



ビームテクノロジーとサブミクロン加工

難波 進*, 川辺 光 央**

1. まえがき

電子, イオン, 光ビーム技術に関するシンポジウムが米国において2年に1度開催されており, 今年はその第14回目が5月にカリフォルニアで開かれた¹⁾. 過去のプログラムをこれらのビームによる加工という立場から見ると, 1960年代は, 電子ビーム, レーザビームの高エネルギー密度, 微小スポット径という特徴を利用した熱による加工が主であった. 今日では, このような加工技術はすでに定着しており, たとえば, 高融点金属材料, ダイヤモンド, セラミックス, 半導体材料の切断, トリミング, 溶接に利用されている. しかしこれらは本来, 局所加熱による加工であるため, 被加工物に損傷を与え, 今日エレクトロニクス分野で要求されているような $1\ \mu\text{m}$, あるいはそれ以下の寸法の超微細加工には不適當である. このシンポジウムの第12回目あたりから急速に目立ってきているのは, 最近話題になっている超 LSI の製作に適用されるべきビームテクノロジーである.

真空管に代ったトランジスタが今日のように我々の生活に大きな変革をもたらしたのは, 小さくて消費電力が少いたためである. 従って, 半導体技術においては微小化, 高集積化, 高周波化が至上命令であり, 特に微細加工技術は重要な働きをなしてきた. 以上のような観点から, ここではエレクトロニクスにおけるビームによる微細加工を中心に話を進める.

従来の IC あるいは LSI の加工技術は写真製版技術が中心である. これは原図を必要な大きさまでに縮小撮影した写真原版を使って, ホトレジスト (感光剤) を塗布した加工面に密着

あるいは投影焼付し, 化学エッチングにより複雑なパターンを形成する方法である. この方法は安価で量産性があり今日の半導体工業における基本的技術になっている. しかしこれらの方法による加工限界は $2\ \mu\text{m}$ といわれており, それ以下の加工寸法を得るために新しい技術の開発が求められてきた. たとえば, 紫外線露光によるパターン製作は, 光の回折限界から $1\ \mu\text{m}$ 以下のパターン製作は容易なことではなく, また, 不純物の熱拡散, 化学エッチングの方法も, 不純物のマスクの裏へのまわり込み, マスク端下部のエッチング, すなわちアンダーカットなどによる精度の限界がある. これらの問題点を克服するものとして, 電子ビームや X 線による露光, イオン注入, イオンエッチングが各国で競って研究開発されている.

2. 電子ビーム露光

半導体工業における微細加工は, ホトレジストの露光から始まる. 従来の光による露光の代りに波長の短い電子ビームを用いるのが電子ビーム露光である. 電子ビーム露光には, 大別して電子顕微鏡型の描画用露光装置と, この装置で製作したマスクを転写するための一括露光装置²⁾の2種類がある. しかし電子ビームによる一括露光は電子ビーム集束用磁場の均一性が広範囲にわたり要求されることや, マスクの寿命が短い点などの欠点があり, 現在は後述の X 線による一括露光が有力視されている.

電子ビーム露光の特徴は, 紫外線露光と異なり回折現象が無視できるためパターン精度が向上すること, 電氣的に比較的容易に偏向できるためコンピュータコントロールにより直接レジスト上に描画が可能であることなどがあげられる. 電子ビームによる描画方式はその目的によりいくつか開発されている. 汎用性があり高精度の得られるのはベクトルスキャン方式であ

