

集束イオンビームを用いた
微細加工に関する研究

昭和62年7月

森 本 博 明

集束イオンビームを用いた 微細加工に関する研究

森 本 博 明

DOC

1987

29

電気系

内 容 梗 概

現在開発が行われている最先端の LSI である 4~16Mビットのダイナミック RAM (Random Access Memory : 随時読出し書き込み可能な記憶素子) では, $1\ \mu\text{m}$ 以下, いわゆるサブミクロン領域の微細加工技術が使用されている。これら LSI の回路パターン形成には光による転写法が主として用いられているが, パターンの微細化がさらに進めばパターン寸法が光の波長に近くなり, 回折現象の影響のためにパターン形成が非常に困難になることが予想される。従って, 光転写法を超える種々のパターン形成技術, すなわち X線リソグラフィ技術, 電子ビームリソグラフィ技術, および集束イオンビーム技術の検討が行われている。

集束イオンビーム (Focused Ion Beam : FIB) 技術は, $0.1\ \mu\text{m}$ あるいはそれ以下に集束したイオンビームを用いて基板表面の加工を行う技術である。イオンビームはエネルギービームとしての性質と, 元素としての性質を合わせ持つので, エッチング, リソグラフィ, 不純物注入, 分析, 物質表面の改質等多くの新しい応用への可能性を持っている。

本論文は, この FIB 技術を用いた半導体デバイス製造における微細加工技術に関して筆者が研究を行ってきた成果をまとめたものである。

第 1 章では, FIB 技術の背景およびその動向について述べる。

第 2 章では, 本研究のために試作した FIB 装置について, イオン源, イオンビーム光学系, 質量分離系, イオンビーム描画系の順に述べた後, 実際のデバイス製作時に加工精度を決定するイオンビームと下地基板との間のアライメント技術について述べる。

第 3 章では, FIB によるエッチング技術について述べる。選択的な FIB 照射を行うことによって基板のマスキング加工が可能になる。また, イオンビーム照射によって基板表面に選択的に格子欠陥を発生させ, ウェットエッチング等の後工程によってパターン形成を行う増速エッチング技術についても述べる。

第 4 章では, FIB を用いたリソグラフィ技術について述べる。イオンビームは電子ビームに比べて基板内での直進性に優れ, またレジスト感度も高い値を示すことから, 新しいリソグラフィ技術として有望である。本章では, 比較的質量の小さいイオンビーム (Be, Si) によるレジスト露光特性と, ガリウムイオンビームを照射したレジストのドライ現像特性について述べる。

第5章では、第3・4章で述べた微細加工技術を半導体デバイス製作に応用した結果について述べる。まず、FIBエッチングを二層プロセスに応用してGaAs FET(Field Effect Transistor : 電界効果トランジスタ)を試作した結果について述べる。次に、FIBリソグラフィによる低雑音GaAs FETの試作について述べる。また、異種イオンビームの混合露光法を用いて形成したマッシュルームゲートを持つFETの試作についても触れる。最後に、ドライ現像法を用いたサブミクロンゲートMOSFETの試作結果について述べる。

第6章では、本研究の結論として、本論文の内容を総括するとともに、今後に残された課題について述べる。

目 次

	頁
第1章 序 論	1
第1章の参考文献	5
第2章 集束イオンビーム装置	
2-1 緒 言	6
2-2 微細加工用イオン源	
2-2-1 液体金属イオン源	6
2-2-2 含浸電極型液体金属イオン源	10
2-3 集束イオンビーム光学系	
2-3-1 レンズ系	13
2-3-2 質量分離系	17
2-4 集束イオンビーム描画系	21
2-5 アライメント系	30
2-6 結 言	41
第2章の参考文献	43
第3章 集束イオンビームエッチング技術	
3-1 緒 言	46
3-2 集束イオンビームによるエッチング特性	46
3-3 シリコン窒化膜の増速エッチング	52
3-4 結 言	55
第3章の参考文献	56
第4章 集束イオンビームリソグラフィー技術	
4-1 緒 言	58
4-2 ベリリウム及びシリコンイオンビームによるリソグラフィー技術	
4-2-1 基礎特性	59

4-2-2	パターン断面形状に関する考察	62
4-2-3	異種ビームによる混合露光法	67
4-3	ガリウムイオンビーム照射とドライ現像法を用いた リソグラフィ技術	69
4-4	結 言	77
	第4章の参考文献	78
第5章 集束イオンビーム技術の半導体デバイスへの応用		
5-1	緒 言	80
5-2	集束イオンビームエッチングによるGaAs FETの試作	80
5-3	集束イオンビームリソグラフィを用いたGaAs FETの試作	
5-3-1	低雑音FETの試作	84
5-3-2	異種ビームによる混合露光法を用いたマッシュルーム ゲートFETの試作	90
5-3-3	マッシュルームゲートGaAs HEMTの試作	97
5-4	ドライ現像法を用いたサブミクロンゲートMOS FETの試作	99
5-5	結 言	104
	第5章の参考文献	105
第6章	結 論	106
謝 辞	108
記 号 表	109
本論文に関する著者発表論文	111

第 1 章 序 論

近年 L S I (Large Scale Integrated Circuit : 大規模集積回路) を代表とするマイクロエレクトロニクス技術の進歩は社会の発展に大きく寄与している。例えば電子計算機の目覚ましい高性能化は L S I 技術の進歩(高集積化, 高機能化, 及び高速化)に負う所が非常に大である。この L S I の製造におけるキーテクノロジーは, 回路パターンの微細加工技術である。すなわち, L S I 製造技術の発展は微細加工技術の進歩によってもたらされたと言っても過言ではない。現在開発が行われている最先端の L S I である 4 ~ 16 M ビットのダイナミック R A M (Random Access Memory : 随時読出し書き込み可能な記憶素子) では, $1 \mu\text{m}$ 以下, いわゆるサブミクロン領域の微細加工技術が使用されている。現在 L S I の回路パターン形成には光による転写法が主として用いられているが, パターンの微細化がさらに進めばパターン寸法が光の波長に近くなり, 回折現象の影響のためにパターン形成が非常に困難になることが予想される。従って, 光転写法を超える種々のパターン形成技術, すなわち X 線リソグラフィ技術, 電子ビームリソグラフィ技術, および集束イオンビーム技術の検討が行われている。

集束イオンビーム (Focused Ion Beam : F I B) 技術は, $0.1 \mu\text{m}$ あるいはそれ以下に集束したイオンビームを用いて基板表面の加工を行う技術である。

イオンビームは,

- (1) 荷電粒子であるので電界または磁界を用いて高速・高精度にコントロールできる。
- (2) 従って平行ビームや集束ビームを得ることができる。
- (3) 電氣的に加速することができる。
- (4) 従って大きな運動エネルギーを基板に与えることができる。
- (5) 固体内での直進性が良い。
- (6) 単なるエネルギービームのみならず, 元素としての性質も合わせ持つ。

という性質を持っている。このような特徴を生かして, 半導体デバイス製造分野でエッチング, リソグラフィ, 不純物注入, 薄膜形成, 分析, 物質表面の改質等多くの新しい技術に用いることができる。Brewer は, このイオンビームを細く集束することによって多くの半導体製造プロセスをマスクレスで行うことができ, 工程が簡単になってかつ歩留りも向上するという観点から, F I B 技術の可能性について検討している⁽¹⁾。

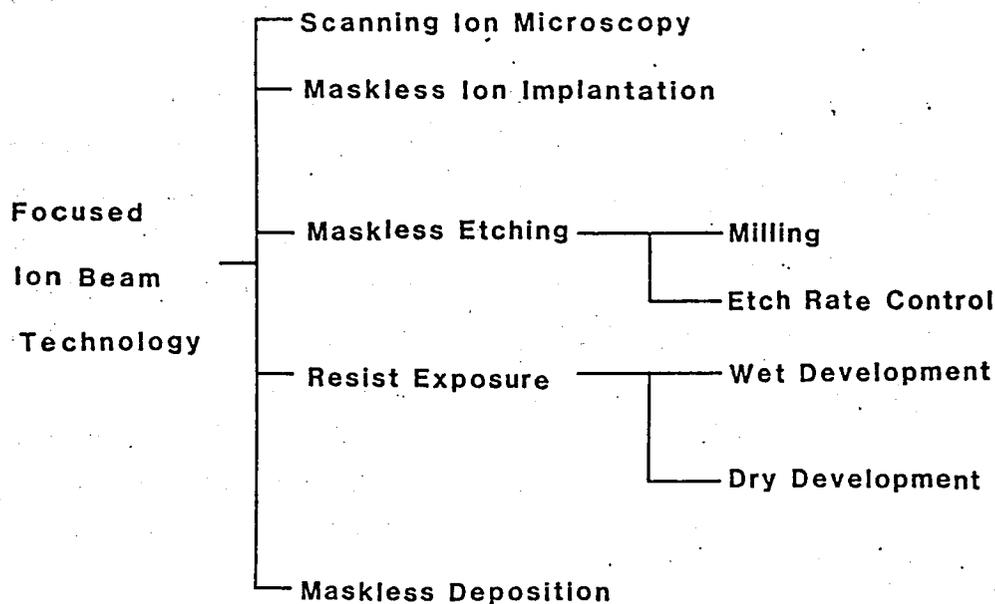
その実験は Seliger らによって行われた。彼らは, イオン注入装置を改造してボロン

(B)のマスクレスイオン注入を行ない、Si基板上にPN接合を形成した⁽²⁾。しかし、このときイオンビームは直径5 μm 程度までしか集束できていない。もっと微細なイオンビームを得るためには、当時使用した従来型のイオン源(デュオプラズマトロン)に比べて、もっと高い輝度ともっと小さなソースサイズを持ったイオン源が必要であった。

その後、高い輝度と小さなソースサイズを持った液体金属イオン源が開発され^(3,4)、直径0.1 μm 以下で電流密度1 A/cm²程度の集束イオンビームが得られるようになって以来⁽⁵⁾、FIB技術の研究が活発に行われるようになった。

半導体デバイス製造分野において考えられるFIB技術の応用を表1-1に示す⁽⁶⁾。走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)と同様の原理で、集束イオンビームで試料上を走査したときに得られる二次電子や二次イオンを検出することによって試料表面の情報を得ることができる。この情報は、イオンビームの条件によっては試料表面の結晶粒界を示すことが報告されている⁽⁷⁾。また、二次イオンの情報は試料表面の元素分析に応用でき、微小領域のSIMS(Secondary Ion Mass Spectroscopy)として期待されている。

表1-1 半導体分野における集束イオンビームの応用



イオン注入は高精度な不純物ドーピング技術として現在では半導体デバイス製造工程ではなくてはならない存在になっているが、FIB技術を用いるとさらに三次元の高精度なコントロールが可能になり、場所によって注入量を変化させるなど、従来不可能であった不純物プロファイルを実現することもできる⁽⁸⁾。また、マスクレスプロセスであるという特徴を生かして、MBE (Molecular Beam Epitaxy) 装置と高真空チャンバーで結合することによって大気にさらすことなく結晶成長と選択的な不純物ドーピングを交互に行う試みもなされている⁽⁹⁾。

