

Feature Article

特集論文

50周年記念製品

全自動超薄膜計測システム UT-300シリーズ

片西 章浩



【開発に携わったメンバー】

後列左から

片西 章浩, 飯田 裕, 鉤 正章,
谷口 平八郎, 澤 弘義, 阿部 将

前列左から

中嶋 嘉之, 萩原 孝志, 和田 等,
濱田 基明, 藤井 史高

半導体デバイスはDRAMを始め目覚ましい技術発展を遂げているが、その技術発展には、新規薄膜材料の開発、薄膜化、多層化が不可欠となっている。また、その生産ラインでは、薄膜の情報を正確に測定することが生産性向上の重要な要素として多くの生産工程の中に薄膜計測の工程が組み込まれている。本稿では、半導体薄膜の膜厚、屈折率、消衰係数などの光学定数を全自動で測定する全自動超薄膜計測システムUT-300について説明する。特に薄膜計測への要求として微小エリア内での正確な測定があげられるが、従来のUT-300の光学系を改良し微小エリアの測定可能なUT-300Hを中心に紹介する。

はじめに

薄膜の膜厚や屈折率などの光学定数などの情報を測定する手段は数多くあるが、その中でも分光エリプソメータは非破壊で薄膜の膜厚や屈折率などの光学定数を正確に算出することができ、多くの薄膜計測技術の中でも特に注目されている。HORIBA Jobin Yvon社が研究・開発用に開発した分光エリプソメータUVISELは、多くのお客様に使用していただき半導体の研究・開発分野で貢献している。また、半導体製造ラインでは、自動もしくは手動でカセットステーションに測定するウエハの入っているカセットを設置し、測定条件などをあらかじめ設定しているレシピを実行するだけでカ

セットからウエハを取り出し、測定しカセットに返却(C to C)する必要がある。更に、測定したデータをお客様のHOSTコンピュータに転送し、データを管理し、生産性の向上を図る必要がある。HORIBAでは、従来より半導体プロセスにおける自動ハンドリングシステムや工場内のデータ通信技術を培ってきた。これらのHORIBAグループの技術を融合し、半導体製造ラインでの薄膜計測のニーズに応えるため全自動超薄膜計測システムUT-300(図1)を開発した。デバイスの生産性を向上するためにはダミーウエハではなく実サンプルを直接測定する必要があり、そのためにはUT-300が微小エリア内で測定できることが強く求められている。



図1 全自動超薄膜計測システムUT-300

分光エリプソメータの原理

分光エリプソメータは光反射による偏光状態の変化を測定する装置である。これは同一光路にある2つの振動成分を使う干渉法より、精度・感度共に優れており、近年、半導体から有機薄膜の評価まで広く利用されている。

エリプソメータはp, s 偏光をサンプルに照射し、光反射による偏光状態の変化から、膜厚や光学定数などを測定する。光の偏光状態は直行する2つの座標軸を伝播する波の重ね合わせから示される。図2に示す通り、エリプソメータの測定では入射光及び反射光の偏光状態をp, s 偏光の座標を用いて表す。入射光は、p, s 偏光の座標から45度傾いた直線偏光である。入射光をサンプルに照射するとp, s 偏光のそれぞれの振幅及び位相差が変化し、一般に楕円偏光となる。エリプソメータでは、反射p, s 偏光の位相差及び振幅比を角度で表した (p, s 偏光の位相差), (p, s 偏光の振幅比) の2つの値を測定する。サンプルの構造が理想的な場合には、エリプソメータから得られる(,)の2つの測定値から、サンプルの屈折率nと消衰係数kの2つの値を求めることができる。更に、分光エリプソメータは多波長測定であるため、 $d \mu(\lambda) k(\lambda) = f(\lambda, \lambda)$ の関係になり膜厚d及び光学定数n, kを同時に求めることができる。

