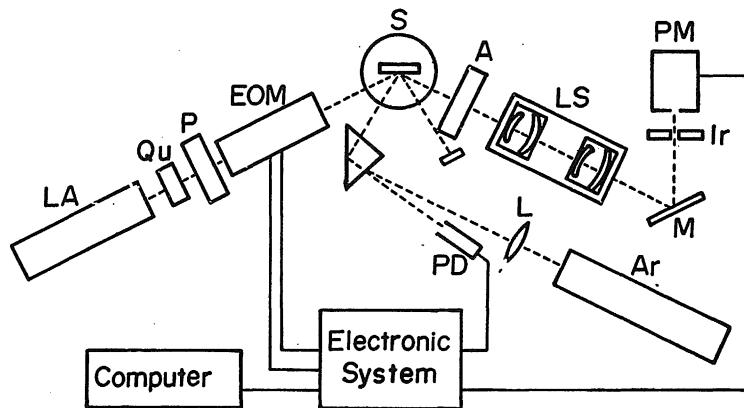


図10 EOM 位相変調型高速エリプソメトリのための光学系

図10に使用した光学系を示す。ここに、LA: He-Ne レーザ, Qu: 1/4 波長板, P: 偏光子, S: 試料, A: 検光子, LS: レンズ系, M: 反射鏡, Ir: アイリス, PM: 光電子増倍管, PD: フォトダイオード, L: 集光レンズ, Ar: アルゴンレーザーである。レンズ系 LS で楕円形状の照射部分を拡大し、アイリスでその中央部を選択して光検出器でその光強度を測定する。また、Ar レーザと試料の間にシャッターを設置してあり、Electronic System を通じて、スタートトリガがシャッターと検出器出力を高速 AD 変換して記憶するディジタイザ

の駆動回路に作動する。ディジタイザは分解能 8 bit の A-D 変換器で、最高速で $0.1 \mu\text{sec}/\text{word}$, $2 \text{kwords}/\text{channel}$ の性能を持っている。また、EOM に対しては 25 MHz までの変調が可能である。

図11にレーザー照射直後(点A)から 32 msec 後(点B)までの固相成長による (Ψ, Δ) の変化の様子を示している。ここで、一組の (Ψ, Δ) に対応するデータ取得時間は $8 \mu\text{sec}$, データ取得間隔は $320 \mu\text{sec}$, データ点数は100である。実線はこれらのデータ点にベストフィットしたものである。また、図中右下の格子は縦軸に基板単結晶 Si の光学定数の温度依存性を、横軸に表面に存在する自然酸化膜 (SiO_2) の膜厚依存性を基に描いたものである。これより、約 600\AA の a-Si 層が表面にあり、a-Si と単結晶 Si の界面から固相成長が始まり、約 22 msec で単結晶化が表面に到達することが分かる。また、格子内の終点からレーザー照射中の成長温度が 1100°C であることが推測できる。

図11から導出した固相成長速度の表面からの深さ依存性を図12に示す。図中破線はイオン注入された As の深さ方向分布を示している。これより、成長速度と不純物濃度が良く対応していることが分かる。