基板上を高照射量で集束イオンビーム走査を行うことによって、選択的なエッチングが可能になる。この方法はマスクやレジストを用いることなしに、 $0.1\ \mu\text{m}$ 程度の微細な加工を行うことができるので、後に述べるマスクレスデポジション技術と組み合わせることによってフォトマスクやLSIのパターンの修復への応用が考えられている^(10,11)。FIBエッチングは $10^{16}\sim 10^{17}\ \text{ions}/\text{cm}^2$ という高照射量を必要とし、製造技術として利用するにはスループットが遅すぎるので、イオンビーム照射によって基板表面の性質を変化させ、後処理によってエッチングパターンを形成する方法も検討されている^(12,13)。

イオンビームは基板内での直進性が良く、また界面からの反射イオンの生成量が非常に少ないことから、微細レジストパターン形成に対する応用が期待できる^(14,15)。さらに、イオンビーム照射によってレジスト表面の改質を行ない、ドライエッチングによってレジストパターンを形成する方法(ドライ現像法)も検討されている^(6,16)。

イオンビームは新しい薄膜形成技術としても期待されているが⁽¹⁷⁾、デポジションが行える程度の低いエネルギーを持つ集束イオンビームを得ることが現在のところ不可能であるので、試料表面に有機金属ガスをあてつつ集束イオンビームを照射することによってマスクレスデポジションを行う方法が検討されている⁽¹⁸⁾。これはレーザCVD⁽¹⁹⁾と類似した原理によるものと考えられるが、イオンビームの集束性および高い制御性から、従来不可能であった高精度な加工が可能になると考えられる。また、前述のエッチング技術と組み合わせることでパターン修正に用いることができる。

このように、FIB技術は多くの応用が考えられ、新しい半導体デバイス製造技術として期待されている。本論文は、FIB技術を用いた半導体の微細加工技術の中で、エッチングとリソグラフィに関して筆者が行ってきた研究成果をまとめたものである。

第 1 章の参考文献

- [1] G.R.Brewer, "The application of electron/ion beam technology to microelectronics", IEEE Spectrum, Jan. 23-37 (1971).
- [2] R.L.Seliger and W.P.Fleming, "Focused ion beams in microfabrication", J. Appl. Phys. 45(3), 1416-1422 (1974).
- [3] V.E.Krohn and G.R.Ringo, "Ion Source of high brightness using liquid metal", Appl. Phys. Lett. 27(9), 479-481 (1975).
- [4] R.Clampitt, K.L.Aitken, and D.K.Jefferies, "Intense field-emission ion source of liquid metals", J. Vac. Sci. Technol. 12(6), 1204 (1975).
- [5] R.L.Seliger, J.W.Ward, V.Wang, and R.L.Kubena, "A high intensity scanning ion probe with submicrometer spot size", Appl. Phys. Lett. 34(5), 310-312 (1979).
- [6] T.Kato, H.Morimoto, K.Saitoh, and H.Nakata, "Submicron pattern fabrication by focused ion beams", J. Vac. Sci. Technol. B3(1), 50-53 (1985).
- [7] N.W.Parker, W.P.Robinson, R.Levi-Setti, Y.L.Wang, and G.Grow, "Analytical applications of focused ion beams", Proceedings of SPIE, vol.537, Electron-Beam, X-Ray, and Ion-Beam Techniques for Submicrometer Lithography IV, 1985, p.117-125.
- [8] R.H.Reuss, D.Morgan, E.W.Greenreich, W.M.Clark Jr, and D.B.Rensh, "Vertical npn transistors by maskless boron implantation", J. Vac. Sci. Technol. B3(1), 62-66 (1985).
- [9] A.Takamori, E.Miyauchi, H.Arimoto, Y.Bamba, and H.Hashimoto, "GaAs growth using an MBE system connected with a 100keV UHV maskless ion implanter", Jpn. J. Appl. Phys. 23(8), L599-L601 (1984).
- [10] B.W.Ward, D.C.Shaver, and M.L.Ward, "Repair of photomasks with focused ion beams", Proceedings of SPIE, vol.537, Electron-Beam, X-Ray, and Ion-Beam Techniques for Submicrometer Lithography IV, 1985, p.110-114.
- [11] J.Melngailis, C.R.Musil, E.H.Stevens, M.Utlaut, E.M.Kellog, R.T.Post, M.W.Geis, and R.W.Mountain, "The focused ion beam as an integrated circuit restructuring tool", J. Vac. Sci. Technol. B4(1), 176-180 (1986).
- [12] M.Komuro, H.Hiroshima, H.Tanoue, and T.Kanayama, "Maskless etching of a nanometer structure by focused ion beams", J. Vac. Sci. Technol. B1(4), 985-989 (1983).

- [13] P.H. La Marche, R.Levi-Setti, and Y.L.Wang, "Focused ion beam microlithography using an etch-stop process in gallium-doped silicon", J. Vac. Sci. Technol. B1(4), 1056-1058 (1983).
- [14] L.Karapiperis and C.A.Lee, "400-Å high aspect-ratio lines produced in polymethylmethacrylate (PMMA) by ion-beam exposure", Appl. Phys. Lett. 35(5), 395-397 (1979).
- [15] H.Morimoto, H.Onoda, T.Kato, K.Saitoh, and T.Kato, "Unique resist profiles with Be and Si focused ion beam lithography", J. Vac. Sci. Technol. B(1), 205-208 (1986).
- [16] H.Kuwano, K.Yoshida, and S.Yamazaki, "Dry development of resists exposed to focused gallium ion beam", Jpn. J. Appl. Phys. 19(10), L615-L617 (1980).
- [17] T.Takagi, "Role of ions in ion beam film formation", Thin Solid Films, 92, 1-17 (1982).
- [18] K.Gamo, N.Takakura, N.Samoto, R.Shimizu, and S.Namba, "Ion beam assisted deposition of metal organic films using focused ion beams", Jpn. J. Appl. Phys. 23(5), L293-L295 (1984).
- [19] D.J.Ehrlich and J.Y.Tsao, "A review of laser-microchemical processing", J. Vac. Sci. Technol. B1(4), 969-984 (1983).

第 2 章 集束イオンビーム装置

2-1 緒 言

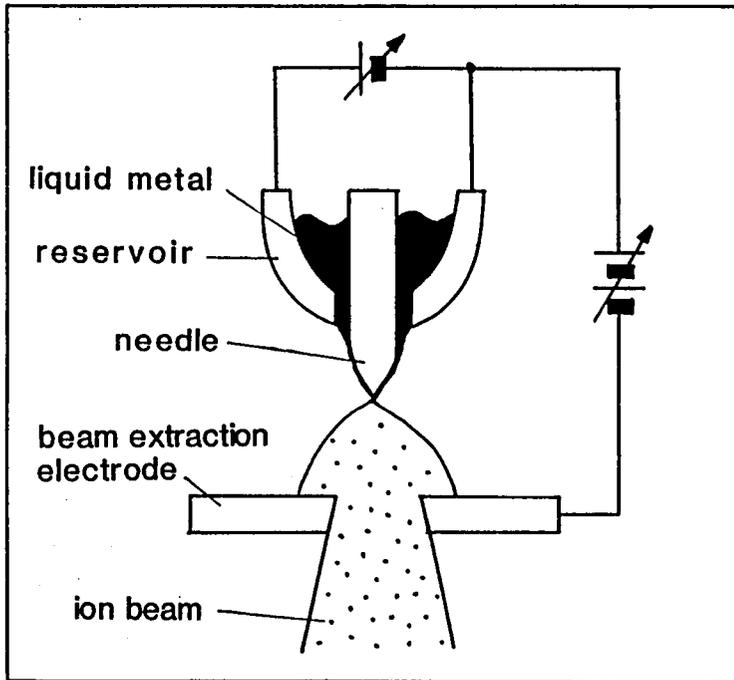
本章では、本研究のために試作した集束イオンビーム装置（以下 FIB 装置と略す。FIB は Focused Ion Beam の略）を例にあげて、その特徴及び各部の特性について述べる。現在 FIB の応用技術がまだまだ基礎研究レベルであるのに対応して、FIB 装置技術も基礎検討段階にあり、今後より一層の研究開発を必要としている。FIB 装置は、現在微細加工の研究に広く用いられている電子ビーム露光装置と非常に類似しているが、FIB 用イオン源、静電レンズ系、及びイオンビームの選択を行う質量分離系を持つのが特徴である。

本章ではまず FIB 装置の特徴的なハードウェアについて述べ、次にトータル的な描画システムについて述べ、最後に下地基板とのアライメント技術について述べる。

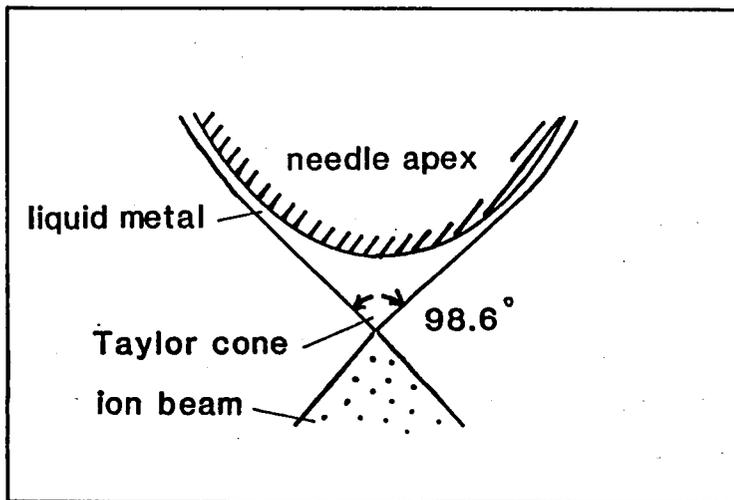
2-2 微細加工用イオン源

2-2-1 液体金属イオン源

前にも述べたように、FIB 技術開発のきっかけとなったのは 1975 年に Clampitt⁽¹⁾ と Krohn⁽²⁾ によって発表された液体金属イオン源 (Liquid Metal Ion Source) の出現であった。非常に高いイオンビーム放射電流密度 (10^6 A/str.) と非常に小さいソースサイズ (< 50 nm)⁽³⁾ を持つために、従来のイオン源では不可能であった領域にまでイオンビームを集束することができるためである。このイオン源は、図 2-1 (a) に示すように、イオン化物質を蓄えるリザーバ、イオン化物質を加熱し溶融させるためのヒータ、尖端からイオンビームを放出するニードルから成っている。溶融したイオン化物質はニードルの表面を流動してニードル尖端 (電解研摩等により尖端半径 $1 \mu\text{m}$ 程度に加工されている) に達する。引出し電極にニードルに対しての負の電圧 ($4 \sim 6$ kV) を印加すると、ニードル尖端部に 10^8 V/cm 程度の高電界が発生し、電界電離によりイオンビームが放出される⁽⁴⁾。このとき、イオン化物質はニードル尖端部で尖端角 98.6° の Taylor cone⁽⁵⁾ を形成している。(図 2-1 (b))