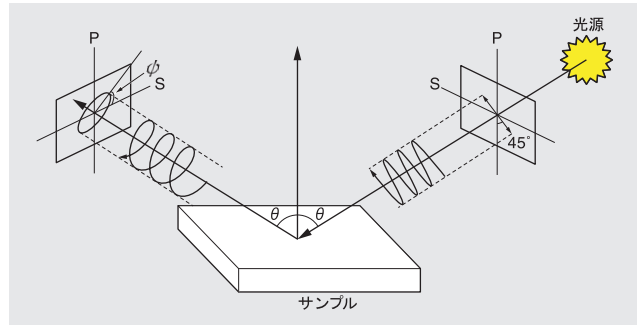


図2 エリプソメータの原理

入射角・立体角の検討

薄膜計測のニーズとして微小エリア内での測定が重要な要素としてあげられるが、分光エリプソメータで精度よく測定結果を得るためには、図2に示す通り入射光をサンプルに照射する角度(以下、入射角)とサンプルに照射する集光ビームの立体角(以下、立体角)が光学的に重要である。一般に分光エリプソメータの測定における入射角はブリュスター角^{*1}に設定される。我々は半導体デバイスの母材であるシリコンウエハのブリュスター角が76.1度であることと、各種サンプルの解析を考慮に入れ入射角を75度と設定した。しかし、75度で光束を入射するとサンプル上では長軸方向ではスポットサイズが約4倍になるため、目標のスポットサイズを得るためにはビームを1/4に絞らなければならない。また、ビームをサンプル上で絞るためには立体角を大きくすることでビームを絞ることが一般的だが、分光エリプソメータの測定においては、先に述べたように入射角も解析の大きな要素であるため、立体角を大きくすると入射角の情報に正確性を欠くため正確に測定することが困難になる。そこで我々は入射角を75度、立体角を1.6度に維持して効率的にサンプル上のスポットを小さくできる光学系を検討した。

*1: 試料表面で光が反射する時、p偏光に対する反射率がゼロになる入射角。

光学設計

スポットをより小さく絞るためには集光ミラーとして放物面鏡を使用することが一般的だが、その放物面鏡の加工精度がスポットサイズに影響することは言うまでもない。我々は機械加工法と研磨法によるミラーの製作を検討したが、研磨法ではミラーの形状精度が機械加工法より悪いため機械加工法で製作したミラーを使用することにした。しかし、機械加工法で製作したミラーはグレーティングのようなツールマークを生じ(図3(a))、その結果図3(b)のように光が回折しサンプル上で複数のスポットが生じた。この影響を極力少なくするため、加工方法や材料などを考慮に入れ慎重にミラーを選定した。

また、偏光状態の変化を測定する分光エリブソメータは、直線偏光をサンプルに照射する必要があるため、集光ミラーとサンプルの間に偏光プリズムを入れなければならない。それが色収差となりビームを絞るための課題となった。偏光プリズムはその構造からレンズ形状にすることができず、色収差を除去することが不可能であるため、色収差を考慮に入れスポットサイズを検討しなければならない。

