



エリプソメトリとその応用

山口 十六夫

静岡大学電子工学研究所 〒432 浜松市城北 3-5-1

(1985年7月22日受理)

Ellipsometry and Its Applications

Tomuo YAMAGUCHI

Research Institute of Electronics, Shizuoka University,
3-5-1, Johoku, Hamamatsu 432

1. はじめに

偏光を用いた表面や薄膜の計測法は、測定感度や精度の高さでエリプソメトリ(楕円偏光解析法、以後エリプソと略称する)に代表されるので、本稿ではエリプソにテーマを絞って解説する。参考のため、「Ellipsometry」のキーワードで Science Abstract 誌に登録されている発表論文数を当たってみたら、この5年の間、年平均120編程度もあった。1983年には「表面、薄膜のためのエリプソメトリおよびその他の光学計測法」に関する国際会議が開かれたこと¹⁾、エリプソの表面研究への応用の草分けの一人で、Surface Science 誌の編集委員でもあった Bootsma の逝去を痛む同志追悼記念号²⁾にエリプソ関連論文が特集されたこともあって、1984年度の登録論文数は200編にもなり、エリプソが表面や薄膜の高感度非破壊評価法として確実に定着していることがわかる。

上記国際会議は、エリプソに関しては5回目であるが、過去の国際会議の Proceedings³⁻⁶⁾と合わせてみると発展の歴史がわかる。コンピュータの発達による測定の自動化がエリプソの普及に拍車をかけている。また、最近の傾向として、分光エリプソ(spectroscopic ellipsometry、以後 SE と略記する)が多用され、表面、薄膜、界面の物性の研究手段として不動の地位を確保しつつある。その分野の第一人者であるベル研究所の Aspnes は最近の国際会議の冒頭の review で「約30のグループが独自の SE を使用または開発中で、回転偏光子(または検光子)法か位相変調法を採用している」と述べている⁷⁾。現在

では SE の市販品が手に入るようになった。原理や方式については後で説明することにして、エリプソがどのような研究に使われているか概観してみる。

例として、1983年度の Science Abstract 誌の登録論文の Abstract をざっと通読して内容をおおざっぱに区分けしてみた。精度は悪いがおおよその傾向はわかる。約半数がエリプソをおもに測定手段とした応用論文で、エリプソの測定原理、新方式、精度などエリプソ固有の論文と、Auger など種々の新しい評価技術を主とし、一部にエリプソを併用している論文とが残り、折半する。エリプソの型で分けると、約半数が単色光使用の普通版で、SE を使用するものと、特殊な測定法や原理に関するものが残りを折半する。測定対象の基板で分けると、Si や Ge 半導体が最も多く約4割、金属および合金が3割、GaAs などの化合物半導体が2割、ガラスなどの透明体やアモルファス Si などが残りの1割である。測定対象で見ると、約半数が酸化膜や窒化膜など透明膜の評価に関するもので、これには、自然酸化膜は勿論、CVD やスパッタリング法などによる成長膜、陽極酸化膜など電気化学的なものも含まれる。単分子層程度の膜厚が問題になるガス吸着、バルク表面の光物性、半導体へのイオン注入損傷に各1割、残りはラングミュア膜などの高分子膜、研磨層、液体表面などを含む。論文には出てこないがエリプソは、Si 表面酸化膜の膜厚測定などには現場でルーチンワークとして使われており、化合物半導体へのイオン打込みや損傷の熱的回復状況の非破壊評価などに、今後ますます威力を発揮するものと思われる。解析のモデルで見ると、理想的な均質等方平行平

面膜を前提にするものが大半で、異方性、不均質、表面粗さ、微粒子集合などを問題にするのは、全部合わせても数割程度にすぎないが、解析の精度が進歩するにつれて理想的な均質等方平行平面モデルからのずれがクローズアップされてくると思われる。そういう意味でエリプソは、まだまだ進展の余地がある。

2. エリプソメトリの原理

2.1 楕円偏光とポアンカレ球

試料に 45° 方位の直線偏光を入射するとき、光線と法線を含む入射面に平行な p 偏光成分と、垂直な s 偏光成分の振幅は等しいから、それらを 1 と置くと、反射光の各成分はそれぞれの成分に対する振幅反射係数 r_p および r_s に等しい。 r_p, r_s は一般に複素数なので、それらが作る電気ベクトルの先端が、光線に垂直な面内に描く軌跡は楕円となる。楕円の形は、両成分の振幅比

$$\begin{aligned} r_p/r_s &= |r_p/r_s| \cdot \exp \{i(\delta_p - \delta_s)\} \\ &= \tan \Psi \cdot \exp(i\Delta) \end{aligned} \quad (1)$$

