

原子スケールの加工技術と硬X線ナノビーム形成



研究室紹介

山内 和人*

Exploration of hard-X-ray nanobeam frontier with atomic-scale fabrication technology

Key Words : Ultraprecision machining, X-ray optics, Scanning fluorescence x-ray microscopy

1. まえがき

我々の研究室は、大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻の精密科学講座、超精密加工領域を担当している。研究室が現在の体制になって3年目である。研究室の看板である「超精密加工」には、その定義に、長い歴史と重みがある。自分が学生として研究に参加した25年前から、「原子サイズの正確さを加工プロセスにおいて目指すこと」である。最先端の研究領域において、今日でもそのまま通用する。物理的にも、これ以上（原子サイズを超える正確さ）は望めないのだからから、今後も変わり様がないだろう。ところで、「つくれないもの」はいつの時代にもある。そして、これを「つくる」ことによって、新たな科学技術が拓かれる。その結果、「つくりたいけれどもつくれないもの」が、また新たに生まれる。「つくる」と取えてひらがなで書いたが、「創る」でなくても良い。「作る」であっても十分に素晴らしい。我々は、「物づくり」のイノベーションによって、社会に、そして新しい科学技術に貢献したいと思っている。

教育の方針も、プロセスの研究と開発を主専門とし、それによって具現化される新しいデバイスや機器を必要とする分野との連携により、幅広い副専門分野を習得させたいと考えている。生命科学を始め、

多くの分野に深くかかわれることは、自分にとっても、この上ない幸せである。

ここでは、研究室紹介として、加工プロセスの研究・開発が、異分野連携研究へと発展した一例である「硬X線ナノビーム形成とX線顕微鏡システムの構築」について紹介したい。本研究では、新しいデバイスや機器として、硬X線ナノ集光ミラーと新しいナノ分解能X線顕微鏡が具現化した。

2. EEM加工表面

ミラー基板の最終加工に使うEEMのごく簡単な紹介から話を始めたい。EEMとは、固体表面間の化学反応を利用した表面創成プロセスである。酸化物微粒子（たとえば SiO_2 ）と加工物（例えばSi）表面が、水雰囲気中で、流れによって適度な運動エネルギーを得ながら接触すると、微粒子と加工物表面の間で酸素を介するSi-O-Si結合が生じ、その結果、加工物表面原子のバックボンドの結合力が低下する。そして、微粒子が加工物表面を離れる際にこの原子を持ち去り、エッチングが進む。このとき、凸部から選択的にエッチングが進むため、自動的に原子レベルで平滑な表面ができる。例えば、超LSI用のSi (001) ウエハ表面には、幅数10nm、高さ1~2 nmの山谷があるが、その山の最大高さである2 nm程度加工すれば、これを完全になくすることができる。図1は、加工後に加熱することなくSTM観察した結果である。20nm×20nmの原子像は、結晶性に変化がないことを示している。100nm×100nmのイメージは、テラス毎に色分けされ、全体の95%が3原子層に納まる超平坦面であることを示している。これは硬X線の高い反射率を得ることに貢献している。



*Kazuto YAMAUCHI
1958年12月生
1984年大阪大学大学院工学研究科精密工学専攻博士後期課程中退
現在、大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻、教授、工学博士、超精密加工学、X線光学
TEL 06-6879-7285
FAX 06-6879-7285
E-mail : yamauchi@prec.eng.osaka-u.ac.jp

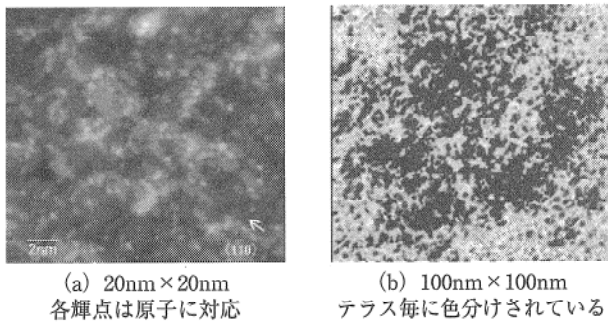


図1 EEM加工されたSi(001)表面のSTM像。プロセス後、加熱処理を施すことなく超高真空STMで観察。(b)から、全体の95%が3原子層で構成されていることが分かる。

