

精密工学第3講座（科学機器）



研究室紹介

片岡俊彦*

1. はじめに

本研究室は、1939年精密工学科の創設とともに、創始者である田中晋輔先生の担当のもとに第2講座として発足した。その後、1948年には第2講座は第6講座に名称変更し、1963年には、従来の精密工学科が改組拡充され、新しく精密工学科と応用物理学科が発出したのを機に新精密工学科第3講座（科学機器）としてスタートした。現在、教授・片岡俊彦、助教授・東健策、助手・遠藤勝義、教務員・井上晴行というスタッフと、企業からの研究生を含む11名の学生が、新しい科学機器の開発と研究に取り組んでいる。

精密工学科は、創設以来、材料、加工、計測のそれぞれの分野で、“精密さ”と“極限”を目指して研究を進めてきている。その中で、本研究室は、計測に使われる新しい科学機器の開発と、それをを用いた広い意味での材料物性の測定に関する研究を中心に行なっている。その場合、計測に利用する物理現象また測定対象となる物性を原子・電子のレベルから理解し、物理現象の利用できる限界を学問的根拠に基づいて見極め、工学的に応用することを常に心掛けている。現在、光を用いた計測に力を注いでおり、光を極限まで利用することによって、どこまで微小な形状の測定、その他種々の物性値の測定が可能かという限界に挑戦している。測定対象は、半導体デバイスを中心としたエレクトロニ



*Toshihiko KATAOKA
1945年10月7日生
1968年大阪大学工学部精密工学科卒業、1973年博士課程修了
現在、大阪大学工学部精密工学科、教授、工学博士、光計測、光物性、結晶格子欠陥、TEL 06-877-5111

クス等の分野で要求の高い超精密加工表面の形状ならびに表面物性である。また、材料の機械的性質を支配している結晶欠陥の挙動も観察している。

以下、現在の研究室での研究テーマの内容を説明することで研究室の紹介としたい。

2. 研究テーマ

本研究室の研究テーマを測定対象で大きく分けると、加工表面、結晶欠陥、プラズマの三つになる。そして、測定対象と測定する科学機器の関連を図1に示す。たとえば、加工表面の中では、絶縁体と半導体に分けられ、それぞれの具体的な測定対象物は光学素子とSiウェーハであり、さらに、加工表面の性質としては表面の幾何学的構造（表面あらさ）と電子構造に分けられる。以下に、図1に従って個々の研究テーマについて説明する。

2.1 走査型近接場光学顕微鏡（Scanning Near-field Optical Microscopy: SNOM）の開発

近年、超LSI等の高集積化や微細加工技術

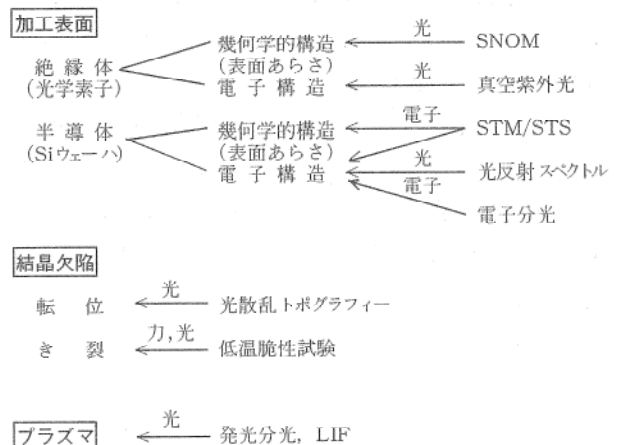


図1 研究テーマと測定対象の関連

の進展にともない、エキシマレーザーやシンクロトロン放射光に代表される光源の高出力・短波長化が進んで来た。同時に、それらの光源で使用される光学素子や超LSIの基板となる半導体ウェーハの加工表面あらさの要求精度も、ナノメートルオーダーにまで高まり、いくつかの超精密加工法ではその要求を満たしつつある。しかしながら、現存の触針式表面あらさ測定器の分解能は、縦0.1nm、横0.1 μm 程度であり、また被測定面にスクラッチ等を残すという問題もあり、加工表面あらさを空間分解能としてナノメートルオーダーで測定するに到っていない。また、位相干渉法やヘテロダイン干渉法を利用した光学的な表面あらさ測定法でも、縦分解能は0.2nm程度はあるが、光の回折限界から横分解能は1 μm 程度でしかない。ところで、最近ナノメートルオーダーの表面あらさを測定できる方法として、走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscopy:STM) が注目されているが、STMでは、原理上半導体の観察はその表面の酸化層のため特殊な場合にのみ可能で、さらに光学素子のほとんどがそうである絶縁体においては観察不可能である。そのため、STMに代わり、半導体や絶縁体の超精密加工された実用表面の幾何学的微細構造をナノメートルオーダーの空間分解能で観察する方法の開発が急務となっている。

