

イオン線誘起電流 (IBIC) を用いたイオン・エッチング 過程の新しいモニター法 (I)

Ion-Beam-Induced-Current (IBIC) Monitoring of Uniform and Selective Ion-Etching Processes
in Layered Structures (I)

榊 裕之*・横山 幸嗣*・関口 芳信*・今井 勇次*
Hiroyuki SAKAKI, Koji YOKOYAMA Yoshinobu SEKIGUCHI and Yuji IMAI

超LSIや光ICなどサブミクロン構造を有する電子回路や素子の作成に不可欠なイオンエッチング過程を最適化するために、イオン線が試料を削る際に誘起する電流 (IBIC) の実時間測定を行った。その結果、IBICの大きさが被加工物質に依存すること、異種物質を積層化した層状試料ではIBICの測定によりエッチングの進行状況を実時間でモニターできることなどが明らかとなった。本法を用いた結果、周期 $0.26 \mu\text{m}$ ；最小線幅 900 \AA までの金属細線格子構造を再現性よく実現する技術が確立した。さらに、得られた格子構造が顕著な偏波依存性を有する光学透過・反射特性を持つことと、高い回折率を示すことが明らかとなった。

1. 序 論

近年の超LSIおよび各種光通信用素子を実現する上で、サブミクロン微細加工技術の重要性が増しつつある¹⁾。これらの技術は、被加工試料表面に塗布したレジスト上に微細パターンを描き込む描画 (または複写) 過程と、描かれたレジスト製パターンをマスクとして試料を選択的に除去するエッチング過程とに分けることができる。パターン寸法がサブミクロンの場合のエッチング過程においては、従来の化学エッチで達成困難な著しく高い忠実度が要求される。このため、サイドエッチング現象 (試料表面に垂直方向に削り取ろうとする場合に横方向も削り取られる現象) が無視できるほどに小さいイオンエッチング法か異方性化学エッチング法が不可欠の手段となっている。後者は特定方位の半導体結晶にのみ適用可能な方法であるから、一般的にはイオン流による物理的エッチングが極めて重要となっている。

我々はこれまでに、レーザの干渉露光で形成した周期 $0.24 \mu\text{m}$ のレジスト格子をマスクとして、ガラス導波路表面をイオンエッチし、光通信用フィルターを実現し、その特性の測定解析を行ってきたが、²⁾ 深くかつ一様な格子構造の形成はかならずしも容易ではなかった。

困難の主たる原因は、ガラスのイオン・エッチ速度とフォトレジストのイオン・エッチ速度との比が十分に大きく取ることができず、このためフォトレジストが除去されることを考慮することが必要となることにある。このため、適正なエッチング量 (時間) の許容範囲が狭く、高い再現性や一様性の実現が困難であった。本報告では、イオン衝突で試料に誘起される電流の測定を行うことにより、従来困難であったエッチング状況の実時間検出を可能にし、これを用いると適正エッチング時間の設定が可能になることを示す。³⁾

2. イオン線誘起電流の性質と測定法

図1は本研究に用いたイオンエッチング装置 (Ion-Tech社製B-92形) の構成⁴⁾とIBICの測定回路とを示したものである。箱形陰極 ($5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$) 内部に水平に二本の陽極棒 (長さ 15 cm , $1 \text{ cm} \phi$, 間隔 2.5 cm) が設けられており、箱内を数ミリ Torr の Ar で満たして、両電極間に数 kV ($1 \sim 4 \text{ kV}$) の直流電圧 V_0 を印加することによりグロー放電を起こすことができる。箱内の鞍形電界 (Saddle-field) の作用で、グロー放電で形成された Ar イオンは箱の底部より真空チェン