* 難波 進 (Susumu NAMBA), 大阪大学基礎工学部, 電気工学科教授, 工博, 理博

** 川辺光央 (Mitsuo KAWABE), 同上, 助教授, 工博

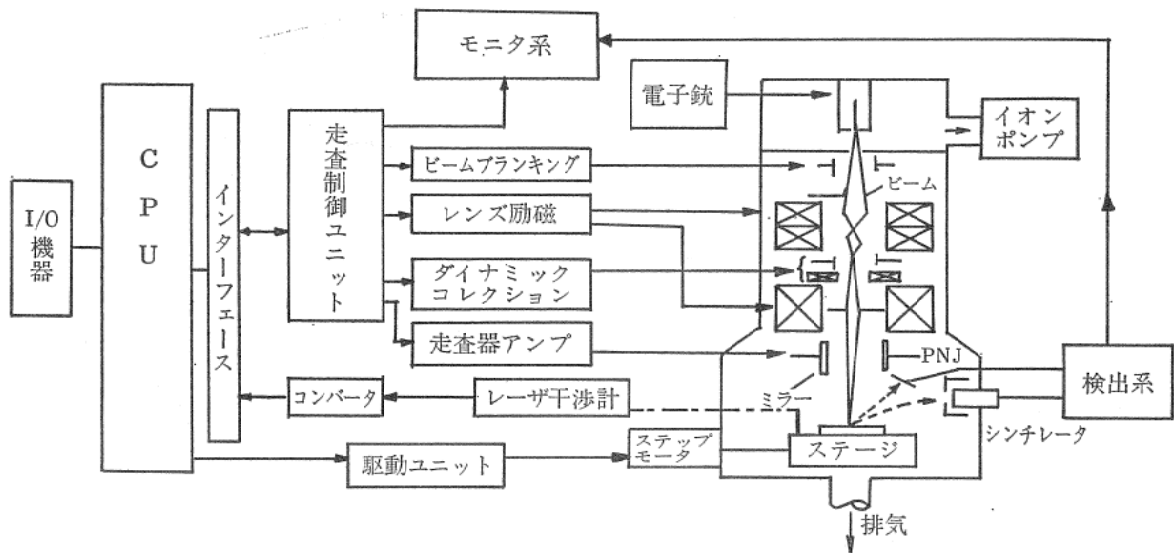


図1 電子線露光装置ブロックダイアグラム

り，一例をブロックダイアグラムで図1に示す³⁾。

これは位置精度 $\pm 0.2\mu\text{m}$ の描画を目的としたもので電子線走査範囲は $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ ， $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ ， $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ の3種類あり，それ以上の図形はステージをステップモーターで移動させて描く。位置の読み取りはレーザ干渉計を使う。また試料上に設けたマーカーによって位置検出を行なうことも可能である。描画は走査制御ユニットにより，描画位置にビームを偏向させて必要な所だけビーム走査を行なう。この方法で直接個々のウェハ上にパターンを描くことも可能であるが，同一パターンを多数必要とする生産ラインに乗せるには能率が悪い。したがってこの方法により高精度のマスクを作りX線によって一括露光する方法が考えられている。

露光時間を短縮し，直接ウェハに露光する方法として，可変矩形電子ビームを用いる方法が提案されている⁴⁾。これは微少な円形電子ビームの走査によるぬりつぶしでパターンを描く代わりに，必要な矩形の電子ビームを作って，その部分を瞬時に露光しようとするものである。したがって，対象となるパターンはICパターンのように矩形の合成されたものに限られる。IBMの方式を例にとれば，まず陰極から出て加速された電子ビームは正方形の第1アパーチャーにより正方形に成形され，偏向電極を通して第2の正方形アパーチャーに入る。偏向電

極により正方形の電子ビームが偏向されるため第2の固定アパーチャーを通過するビームは偏向の度合によって任意の矩形に成形される。これをレンズにより縮小，偏向させてウェハ上に矩形の重ね合せにより描画を完成させる。

他の露光方法は，必要なパターンの約10倍の自己保持型のマスクを作り，これを電子光学系によりウェハ上に縮小投影するものである。この方法の問題点は自己保持型マスクの製作方法にあるといわれている。

3. X線露光

X線による露光は，光の代りに波長 $4 \sim 20\text{\AA}$ の軟X線を利用するもので⁵⁾，特長としては，波長が短いため回折現象が無視できること，たいいていものを透過するため表面の影響を受けにくいこと，電子ビームのように固体内部での散乱がないのでパターン精度が上がることなどがあげられる。マスク材としては吸収係数の大きい金が用いられる。マスクを保持するマスク基板は，X線の透過が良く機械的強度があって寸法変化の少いことが要求される。通常は数 μm まで薄くしたシリコンが用いられるが製作が困難で脆い。最近ではマイラ，パリレンといった高分子膜も有望視され研究が進められている。図2はこの方法の原理図である。X線源の大きさが有限であるため，半影によるぼけおよびマスクとウェハの間隙が一様でないためのパターンひずみが生じる。これを避けるためには