(a)



(b)

図 2 - 1 液体金属イオン源。

(a) 原理図。

(b) ニードル尖端部の Taylor cone。

液体金属イオン源は、真空中でイオン化物質を溶融してイオンビームを引き出す原理であるので、イオン化物質は(1)低融点、(2)低蒸気圧、(3)不活性、(4)ニードル材とのぬれ性が悪くないこと、といった条件を満たしているのが理想的である。ガリウム(Ga)はこの条件を割合良く満たしているので、液体金属イオン源のイオン化物質として良く使用されている。Gaの液体金属イオン源のイオンビームエミッション特性の一例を図2-2に示す⁽⁶⁾。ビーム引き出し電圧がある閾値を超えるとエミッションが開始する。引き出し電圧と閾値とエミッション特性の傾きは、エミッタのニードルの尖端半径、表面状態⁽⁷⁾、温度、及びニードルとイオン化物質のぬれ性によって大きく影響される。また、これらの条件以外でも真空度や残留ガスがビームエミッションの安定性に影響を与えることが報告されている⁽⁸⁾。

前記の液体金属イオン源としての条件を比較的満たしているイオン化物質としては、Ga以外にインジウム(In)、スズ(Sn)、金(Au)がある。しかし、リソグラフィやイオン注入などの半導体製造技術への応用のためには、もっと軽い元素や、半導体の不純物となる元素(Si, Be, Zn, B, As, P, Sbなど)が必要である。しかし、そのまま液体金属イオン源で使用するには、Be, B, Siは融点が高く(1900~2600℃)、P,

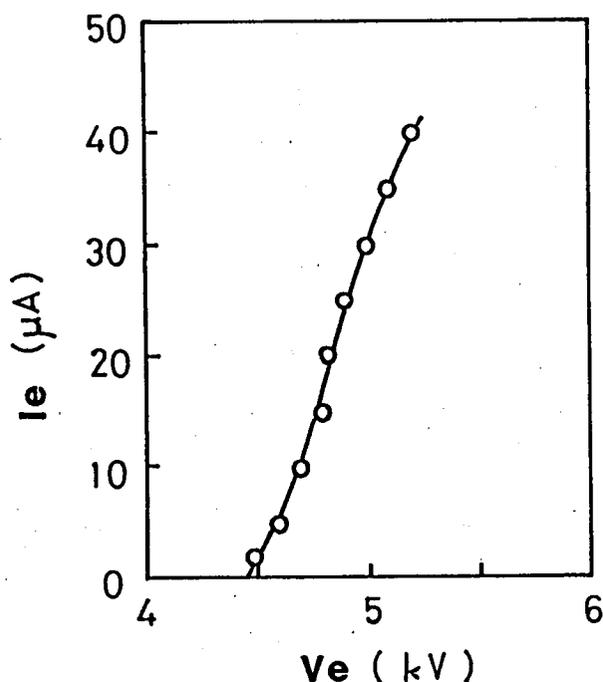


図2-2 液体金属イオン源のエミッション特性。

Zn, As は蒸気圧が高く, また B, Sb, はニードル材に用いられるタングステンと反応するという問題を持っている。そこで, イオン化すべき元素を他の元素との合金にすることによって融点を下げる方法が考案された⁽⁹⁾。図 2-3 は Au-Si 合金の状態図⁽¹⁰⁾であるが, 単体では融点 1412 °C の Si が, Au-Si の共晶点 (Si の重量比 3.15%) においては 363 °C で溶融することがわかる。融点が下がると, 液体金属イオン源の加熱温度を下げるので蒸気圧も低くすることができる。二元以上の合金を用いると, 必要なイオン種を複数種類取り出すことも可能である。図 2-4 は Au-Si-Be 三元合金の液体金属イオン源から放出されるイオンビームの質量スペクトルを示している⁽¹¹⁾。質量比で Au:Si:Be = 94:5.5:0.5 のもの⁽¹²⁾を使用している。このときビームエミッション電流は 10 μ A である。質量分離は, FIB システムに装備した E×B 型の質量分離器 (2-3-2 節で述べる) を用いた。使用した磁場の強度は 1 k Gauss である。この液体金属イオン源からは一価と二価の Si 及び Be イオンビームが得られ, リソグラフィや III-V 族半導体へのイオン注入に応用することができる。

以下の本論文に述べる研究は, Ga, Au-Si-Be 又は Au-Si (質量比 Au:Si = 96.85:3.15) の液体金属イオン源を用いて行ったものである。

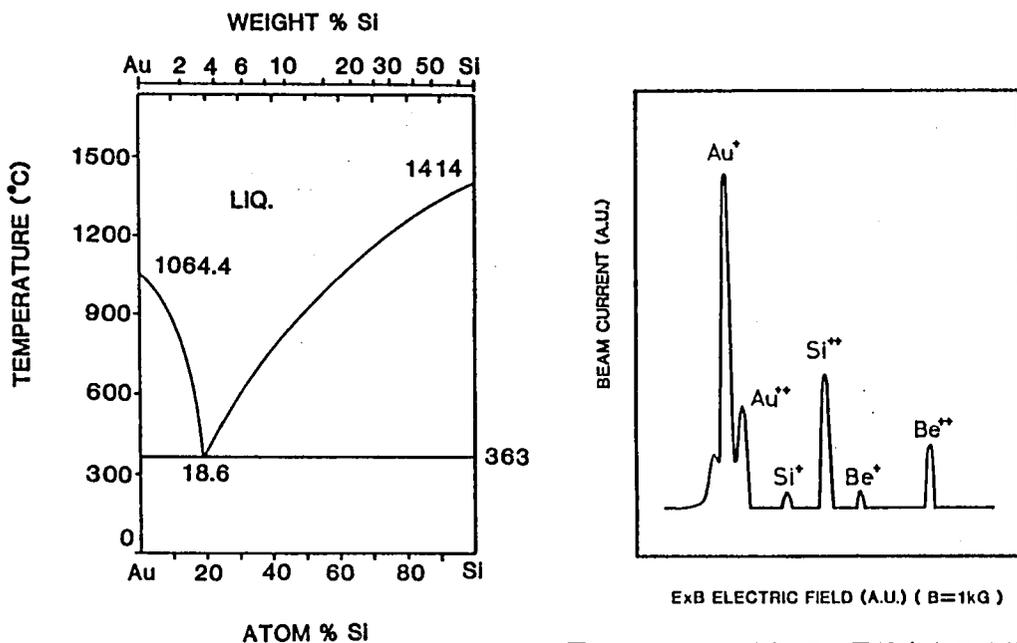


図 2-3 Au-Si 合金の状態図⁽¹⁰⁾。

図 2-4 Au-Si-Be 三元合金の液体金属イオン源から放出されたイオンビームの質量スペクトル。

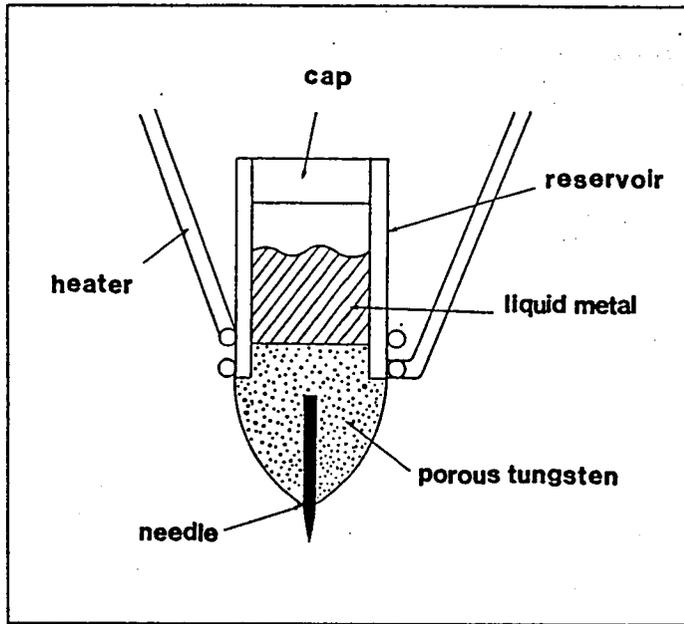
2-2-2 含浸電極型液体金属イオン源

液体金属イオン源のエミッション特性を高精度にコントロールする上で最も大きな障害となっているのは、イオン化物質の供給がニードル表面の流れによって決まっているということである。表面での流動現象は制御が困難で、また雰囲気などの影響によって経時的な変化も大きいからである。イオン化物質の供給を積極的にコントロールすることのできる新しいタイプの液体金属イオン源として、含浸電極型液体金属イオン源が開発されている⁽¹³⁾。このイオン源は、タングステンパウダーを焼結して多孔質の電極を形成しているので、パウダーのサイズを変えることによりイオン化物質の供給をコントロールすることができる。また、リザーバに開口部がなくなるので高蒸気圧物質の取扱いにも有利である。本節では、この含浸電極型液体金属イオン源の特性及びその応用について述べる。

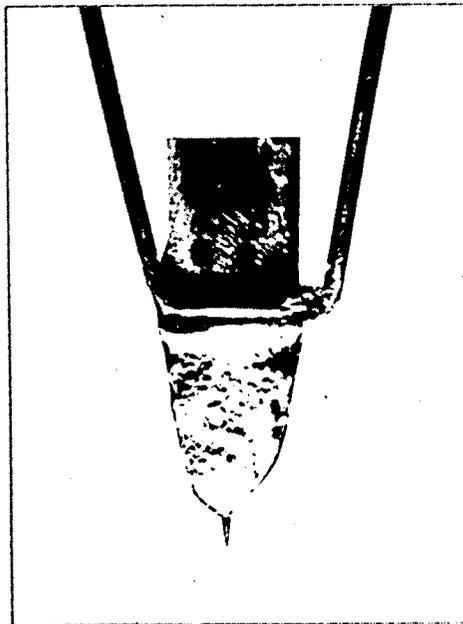
図2-5(a)は試作したイオン源の断面図である⁽¹⁴⁾。円筒形状のタングステンリザーバの一方にポータス電極が形成されており、その先端にはタングステンのニードルを装着している。ポータス電極は直径100 μm と10 μm のタングステン粒を50%ずつ混合したものを焼結して形成している。ニードルの先端は電解研摩によって先端半径1 μm 程度に尖らせている。リザーバとニードルは、ヒータに直接電流を流すことによって加熱する構造になっている。図2-5(b)は外観写真である。加熱特性を図2-6に示す。ほとんどの場合、液体金属イオン源は1000 $^{\circ}\text{C}$ 以下の温度で動作するので、本構造で十分な加熱特性を持っているといえる。

このイオン源にAu-Si-Be合金(組成94:5.5:0.5重量%)を充填した場合のエミッション特性について調べた。図2-7はイオンビームの質量スペクトルである。従来のタイプのもの(2-2-1節・図2-4参照)に比べてSiが約15%、Beが約50%少ない電流値を示している。この原因は今のところ不明であるが、合金が焼結体の電極中を浸透していく間にSiとBeの一部がタングステンと反応していることが考えられ、さらに検討を要する。