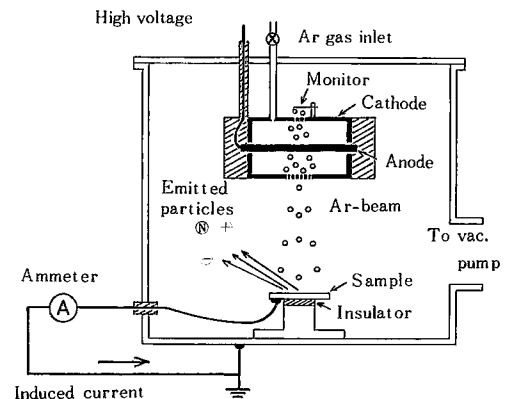


図1 イオンエッチング装置の構成とIBIC測定系

* 東京大学生産技術研究所 第3部

パー内にはほぼ eV_a のエネルギーを得て放出され、試料表面を照射する。放電電流が 20~200 mA の時に放出されるイオン電流の推定値は約 1~10 mA 程度であるが、その大部分は箱から出る前に中性化されていると考えられている。^{4,5)}

このようにして作られたアルゴン粒子線（簡単のために中性化の後にもイオン線と略称する場合がある）を試料に照射すると、試料内では多重衝突と励起が起こり、その結果として、試料物質が削り取られるとともに二次電子放出 I_{SE} や二次イオン放出 I_{SI} に伴う電荷の移動が生じる。放出された電荷はチェンバー壁面に付着するが、図1のような電気接続のある場合にはこれを経由して、試料に還流する。このイオン線誘起電流 I_{IBIC} は、イオンおよび電子電荷の試料への出入りを考えることにより

$$I_{IBIC} = (I_{PI} - I_{PE}) + (I_{SE} - I_{SI}) \quad (1)$$

で与えられる。ここで I_{PI} および I_{PE} は流入する一次(primary)イオン電流および一次電子電流であり、 I_{SI} および I_{SE} は粒子線照射に伴って放出される二次(secondary)イオン電流および二次電子電流を表している。各成分は試料の種類および試料とチェンバー間に印加するバイアス電圧 V_0 などに複雑に依存するが、⁵⁾ $V_0 = 0$ の場合には I_{PI} および I_{SE} が支配的要素と考えられる。殊に試料が酸化物や半導体の場合には、 I_{SE} が支配的になるものと思われる。IBICの起源については、別の報告にその詳細を委ねることとし、本報告ではその性質と利用法についてのみ述べる。

図2はシリコン、フォトレジスト(AZ 1350)および

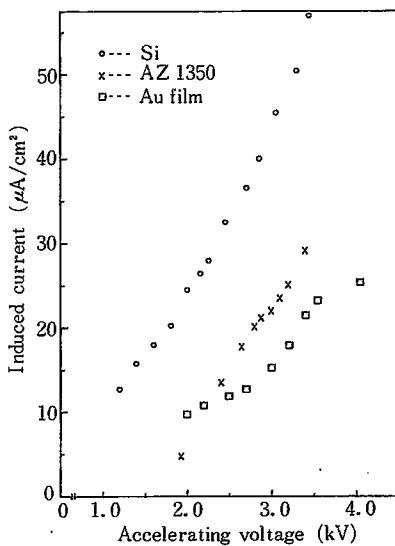


図2 イオン線誘起電流 IBIC のイオン加速電圧依存性

金薄膜の試料について、誘起電流 IBIC をイオンの加速電圧 V_a の関数として測定した結果を示したものである。この時の放電電流は一定値 40 mA に固定してある。同一電圧に対しては Si 結晶で最大の電流が流れ、続いてフォトレジスト・金薄膜の順序となっている。ここでのフォトレジスト試料は金薄膜上に約 0.3 μm の厚みでスピナ塗布したものであり、試料電極は金薄膜に接続されている。なお観測された電流の向きは、試料表面から負電荷が飛び出す(または正電荷が流入する)向きとなっている。以上の結果より IBIC は試料の種類特に試料表面の物質組成に明瞭に依存すること(したがってその大きさは二次電荷放出により支配されていること)が明らかとなった。