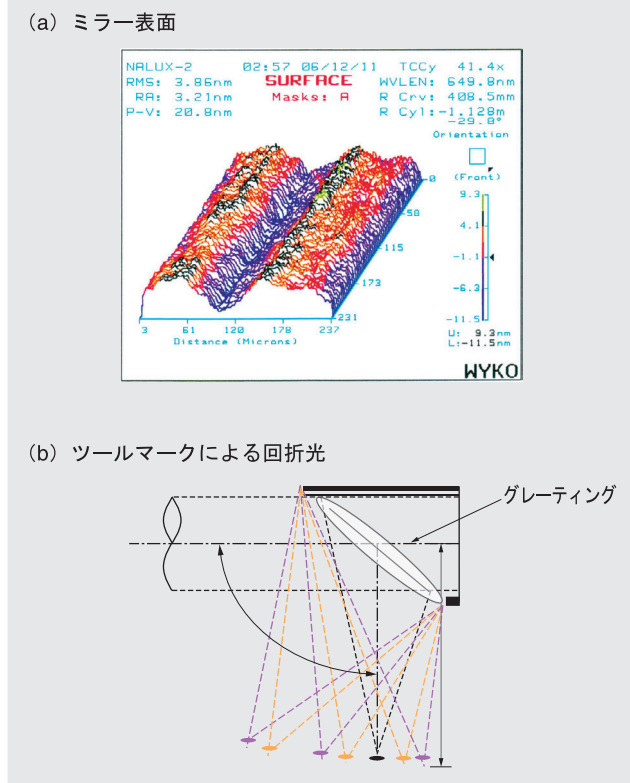


図3 ミラー表面とツールマークによる回折光

多くの課題の中でより効率よくビームを絞るために光学シュミレーション(図4(a))を実施し、効率よくビームを絞る光学配置を検討した。シュミレーション時にスポットダイアグラム(図4(b))及び点像強度分布(図4(c))を合わせて計算し、偏光プリズムがない状態で像サイズが約30 μm になると予想した。これを75度で入射することにより長軸側のサイズが約120 μm となることが予想できる。ツールマークや色収差の影響を考慮に入れても、目標の200 μm \times 400 μm を達成できると考え設計を進めた。

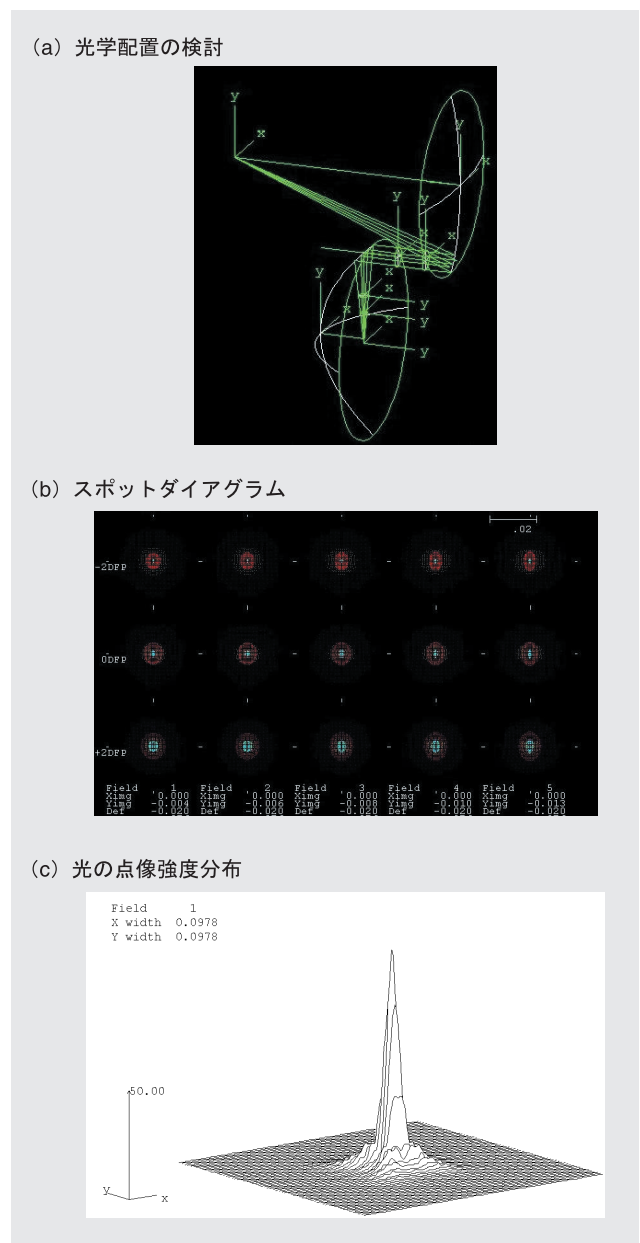


図4 光学シュミレーション

マイクロスポットの評価

光学設計 部品選定が完了し、最後にマイクロスポットの大きさをどのようにして評価をするかが重要である。光は効率よく絞っても完全に絞ることは困難である。また、分光エリプソメータは先に述べたようにサンプルに照射した光の偏光の変化によって光学特性を解析する装置であるため、測定エリア外の材質が偏光の状態に大きく影響を与えるものであれば少しの光量でも測定結果には大きく影響を与える。一般的に光の強度分布は中央部が強く徐々に弱くなり(ガウス分布)、スポット径は光の強さが最大のところの1/e (約13%)までと定義することが多いが、約13%他の材質の情報が混在すると正確に解析することが困難になる。そこで、我々はステップテストという評価方法を用い、より測定結果に近い方法でスポットサイズを評価した。ステップテストとは、2種類の大きく材質の異なる膜が成膜されたサンプルを準備し、微小ステップ送りでステージを移動し分光エリプソメータで測定したスペクトルの変化量を測定する手法で、各波長毎の変化を同時に測定できるため色収差などの波長によるスポットサイズの違いも見ることができる。また、分光エリプソメータで測定したスペクトルにて直接評価するため、解析による影響も含めて評価することが可能である(図5)。ステップテストではスペクトルの平均値の±2%を閾値としてそこから信号が変化するのに要するステージの移動量をスポットサイズとした。我々はステップテストにてスポットサイズ 115 μm × 150 μm(図6)の結果を得ることができ、目標の200 μm × 400 μmのエリア内で精度よく測定できることを確認した。