ビームの集束性に関しては、イオンビームを試料上で走査することによって得られる二次電子像から判断して、直径0.1 μm 程度のイオンビーム径が得られていると考えられる(2-4節・図2-16参照)。これらの結果から、本イオン源は微細加工技術に応用するに十分なソースサイズ及び安定性を有していることが明らかになった。



(a)



(b)

図 2 - 5 含浸電極型液体金属イオン源。

(a) 断面図。

(b) 外観写真。

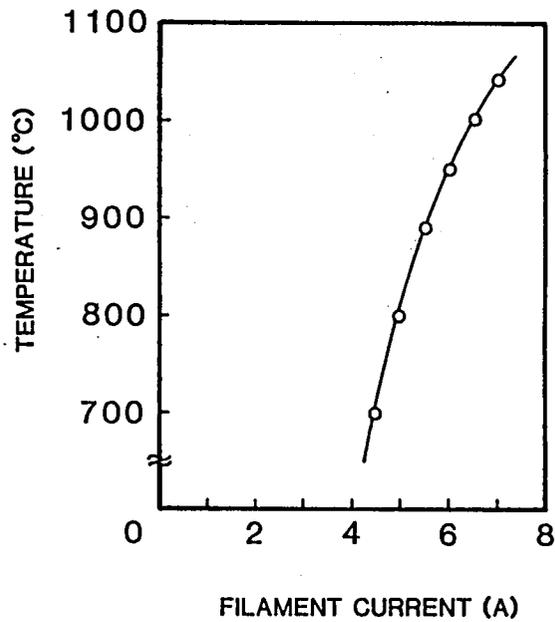


図 2-6 含浸電極型液体金属イオン源の加熱特性。

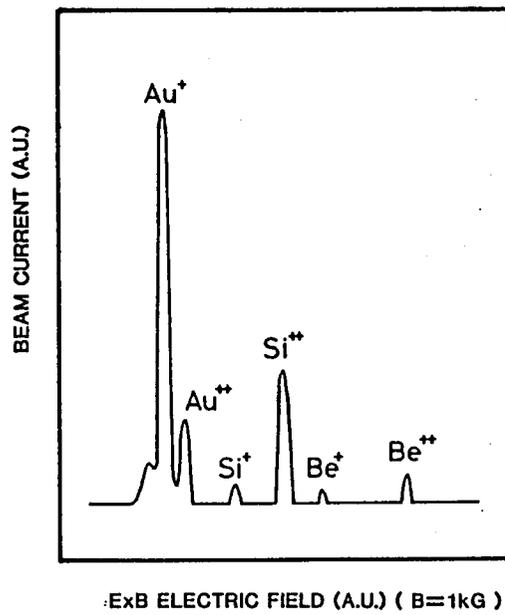


図 2-7 Au-Si-Be 合金を含ま浸電極型イオン源に使用した場合の放出イオンビームの質量スペクトル。

2-3 集束イオンビーム光学系

2-3-1 レンズ系

イオンビームは電子ビームに比べて質量が大きく、磁場による制御は難しいために、その集束には静電レンズ系を用いる。本節では、本研究のために試作したFIB装置に使用している2段静電レンズ光学系について述べる。

一般的に、図2-8に示すような1段のレンズ系において、光学的収差による理論的な最小ビーム径(半径)を r_p (m)とすれば、

$$r_p^2 = \left(\frac{1}{4} C_s \alpha^3\right)^2 + \left(C_c \left[\frac{\Delta V}{V_a}\right] \alpha\right)^2 + (mr_s)^2 \quad (2.1)$$

という関係がある⁽¹⁵⁾。ここで C_s と C_c はそれぞれ球面および色収差係数(m)、 α はビームの放射半角(rad.)、 V_a はビームの加速エネルギー(eV)、 ΔV はエネルギー分散(eV)、 r_s はソースサイズ(m)、 m はレンズの倍率である。

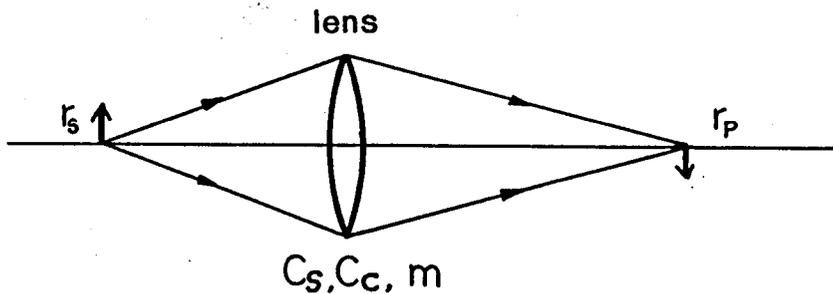


図2-8 1段の静電レンズ光学系。

質量分離系を持つ光学系の場合は、図2-9に示すようにコンデンサ・レンズと対物レンズの2段レンズ系が用いられるために、両方のレンズの収差を考慮しなければならない⁽¹⁶⁾。すなわち

$$r_p^2 = \left(\frac{1}{4} C_{s0} \alpha_p^3\right)^2 + \left(C_{c0} \left[\frac{\Delta V}{V_a}\right] \alpha_p\right)^2 + (mr_c)^2 \quad (2.2)$$

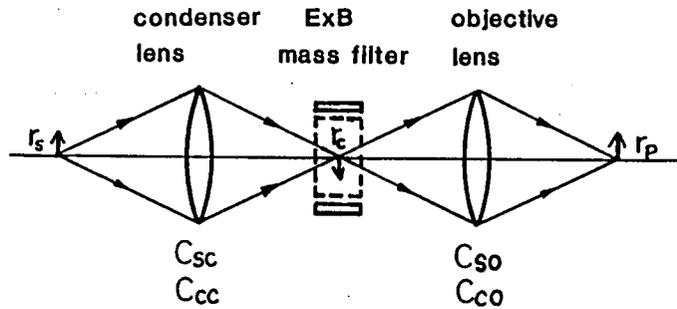


図 2-9 質量分離系を持つ 2 段の静電レンズ光学系。

$$r_c^2 = \left(\frac{1}{4} C_{sc} \alpha_s^3 \right)^2 + \left(C_{cc} \left[\frac{\Delta V}{V_e} \right] \alpha_s \right)^2 + r_s^2 \quad (2.3)$$

となる。ここで、諸量に対し次のような定義を行っている。計算の簡略化のために、 r_s と r_c をともにイオン源側で定義することによって、光学系全体の倍率 $m (= m_c m_o)$ を (2.2) 式だけに残している。

- r_s : ビームのソースサイズ (半径) (m) (イオン源側で定義)
- r_c : コンデンサレンズによるクロスオーバー半径 (イオン源側で定義) (m)
- r_p : 試料上でのビーム半径 (m) (試料側で定義)
- V_e : イオンビームの引き出しエネルギー (eV)
- V_a : イオンビームの加速エネルギー (eV)
- ΔV : イオンビームのエネルギー分散 (eV)
- C_{sc} : コンデンサレンズの球面収差係数 (m)
- C_{cc} : コンデンサレンズの色収差係数 (m)
- C_{so} : 対物レンズの球面収差係数 (m)
- C_{co} : 対物レンズの色収差係数 (m)
- m_c : コンデンサレンズの倍率
- m_o : 対物レンズの倍率
- α_s : イオン源からのビーム放射半角 (rad.)

α_p : 試料上へのビーム入射半角 (rad.)

k : 角倍率 ($= \alpha_s / \alpha_p$)

つきに、角倍率 k を用いて (2.3) 式の α_s を α_p でおきかえた後 (2.2) 式との間で r_c を消去し、

$$m = m_c m_o = \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_c} \sqrt{\frac{V_e}{V_a}} \right) \cdot \left(\frac{\alpha_c}{\alpha_p} \right) = k \sqrt{\frac{V_e}{V_a}} \quad (2.4)$$

によって m を消去する。

さらに、

$$\Delta V = G I_e^{\frac{2}{3}} \quad (17) \quad (2.5)$$

$$I_e = 2 (1 - \cos \alpha_e) \frac{I_p}{\alpha_s^2} \quad (2.6)$$

を用いることによって ΔV を消去し、次のように r_p を α_p で表わすことができる。ここで、 G は定数、 I_e はエミッション電流 (A)、 I_p は試料上でのビーム電流 (A) である。

$$r_p^2 = A_1 \alpha_p^8 + A_2 \alpha_p^{-\frac{2}{3}} + A_3 r_s^3 \quad (2.7)$$

(2.6) 式において第 1 項は球面収差、第 2 項は色収差、第 3 項はソースサイズによる項である。ただし、

$$A_1 = \left(\frac{1}{4} C_{so} \right)^2 + \left(\frac{1}{4} k^4 C_{sc} \right)^2 \frac{V_e}{V_a} \quad (2.8)$$

$$A_2 = G^2(2(1 - \cos \alpha_e) I_p)^{\frac{4}{3}} \cdot \left((k^{-\frac{4}{3}} C_{co} V_a^{-1})^2 + (k^{\frac{2}{3}} C_{cc})^2 V_a^{-1} V_e^{-1} \right) \quad (2.9)$$

$$A_3 = k^2 \frac{V_e}{V_a} \quad (2.10)$$

である。(2.7)式に対して、実際の装置のパラメータを用いたときの r_p を α_p に対してプロットした結果が図2-10である。用いたパラメータの値を以下に示す。

- $C_{sc} = 5.42 \times 10^{-1} \text{ m}$
- $C_{cc} = 2.10 \times 10^{-2} \text{ m}$
- $C_{so} = 13.4 \text{ m}$
- $C_{co} = 1.30 \times 10^{-2} \text{ m}$
- $V_o = 100 \text{ keV}$
- $V_e = 6 \text{ keV}$
- $r_s = 10 \text{ nm}$
- $\alpha_e = \pi/12 \text{ (rad.)}$
- $G = 3.5 \times 10^4 \text{ (V/A)}^{\frac{2}{3}}$
- $k = 2$

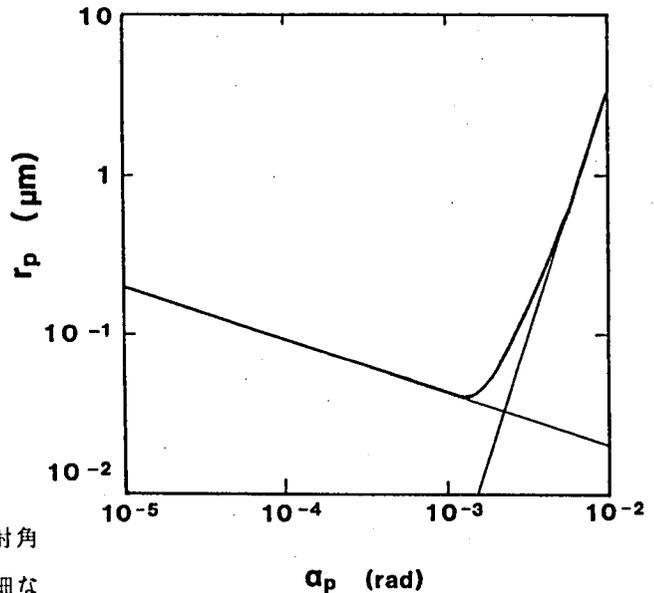


図2-10より、適切なビーム入射角のもとでは直径0.1 μm 程度の微細なビーム径が得られることがわかる。図において、ビーム径に対し α_p の増加とともに球面収差の影響が大となり、逆に α_p の減少とともに色収差の影響が大となることがわかる。