で一義的に決まる。エリプソは、この楕円の形、すなわち、 Ψ と Δ を測定して試料の特性を評価する方法である。楕円の形は (Ψ, Δ) の組のほか、楕円の長軸 (ξ 軸) の方位 θ と長短軸比 $\chi \{= \tan^{-1}(a_\xi/a_\eta)\}$ の組 (χ, θ) で表わしてもよい。

任意の楕円偏光は、 r_p/r_s 複素平面の一点で表示されるが、エリプソは複素平面の立体射影 (リーマン球) であるポアンカレ球を用いると見通しよく行なうことができる。上述のパラメータ (Ψ, Δ) と (χ, θ) は図 1 に示すようなポアンカレ球上の球面座標である。経度および緯度は 2θ および 2χ で目盛られている。赤道は直線偏光、両極が円偏光、北半球が右回り、南半球が左回り楕円偏光に対応している。

ポアンカレ球をエリプソの道具として用いる利点は、位相板の作用を考えると発揮される。位相板 (位相補

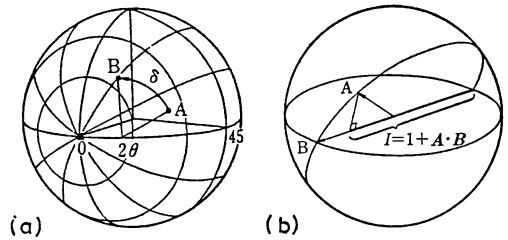


図 2 ポアンカレ球使用法
(a) 位相補償素子の作用,
(b) 偏光子通過後の光の強度

償器または移相素子などとも呼ばれる) の作用は、速い軸の方位 θ 成分とそれに直交する成分間に位相差 δ を与えることであるが、ポアンカレ球上では図 2(a) に見るように、位相板に入射する前の楕円偏光を表す点 A から、赤道上の 2θ の点を中心として δ の円弧を描くのみでよい。終点 B が、位相板を通った後の楕円偏光を表す。

ポアンカレ球をエリプソに用いるもう一つの利点は、偏光子を通った後の光の強度を視覚的に予測できることである。図 2(b) で、偏光子に入射する楕円偏光を A、出射する直線偏光を B とする。ポアンカレ球の中心から A, B へ向かうベクトルをそれぞれ \mathbf{A}, \mathbf{B} とすると、出射光の強度は $1 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ に比例する。 $\mathbf{A} = -\mathbf{B}$ のとき、すなわち、ポアンカレ球上で対極にあれば、強度がゼロなので消光状態になる。

2.2 測定法

測定法は、光検出器をどう使うかによって、1) 消光法、2) 平衡法、3) 走査法、4) その他、に大別できる。以下に、これらの特徴をかいつまんで説明する。

2.2.1 消光法

古典的で最も精度の高い測定法であるが、二つの操作で消光点を追従しなければならないので速い変化の測定には不向きである。消光点の位置を検出するだけなの

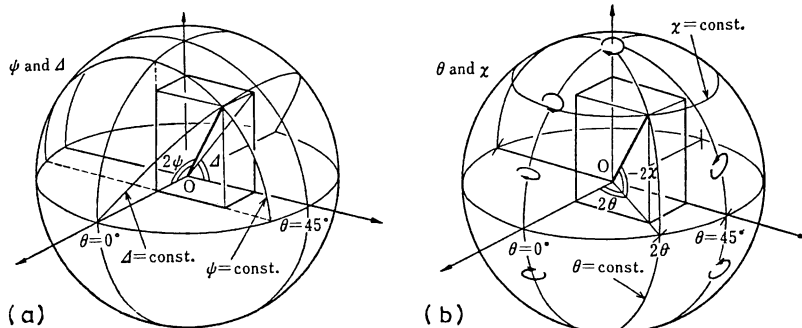


図 1 楕円偏光を表わす 2 組のパラメータ
(a) Ψ と Δ , (b) χ と θ

で、光源の強度や検出器の感度の時間的変動やそれらの偏光特性にはまったく影響されない反面、最も弱い光だけを使うので、強い光強度と高い分光感度のスペクトル領域でなければ有効でない。消光させるためには、位相補償素子が必要なのでそれをCで表わすと、光学系は

$$P-S-C-A$$

となる。Pは偏光子、Aは検光子、Sはサンプルを表わす。Sで光を反射させるのが普通だが、透過光を使うことももちろん可能である。PとAは素子としては同等だが、光源側をP、光検出器側をAとする。もちろん、光を逆に通しても測定結果は原理的には変わらない。