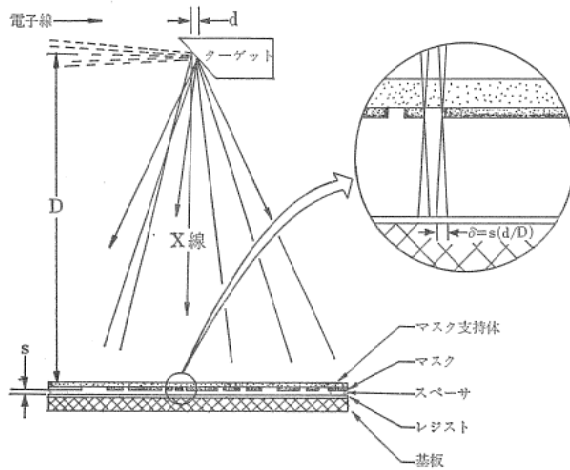
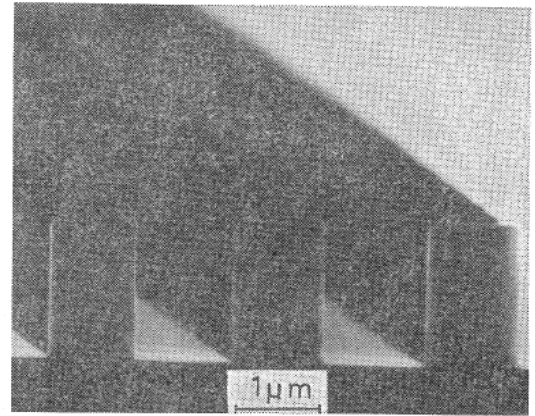


図2 X線露光原理図

線源とマスクの距離を大きくすれば良いが、X線強度が弱くなる。数100WのX線源では、マスクまでの距離はせいぜい数cmまでである。最近電々公社通研で水冷ターゲットを用い



1 μm line width
1.7 μm thick PMMA
expoexposure time 20min.

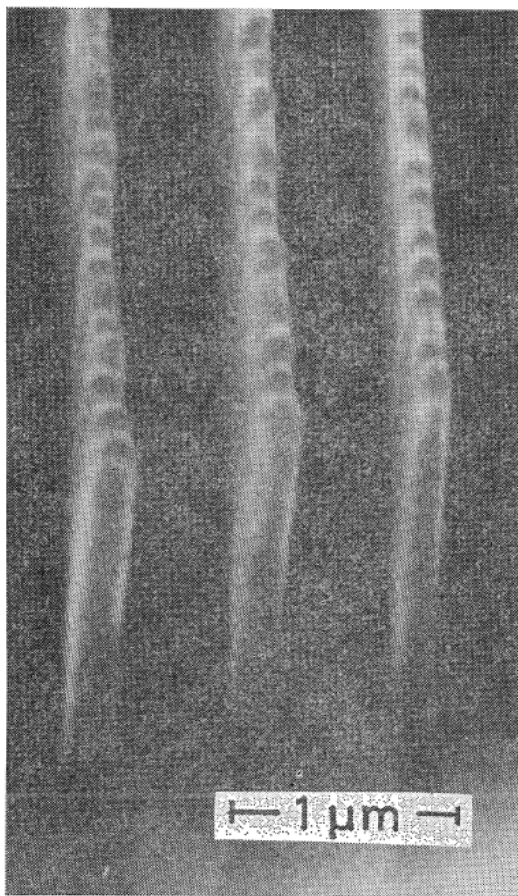
図3(b)