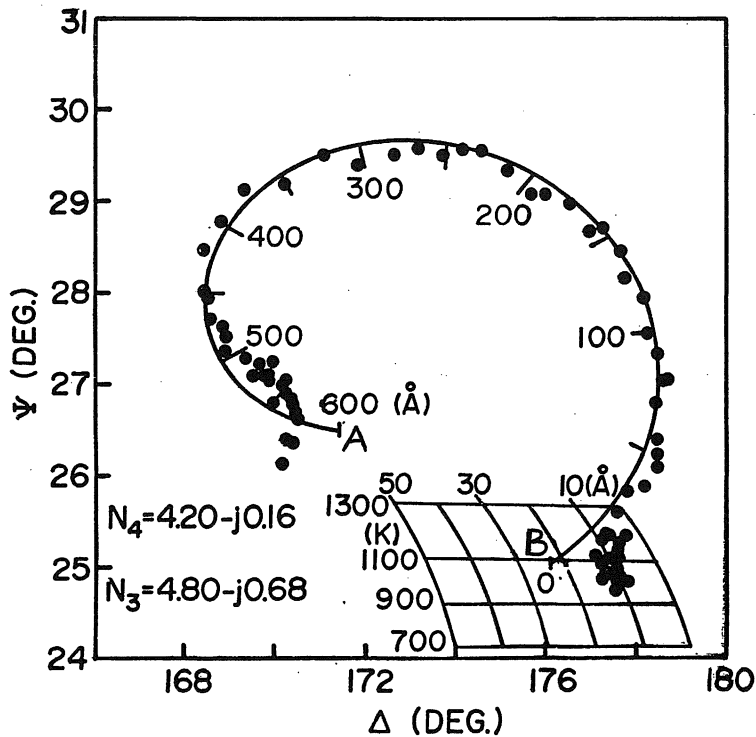


図11 レーザー照射直後(点A)から 32 msec 後(点B)までの a-Si の固相成長過程における (Ψ, Δ) -t 特性

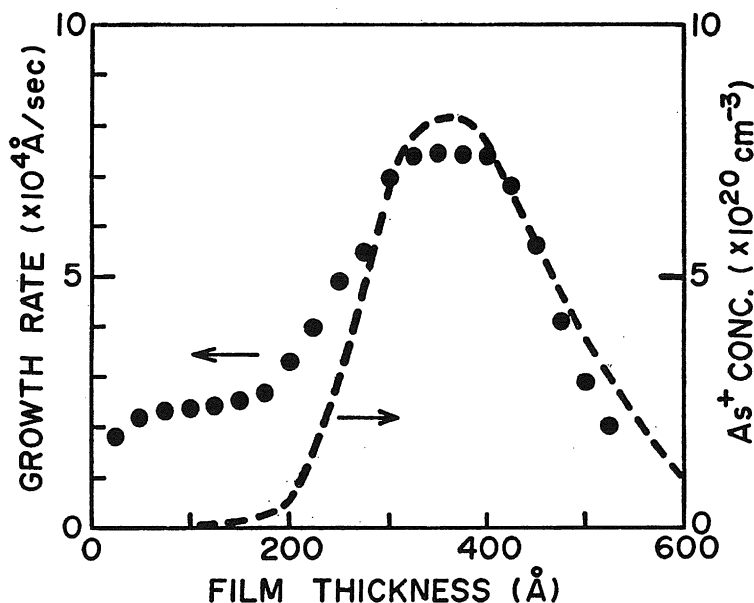


図12 固相成長速度と注入 As イオンの表面からの深さ方向依存性

この他、レーザ照射中の in situ エリプソメトリの応用として、光照射によって屈折率のメモリ効果を示す As_2Se_3 薄膜の研究がある¹⁶⁾。図13に屈折率変化の時間依存性を測定した結果を示している。これも現象が1秒以内に完了するため、EOM位相変調法が適用できる好適な例と言える。

4. in situ エリプソメトリのプラズマ浸炭過程制御への展開

鋼のプラズマ浸炭プロセスにおける in situ 制御へのエリプソメトリの展開について述べる。鋼の浸炭は、表面が硬くて、しかも、脆くない性質を必要とする歯車や自動車部品など耐摩耗性材料に利用される表面硬化処理である。

今年度下期から始まり平成11年度で完了する予定の「In-situ 制御によるプラズマ利用表皮処理プロセスの開発」プロジェクトでは、従来のガス浸炭法¹⁷⁾(メタンガスなどを熱分解して鋼表面に炭素を熱拡散し急冷することで表面硬化させる)の問題点(生産性が悪い、エネルギー効率が悪い、有害ガスの発生による劣悪な作業環境など)を抜本的に解決するため、高生産性、省エネルギー化、クリーン化であるプラズマ浸炭プロセスを確立することを目指している。プラズマ浸炭法¹⁸⁾には、プラズマの制御手段が不十分なことから、製品の品質にバラツキがあり、信頼性に欠けるという問題点がある。そこで、本研究開発では、プラズマ浸炭プロセスにおける制御手段、すなわち、①プラズマ内状況の把握と診断、②材料表面の析出、および、浸炭状況の把握と診断、をその場 (in situ) で行い、電圧、電流、圧