いま、Pの方位角を 45° とすると、Sから出射する光の偏光状態は (Ψ, Δ) で表わされるポアンカレ球上の一点で与えられる。Cがバビネーソレイユ位相素子(BSC)であれば、その方位を 0° にして位相差 δ を調整すれば直線偏光にでき、Aの方位角 θ_a を調整して消光できることは、図1, 2を見れば理解できよう。消光する δ と θ_a は2組あり、それらが $(\delta_1 = \Delta, 2\theta_{a1} = \pi + 2\Psi)$ と $(\delta_2 = \pi - \Delta, 2\theta_{a2} = \pi - 2\Psi)$ となることも、図を見ればすぐわかる。Pの方位角が -45° についても2組の測定点がある。これら4組の測定点を平均することを4-zone測定と呼ぶ。Cが1/4波長板のときは、その位相差 δ は 90° に固定されるので、その方位角を 45° または -45° に固定し、PとAの方位角で消光させる。やはり、4-zone測定をする。4-zone測定をすれば、各素子の入射面に対する方位角初期設定の誤差や、1/4波長板の位相差の 90° からのずれなどに起因する種々の系統誤差が除かれることも、ポアンカレ球を使って考えると容易にわかる。

4-zone測定をすると精度は高いが測定に時間を要する。そこで、種々の方式による自動化が試みられた。消光法の基本は、手動でもそうだが、消光点近傍で方位角や位相差などの変数を前後に振ることである。自動化のた

め、偏光の方位角を振る目的では Faraday cell が、位相差を振る目的では Pockels cell が使われる。Faraday cell はガラス内を通る偏光の方位が磁場によりわずかに回転することを利用するが、古くは Winterbottom の review⁹⁾ に解説されているし、新しいところでは、Muller が SE に用いている⁹⁾。以下もそうだが、文献は一例にすぎない。

Muller の自動 SE の光学系の配置図を図3に示す⁹⁾。円周にそって連続的に透過波長を変えた特殊な円板型干渉フィルター(2)を回転させることにより、370~720nmの波長範囲を速いモードで3s、高精度モードで15sで走査できる。1/4波長板(6)としては、アクロマチックな3回全反射フレネル・ロムを用いている。直径19.1mm、長さ152.4mmのSF-6ガラス Faraday cell (5, 8)のソレノイドに流す10kHzの交流電流で偏光面を数度($^\circ$)振らせ、光検出器の信号を位相検波して、ソレノイド電流に帰還させることにより1msの桁で消光点が追従できる。最大 ± 150 Aの電流でカバーできる偏光面の回転幅は、 $\lambda = 400$ nmで 140° 、 $\lambda = 700$ nmで 36° である。これより、大きな変化に対しては、P(4)やA(9)を機械的に回転させる必要がある。

Pockels cell を用いた自動エリプソメータは、去る6月に急逝された高崎が創始した¹⁰⁾。ADP Pockels cell に商用周波数の交流電圧をかけて数度($^\circ$)の位相差変動を与え、検出信号でサーボ・モータを駆動することにより、Aの回転やBSCの位相差に帰還させて消光点を追従させた。筆者らは、半波長電圧が7.5kVとADPより低くてすむKDPを用いたPockels cellの電圧に帰還させる自動エリプソメータを作り¹¹⁾、金属薄膜の蒸着中¹²⁾や蒸着直後¹³⁾の大きな変化を追従した。自動化することにより手動では不可能だった測定ができるようになった反面、光路に余分な素子を導入することは、系統誤差の導入の可能性も増す。蒸着初期の金属島状膜は極端

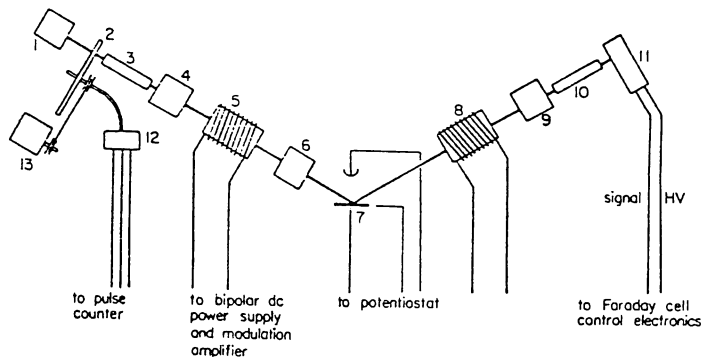


図3 Faraday cellを使ったSEの光学系⁹⁾

な異方性をもつが、等方性か異方性かを定量的に評価しようとするときと系統誤差が邪魔になるので、余分の素子を除いた普通のエリプソメータによる手動の 4-zone 測定に戻らざるをえなかった¹⁴⁾。Pockels cell の最近の応用例としては、森谷らの高速位相変調エリプソメータがあり、10 μ s 以下の測定時間と 0.01° の桁の測定精度をうたっている¹⁵⁾。しかし、これは消光法ではなく、走査法に属するのでそこで説明する。