て20kWのX線露光システムが製作された。線源、試料間距離は80cmとなっている。

このような通常の軟X線源を用いた露光以外に、電子軌道放射X線(Synchrotron Orbital Radiation)による露光が実験されている⁶⁾これは半径数m〜数10mで電子を円運動させ、速度変化により生じるX線を利用するもので、強力で平行度の良いX線が得られる。装置が高価である点以外は、露光用X線源として理想的である。図3にSOR軟X線により転写したパターンの例を示す⁷⁾。いずれもシリコン基板上に塗布したPMMA(ポリメチルメタクリレート)に転写したもので、(a)は幅2000Å、高さ2.2 μmの壁がピッチ7000Åで平行に並んでいる状況を示す、また(b)は幅1 μm、高さ1.7 μmのPMMAの壁が長方形断面をもって作られていることを示す。いずれも壁面は基板に対して垂直であり、X線の平行性が非常に良いことを如実に示している。マスクは厚さ3 μmのシリコンを保持基板とし、その上に約4000Åの金を蒸着し、イオンエッチングによりパターン化したものである。

4. イオンビーム加工

イオンビームによる加工はサブミクロンという寸法精度の要求に応えうる加工法の1つとして最近特に注目されている。微細加工に限らずイオンビームの表面加工への応用は、加速エネルギー、イオン種などを変えることにより数多く考えられ、また現実に利用されている、数100



$\lambda = 692\text{nm}$
0.2 μm line width
2.2 μm thick PMMA

図3(a)

eV の低エネルギーイオンはイオンプレーティングに利用され、半導体保護膜、光学部品の透過保護膜、機械部品の耐食性や硬度を上げるために用いられる。数100から10keV の範囲ではイオンエッチングに用いられ、この場合は主としてアルゴンイオンなどの不活性ガスのイオンが利用される。さらに高エネルギーイオンはイオン注入に利用される。イオン注入は半導体への不純物ドーピングの新しい技術としてすでに実用化されており、従来の熱拡散法では不可能であった高精度の不純物分布制御を可能とした。注入と同程度のエネルギーで不活性ガスイオンを注入し、結晶の乱れによって化学エッチングが促進されることを利用した加工法もあり、これについては4.2でのべる。まず、サブミクロン加工の有望な技術として注目されているイオンエッチングについて述べる。

4.1 イオンエッチング

イオンエッチングは、入射イオンと固体との衝突により、結合エネルギー以上のエネルギーを与えられた表面原子が変位して飛び出すことにより起る。イオンエッチングの重要なパラメータであるスパッタ率は、入射イオン1個あたり跳ばされるターゲット原子の数で表されるが、この値は、ターゲット原子、入射イオン、入射エネルギー、入射角度に依存する。たとえば図4は400eV の Ar イオンを用いた場合のスパッタ率を原子番号の関数として表わしたものである⁹⁾。最も差の大きいCとAg ではスパッタ率にして20倍以上の差のあることがわかる。よく使われる物質のイオンエッチング速度を参考

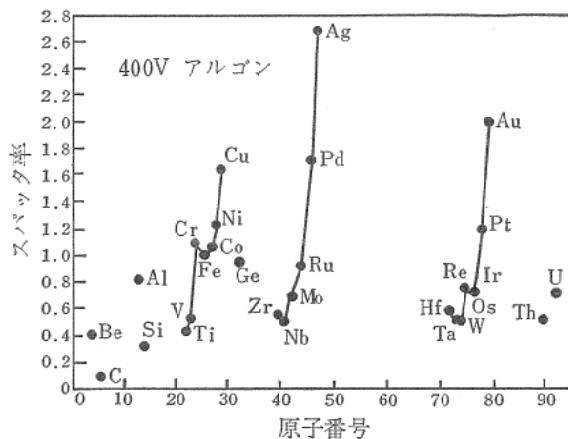


図4 スパッタ率と原子番号の関係⁹⁾

表1 種々の物質のエッチング速度 (Ar イオン, 1 keV, I=0.85mA/cm²)

