

分光エリプソメータを用いた薄膜特性評価

○山下 彬宏^{a)}

^{a)}熊本大学 研究開発戦略本部 技術部門

1.はじめに

近年、半導体デバイスの微細化や多層膜化が急速に進行している。プロセスの微細化に伴い、膜厚は原子層レベル（サブナノメートルサイズ）まで極薄化しており、高度な成膜技術が導入されている。そのため、ナノメートル領域における薄膜の膜厚（ d ）や、屈折率（ n ）、消衰係数（ k ）といった光学定数の精密制御は、電気特性や製品の歩留まりを左右する極めて重要な要素である。

薄膜における膜厚や光学定数といった特性評価をインラインで正確に測定・監視するため、分光エリプソメトリー（Spectroscopic Ellipsometry：SE、図 1）といった高精度な非破壊計測技術が不可欠となっている。SE は、反射光の偏光変化を広範な波長領域（近赤外-可視-紫外領域）で解析し、膜厚や光学定数といった薄膜特性を非破壊・非接触で高精度に評価できる技術である。そのため、最先端材料の研究開発から、工場の製造ラインにおける品質管理にいたるまで、幅広く活用されている。

本稿では、同装置を用いて Si 基板上に成膜された膜厚の異なる SiO_2 薄膜の測定および解析に取り組んだ。近年の製造プロセス高度化に伴い、異なる膜厚における解析の適用限界や精度を把握することは極めて重要である。そこで、数ナノメートルサイズの極薄膜から数百ナノメートルサイズの厚膜に至る種々の膜厚領域において薄膜特性を評価し、比較した。得られた測定データに対して適切な光学モデルに基づくフィッティング解析を行うことで、各膜厚領域における薄膜特性を高精度に導出した結果について報告する。

2.実験方法および解析手順

2.1.測定条件および試料

分光エリプソメータ（UVISEL Plus, 堀場製作所製、図 2）を用い、Si 基板上に膜厚の異なる SiO_2 が成膜された 4 種類の薄膜試料（膜厚：2.5, 25, 100, 300 nm）を測定した。測定条件は、入射角を 70° とし、波長範囲 190–2100 nm（光エネルギー：0.6–6.5 eV、近赤外-可視-紫外領域）で分光スペクトルを取得した。

2.2.光学モデル作成およびフィッティング解析

解析の初期ステップとして、想定される試料構造 Si 基板/ SiO_2 薄膜をソフトウェア上で定義し、各層における d , n , k の初期値を仮定して理論的な振幅比角（ ψ , プサイ）および位相差（ Δ , デルタ）を計算した。次に、実測されたスペクトルおよびモデルから得られた理論スペクトルを比較した。最小二乗法などのアルゴリズムを用いて、両者のズレが最も小さくなるようにモデルパラメータ d , n , k を自動的に繰り返し最適化させた。この実測

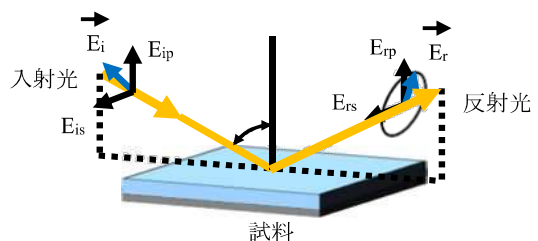


図 1 分光エリプソメトリー測定概要図



図 2 分光エリプソメータ（UVISEL Plus）

値と理論値の一致度（フィッティング精度）を評価する指標として、平均二乗誤差（ χ^2 、カイ二乗）を用いた。 χ^2 値がゼロに近づくほど、構築したモデルが実試料の物理構造を正しく反映していると判断できる。

3.測定・解析結果および考察

3.1.各膜厚におけるフィッティング精度評価

膜厚 2.5 nm および 300 nm におけるフィッティング解析によって導出された光学定数（ n , k ）スペクトルを図 3 に、測定およびフィッティング解析により得られた各試料の膜厚、波長 633 nm における屈折率（ n ）、および平均二乗誤差（ χ^2 ）の値を表 1 にそれぞれ示す。いずれの薄膜においても膜厚に対して妥当な値が得られており、幅広い膜厚サイズにおいて、高精度に測定・フィッティング解析できることを確認した。

3.2.各膜厚領域における考察

①極薄膜（膜厚：2.5 nm）

結晶 Si（c-Si）基板は、紫外領域（波長範囲 200-400 nm）に大きな光学遷移ピーク 2 点を有する。具体的には、①E2 遷移（約 290 nm，光エネルギー：約 4.3 eV）および②E1 遷移（約 370 nm，光エネルギー：約 3.4 eV）である。このように、超薄膜評価における紫外領域のスペクトルデータは、ピークの鋭さから基板表面の結晶性や加工損傷を評価できることがわかる。また、表 1 より、 $\chi^2=0.181$ という極めて低い値を示しており、ナノメートルサイズの超薄膜に対しても高精度にフィッティングできていることを確認した。

②厚膜（膜厚：300 nm）

厚膜試料（膜厚：300 nm）では、膜内での干渉の次数が増加し、スペクトル上に複数の振動パターンの連続（フリンジ）が確認された。表 1 より、膜厚が 100 nm から 300 nm と厚くなるにつれて χ^2 値が上昇する（フィッティングのズレが大きくなる）傾向が見られる。これは、膜厚が厚くなることで膜内での光の多重反射の影響が複雑化することや、膜厚自体の不均一性、あるいはわずかな消衰係数（ k ）値の変動が影響を及ぼすためだと考えられる。

4.結言

分光エリプソメトリーを用い、Si 基板上に成膜された膜厚の異なる SiO₂ 薄膜 4 種類を共通の光学モデルをベースに高精度に評価した。極薄膜（2.5 nm）における下地（Si 基板）由来のピークおよび厚膜（300 nm）における多重干渉解析の妥当性を確認し、本手法が薄膜特性評価において非常に有用なツールであることを改めて示した。今後は、より高度な多層モデルを適用することでさらなる解析精度の向上を目指す。

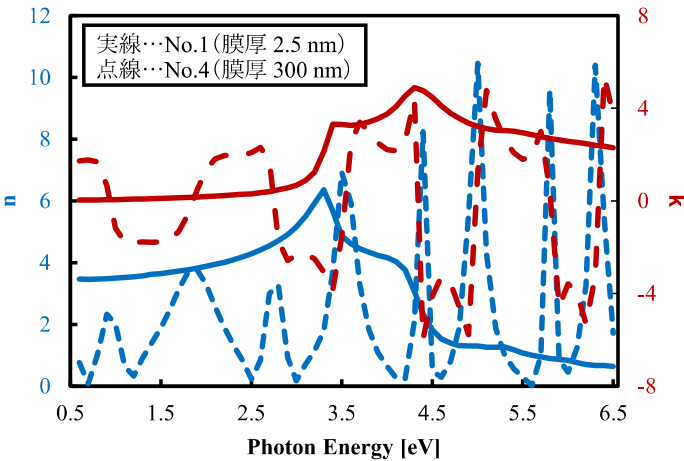


図 3 フィッティング解析によって導出された光学定数（ n , k ）スペクトル

表 1 Si 基板/SiO₂ 薄膜測定・解析結果

No.	膜厚 [nm]	屈折率（ n ） （633 nm）	平均二乗誤差 （ χ^2 ）
1	2.54	1.457	0.181
2	25.00	1.495	0.151
3	102.16	1.462	0.862
4	300.31	1.457	5.137