

Polarization on the Prairie~ネブラスカでのエリプソメトリーの歴史~ Ron Synowicki



『ネブラスカ州リンカーン市にある光学先端技術って何?』という質問をよく耳にします。確かにネブラスカ州は光学よりもアメリカンフットボールとかステーキのほうがずっと有名です。でも、ネブラスカ大学リンカーン校 (UNL) と J.A.Woollam 社でのエリプソメトリーの歴史は古く、興味深いのです。

1961 1981 年 : 最初の 20 年間

1956 年、Nick Bashara 教授はネブラスカ大学リンカーン校の Ferguson ホールの地下に電子材料研究室を設立しました。彼の主な研究対象は薄膜中の多孔質に関する研究でした。

このような細孔は材料密度と膜の誘電率を下げるので、半導体デバイスの不良の原因となります。低い誘電率は光学波長上で低い屈折率として現れます。屈折率のモニタリングで堆積膜の性質を決定することは可能でしたが、正確に屈折率を決定するには正確な膜厚情報が必要としました。Bashara 教授は薄膜の屈折率と膜厚を同時に計測するにはエリプソメトリーが最も適していることに気づき、1961 年、エリプソメトリー研究が電子材料研究室で始まりました。Bashara 教授のエリプソメーターはほぼ手作り、時には Gaertner 社や Rudolph 社製エリプソメーターのシステムも使用していました。

1960 年、1970 年代に Bashara 教授と彼の生徒達は 85 の論文を科学ジャーナルに掲載し、生徒達はネブラスカ大学の修士号と博士号を取得しました。Bashara 教授と生徒達は、これらの誘電体膜の研究に加えて、ス

パツタリングによる洗浄やイオン注入表層処理がシリコンウェハの表面に与えるダメージの過程やデータ解析の中で無視できる程の膜の吸収と測定エラーとの関係についてもエリプソメトリーで研究しました。

1967 年、Rasheed Azzam 氏は、ネブラスカ大学大学院に入学し、Bashar 教授の指導のもとで博士号を取得しました。彼の研究は、一般化エリプソメトリー理論を更に発展させ、同時にエリプソメーターの製造開発や解析技術の向上にも貢献しました。1960 年、1970 年代の Azzam 氏と Bashara 教授の共同研究により、彼らの共同著書である『Ellipsometry and Polarized Light』(1977 年初版) が出版されました。これがエリプソメトリーを題材にした最初の英語による参考書であり、現在のエリプソメトリー研究の基礎になっています。現在の研究者達も、この文献をエリプソメトリーのバイブルとして使用しています。更に Azzam 氏と Bashara 教授は、1968 年と 1975 年に開催された第二、三回国際エリプソメトリー会議のホスト役も勤めました。

1981 2001 年 : 次の 20 年間

1981 年にネブラスカ大学エリプソメトリー研究室で大人事異動が起きました。Azzam 教授はリンカーンを去り、ニューオーリンズ大学へ移りました。彼は現在もそこで教授として研究に従事しています。Bashara 氏は 1981 年に定年退職し、長いエリプソメトリーの歴史と、多くのエリプソメトリーのハードウェアと共に大学を去りました。そして大学には新たなエリプソメトリーのリーダーが必要となりました。

John Woollam 氏はクリーブランド州 NASA-Lewis 研究センターでの 13 年間の勤務の後、1979 年にネブラスカ大学に赴任しました。1981 年に Woollam 氏は Azzam 氏と Bashara 氏のエリプソメトリーの研究を引き継いだので、この赴任はちょうど良いタイミングでした。

この頃から UNL のエリプソメトリー研究は、多くの優秀な研究者達によって、大変目覚しく発展していきました。George Bu-Abbud 氏は Bashara 教授のもとでエリプソメトリーの研究をより容易にする為、エリプソメ

ーターのハードウェアを自動化にして、博士号を取得しました。このハードウェアはデータ解析ソフトの向上により、更に進歩しました。Marty Rost氏は古いMcCrackinコードを使って、初期型DECコンピュータで動作するようにソフトウェアを改良しました。彼のソフトウェアの進歩は、後に3D感度グラフの開発に貢献しました。アプリケーションに関しては、Samuel Alterovitz博士が1980年代初頭から半導体に関する研究を行いました。彼は現在、NASAで分光エリプソメトリーのアプリケーション研究を続けています。