物質名	エッチング速度 (μ/hr)
Si	2.0
GaAs	15.0
Al ₂ O ₃	0.8
KTFR resist	2.3
AZ 1350	3.6
PMMA	5.0
Ag	18.0
Au	12.0
Al	2.6
Fe	1.9
SiO ₂ (thermal)	2.5

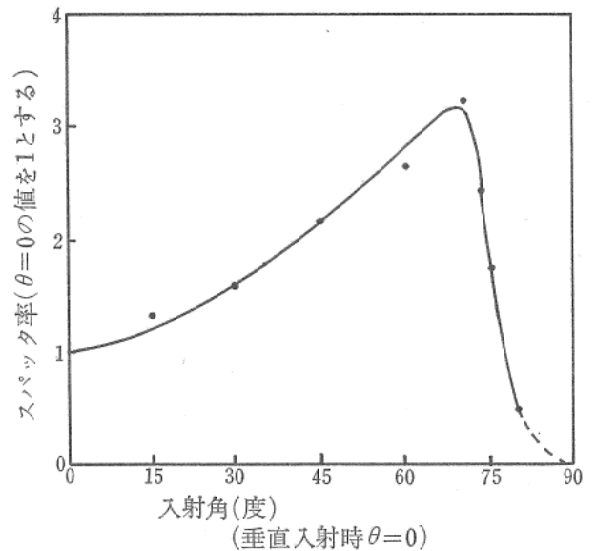


図5 アルゴンイオンによるパーマロイのスパッタ率の入射角度依存性⁹⁾

のために表1に示しておく⁹⁾。スパッタ率はまた変位原子の変位方向および表面からの距離に依存する。イオンビームを表面に垂直な入射角0°の状態から次第に傾けてゆくと、図5に示すごとく入射角60°~70°でスパッタ率が最大となりあとは急速に減少する⁹⁾。すなわち、入射角が大きくなると変位原子は表面近傍に生じ、外に飛び出す原子の数が増える。角度が最大値を超えると、入射イオンのうち表面で反射されるイオンの数が増加するため、スパッタに寄与するイオンが減少しスパッタ率が低下する。

イオンエッチングには2種類あり、1つは大

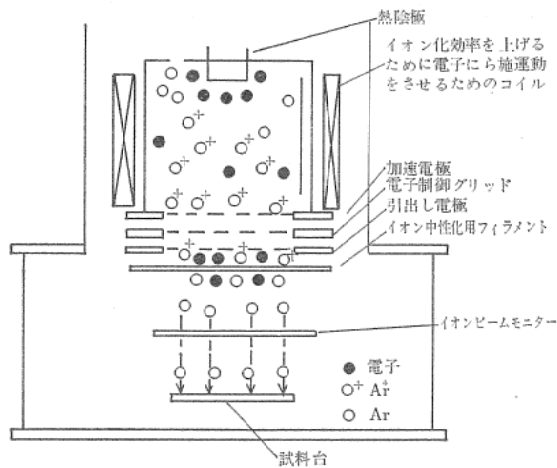


図6 イオンエッチング用カウフマン型イオン銃

面積イオンビームで一様に試料を照射する方法であり、他は走査イオンビームを使う方法である。二次元パターンの微細加工は走査イオンビームによる加工の方が適しているようだが、現実には、イオンビームを細く絞ることが困難であるため、マスクの上から一様なイオンビームを照射する方法がとられている。この方法はマスク材と被加工材の間のエッチング速度の差が大きい方が良く、図4や表1より、 Al_2O_3 やTiがマスク材として適していることがわかる。

図6はこの目的のために作られた加工装置の1例である。イオン源で作られたイオンは加速引出し電極によって引出され、真空中におかれた試料に衝突する。試料が絶縁物の場合は、帯電を防ぐため熱電子により電荷を中和させる。

この方法は最近半導体ICの加工技術として試みられているが、Siのエッチング速度が遅く量産性に欠けることやイオン衝撃を利用するため結晶に損傷が残り素子の特性に悪影響をおよぼすことなどがあるため、ICプロセスに取り入れるまでにはまだ改良の余地が多く残っている。むしろ、光集積回路素子、磁気バブル素子、超音波素子、超伝導素子、回折格子などのようにまだ量産を必要としないが、高い精度が要求される加工分野に広く利用されつつある。以下に2, 3の加工例を示す。