図2-10 集束イオンビーム光学系の集束特性。
(ビーム入射半角に対するビーム半径)

2-3-2 質量分離系

2-2-1節で述べたように、多くの場合液体金属イオン源から所望のイオンビームを得るためには、イオン化合物を合金にして融点を下げることが必要である。このとき放出されるイオンビームから、所望のイオンビームのみを取り出すために質量分離装置を用いる。E×B型質量分離装置は、質量分解能は高くないがコンパクトであり、選択したイオンビームの軌道が変わらないという理由で、FIB装置に一般的に用いられている⁽¹⁸⁾。

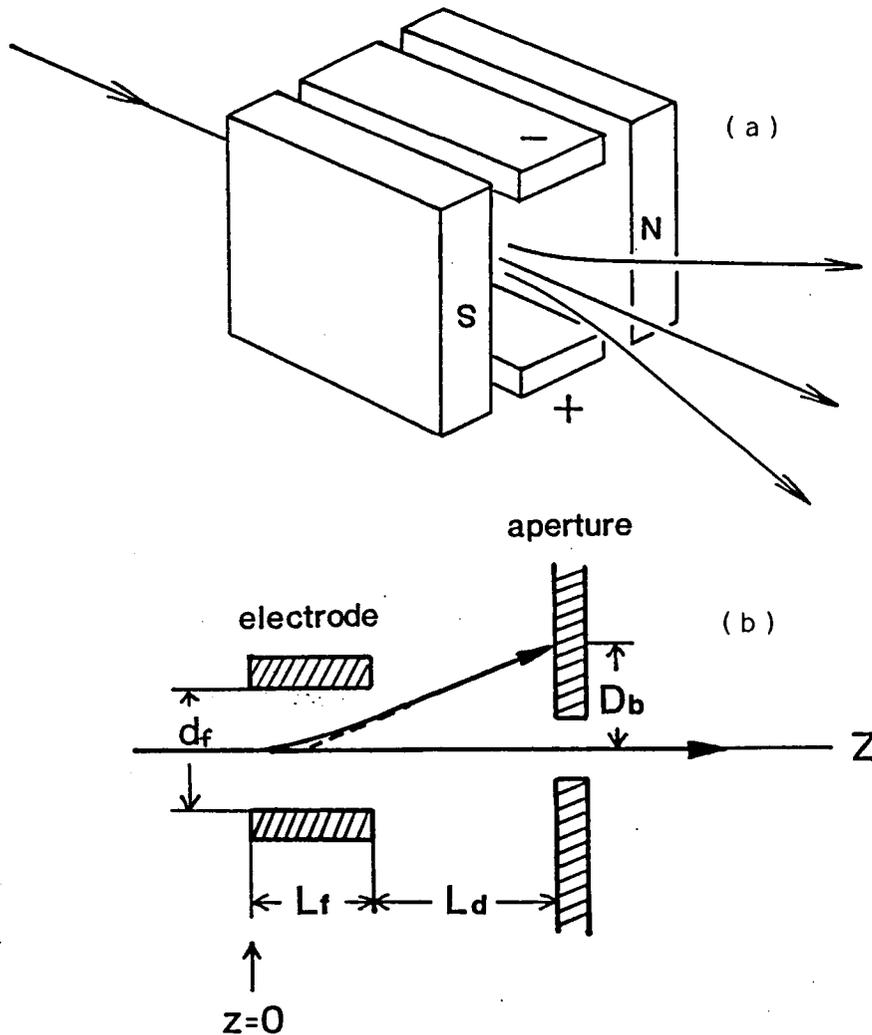


図 2-11 E×B型質量分離装置。

(a) 原理図。

(b) 各部のパラメータ。

この質量分離装置はビーム進行方向に対し垂直な面内で電場E及び磁場Bを互いに垂直な方向に印加することによって質量分離をおこし、電場による力と磁場による力が釣り合うような速度を持った粒子のみを直進させる原理を利用している(図2-11(a))。ビームが直進する条件は次式によって与えられる。

$$q(v \times B) + qE = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{2} m_i v^2 = qV_a \quad (2.12)$$

ここで、

- q : イオンの持つ電荷 (C)
- m_i : イオンの質量 (kg)
- v : イオンビームの速度 (m/sec.)
- B : 磁場の強度 (T)
- E : 電界の強度 (V/m)
- V_a : ビームの加速エネルギー (eV)

としている。(2.11)(2.12)式から、あるイオンビームを直進させるためのEとBの関係は

$$E = \sqrt{\frac{2q}{m_i} V_a} \cdot B \quad (2.13)$$

となる。

図2-11(b)に示すE×B型質量分離装置において、除去すべきイオンの中心軸からのずれ量をD_b(m)、ビームの持つエネルギー分散によって生ずる色収差をD_o(m)とすれば、

$$D_b = \frac{1}{2} \left(\frac{L_f}{d_f} \right) \cdot \left(\frac{L_f}{2} + L_d \right) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{m_p \cdot q_s}{m_s \cdot q_p}} \right) \cdot \left(\frac{V_f}{V} \right) \quad (2.14)$$

$$D_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{L_f}{d_f} \right) \cdot \left(\frac{L_f}{2} - z \right) \cdot \left(\frac{V_f}{V} \right) \cdot \frac{\Delta V}{V_a} \quad (2.15)$$

と表される⁽¹³⁾。ここで、

- V : ビームの加速電圧 (V)
- V_f : 質量分離装置の印加電圧 (V)
- m_p : 直進させるイオンの質量 (kg)
- q_p : 直進させるイオンの電荷 (C)
- m_s : 除去するイオンの質量 (kg)
- q_s : 除去するイオンの電荷 (C)
- ΔV : イオンビームのエネルギー分散 (eV)

としている。(2.14)式から、当然のことながら分離すべきイオン間の質量電荷比が近接している場合は $(m_p/m_s) \cdot (q_s/q_p) \simeq 1$ となり、 $D_b \simeq 0$ となるのでイオンビームの分離が困難になる。また、V_f を大きく、従ってBを大きくすれば分離が良好になる。図2-12は2-2-1節で述べたAu-Si-Be合金液体金属イオン源から放出されたイオンビームをE×B型質量分離装置によって質量分離を行った結果を示している。図2-12(a)は質量分離装置の磁場の強さBが0.1 k Gauss, (b)は1 k Gauss, (c)は5 k Gaussの場合であるが、上記の如くBが大きくなる程分離が良好になっていることがわかる。

また、(2.15)式より、 $Z = L_f/2$ のときに $D_0 = 0$ となるが、これはコンデンサレンズによってビームのクロスオーバを質量分離装置の電極の中央部に結ばせると色収差の影響をなくすことができ、良好なビーム集束特性を得ることができることを示している。そのため、コンデンサ・レンズの電圧はE×B型質量分離装置の電極中央部でクロスオーバを結ぶような条件に設定する。

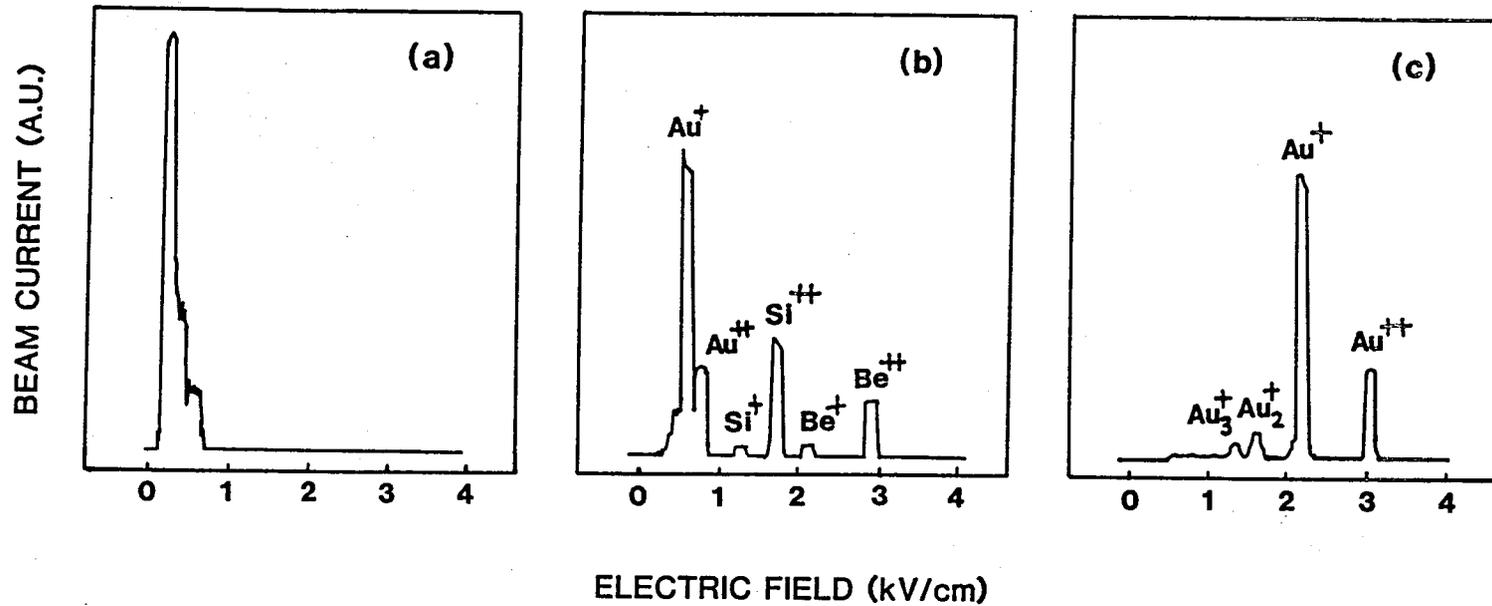


図 2-12 E × B 型質量分離装置の磁場の強さ (B) を変化させたときの, Au-Si-Be 液体金属イオン源から放出されたイオンビームの質量スペクトル。
(a) $B = 0.1$ kGauss. (b) $B = 1$ kGauss. (c) $B = 5$ kGauss の場合。

2-4 集束イオンビーム描画系

本研究のために、2-2節で述べた液体金属イオン源と2-3節で述べたFIB光学系に制御系を付加したFIBシステムを試作した⁽¹¹⁾。図2-13にその外観写真を、また図2-14にそのブロック図を示す。単体元素又は合金の液体金属イオン源を使用してGa, Si, Be, 及びAuのイオンビームを得ることができる。合金材料を使用した場合、必要なイオンビームのみを選択するために、E×B型質量分離装置を備えている。質量分解能は1/20である。イオンビームは質量が大きいので光学系には静電型のものが用いられる。それ以外は半導体デバイス製造においてフォトマスク描画や微細パターン形成に広く用いられている電子ビーム露光装置と非常に類似している。