3. 層状試料におけるイオン線誘起電流

イオン線誘起電流の大きさが試料の種類に依存する事実を利用して、異種物質を積層化した層状試料のエッチング状況の検出を試みた。図3, 4, 5 らはその一例で、誘起電流をエッチング時間の関数として測定したものである。

図3はガラス基板上に約 0.13 μm の金薄膜を形成した試料に対する測定値である。エッチング開始と同時に金

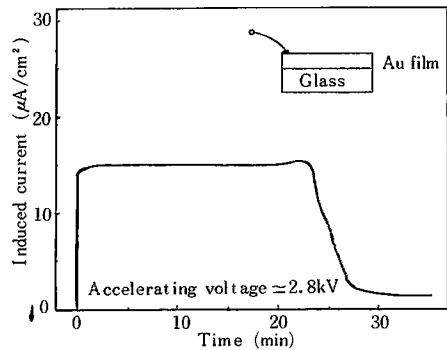


図3 ガラス基板上的金薄膜(厚さ 0.13 μm)における IBIC のエッチング時間依存性

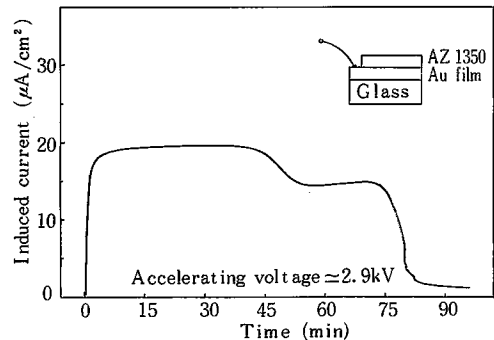


図4 ガラス基板上的金(0.13 μm)およびフォトレジスト(AZ-1350: 0.2 μm)を塗布した試料の IBIC 特性

研究速報

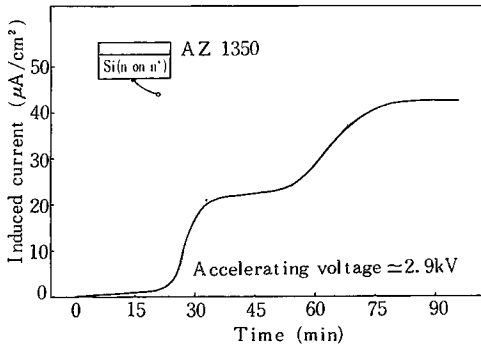


図5 Si ウェーファ(n on n⁺)上にフォトレジスト (AZ 1350 : 0.3 μm)を塗布した試料の IBIC特性

に固有な誘起電流が流れ、エッチングの終了(金膜の除去)に伴い電流が減少することが示されている。電流減少前に見られる電流の一時的増加($t \approx 22$ 分前後)は、金薄膜が薄くなったため(約100 Å)に生じる基板の影響と考えることができ、基板への到達の予知に有用と考えられる。また、電流の減少過程($t > 24$ 分)の急峻さはエッチングの面内一様性を反映すると考えられ、この試料(1 cm \times 1 cm)での不均一性は約10⁻¹⁰ S/cm²と推定されることが分かる。

図4は、図3の金薄膜試料上にフォトレジストを約0.2 μm 塗布した試料の誘起電流特性である。当初、フォトレジスト(AZ 1350)に固有の電流レベルに達するがエッチングにより試料表面に金が露出するに伴い、電流は階段的減少を示す。金に固有な電流レベルに達した後の振舞いは、図3と同様である。

図5はシリコン・ウェーファ上にAZ-1350を約0.3 μm 塗布した試料についての測定結果である。当初フォトレジストに固有の電流レベルよりも極めて低い値を示すが、その後は、図2から予測される経過を辿る。エッチング時間が約60分を経ると、Si が表面に露出し始めることが明瞭に示されている。