2.2.2 平衡法 (分離光路エリプソメータ¹⁶⁾)

検光子の代りに Wollaston プリズムを用いて、ポアンカレ球上で試料の (Ψ , Δ) の点をはさむ直交した二偏光に分け、それらの強度がバランスする点を求める方法である。消光法と違って十分強い光を使い、しかも、次に述べる走査法と同様位相素子を必要としないので SE に適している。光強度のバランスを見るだけなので、走査法のように光強度測定に神経を使う必要はない。ただ、二つの光検出器の強度バランスを見るため、光路に偏光子を入れたり出したり操作が複雑であるように見える。消光法と走査法の間位置づけられる。

2.2.3 走査法

この方法は、なんらかの素子の変数を一周期分動かすときの検出器出力の変化を記録しフーリエ解析するものである。消光法と違い全方位の光束に含まれる情報をすべて有効利用するので、適用できるスペクトル領域の制限はゆるやかになる。また、回転偏光子法 (RP) や回転検光子法 (RA) では位相素子を必ずしも必要としないので、SE に適している。反面、RP では光源の、RA では検出器の偏光特性に影響されるし、検出器の非直線性や光源のドリフトなど、光強度の精密測定に伴う種々の困難を克服しなければならない。測定の手速や精度は、光学系よりはむしろエレクトロニクスの問題で解決可能なので、現在、最も広く SE に使われている。古いところでは、Cahan らの論文¹⁷⁾ですでに 0.02 s の測定時間と 0.01° の測定精度をうたっている。その後、多くの測定精度に関する報告があり、最近でも、市販の RA を用いて、なおかつ測定精度に関し光学素子の光学活性と二色性の影響について論じている¹⁸⁾。

測定法の原理は図 1(a) と図 2(b) を見れば理解できる。たとえば、RA では、検光子の回転に伴って、図 2(b) の B 点が赤道を回るので、検出される光の強度は $1 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ に比例して周期的に変動する。すなわち、検光子の方位角を θ_a とすると

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= (\cos 2\Psi, \sin 2\Psi \cdot \cos \Delta, \sin 2\Psi \cdot \sin \Delta) \\ \mathbf{B} &= (\cos 2\theta_a, \sin 2\theta_a, 0) \end{aligned}$$

であり

$$\begin{aligned} I &= I_0(1 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}) \\ &= I_0(1 + \alpha \cos 2\theta_a + \beta \sin 2\theta_a) \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ここに、 $\alpha = \cos 2\Psi$ 、 $\beta = \sin 2\Psi \cdot \cos \Delta$ である。したがって、(2) 式をフーリエ解析して α と β を決めると Ψ と Δ が求まる。

消光法で紹介した文献¹⁵⁾は、Pockels cell に交流電圧を印加して変調するのではなく、三角波を加えて、位相差を直線的に走査しながら、強度変化を記録しフーリエ解析している。これは、RA が図 2(b) の B を赤道のまわりに回したことに對し、両極を通る大円を回したことに相当している。Cell の方位角が 45° のときは (2) 式の β は $\sin 2\Psi \cdot \sin \Delta$ に変わる。純電氣的な走査だから 10 μ s と極端に速くできたが、一軸結晶による Pockels cell は光線と光軸との軸合せが不完全だと位相差が残留し、それが温度依存をするなど系統誤差を生ずる可能性があるので、文献¹⁵⁾に記述してあるように注意深く取り扱う必要がある。その他にも、回転偏光子の外側に第三の偏光子を入れたり、1/4 波長板を回転させたり、種々の方式があり、Hauge¹⁹⁾ が系統的に詳しく解説している。