3. 硬X線ナノビーム形成

SPring-8やESRF (European Synchrotron Radiation Facility), APS (Advanced Photon Source) などの、第3世代のシンクロトロン放射光施設では、極めて高い輝度のX線が利用できる。また、技術が改良され、より低いランニングコストで、ほぼ同等の高輝度X線を得る第3.5世代放射光施設の建設が、世界中で始まっている。そして、日本では、第4世代放射光(X線自由電子レーザー)施設の建設が始まる。輝度とは、放射エネルギーの大きさと、光源および発散角度の小ささに比例する物理量であって、高輝度X線光源は、X線ナノプローブ形成のための光源といっても過言ではない。それゆえ、世界中で硬X線の集光競争が繰り広げられている。我々は、世界に先駆け、回折限界における集光性能を達成することに目標をおいた。

X線の集光には様々な方法があるが、期待できる集光強度から、ミラー素子にかなうデバイスはない。X線では物質の屈折率が1より小さく、表面すれすれに光を入射し、全反射によって高い反射率を得る。また、多層膜による反射率の向上も可能である。いづれにしても、回折限界の集光を実現するには、ミラーで反射した波のすべてが、集光点において強めあう干渉条件を満たさなければならない。しかし、これは途轍もなく大変である。光源を第一焦点、集光点を第二焦点とする楕円体の一部を切り出し、さらに、全反射に特有の入射角に依存した位相とびを考慮した曲面を創る必要がある。そして、我々が既に達成したSub-50nmビーム形成を目指すならば、波動光学シミュレーションの結果から、長さ100mmに亘るミラー全領域を、誤差振幅の最大値

が2nm(PV: Peak-to-Valley)程度で作らなければならない。

4. 形状創成プロセスの一例

Sub-50nmを実現するためのミラーは、反射面の全長100mmに亘って穏やかにカーブしており、最大深さが15 μ m程度の曲面である。そして、許容できる誤差の振幅は2nm(PV)である。図2の例では、EEMプロセス開始前に約10nmの形状誤差が存在し、そこに振幅1~5nmの高空間周波数領域の形状誤差が重畳している。この誤差のマップをもとに、各点に必要な量だけ微粒子を供給し、誤差の山の部分だけをエッチングし、一番深い谷部分の高さにそろえて目標の形を作る。図2では、3回のプロセスで、これが完了したことを示している。また、大面積に亘るナノスケールの誤差評価も、研究室で開発した計測装置により、始めて可能になったのである。

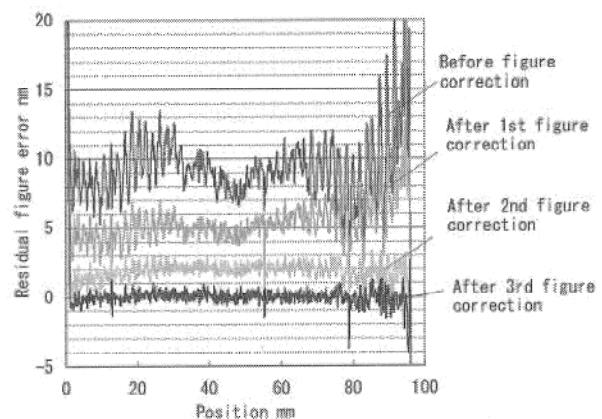


図2 ミラー表面(全長100mm)の形状修正過程の一例

5. 集光特性の評価

SPring-8のBL29-XULにおいて評価した集光プロファイルを図3に示す。設計どおり世界最小のSub-50nmに集光されている。そして、回折積分により求めた理論プロファイルと完全に一致し、回折限界の集光が行われたことを示している。硬X線の回折限界での集光を達成したのは、今でも、我々の研究室だけである。また、この光学系は、100mmのワークディスタンスが確保されており、応用範囲の広さからも他の追随を許していない。