以上示したように、各種の層状試料のエッチングにおいては、異種物質が表面に露出する度に、誘起電流が階段的变化を示すことが示された。なお、図3, 4, 5における照射イオン流束は(中性粒子束も含めて)約20~30 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ と推定される。また、本来絶縁物と考えられているフォトレジストの電気伝導機構は詳らかでないが、約0.1 μm の厚みの膜に10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の電流を流すのに必要な導電率 σ は、(実効印加電圧を1Vと仮定すると)、10⁻¹⁰ S/cmに過ぎないことを記しておく。

4. サブミクロン金属回折格子の作成とその諸性質

イオン線誘起電流を用いたエッチング過程のモニタリングの有効性を示すために、周期0.26 μm の金属回折格子

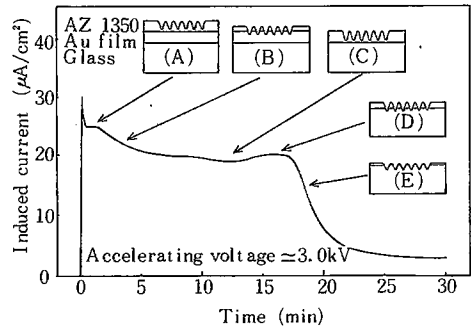


図6 フォトレジスト格子付金薄膜のIBIC特性

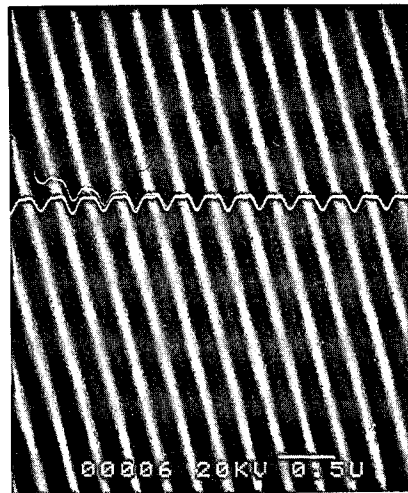
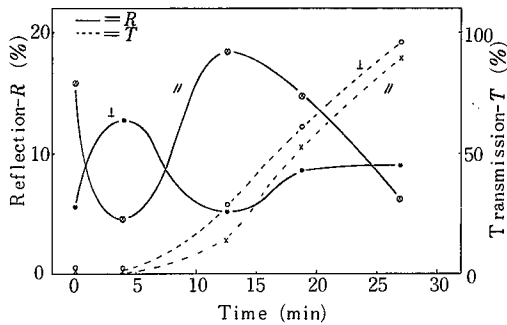


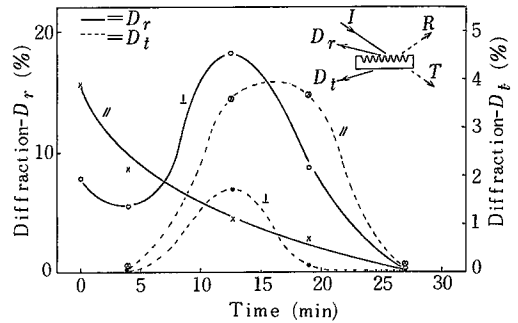
図7 18分間エッチングを施して作られた金線回折格子 周期約0.26 μm 、金線(白色部分)線幅約0.09 μm 。

の作成を試みた。試料はまずガラス基板の上に金薄膜(厚さ0.13 μm)を形成し、その上に厚さ0.08 μm のフォトレジスト製格子を形成したもの(図6挿入図(A)参照)である。