2価のBeイオンビームを用いて厚さ1 μm のレジストを露光できるようにするために最大加速電圧は100 kVに設定した。

2-3-2節で述べたように、質量分離装置の色収差の影響を避けるために、コンデンサレンズを用いて質量分離装置の中央部でイオンビームのクロスオーバを形成するようにしている。また、良く知られているように、ビームのオン・オフを行うビームブランキングプレートはビームのクロスオーバ部に設置する必要がある。これはビームのオン・オフ

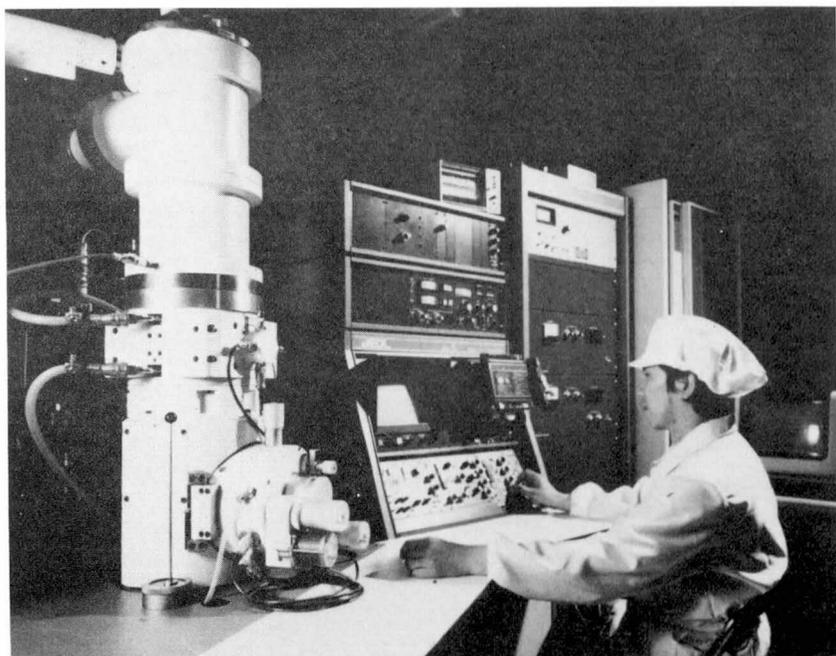


図2-13 試作した集束イオンビーム装置の外観写真。

時に試料上でビームが移動するのを防ぐためである。しかし、ビームのクロスオーバー部は質量分離装置内にあるので、ビームブランキングプレートを質量分離装置の上下に配置し、等価的にビームのクロスオーバー位置でブランキングを行うようにしている。対物レンズはアインチェルレンズで、イオンビームを試料面で結像させる働きをする。ビームの軸合せを行うために2組の静電電極が設けられ、また非点収差補正のために8極の静電電極を備えている。対物レンズのすぐ下にビーム入射角を決める対物絞りがあり、その下部に4極の静電偏向器がある。この偏向器は100 keV加速のイオンビームを±400 Vの偏向電圧で400 μm偏向することができる。試料ステージは最大4インチ径のウエハが装着でき、X・Y方向にそれぞれ15および25 mm移動できる。

集束イオンビームによって試料上を照射したときに得られる二次電子を検出することにより、走査型電子顕微鏡（SEM：Scanning Electron Microscope）と同じ原理で試料の拡大像をCRT（Cathode Ray Tube：陰極線管）に出すことができる。図2-15はAuをコーティングしたNiメッシュ上を100 keVのGa集束イオンビームで走査

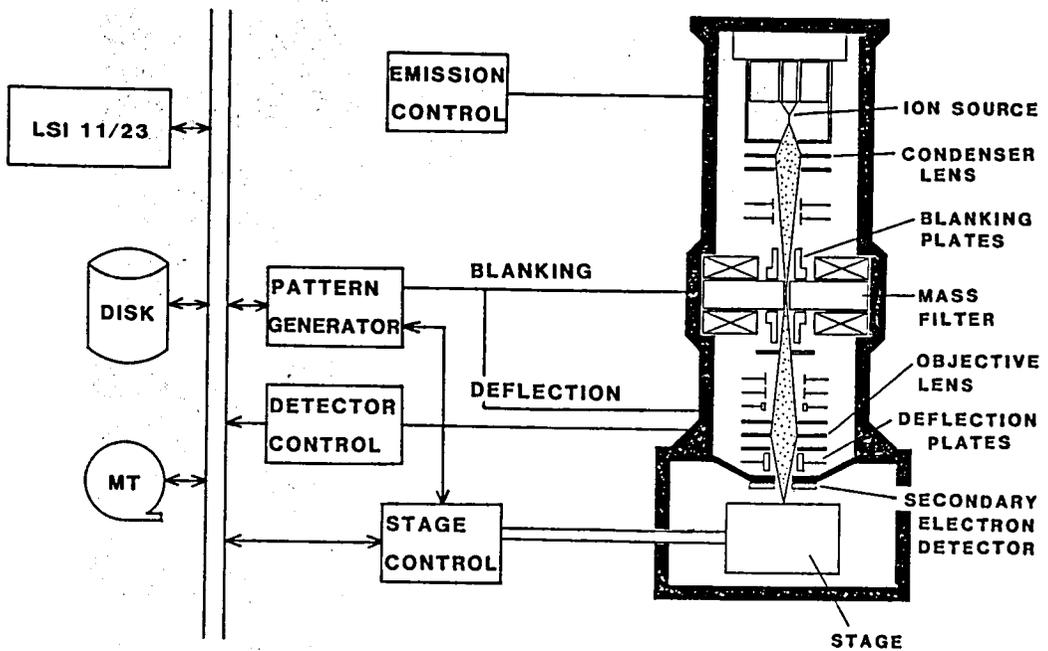


図 2-14 試作した集束イオンビーム装置のブロック図。

することによって得られた二次電子像である⁽⁶⁾。この像を観察することによってイオンビームを照射すべき場所の位置合せを行ったり、ビームの集束特性を評価することができる。この像の解像度は $0.1\ \mu\text{m}$ を大きく切っており、ビーム径は $0.1\ \mu\text{m}$ 以下に集束できていると考えられる。図2-16は含浸電極型液体金属イオン源にAu-Si-Be合金を用いた場合のNiメッシュの二次電子像である⁽¹⁴⁾。(a)は200 keVのAu, (b)はSi, (c)はBeのイオンビームを使用した場合である。ビームのエミッション電流は $10\ \mu\text{A}$ である。図から明らかなように、像の解像度は $\text{Be} > \text{Si} > \text{Au}$ の順になっているが、これはイオンビームの質量が小さい程ビームのエネルギー分散が小さいので⁽¹⁹⁾、色収差の影響が小さくなるからである。二次電子検出器として、シンチレータとマイクロチャンネルプレートが備えられている。これについては2-5節で詳しく述べる。

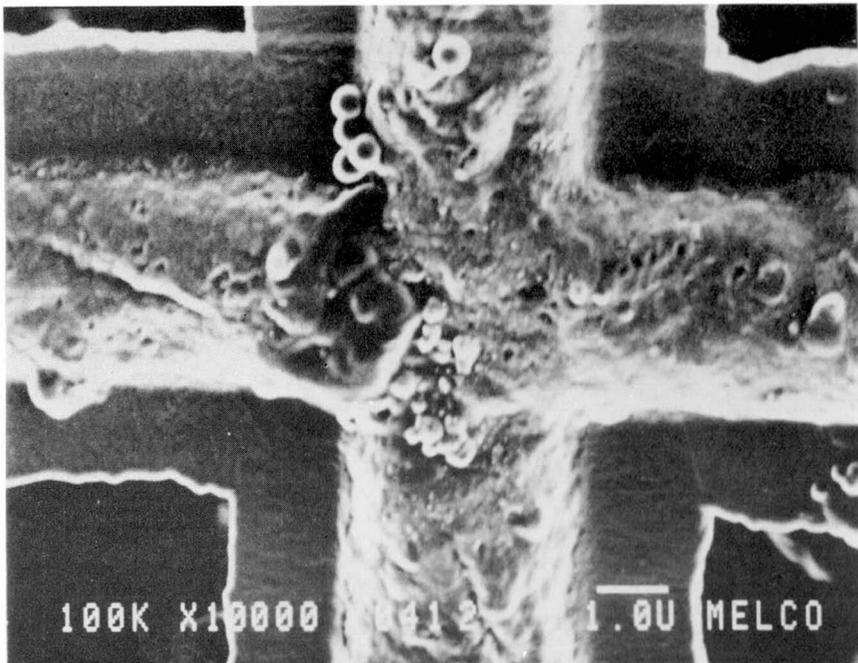
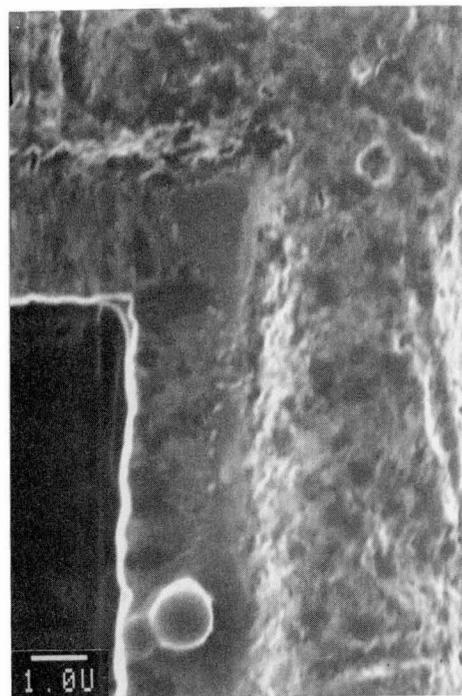
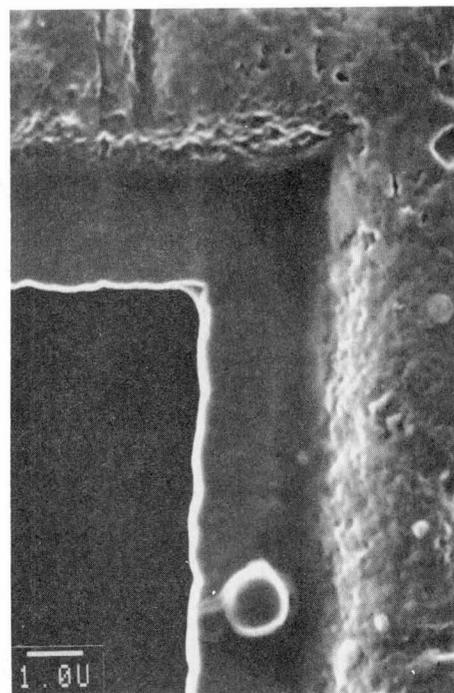