2.2.4 その他

変り種のエリプソメータを幾つか紹介しよう。

芳野らは、試料に光ファイバーで光を導くエリプソメータを作製した²⁰⁾。偏波面保持光ファイバーの一端から直線偏光を射出し、射出端のセルフフォーカスで平行光束にして試料に斜入射する。ファイバーに入射する偏光の方位をファイバーの主軸から 45° 傾ける二つの主軸成分がファイバー内を伝播する。ファイバーの一部をプロアで加熱すると、約 2.5 mm のビート長が熱膨張により変化して、ファイバーを射出する両成分の位相差が何周期も変化する。試料からの反射光を光ファイバーの束で受け強度変化を記録すると、その振幅比から $\tan \Psi$ が求まる。 Δ に関する情報は得られないが、この方法は、エリプソメータを持ち込めない、または、光ビームが直線的に入射できないような場所での、表面のリモート・センシングができる点で興味深い。

梅田らは、彼らが開発した周波数安定化横ゼーマンレーザー光が、わずかに周波数の違う直交した二つの偏光を含むこと、すなわち二偏光を合成した結果、見掛け上、位相差が約 100 kHz に相当する速さで自動的に変化する光源になることを利用したエリプソメータを作製し、レーザーミラーのわずかな面内異方性を検出した²¹⁾。

エリプソをイメージングに応用する試みも面白い。普通のエリプソメータは検光子と光検出器の間に望遠鏡を

用いて平行光線のみを検出するが、試料面にピントを合せた顕微鏡を用いれば、消光状態からの局所的なずれ、たとえば、合金相の局所的な揺らぎ²²⁾や、透明膜厚の局所的な揺らぎ²³⁾が、映像として見える。垂直入射における干涉顕微鏡と類似しているが、斜入射が本質的なだけにピント合せや、横方向の分解能、倍率に多少問題があるものの、物性のわずかな違いが映像化できる。

山本は、偏光子が検光子を兼ねた O'Bryan 型往復光路エリプソメータ²⁴⁾、および、白色法によるチャンネルスペクトルを用いた厚い透明膜のエリプソメトリ²⁵⁾について報告している。筆者は、透明膜の膜厚が分離して計れるエリプソを考案した²⁶⁾。その他にも数多くのエリプソがあるが、紙数の制限があるので割愛する。

3. 解析法および解析例

3.1 解析法

4-zone 測定した値をどのように平均すれば正しい Ψ と Δ を得るか、たとえば、ポアンカレ球の北半球の値か南半球の値か判定に困るときのために、現実の光学定数や膜厚を用いてシミュレートしたポアンカレ球上のマップを用意した²⁷⁾。計算するとき $\exp\{\pm i(\omega t - kx)\}$ の複号のどちらを採用しているかによって、光学定数の虚部は $n \mp ik$ の複合になる点に注意する必要がある。それによってポアンカレ球上のマップも変わるからである。

バルク表面の薄膜や表面層を問題にするときはつねに信頼のできるバルク値は何かが問題になる。筆者は、代表的な金属について信頼できそうなバルクの数値が表に示してある文献を集めて、その種々のスペクトルを図示した²⁸⁾。そこには、種々の金属の二次元的および三次元的微粒子分散系の光学的振舞いをシミュレートしたスペクトルも含まれている。

代表的な半導体については、やはり、数値が表に示してあって利用しやすいという意味でも、Aspnes らの回転検光子法によるデータが参考になる²⁹⁾。最新の表面処理法を駆使しても表面層の影響は避けがたいので、あえて擬誘電率と称し、データの信頼性や限界に言及している。

バルク表面の n と k は、 Ψ と Δ の関数として(1)式が解けるので簡単だが、薄膜や表面層を問題にする一般的な場合は解けないのが普通である。そこで、 (Ψ, Δ) 平面に、モデルとした二つのパラメータ値を変えて計算したチャートを用意し、実測の Ψ と Δ をあてはめて目的のパラメータ値を得るのが普通の解析法である。パラメ

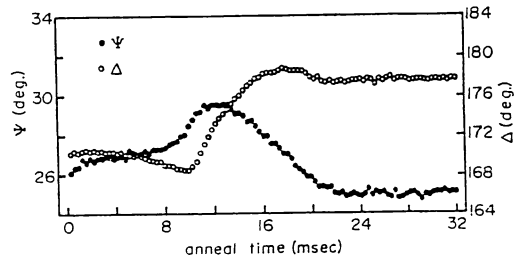


図4 Asを打ち込んだa-Si層のArレーザーアニール固相エピ成長の高速エリプソメータによる監視例³²⁾
照射による反応が30msで完了している。

ータは、透明膜の n と膜厚 d 、薄膜の n と k 、下地の n と k 、あるいは、不均質モデルの屈折率勾配のパラメータ、異方性屈折率などなど、いろいろの組合せがありうる。測定量が不足するときは増やす努力も必要である。筆者らは、金属膜の n 、 k 、 d を同時に決めるため、 Ψ と Δ に加えて透過率を蒸着中にその場測定した³²⁾。多入射角エリプソ³⁰⁾や入射角微分エリプソ³¹⁾も測定量を増す工夫の現われであろう。