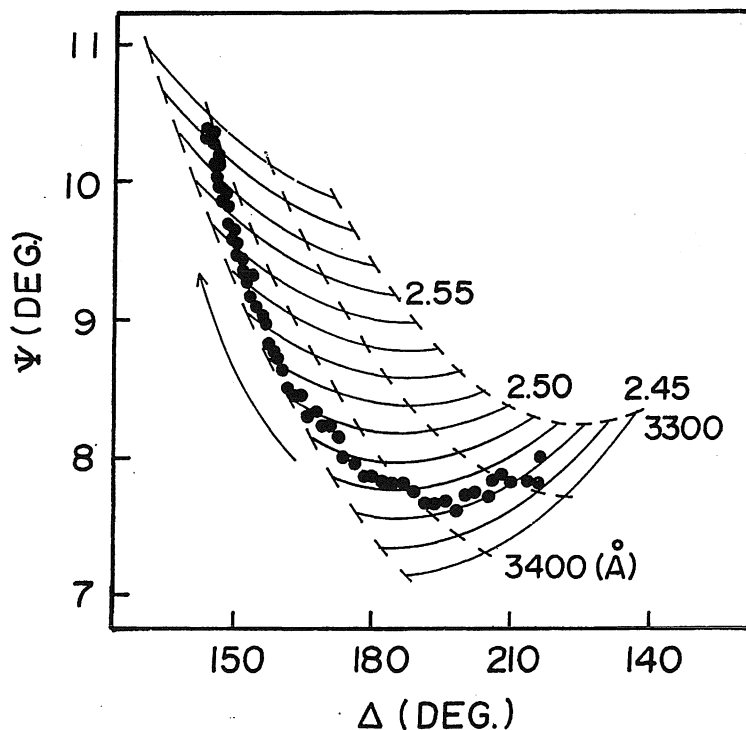


図13 As_2Se_3 薄膜の光照射直後の屈折率変化に伴う $(\Psi, \Delta)-t$ の変化の様子

力、ガス組成などの操作パラメーターにフィードバックして浸炭に適正なプラズマに制御する方法を確立することを目標としている。これにより、製品の品質の均一性、再現性の向上を実現し、プラズマ浸炭法の適用拡大に寄与する計画である。

筆者達の分担は特に(2)の表皮プロセスを試料表面の in situ 分光偏光解析を用いて調べようとするものである。プラズマ浸炭プロセスは処理温度にもよるが、全処理時間は数十分台であるため、前項の実験例等で述べたように、長時間安定で高精度測定が可能な回転検光子法が最適であると言える。

ここでは計画しているプラズマ浸炭プロセス中の試料表面への in situ エリプソメトリの展開について述べる。

図14に in situ 分光エリプソメータとプラズマチャンバが一体となった測定系を示している。入射光は光源をキセノンアークランプとした白色光ビームである。偏光子 (polarizer) を通過して試料表面で反射された光ビームは一回転 25 msec の高速で回転している検光子 (analyzer) を通過した後、分光器で分光され、それぞれの波長に対応して、88個のフォトダイオードアレイで検出される。すなわち、88個の波長に対応した $(\Psi, \Delta)-t$ 特性が測定できる。