図5に示すごとく、エッチング速度はイオンの入射角に依存し0度と90度で最低となるので、適当なマスクと試料を選ぶことにより、イオンビームに対し垂直な面と水平な面を最終的

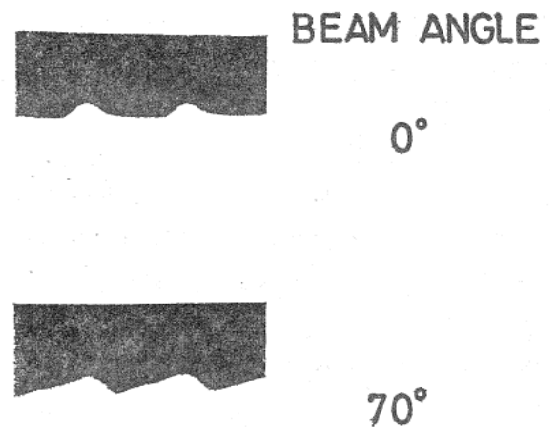


図7 イオンエッチングによってブレイズされたホログフィックグレーティング

に残すような加工が可能である。たとえば、レーザーの干渉パターンをレジスト上に露光して作った回折格子をマスクとして、斜入射イオンビームでエッチング加工を行うことにより、任意のブレイズ角をもった回折格子を製作することができる。図7はGaAs結晶上に加工した回折格子の断面SEM像の1例であり、イオンビームの入射角により表面形状が顕著に変化していることがわかる¹⁰⁾。

イオンエッチングによる微細加工の記録としては、膜厚 100\AA のAu-Pd膜上に幅 80\AA の細線加工をした例がある¹¹⁾。Au-Pd膜上に電子ビームで微細パターンを描くと、電子の衝突した所は吸着物質が重合して膜が成長する。エッチング速度の遅いこの重合膜をマスクとしてイオンエッチングを行うと、Au-Pdの細線を得ることができる。

イオンエッチングの欠点は量産性に劣る点であるが、また残留損傷も大きな問題となる。特にGaAsのような発光材料に対しては、残留損傷が発光効率に重大な影響を与える¹²⁾。図8はGaAs表面の発光率をエッチングイオンのエネルギーに対してプロットしたものである¹³⁾。100 eV程度の低エネルギーのイオンでエッチングしても発光効率は元の値の20%に減少していることがわかる。この損傷による発光効率の減少は軽微な場合は熱処理により100%回復させることができるが、500 eV以上のイオンエネルギーでエッチングした場合は100%の回復は困難である。その他の欠点としては、再付着の問題と