3.2 測定および解析例

半導体表面の評価にエリプソを応用した例を幾つか示す。図4はSi単結晶表面にAsを打ち込んだ非晶質(a-Si)層のArイオンレーザーアニール固相エピ成長を高速エリプソで監視した例で、30msでレーザー照射による反応が完結したことを示している³²⁾。 Ψ - Δ 面での測定値の軌跡を解析することにより、結晶層の成長速度をa-Si層の厚さおよび照射時間の関数として得た。また、成長速度、不純物濃度分布、成長温度間の相関に関する知見も得ている。これは、Arレーザー照射領域の中央に、プローブ光としてHe-Neレーザー光をレンズで絞ってあて、その光で単色高速エリプソを実行した例だが、イオン打ち込み損傷の回復過程をSEで監視した例³³⁾を図5に示す。

図5(a)は実線が結晶、点線が非晶質GaAsの誘電率で、図5(b)はSE測定した $d(\cos \Delta)/d(k\omega)$ データを3eV近傍で拡大した図である。GaAs結晶にB⁺を打ち込んだ直後は結晶の二つのピークが見られないが、アニール温度を上げるにつれて、3eV近傍の E_1 および $E_1 + \Delta_1$ ピークが回復して再結晶していく様子がわかる。

イオン打ち込みの効果は、RFスパッタリングによっても生じる。高橋らは、InP基板にSiO₂膜をRFスパッタリングで成膜するとき、基板がプラズマに晒されたとく初期の段階で数百Åの深さまで損傷されることを、多入射角エリプソで明らかにした³⁴⁾。図6(a)の実

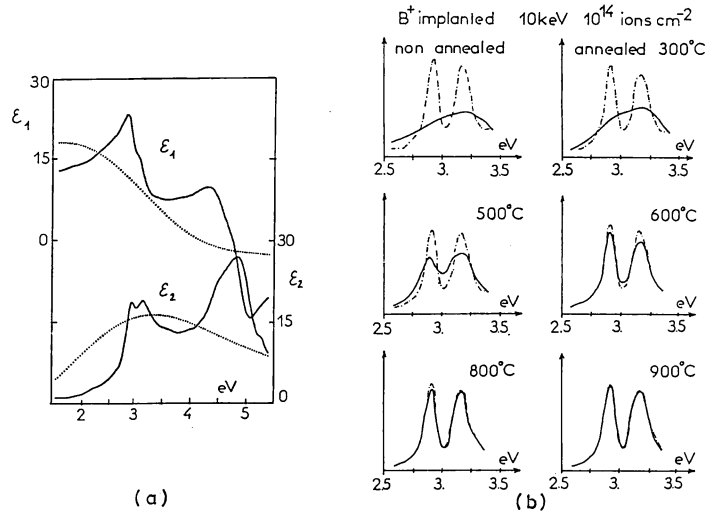


図5 B⁺を打ち込んだ a-GaAs のアニールによる再結晶化過程を SE で監視した例³³⁾
 (a) c-GaAs の誘電率, (b) $d(\cos \Delta)/d(\hbar\omega)$ vs $\hbar\omega$