図15に予想される浸炭過程のモデルを示す。これに基づき、表面に炭素皮膜が付着する

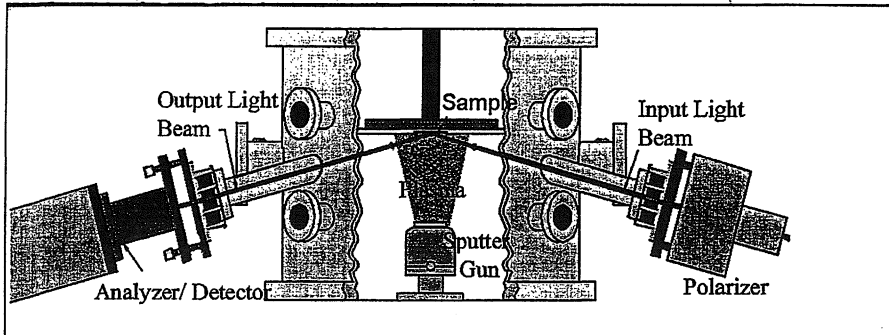


図14 in situ 分光エリプソメータとプラズマチャンバが一体となった測定系のイメージ

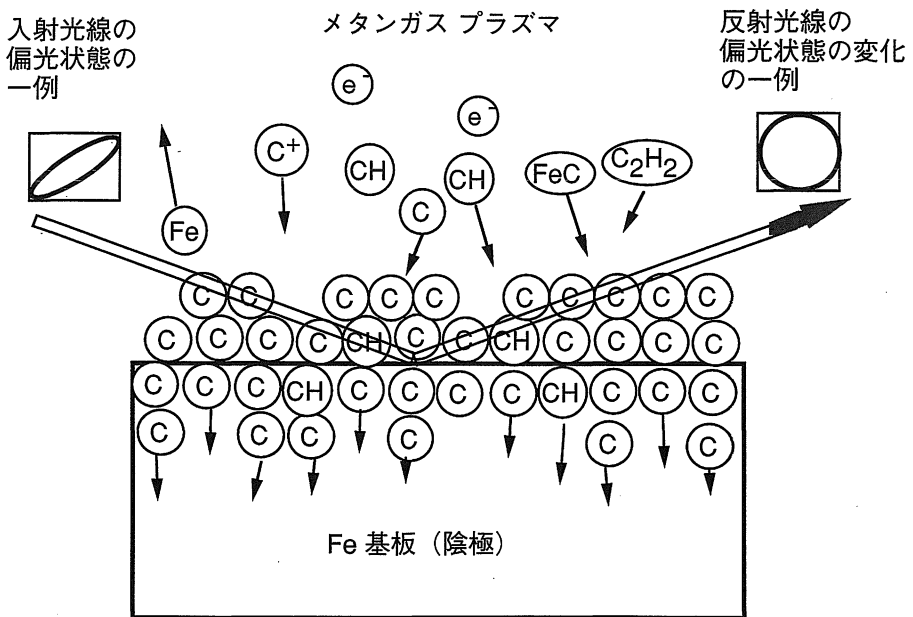


図15 浸炭過程のモデル

かどうかをモニターするとともに、炭素が鉄内部に拡散して表面が変質して行く過程を調べる予定である。ちなみに、図16に、鉄に炭素 (diamond-like carbon, DLC) が20%混ざった表面層が1000Å存在すると仮定したときの計算値の波長依存性と入射角度依存性を示している。これより、Psi (Ψ), Delta (Δ) とともにCが混合された場合 (破線), 鉄 (実線) よりも増加し、短波長になるほど、また、入射角が大きくなるほど、その変化の割合が大きくなるのが予想できる。