Paul Snyder氏もポスドクとして1985年から半導体アプリケーションに焦点を当てて研究を行い(後に教授となりました)、彼のAlloy-Shiftingアルゴリズムは今もなお、エリプソメトリーの解析において非常に重要な役割を果たしております。

新時代の研究者達は以前とは異なる研究対象を扱ってきました。Bashara教授時代は主に誘電体膜に関する研究を行いましたが、現在は主に半導体の電気特性に焦点を当てて研究を行っています。この研究には、エリプソメトリーのハードウェアと測定技術の更なる進歩を必要としました。

一波長、多入射角でデータを取得する事がBashara氏の測定方針であり、屈折率がゆっくり滑らかに変化する誘電性材料を測定するには、非常に適していました。しかし半導体は逆で、結晶材料の屈折率は材料中の電子遷移によって鋭いスペクトル特性を示し、このスペクトル特性の位置や形状は、材料の電気的特性を理解するのに非常に重要なので、測定するには、広いスペクトル領域上の分解能力の高い分光データといくつかの入射角のデータが一般的に必要となります。

1980年代、Bashara氏のエリプソメーターは波長が不連続な光源から白色光で波長可変のモノクロメーターに換えることでグレードアップされ、紫外域から近赤外域までの連続したスペクトルの範囲を測定可能となりました。これにより半導体材料研究にとって最適な装置となりました。こうして、大学で初めての分光エリプソメーターが生まれました。

分光エリプソメーターのシステムは、Bashara氏の

測定方針である多入射角の性能を持っていて、多入射角と完全分光を同時に併せ持つエリプソメーター製品となりました。一つの機器で両方の性能を併せ持つことは、研究を柔軟に進める上で理想でした。つまり、誘電体、半導体、金属やこれらのどの組み合わせに対しても柔軟に対応できるようになりました。ちなみに、このVASE®という言葉の由来は『Variable Angle Spectroscopic Ellipsometer system』からきた造語です。

VASE®のこの新しい性能は、各分野のエリプソメトリー研究の範囲を開拓、拡大するのに大きく貢献しました。例えば、今日よく使われている発光ダイオードやレーザーダイオードのようなGaAs、InPとこれらの混合材といった化合物半導体の材料に関する研究や、データストレージ用の磁気光学物質の研究に加えて太陽電池の研究もされました。他の新しい研究分野においては、フラットパネルディスプレイ上の透明な導電酸化膜、ダイヤモンドライクカーボンの硬質コーティング、宇宙船などに使用される耐酸化コーティング、更にはシリコンマイクロチップ用の全ての膜種に関する研究もされました。最近の大学の研究ではエレクトロクロミックやフォトクロミックの層やデバイス、そして生物学や医学のアプリケーションに対する薄膜なども研究されています。

分光エリプソメトリーは、薄膜蒸着やエッチングのモニタリングと制御にも使用されました。In-situ エリプソメトリーは文字通り真空チャンバーが付けられているので、一つの固定入射角のみが有効となります。このプロセスは一つの入射角という制約はあるけれど、分光データが複数波長データよりも多くの情報を提供することができるアプリケーションであります。

分光データは多入射角で計測されますが、多くのデータポイントの収集と同時に解析する必要がありました。毎回、数百ものデータポイントの取得と、データ解析による膨大で複雑な計算を行うには自動化が必要で、これが大きな課題となりました。しかし、1980年代というのは、装置の制御と数値計算の両方にパーソナルコンピュータを導入していった時代であった為、幸運にもこの問題を解決することが出来ました。

1990年代の大学での優れた研究は、Craig Herzinger氏、Bill McGahan氏、Ping He氏、Tom Tiwald氏、Dan Thompson氏などをはじめとした多くの生徒達と共に進められていきました。Mathias Schubert氏は、初めは生徒として、後にビジターとしてLeipzig大学から来校し、一般化エリプソメトリーの更なる発展に貢献しました。彼と彼の仲間達は赤外域における化合物半導体に関する研究にも従事していました。