今年度4月には、Sub-30nm集光にも成功した。

現在、反射X線の位相誤差を詳細に評価するため、位相回復法にもとづく硬X線At-wavelength干渉計を提案し、その開発を進めている。また、反射位相誤差を補正する新たな方法の検討も進めている。Sub-10nmビームの形成が、次の目標である。

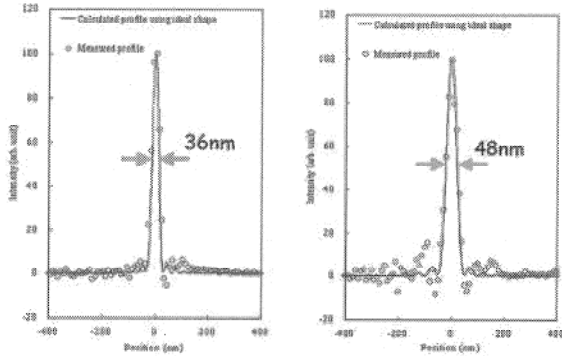


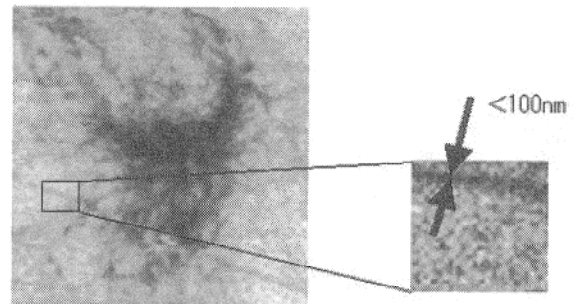
図3 硬X線 (15keV) のSub-50nm集光の例. 理論集光プロフィールとの比較, 回折限界の集光径が実現できていることが分かる (世界初)

6. 医学分野での応用展開

X線は物質への透過性に優れ、また、必ずしも真空を必要としないことから、生体サンプルとの整合性が高い。図4は、マウス細胞のβチューブリンをCdSe量子ドットによって免疫染色し、形成したナノビームを走査型プローブにして、Seの蛍光X線により、顕微観察した例である。βチューブリンの構造が鮮明に浮かび上がり、その拡大像から数10nmレベルの空間分解能が期待できることを示している。これらをベースに、SPring-8/理化学研究所と国立国際医療センター研究所、癌研究会研究所との共同で、抗癌剤シスプラチンの耐性機序に関する共同研究を行っている。細胞が耐性を獲得した際、細胞内のZnの分布に大きな変化が現れることを明らかにしており、様々なオルガネラ構造を空間分解した元素アレイ解析へと発展させている。

7. アクティビティー

研究室の構成員は、佐野泰久助教授、玉作賢治



Seの蛍光X線による40μm×40μm領域のワイドスキャン像

図4 マウス細胞のβチューブリンをCdSe量子ドットによって免疫染色し、Seの蛍光X線によって顕微観察した例

特任助教授、三村秀和助手、そして、やる気満々の博士コース (5名)、修士コース (8名)、学部4年生 (6名) の学生達と、忘れてはいけないのが、応用自然科学科 精密科学コースのトップ8制度で配属された3年生 (1名) である。

X線光学グループの他に、ワイドギャップ半導体表面プロセスグループ、イオン・プラズマプロセスグループ等がある。皆が主専門において高い目標を掲げ、同時に、異分野連携、産学連携、国際連携、そして、様々なコミュニティでの研究交流を経験しながら、研究とは「楽しく夢を実現すること」をモットーに、寝る間も惜しんで頑張っている。ホームページ<http://www-up.prec.eng.osaka-u.ac.jp/>も参考にいただければ幸いです。

8. おわりに

貴重な紙面を割いて、我々の研究室を紹介する機会をいただいたことに、厚くお礼申し上げます。また、理化学研究所 (播磨研究所) の石川哲也先生、国立国際医療センター研究所の志村まり先生を始め、学内外の多くの方々との共同により、本研究が行われていることを述べ、感謝いたします。最後に、本研究室の先代の教授で、恩師である森 勇藏先生に、この場を借りて深く感謝いたします。