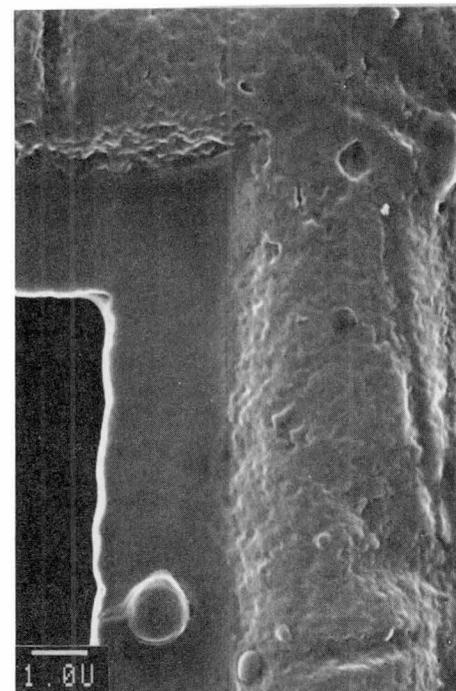
図2-15 Niメッシュ上を100 keVのGa集束イオンビームによって走査したときの二次電子像。



(a) Au



(b) Si



(c) Be

Secondary electron image with Au^{++} , Si^{++} and Be^{++} FIB

energy: 200 keV I_e : 10 μA

図 2-16 異なるイオンビームによる二次電子像。

(a) 200 keV の Au, (b) 200 keV の Si, (c) 200 keV の Be を用いた場合。

ビーム径をより詳細に評価するために、グリッドメッシュのエッジ部をイオンビームによって走査し、透過したビーム電流をファラデーカップによって測定する方法を試みた。その測定原理及び100 keVのGa イオンビームの測定結果を図2-17(a)(b)に示す。このときのビームエミッション電流は $2.5\ \mu\text{A}$ 、試料上へのビーム電流は50 pAである。グ

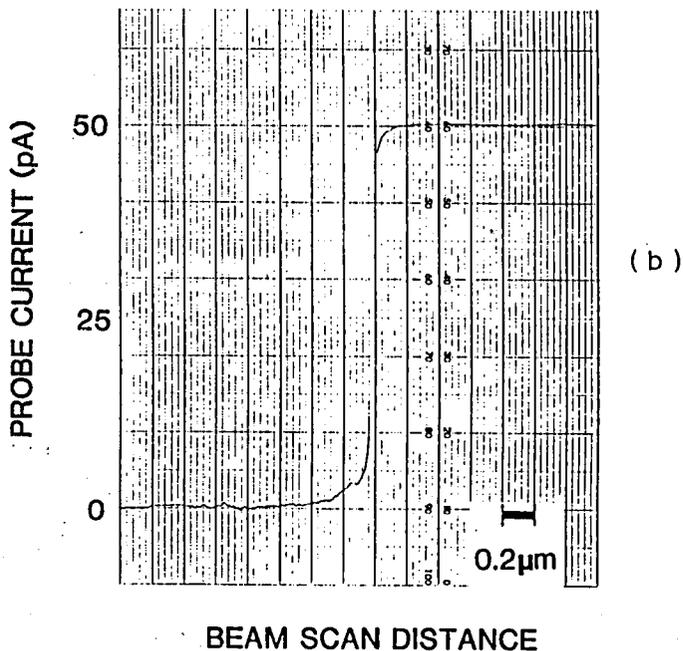
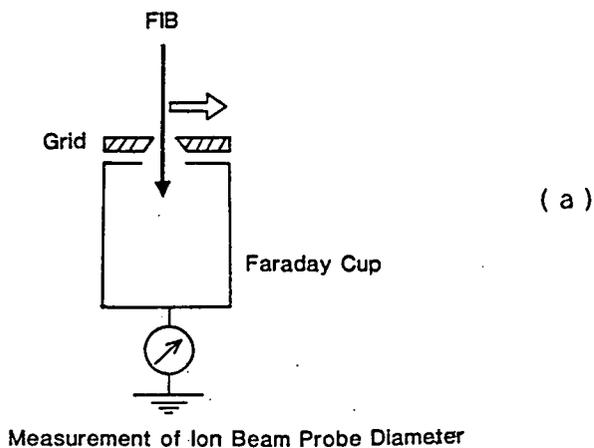


図2-17 イオンビーム径の測定。

(a) 測定原理。

(b) 測定結果。

ラフのエッジ部での立ち上がり時間（10～90％）から、ビーム径は $0.07\mu\text{m}$ と測定できる。基本的には本方法によってビーム径を測定することができるが、高精度な測定を行うには、イオンビーム照射によるグリッドメッシュのスパッタリングや、グリッドメッシュから発生する二次電子・二次イオンの測定値に対する影響をなくすることが必要である。

FIBシステムによって描画を行うために、DECのLSI 11/23を使用している。コンピュータシステムはメインメモリが256KBで外部記憶に10MBの固定磁気ディスク2台と1600BPI (Bit Per Inch) の磁気テープドライブを備えている。コンピュータの機能は主に図形データからの描画機能（ビームの偏向・ブランキングと試料ステージの制御）と、検出した二次電子信号によるビーム位置の測定及び位置合せである。描画データは電子ビーム露光装置でも広く用いられている台形フォーマットを採用した。また、インターフェース・ソフトウェアによって、CAD (Computer Aided Design) システムのデータも扱うことができる。CRT端末からエディタによって編集・修正ができるASCIIデータも入力することができる。

パターン描画機能を持つパターン発生装置のハードウェアブロック図を図2-18に示

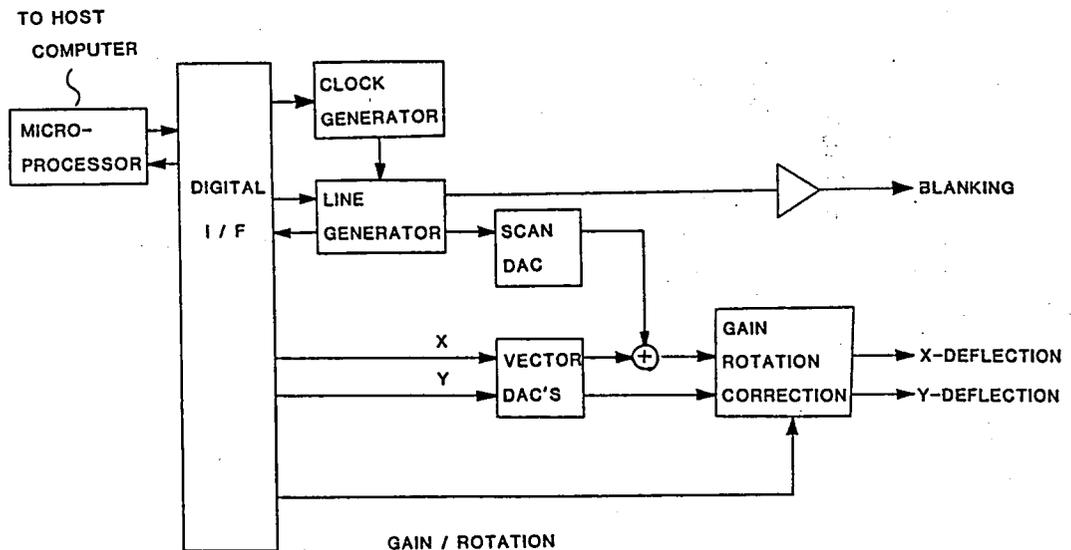


図2-18 パターン発生装置のハードウェアブロック図。

す⁽¹¹⁾。パターン発生装置はマイクロプロセッサによってコントロールされている。このプロセッサはLSI 11/23との間でデータとコマンドのやりとりを行ない、図形データをビームスキャンに対応するスキャンデータに分割するとともに、位置合せの時はA/Dコンバータの制御をおこなう。またパターン発生装置の諸パラメータ（描画速度、ビーム位置補正值、ビーム偏向のゲイン・ローテーション）の設定を行う。このような構成にしたのは、描画時のオーバーヘッドを多少犠牲にしても多彩な実験に対応して描画方式をソフトウェアのみの変更によって簡単に変えることができるからである。16 bit と 12 bit の2つのD/Aコンバータの出力の和をビームの偏向信号としている。16 bit のD/Aコンバータによってビームを描画位置まで偏向した後12 bit のD/Aコンバータによって図形の描画を行う。これは、全描画フィールドを充分高い解像度で走査するには16 bit が必要であるが、高解像D/Aコンバータは高速描画に回答できないからである。アドレスサイズ（ビーム走査時のステップ間隔）は200 μm フィールド使用時には0.025 μm 、400 μm フィールド使用時には0.05 μm である。

描画速度はパターン発生装置を設計する上で重要なパラメータである。描画速度（1秒間のビームショット数と定義する）を f_w (Hz)，アドレスサイズを d (μm)，イオンビーム電流を I_p (pA，ただし一価のイオンの場合。n価の場合は I_p/n)，電子の電荷を e (C)，必要なイオンビーム照射量を D (ions/cm²)とすれば，

$$f_w = \frac{I_p}{ed^2D} \times 10^{-4} \quad (2.16)$$

と表される。ビーム電流が100 pAの場合の f_w と D の関係を d をパラメータにして図示したものが図2-19である。参考のために、主なFIBの応用に必要なイオン照射量の範囲をあわせて示している。全応用範囲をカバーするためには $d = 0.025 \mu\text{m}$ の場合10 Hz ~ 100 MHzの描画速度が必要となる。しかし、制御系の応答速度の上限は2 MHzであるため、低照射領域はビーム電流を減少させることにより対応することにした。描画速度 f_w (Hz)は

$$f_w (\text{Hz}) = n \times 10^k \quad (2.17)$$

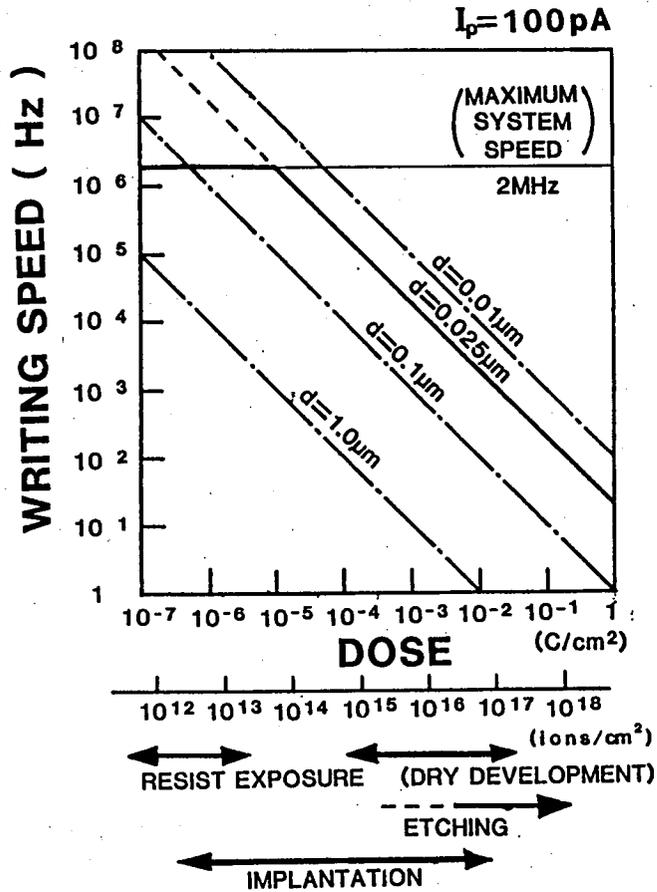


図 2-19 ビーム電流が 100 pA の場合のイオンビーム照射量と描画速度との関係。

の式に対応して選択することができる。($n = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 18, 20$, $k = 1 \sim 5$)