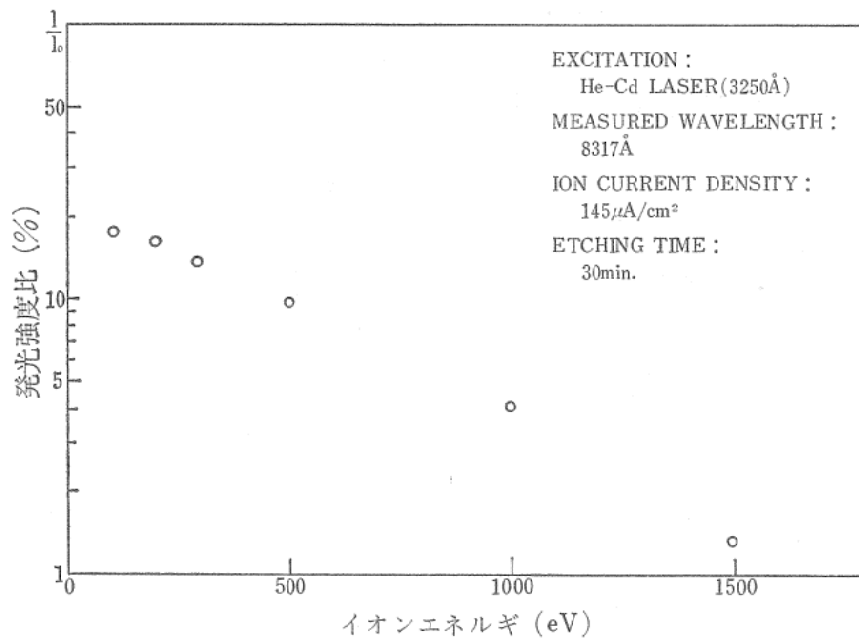


図8 GaAs における発光強度とイオンエネルギーの関係

マスクパターン縮みの問題がある。再付着はスパッタされた物質がパターンの側壁に付着する現象で、加工されたパターン幅がマスクより太くなったり、マスクを取り去ったあとに再付着物による突起が残ったりする。パターンの縮みはこれと逆で、マスク材と被加工物のエッチング速度の差があまり大きくない場合、マスク自身のエッチングも無視できなくなり、マスクパターンが細くなる現象である。これらの現象はマスク材、被加工物により程度の差があるので個々の場合について注意が必要である。

走査イオンビームによる加工は、イオンビームを試料面でスポットに集束させ、XY方向に走査させることによりパターンをエッチング加工するものである¹⁴⁾。装置はイオン銃にレンズ系と偏向系が加わり、試料表面の3次元的な加工進行状況を真空外よりレーザー干渉計などにより監視して制御することも可能である。微小イオンビームを得るのが困難であるため、この方法であまり微細なパターンを加工することはできないが、深さ方向には精密な加工ができるので、非球面レンズなどの精密加工に利用されている。

イオンの衝突を利用した加工法としてはrfスパッタリングがよく利用されているが、試料がプラズマ中にあるため試料温度が上昇した

り、壁面のスパッタリングによって試料が汚染されたり、エッチング速度の制御が比較的困難である等の欠点のため微細加工にはイオンビームによるエッチングの方が適している。

4.2 イオン衝撃による増速エッチング

イオン衝撃により大きく損傷されたシリコンがフッ酸で溶解することは早くから知られており¹⁵⁾、その後この効果はシリコンの微細加工法として研究され¹⁶⁾、最近では磁気バブル素子用ガーネット¹⁷⁾や光集積回路用LiNbO₃¹⁸⁾にも適用されている。また半導体集積回路においてSiO₂¹⁹⁾やSi₃N₄²⁰⁾のエッチング溝のプロファイル制御にも使われている。この方法は、イオン衝撃により生じた損傷部分と非損傷部分との間の化学エッチング速度の大きな差異を利用して、適当な化学エッチング液を選ぶことにより損傷部分だけを選択的にエッチしうるため、普通の化学エッチングでよく見られるマスク下へのまわり込み(アンダーカット)がなくなる。またエッチング深さは入射イオンのエネルギー量をきめると計算によりあるていど予測でき、またエッチング時間やエッチング温度の影響はほとんど受けない。図9に示す実験例は、Ar⁺およびN⁺を注入したLiNbO₃を希釈したフッ酸でエッチしたものであり、液の温度、エッチング時間に関係なく、イオン種、加速エ