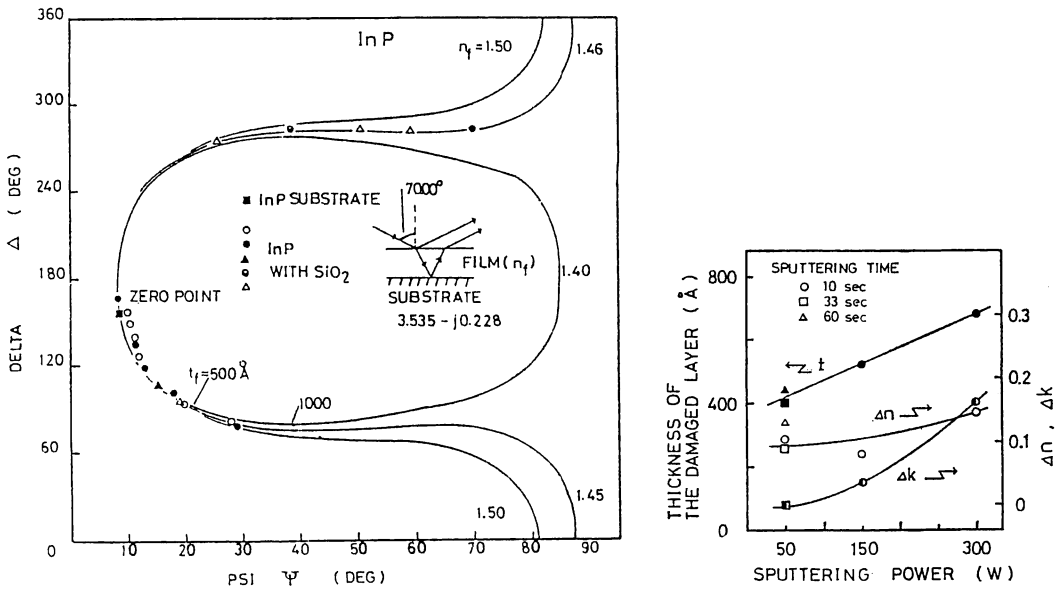


図6 InP に SiO₂ を RF スパッタリングでコートするときの損傷を多入射角エリプソメトリで見いだした例³⁴⁾
 (a) スパッタリング開始直後の測定点が左下部に見られるように計算チャートから外れる様子,
 (b) 5 入射角測定から得た損傷層の n , k , d の RF パワー依存

線は単層膜計算によるチャートである。膜成長初期段階の測定点がチャートの左下部に見られるように、計算曲線から外れる現象を、基板と SiO₂ 膜の間に損傷層を設けて説明した。損傷層の未知パラメータ n , k , d が増えるので、主入射角近傍の五つの入射角で測定し解析して、図 6(b)に示すような結果を得た。

ガス吸着の実験では、 Ψ と Δ の変化はただか数分の 1 度しかなく、他の光学的手段では観測が困難なので

エリプソンの占める役割は大きい。渡辺らは、CO 吸着層の誘電率が、Ag に吸着したときは常識的な液体のそれに近いのに、Cu に吸着したときは金属的なものなることを見いだした³⁵⁾。

4. おわりに

勉強不足と紙数の制限もあって十分な解説ができたとは思えない。ここで紹介できなかったが、国内のエリプ

ソを用いた研究グループは、手許の文献を見ただけでもまだ 15 近くある。筆者自身は、しばらくエリプソを用いた研究から遠ざかっていたが、やはり、独自の SE を組み立てて、微粒子や超格子の評価をしてみようという計画している。