本研究の目的は、近接場と呼ばれる領域での光の特殊な振舞いを利用し、光の回折限界を越えるナノメートルオーダーの分解能を持つ走査型近接場光学顕微鏡 (Scanning Near-field Optical Microscopy:SNOM) を開発し、半導体や絶縁体の超精密加工表面の評価を行なうことである。SNOMは走査型プローブ顕微鏡の一種であり、プローブである光の波長よりも小さいサイズの光学探針の周りに消滅波 (evanescent wave) を形成させ、それと物質との相互作用を利用するものである。しかしながら、近接場における光の挙動は完全には解明されておらず、SNOMの原理に関しても未知な部分が多々残されている。したがって、SNOMを開発することは、その原理を明らかにして行くだけでなく、近接場という特殊な領域での新しい光学の

分野を開くことにもつながる。そして、この方法でSiウェーハや光学素子の超精密加工表面をナノメートルオーダーで観察することによって、その加工法の特徴を明らかにするとともに、加工法の改善を図り、さらなる精度の向上を目指すものである。現在、試作したSNOMにより、縦1nm、横10nm以上の分解能が可能であるという結論を得ており、光を用いた測定方法の分解能が回折限界によって制限されるという従来の概念を破り、新しい光学の分野を期待させる。

2.2 走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunneling Microscope:STM) による超精密加工表面の観察

STMは、IBMのBinnig等によって開発されたもので、縦0.01nm、横0.1nm以上の分解能で表面の形状および電子構造を測定できる装置である。すでに、一部の材料では、原子の凹凸を検出しており、超精密加工表面の微細構造の観察には、有力な武器と成り得る。その原理は、以下のように説明される。物質の表面に外部から高電界を与えると、表面近くに存在する電子のポテンシャルが増加し、材料内の束縛を破って電子が飛出して来る。この現象は、量子力学的トンネリング効果によって説明でき、このときの電子放出特性には、物質表面の電子構造の情報が含まれている。STMは、この現象を利用し、試料表面に電界をかけ電子放出を起こさせるための電極をチップ状にすることにより空間分解能を原子オーダーにまでしている。

本研究室では、サブナノメートルの空間分解能を持つSTMを製作し、超精密加工表面の原子レベルの形状および電子構造の測定を行なっている。これまで、現在触針式のあらさ計の最高峰といわれているタリストテップ (最高分解能0.5nm) でも、その差が明らかにされなかった超精密加工表面の微細構造の違いを観察し、その評価を行なっている。また、それらの加工機構の解明に役立っている。今後、超精密加工表面の電子状態の評価法 (トンネルスペクトロスコピー) として確立するべく、測定される放出電流と目的の物理量とを関係づけるための理論解析も進めている。

2.3 光反射率スペクトルによる超精密加工表面の評価

現在の最先端の超精密加工法により仕上げられたSiウェーハ等の表面は、従来の観察法（表面あらさ測定、電子線回折法、X線トポグラフィ法等）による結果では、それらの分解能において、幾何学的にも、結晶学的にも優れた鏡面になっている。このような完全であると思われる表面でも、極表面層の格子欠陥や不純物によって、結晶学的な乱れや、電子状態の乱れがあると考えられ、それらを測定するためには、分解能の高い測定法が必要である。しかし、既存の表面分析法では、結晶の完全性、格子欠陥の分布状態を高い精度で測定できる方法はまだ開発されていない。

そこで、光反射率が極表面層の格子欠陥の存在による電子構造の乱れに依存することを利用して、光反射率スペクトル測定により極表面の結晶学的評価を行なっている。また、表面に欠陥が存在することで、反射率スペクトルがどのように変化するかを、電子論的立場から理論的に解析している。現在、真空中で雰囲気安定させ反射率を0.01%の精度で測定する装置を開発し、従来の評価法では検出できなかった各種超精密加工表面の違いを反射率スペクトルの差として検出できている。さらに、反射率を0.001%の精度で測定可能な装置を開発し、表面欠陥の定量的評価をしようと試みている。

2.4 真空紫外光による絶縁体加工表面の評価

近年、エキシマレーザー等の出現により短波長、高エネルギー密度の光源が得られるようになってきたが、光学素子の表面欠陥による吸収により、性能の劣化や、光学素子の破壊が起こり、問題となっている。したがって、加工により導入される光学素子の表面欠陥を減らす必要がある。しかし、光学素子の材料は一般的にバンドギャップが大きく電気伝導性がないため、表面欠陥の検出は困難であり、加工表面の評価方法はほとんど無いのが現状である。

そこで、本研究では、絶縁体の超精密加工表面の欠陥を、極表面での真空紫外光の表面光起電力スペクトルから評価する方法を開発しようとしている。加工表面、特に機能材料の加工表