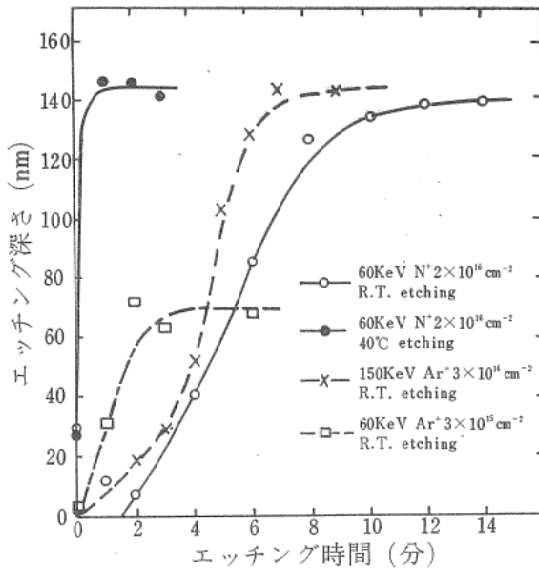


図9 LiNbO₃ のイオン衝撃による増速エッチング

エネルギー、注入量でできる深さまで化学エッチされていることがわかる。またイオンエッチングの欠点であった再付着、マスクの縮みの問題もない。増速エッチング法の欠点は、イオン注入と化学エッチングという2つのプロセスを必要とするため手数がかかること、イオン注入機という高価な装置が必要であること、エッチング深さがイオンのエネルギーでほぼきまるため、或る値以上の深さが必要な場合は、イオン注入、化学エッチングの過程をくり返さなければならないことなどが挙げられる。

5. むすび

エレクトロニクスにおける新しい微細加工技術の点からビームによる加工技術を展望した。ビームそのものを利用するのではないのでここでは述べなかったが、プラズマエッチング²¹⁾も重要な微細加工法である。これは一見 rf スパッタリング、イオンエッチングと似ているがエッチング機構は全く異っており、酸素、フロンガス等を放電により活性化して、試料と化学反応を起させ、試料の構成物質を揮発性の化合物に変えるものである。この方法は比較的量产性があり、化学エッチングに比して制御性、加工精度において秀れているので、すでに生産工程にも取り入れられている。

微細加工を必要とする分野はエレクトロニクスにとどまらず、今後はますます増大するもの

と思われる。とうぜん、各分野からは、精度、手法において異った要求がなされよう。

ここに述べた加工法の大きな特徴は、微細加工に適していることの他に、自動制御が容易なことである。従来の水溶液中の処理が主であった人手のかかるウェットプロセスに代り、自動制御されたドライ技術の組合せが半導体工業で重要な位置をしめるようになるだろう。

文 献

- 1) Fourteenth Symposium on Electron, Ion and Photon Beam Technology, May 25~27, 1977, Palo Alto (Chairman: T. E. Everhart.)
- 2) T. W. O'Keefe, et al., Solid State Electronics. 12) 1969) 841.
- 3) 日本電子製 JBX-5B 型 阪大基礎工学部難波研究室に設置されているもの。
- 4) H. Pfeiffer. J. Vac. Sci. Technol. 12 (1975) 1170.
- 5) H. I. Smith, et al., J. Vac. Sci. Technol. 10 (1973) 913.
- 6) E. Spiller, et al., J. Appl. Phys., 47 (1976) 5450.
- 7) H. Aritome, et al., 1) のシンポジウムで発表。
- 8) N. Laegreid, et al., J. Appl. Phys. 32 (1961) 365.
- 9) E. G. Spencer, et al., J. Vac. Sci. Technol. 8 (1971) 552.
- 10) 青柳, 他, 応用物理 45 (1976) 657.
Y. Aoyagi, et al., Optica Acta. 23 (1976) 701.
- 11) A. N. Broers, et al. Appl. Phys. Letters. 29 (1976) 596.
- 12) S. Namba, et al., J. Vac. Sci. Technol. 12 (1975) 1348.
- 13) M. Kawabe, et al., Technical Digest of Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Communication. 1977 p.563.
- 14) H. Yasuda, Japan. J. Appl. Phys., 12 (1973) 1139.
- 15) U. F. Gianola, J. Appl. Phys., 28 (1957) 868.
- 16) J. F. Gibbons, et al., Appl. Phys. Letters. 15 (1969) 117.
- 17) 鶴島他, 電気学会雑誌 51-A68 (1976) 527.
- 18) M. Kawabe, et al., J. Vac. Sci. Technol. (1977) to be published.
- 19) R. A. Moline, et al., IEDM. 19-1 (1972)
- 20) Y. Akasaka, et al., Proc. 5th Conf. Solid State Devices Tokyo, J. Japan Soc. Appl. Phys. Suppl. 43 (1974) 493.
- 21) 阿部他, 応用物理 44 (1975) 881.