文 献

- 1) F. Abeles, M. Costa, A. Septier, J.-B. Theeten and M.-L. Theye, eds.: *Proc. of the Int. Conf. on "Ellipsometry and Other Optical Methods for Surface and Thin Film Analysis,"* Paris (1983), J. Phys. **44**, C 10 (1983).
- 2) H. Gatos, eds.: "Special volume in commemoration of Gosse A. Bootsuma," Surf. Sci., **135** (1983).
- 3) E. Passaglia, R. R. Stromberg and J. Kruger, eds.: *Proc. of the Int. Symp. on "Ellipsometry in the Measurement of Surfaces and Thin Films"* (Natl. Bur. Std. Misc. Publ. 256, U.S. Gov't Printing Office, Washington D. C., 1964).
- 4) N. M. Bashara, A. B. Buckman and A. C. Hall eds.: *Proc. of the Int. Symp. on "Recent Developments in Ellipsometry,"* Nebraska (1968), Surf. Sci., **16**(1969).
- 5) N. M. Bashara and R. M. A. Azzam eds.: *Proc. of the 3rd Int. Conf. on "Ellipsometry,"* Nebraska (1975), Surf. Sci., **56** (1976).
- 6) R. H. Muller, R. M. A. Azzam and D. E. Aspnes, eds.: *Proc. of the 4th Int. Conf. on "Ellipsometry,"* Berkeley, California (1979), Surf. Sci., **96** (1980).
- 7) D. E. Aspnes: "Optical characterization by ellipsometry—A prospective," J. Phys., **44**, C 10 (1983) 3-12.
- 8) A. B. Winterbottom: "Increased scope of ellipsometric studies of surface film formation," Ref. 3, pp. 97-112.
- 9) R. H. Muller and J. C. Farmer: "Fast, self-compensating spectral scanning ellipsometer," Rev. Sci. Instrum., **55** (1984) 371-374.
- 10) H. Takasaki: "Photoelectric measurement of polarized light by means of an ADP modulator. II. Photoelectric elliptic polarimeter," J. Opt. Soc. Am., **51** (1961) 463.
- 11) T. Yamaguchi and H. Hasunuma: "A quick response recording ellipsometer," Sci. Light, **16** (1967) 64-71.
- 12) T. Yamaguchi, S. Yoshida and A. Kinbara: "Continuous ellipsometric determination of the optical constants and thickness of a silver film during deposition," Jpn. J. Appl. Phys., **8** (1969) 559-567.
- 13) S. Yoshida, T. Yamaguchi and A. Kinbara: "Changes of the optical properties of aggregated silver films after deposition," J. Opt. Soc. Am., **61** (1971) 463-469.
- 14) T. Yamaguchi, S. Yoshida and A. Kinbara: "Effects of optical anisotropy of aggregated silver films on ellipsometric determination of n , k , and d ," J. Opt. Soc. Am., **62** (1972) 634-638.
- 15) A. Moritani, Y. Okuda, H. Kubo and J. Nakai: "High-speed retardation modulation ellipsometer," Appl. Opt., **22** (1983) 2429-2436.
- 16) N. V. Smith: "Optical constants of sodium and potassium from 0.5 to 4.0 eV by split-beam ellipsometry," Phys. Rev., **183** (1969) 634-644.
- 17) B. D. Cahan and R. F. Spanier: "A high speed precision automatic ellipsometer," Surf. Sci., **16** (1969) 166-176.
- 18) 星野孝志, 森谷明弘, 中井順吉: "回転検光子型自動偏光解析装置の校正および測定精度について", 応用物理, **52** (1983) 443-450.
- 19) P. S. Hauge: "Recent developments in instrumentation in ellipsometry," Surf. Sci., **96** (1980) 108-148.
- 20) T. Yoshino and K. Kurosawa: "All-fiber ellipsometry," Appl. Opt., **23** (1984) 1100-1102.
- 21) N. Umeda and H. Takasaki: "New ellipsometry realized by the use of a stabilized two-frequency laser," Surf. Sci., **96** (1980) 141-148.
- 22) K. Sugimoto and S. Matsuda: "Analysis of passive films on Austeno-Ferritic stainless steel by microscopic ellipsometry," J. Electrochem. Soc., **130**(1983) 2323-2329.
- 23) 三島瑛人: "エリプソ干渉法の横方向分解能—膜厚および入射角の影響—", 電子通信学会論文誌, **J 66-C** (1983) 328-332.
- 24) M. Yamamoto and O. S. Heavens: "A vacuum automatic ellipsometer for principal angle of incidence measurement," Surf. Sci., **96** (1980) 202-216.
- 25) M. Yamamoto: "Ellipsometry of thick ($d > \lambda$) transparent films using channelled spectrum," J. Phys., **44**, C 10 (1983) 35-38.
- 26) T. Yamaguchi and H. Takahashi: "Ellipsometric method for separate measurements of n and d of a transparent film," Appl. Opt., **14** (1975) 2010-2015.
- 27) 高崎 宏, 山口十六夫: "エリプソメトリ, 薄膜ハンドブック, 学振 薄膜 131 委編 (オーム社, 1983) pp. 318-322.
- 28) 山口十六夫: "金属薄膜の光物性, 薄膜の作製・評価とその応用技術ハンドブック, 権田編 (フジ・テクノシステム, 1984) pp. 155-167.
- 29) D. E. Aspnes and A. A. Studna: "Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV," Phys. Rev. B, **27** (1983) 985-1009.
- 30) Y. Gailyova, E. Schmidt and J. Humlicek: "Multiple-angle ellipsometry of Si-SiO₂ polycrystalline Si system," J. Opt. Soc. Am. A, **2** (1985) 723-726.
- 31) R. M. A. Azzam: "Theory, implementation and applications of AIDER (angle-of-incidence derivative ellipsometry and reflectometry)," J. Phys., **44**, C 10 (1983) 71-74.
- 32) A. Moritani and C. Hamaguchi: "High-speed ellipsometry of arsenic-implanted Si during cw laser annealing," Appl. Phys. Lett., **46** (1985) 746-748.
- 33) M. Erman and J. B. Theeten: "Analysis of ion implanted GaAs by spectroscopic ellipsometry," Surf. Sci., **135** (1983) 353-73.
- 34) Y. Takahashi, S. Sakai, M. Umeno and S. Hattori: "Ellipsometric studies of sputter-damaged layer in n-InP," Jpn. J. Appl. Phys., **21** (1982) 1689-1692.
- 35) M. Watanabe and P. Wissmann: "Dielectric constants of adsorbed CO on Cu and Ag," Surf. Sci., **138** (1984) 95-112.