面を評価する場合、評価対象となる物理量は表面電子構造である。一般に、半導体や絶縁体の表面は、正または負の電荷を持つと、その結果として、広い意味での表面準位を反映して表面電位が生じる。このような状態で表面に光を入射すると、表面電位を打ち消そうとするような起電力が生じ表面電位が変化する。これが表面光起電力と呼ばれるものであり、加工などによる表面層の電子構造の乱れを反映している。そして、この表面光起電力スペクトルを利用して、現在問題となっている光学素子の超精密加工法による表面電子構造の乱れの差を明らかにする。

2.5 高分解能電子分光装置の開発

本研究の目的は、表面の分析に用いられるオージェ電子分光や表面電子構造を知るための光電子分光等における電子エネルギーの測定を従来の方法より高い分解能で行なえる阻止電位型電子分光装置を開発することである。従来の電子分光装置の分解能は、測定対象となる電子のエネルギーの0.2~0.6%程度であり、ここでは、0.01%オーダの分解能を目指している。現在、阻止電位を与える電極の形状と電子エネルギーの分解能の関係をコンピュータシミュレーションによって明らかにし、その結果、電極の形状を最適化することによって、電子のエネルギー分解能 $\Delta E/E=0.02\%$ が可能であることを示している。

2.6 光散乱トポグラフィーによる転位の観察

従来、運動転位の直接観察は、電子顕微鏡やX線トポグラフィーによって行なわれてきた。電子顕微鏡観察では、高い倍率と分解能が得られるという利点があるものの、電子線の透過能の悪さから試験片は薄片に限られている。一方、X線トポグラフィーでは、そのような観察も可能であるが、転位の動的挙動を見るためには強力なX線源が必要となる。また、X線に対するレンズが得られないため分解能が上がらないという欠点を有している。

これらの欠点を補うために可視光を用いた新しい観察手段を考案した。その原理は、転位のひずみ場により光が散乱されることを利用したものである。転位の周りのひずみ場の大きさは屈折率変化に直して 10^{-5} 程度であるからその

散乱は非常に弱いものになる。したがって、転位の動的挙動を観察・記録するためには強力な光源と、高感度な受光装置が必要である。その条件を満たすために、光源には出力2Wのアルゴンイオンレーザーを、受光部にはイメージンテンシファイヤーを用いたトポグラフィ装置を試作し、その結果、KCl単結晶中の転位運動の観察に世界で初めて成功した。現在では、さらにき裂先端近傍の転位の生成および運動を観察するために、共焦点顕微法を利用した光散乱トポグラフィを開発し、き裂近傍から放出された転位を観察することにより破壊のメカニズムを明らかにしようとしている。

2.7 低温における脆性破壊のメカニズム

イオン結晶は低温にすると、鉄などの一般の材料とは異なり破壊靱性値が大きくなると言われている。本研究の目的は、そのようなイオン結晶の破壊メカニズムを低温で破壊靱性値を測定することによって明らかにすることである。

これまで、低温でのKCl単結晶の破壊靱性値の温度依存性をき裂先端近傍の複屈折像による応力場のその場観察を行ないながら測定し、その結果、KClの低温での破壊靱性値は上昇することがわかった。これは、き裂先端から生成した転位が低温になると動きにくくなることによって、転位による応力遮蔽効果が室温の時より大きくなり、破壊靱性値が上昇すると考えている。

2.8 高圧力プラズマ・ラジカルの計測

最近、高圧力のプラズマ・ラジカルが加工や成膜技術に応用されている。これらの技術を高品質なデバイスの開発に利用するには、加工お

よび成膜するために最適なプラズマ状態を見つけ、またそのプラズマ状態をモニターすることによって最適な状態を維持することが重要である。

本研究では、発光分光法、レーザー誘起蛍光法等を利用して、プラズマ中に生じた中間生成物の種類、寿命、密度を測定することによって最適なプラズマ状態を明らかにすることを試みている。

3. おわりに

さて、現在の日本の工業技術は、急速に進歩し世界のトップレベルに達した感がある。このような国際環境の中で今後さらに、日本が科学、工学の分野で世界の指導的な立場に立つためには、世界に貢献できるオリジナルな先端技術を創造する必要がある。そのためには、材料、加工、計測のそれぞれの分野で極限に近い原子・電子レベルの技術を目指すべきであり、それを実現するにはそれぞれの物理現象を原子・電子のレベルから理解することが肝要である。精密工学科では、このような思想のもとに、研究を行っており、講座の壁を超えた共同研究も進めている。特に、本研究室は、森研究室（精密工学第5講座、特殊加工）との共同研究に力を注いでいる。

最後に、大学の研究室とは自然科学はもちろん人間としての生き方、人生観を研究を通じて学べる修業の場であるという信念のもとに、次世代を担う若い人材の育成に務めていることを申し添えておきたい。