UNLでは物理学、化学、電気工学、機械工学などの理工学分野における今日の材料研究に関して、エリプソメトリーは急速に普及し、積極的に使用されています。

1987年：J.A.Woollam社の設立

エリプソメトリーのハードウェアとソフトウェアをパソコンに統合することで、VASE®エリプソメーターは柔軟性の高い測定機器になると同時に立派な商品になりました。UNLエリプソメトリー研究室の来訪者が自身の研究室に是非VASE®を導入したいと申し出てきました。大学でのエリプソメトリーが教育、研究的にも発展していく中、エリプソメーター市場のニーズに対応するための独立した会社が必要になってきた為、1987年、世界中の研究者に最も信頼され柔軟性のある研究用エリプソメーターを提供するべく、J.A.Woollam社が設立されました。

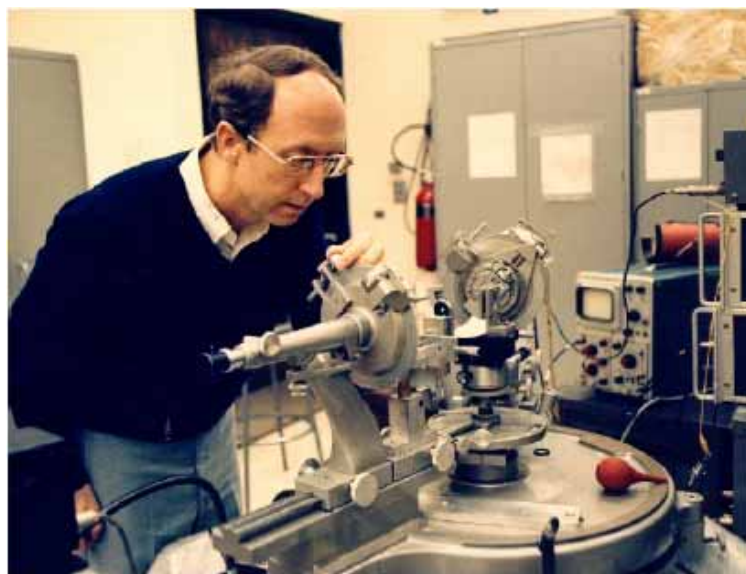
商品用の装置を製造する事は、一種の研究室用の装置を強力かつ信頼性があり、かつ客先で修理可能なものに関与する必要があります。これは研究分野で高い評価をもつVASE®でさえも技術的な面で莫大な仕事量になりました。商品として優れたエリプソメーターを開発し続ける為に、UNLの卒業生を雇用しました。Blaine Johns氏は1989年に入社し、ゼロからデータ取得と解析の両方が可能なソフトウェア(WVASE32)を作り上げました。このソフトウェアは、洗練された性能で世界をリードする為に、スピーディに進化し続けています。同時にオリジナルのVASE®技術も常に向上しており、最初のダイオードアレイ使用の装置も、元々はIn-situ分光エリプソメトリーで必要であった為、開発されたものでした。

『There is no stopping an idea whose time has come. (新しいアイディアは尽きることがない)』という古い言葉があります。このVASE®エリプソメーターはまさにこれを証明しています。Woollam社は当初、少数の各研究者一人一人に対してエリプソメーターを提供する為の小さい独立会社として設立されました。しかし、1990年代初めまでに、時代は分光エリプソメトリーを必要とし、分光エリプソメーターは商用電子デバイスや他の多くのアプリケーションにとって不可欠な存在になりました。

J.A.Woollam社は現在14年目に入り、44人の従業員と世界各国に販売サポート拠点を持つほどの企業に成長しました。現在、600台を超える分光エリプソメーターが世界各国に設置されています。

明るい未来に向かって

John Woollam氏はエリプソメトリーに従事始めて今年で20周年であり、ネブラスカ大学においては今年で50年もの歴史が経過しました。我々が培ったこのような強力なバックグラウンドとこれからの明るい展望があれば、我々のネブラスカでのエリプソメトリーは、今後20年も確実にすばらしいものとなるであろう。



初期型UNLエリプソメーターを使用している
John Woollam氏