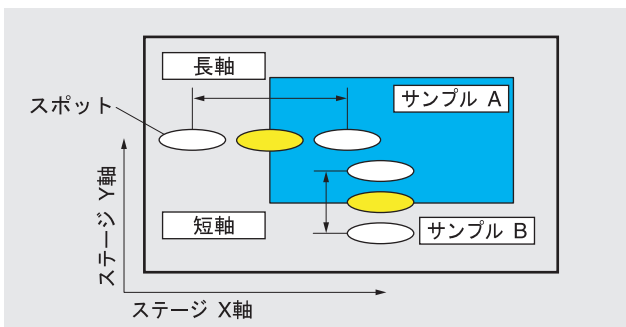


図5 ステップテスト概念図

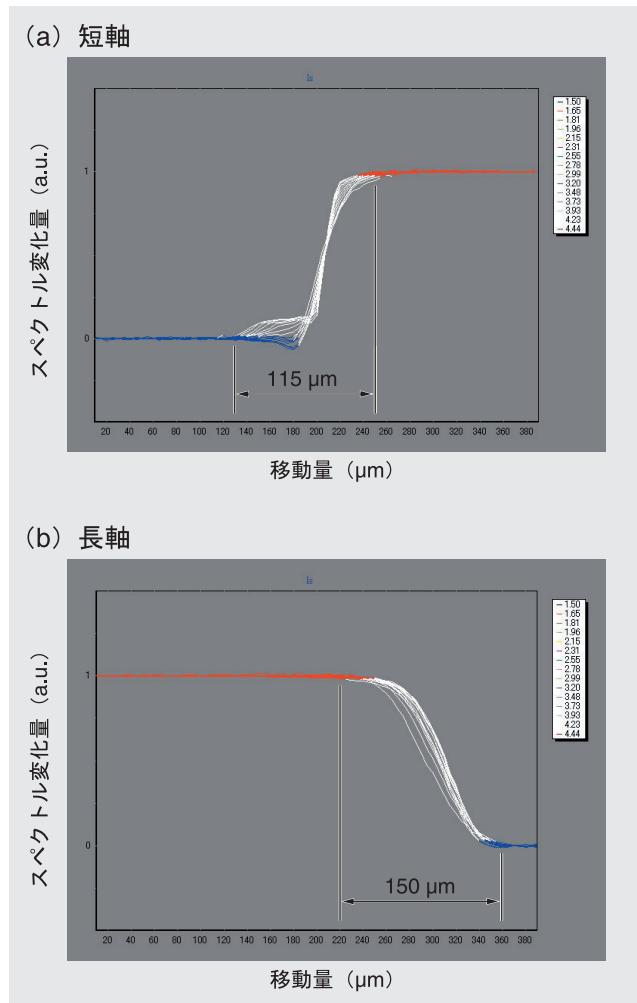


図6 ステップテスト結果

おわりに

今後も半導体デバイスの技術は発展を続け、全自動計測へのニーズは更に拡大すると考えている。測定エリアの微小化が進む中で分光エリプソメータについては、更に微小エリアを測定できるよう検討し、現段階でより微小スポットのデモ機も完成している。あわせて品質、性能の向上に取り組んでいる。また、HORIBAグループの多くの計測技術を駆使し、UT-300で培ってきた全自動化の技術と融合した装置を開発し、お客様のニーズに応えていきたいと考えている。

参考文献

- [1] 永井, N.BLAYO, 平川他, 全自動超薄膜計測システムUT-300, Readout 21, 17-30(2000)
- [2] 藤原裕之, 分光エリプソメトリ(丸善, 2003)