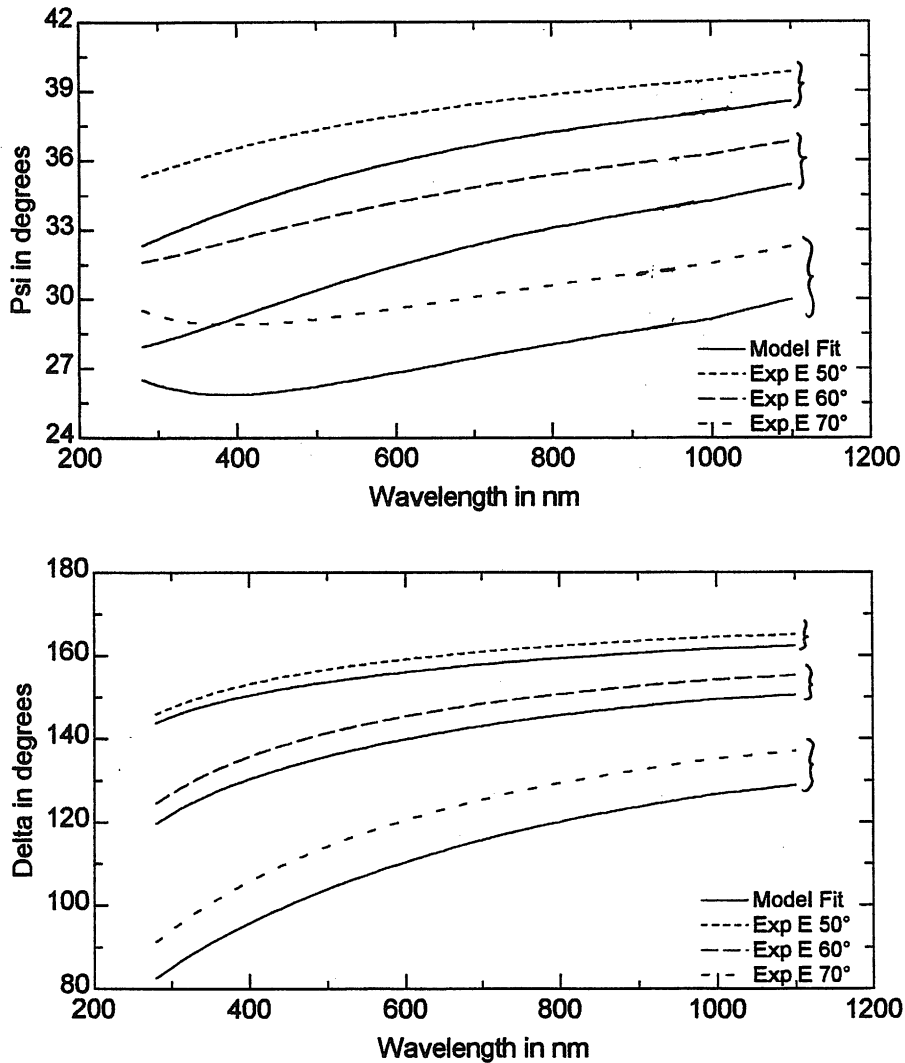


図16 鉄にダイヤモンド-ライターカーボンが20%混合したと仮定して計算した (Ψ, Δ) - t の波長依存性. 同合金薄膜が鉄基板上に1000Å付着していると仮定している.

この光学系で検討課題として、チャンバ窓の歪や付着物による偏光状態の変化と、プラズマ発光による迷光をいかに避けるかが挙げられる。前者の対策として、無歪石英板ガラスを準備すべきである。後者の対策として、検光子の位置を窓から離し、直進ビームのみが検出器に到達するような工夫が必要となるであろう。

4. ま と め

表面反応が短時間（ミリ秒台）から比較的長時間（数十分台）で起こる現象に対する *in situ* エリプソメトリの応用に対して、回転検光子法、PEM 位相変調法、EOM 位相変調法があることを実験例を示しながら紹介した。またプラズマ浸炭プロセスの研究開発プロジェクトに対する *in situ* エリプソメトリの展開について述べ、高速回転検光子法による分光エリプソメトリがその解析に最適であることを示した。

参 考 文 献

- 1) R. M. A. Azzam and N. M. Bashara; "Ellipsometry and Polarized Light", North Holland, Amsterdam, 1977.
- 2) 土井康弘; 「偏光と結晶光学」共立出版, 1975.
- 3) B. D. Chahan and R. F. Spanier; Surf. Sci. **16** (1969) 16.
- 4) P. S. Hauge and F. H. Dill; IBM J. Res. & Dev. **17** (1973) 472.
- 5) D. E. Aspnes and A. A. Studna; Appl. Opt. **14** (1975) 220.
- 6) 星野孝志, 森谷明弘, 中井順吉; 応用物理 **52** (1983) 443.
- 7) S. N. Jaspersen and S. E. Schanaterly; Rev. Sci. Instrum. **40** (1969) 761.
- 8) B. Drevillon and Benferhat; J. Appl. Phys. **63** (1988) 5088.
- 9) O. Acher, E. Bigan and B. Drevillon; Rev. Sci. Instrum. **60** (1989) 65.
- 10) A. Moritani, Y. Okuda and J. Nakai; Appl. Opt. **22** (1983) 1329.
- 11) A. Moritani, Y. Okuda, H. Kubo and J. Nakai; Appl. Opt. **22** (1983) 2429.
- 12) A. Moritani, Y. Okuda and J. Nakai; J. Phys. **44** (1983) 63.
- 13) 星野孝志; 学位論文「GaAs と Bi₂Te₃ の表面と陽極酸化膜のエリプソメトリによる研究」(大阪大学工学部, 1984).
- 14) B. Drevillon, J. Perrin, R. Marbot, A. Violet and J. L. Dalby; Rev. Sci. Instrum. **53** (1982) 969.
- 15) A. Moritani and C. Hamaguchi; Appl. Phys. Lett. **46** (1985) 746.
- 16) A. Moritani and J. Nakai; Conf. Digest of the Intern. Commission for Optics, Sapporo, (Jpn. Soc. Appl. Phys.) 1984, p. 558.
- 17) 大谷南海男; 「金属表面工学」増補版 日刊工業新聞社 (1996) p. 263.
- 18) 小沼光晴; 「プラズマと成膜の基礎」日刊工業新聞社 (1988) p. 189.