上記の試料のイオン・エッチングを行い誘起電流を測定した。その結果を図6に示す。エッチング開始直後の過渡応答の後に、約1分間フォトレジスト領域を削る際に流れる一定電流が観測される。その後電流の単調な減少が見られ(1分 $<t < 6$ 分)、続いてほぼ平坦な領域に至る。この電流減少領域(B)はフォトレジスト格子が削られて徐々に細くなり、より多くの領域で金が露出するために生じるものと考えられる。領域(C)(6分 $<t < 12$ 分)では、金が全面に露出しており、凹凸を持つ表面が基板方向に後退してゆく過程と考えられる。また $t = 15$ 分前後(D)では、金の凹部が基板に達し始めることに対応した一時的な電流増大が見られる。さらに、 $t > 17$ 分の(E)領域での電流の減少は金の凹部からガラス基板が徐々に露出するために生ずるものと考えられる。



(A) エッチング時間を異にする金属格子構造の透過特性 T および反射特性 R



(B) 金属格子の回折特性
(垂直入射 $\theta=0$, 偏波面は格子縞と平行//または垂直⊥)

図 8

上記の格子構造の変化の解釈の妥当性は、走査電子顕微鏡 (SEM) による試料表面の形状観察および次に述べる光学的特性測定からからも確認することができる。図7は、エッチング時間18分の試料のSEM写真であり、白色部分が金を、黒色部分が下地のガラスの露出部分を示しており、金線の幅が 900 \AA 弱であることが読みとれる。このような伝導性極細線は、人工的な一次元半導体⁶⁾や一次元超伝導材料として特異な物性の実現可能性を与えるものとしても重要である。

エッチング時間の違いに伴い様々な格子構造が得られることは、その光学的特性の違いとして反映されることが予測される。図8(A), (B)は、図6の過程で作成した五種類の格子について、その反射特性 R 、透過特性 T および斜方入射時の回折特性 D (反射側 D_r 、透過側 D_t) を調べたものである。測定光は直線偏波の Ar レーザ (波長 $0.4579 \mu\text{m}$) であり、その偏波面は格子縞と平行 (//) および垂直 (\perp) の二方向である。図8(a)の透過特性の増大は金薄膜が薄くなることに伴うものである。また $T(\perp)$ が $T(\parallel)$ より常に大きいことは、低効率ではあるがポラライザ機能を持つことを示している。同様の偏波面選択性は、反射率 R においてより顕著であり、 $t=12.5$ 分の試料では $R(\parallel) : R(\perp) \approx 3.6 : 1$ に達する点は注目値する。

また図8(B)の回折特性では、反射側での回折強度 D_r が18%にも達することと共に、強い偏波面依存性のあることなども明らかとなった。現在、高い回折特性を

活用した光導波路形ブラッグ・フィルタ⁷⁾や軟X線用格子の開発を行いつつある。

5. 結論および謝辞

イオン・エッチングの際、試料とチェンバー間に流れる誘起電流の測定により、層状試料のエッチング過程の実時間モニターが可能となった。その応用として、周期 $0.26 \mu\text{m}$ 最少線幅 $0.09 \mu\text{m}$ までの金属細線格子の作製技術を確立した。

最後に、有益な討論を頂いた本学の浜崎襄二教授、荒川泰彦講師、阿部一郎助手、元大学院学生我妻勝美氏 (現古河電工) の諸氏に謝意を表す。本研究は文部省科学研究費 (特定研究) を得て行われたものである。ここに記して感謝の意を表す。 (1980年9月24日受理)

文 献

- 1) たとえば、榊: 計測と制御 **19** (1980) 142
- 2) K. Wagatsuma, H. Sakaki, S. Saito: IEEE J. Quant. Electronics **QE-12** (1979) 632
- 3) H. Sakaki, Y. Sekiguchi, and K. Yokoyama: J. Vac. Sci. Tech. (contributed)
- 4) Instruction Manual and Catalog for Ion Gun B-92, Ion Tech, Teddington, England.
- 5) Y. Arakawa and H. Sakaki: in preparation
- 6) H. Sakaki: Japan. J. Appl. Phys. (to appear, Dec. 1980)
- 7) Y. Yokoyama, Y. Arakawa, H. Sakaki: in preparation