ここで、FIBプロセスのスループットについて考察を加えてみる。描画面積を S (mm²) 描画に要する時間を T (分) とした場合、描画装置の速度の上限およびオーバーヘッドを無視すれば、

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{60} \left(\frac{eDS}{I_p} \right) \times 10^9 \\
 &= 2.67 \times 10^{-11} \times \frac{DS}{I_p}
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

と表される。これを $I_p = 100 \text{ pA}$ の場合において S をパラメータとして図示したものが図 2-20 である。一例として、直径 6 インチのウェハの 5% の面積 ($\approx 10^3 \text{ mm}^2$) を描画する場合を考えると、図 2-20 から、 $10^{12} \text{ ions/cm}^2$ の照射量に対してはウェハ 1 枚当たりの描画時間が約 100 分であるが、 $10^{16} \text{ ions/cm}^2$ の照射量に対しては描画時間が約 10^7 分にもなってしまう、現実的には実現不可能である。このことから、特に高照射領域での応用に対してスループットの高速化が重要であることが理解できる。スループットを上げるには、原理的には (2.18) 式からイオンビーム電流を増やすしかなく、直接的にはイオン源の輝度を上げることが必要になる。また、別の手段として、可変矩形ビーム方式の採用が考えられる。これは、描画パターンに応じて成形した矩形のビームによって描画を行う方式で、高スループット電子ビーム描画装置のために開発されたものである。この方式では、イオンビームの輝度が保存されると仮定すれば、ビーム径 $0.1 \text{ }\mu\text{m}$ で 100 pA のビーム電流がとれるイオン源を使用した場合、 $5 \text{ }\mu\text{m} \times 5 \text{ }\mu\text{m}$ の成形ビームでは約 300 nA のビーム電流がとれることになり、等価的に (2.18) 式におけるビーム電流を 3 桁以上上げることができる。しかし、可変矩形ビーム方式を実現するためには、高輝度でかつ大面積にわたって均一性の良いビームを発生するイオン源や、成形ビーム光学系の開発が前提となる。

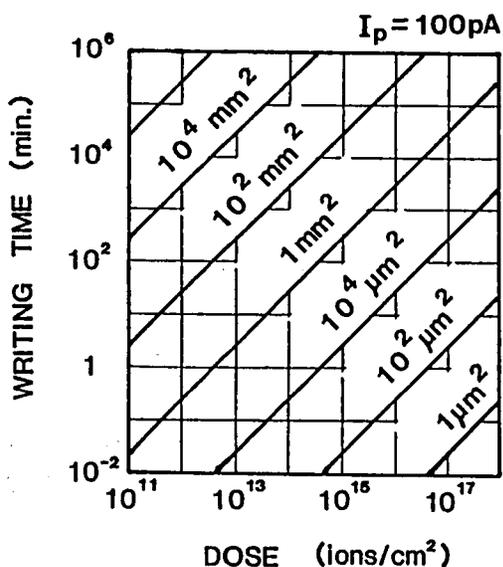


図 2-20 描画面積に対する、イオンビーム照射量と描画速度との関係。

2-5 アライメント系

FIBによって実際に半導体デバイスを製造する場合、イオンビームの位置をデバイスの回路パターンに正確に合せること（以下「アライメント」と呼ぶ）が必要である。イオンビームを試料に照射した場合、試料表面から二次電子、二次イオン、スパッタされた基板物質原子といった二次粒子や、反射イオン及びフォトンが発生する。二次電子はその放出比が最も大きく、検出も容易であることからアライメント信号として適している。アライメントは、FIB描画時に、試料基板にあらかじめ設けられた基準マーク（アライメントマーク）上をイオンビームによって照射し、発生したアライメント信号を検出することによって行う。アライメント技術はFIB描画精度に最も大きな影響を与えるので⁽²⁰⁾、各条件におけるアライメント信号及びその検出精度を把握することは非常に重要である。本節では、アライメント信号の検出器およびアライメント信号波形についての考察結果について述べる。

アライメント信号検出器として、フォトマルチプライア（PMT）とマイクロチャンネルプレート（MCP）を使用して比較を行った。その配置を図2-21に示す。PMTはコレクタ（+1.5 kV）によって集められた二次電子をシンチレータ（最大バイアス10 kV）に入射させた後光電子増倍を行っている。MCPは、図2-22に示すように、各々が二

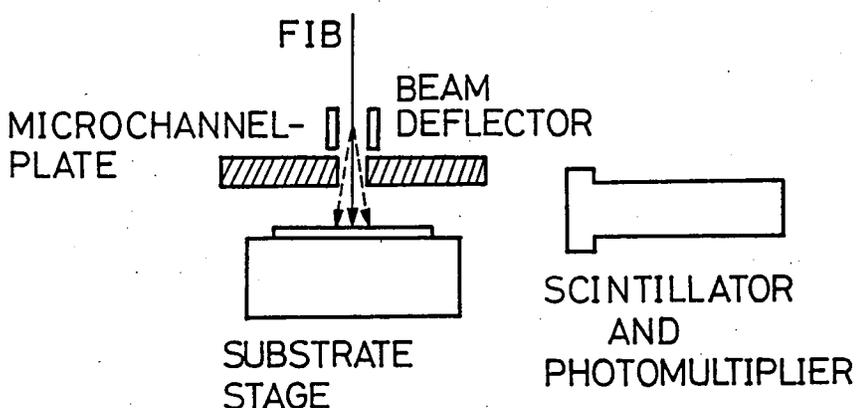


図2-21 アライメント信号検出器の配置。

二次電子増倍作用を持つチャンネルを束にした円板状のものである⁽²¹⁾。チャンネルの直径は20 μm で、内壁には二次電子放出材料を塗布してある。チャンネルの入口と出口の間には最大1 kVのバイアスを印加しており、入口に入射した粒子によって発生した二次電子は、チャンネル内でこのバイアスによって加速されながらチャンネル内壁に衝突し、二次電子増倍が行われる。1 kVバイアス時のゲインは約10000である。最終的な二次電子は後方におかれた円板状のコレクタに捕捉され、検出回路に流れる。MCPの前面には電極があり、100 V前後のバイアスを印加したときに最大のアライメント信号が得られる。これは、MCPの入射電子エネルギーのゲイン特性と、二次電子捕捉の関係から決まっていると考えられる。実際に使用しているMCPはイオンビームを通すためにその中央に穴をあけている。

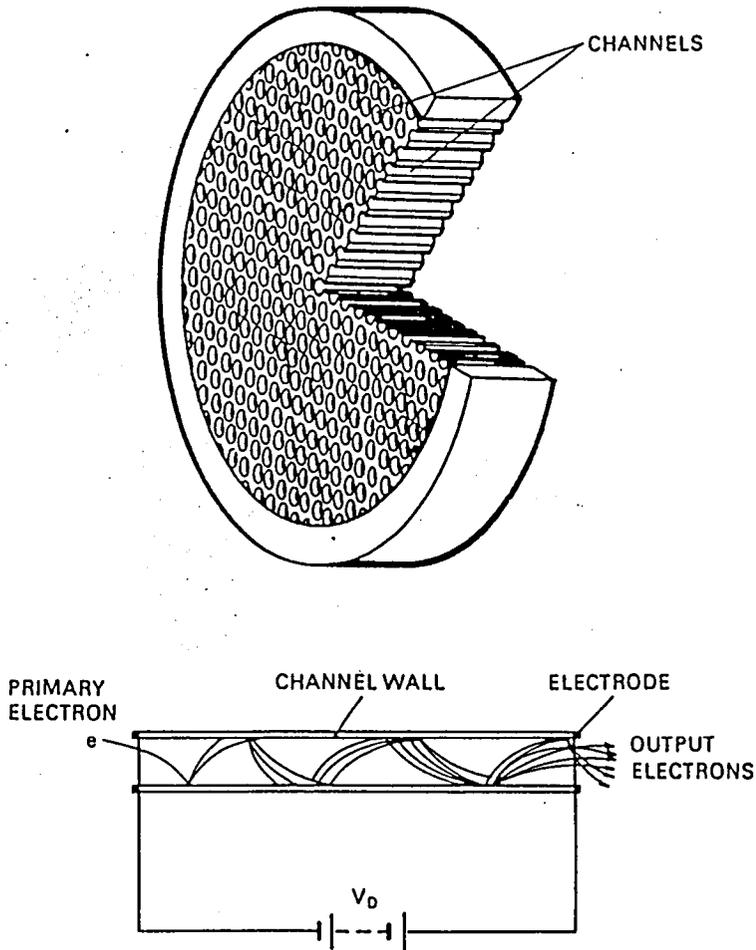
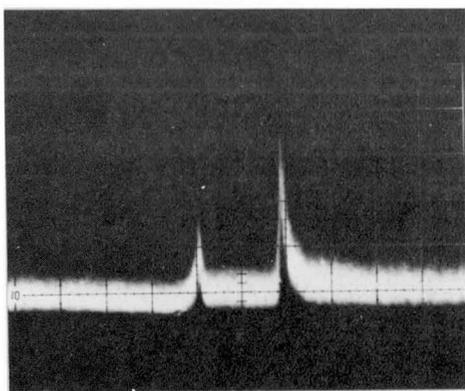
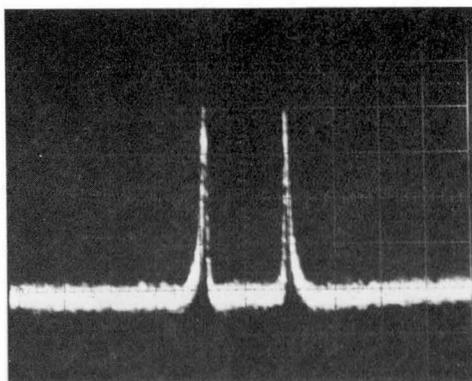


図 2-22 マイクロチャンネルプレートの構造⁽²¹⁾。

Si 基板上に形成されたアライメントマーク上を 200 keV の Si イオンビームによって走査したときに、PMT 及び MCP によって得られたアライメント信号を図 2-23 に示す^[22]。ビーム電流は 20 pA、ビームの走査速度は 100 kHz、アドレスサイズは 0.025 μm である。マークは RIE (Reactive Ion Etching: 反応性イオンエッチング) によって形成した幅 10 μm 、高さ 2 μm のエッチングパターンである。マーク以外の部分をエッチングによって掘り下げている。アライメント信号のピークはマークのエッジ部に対応している。マークエッジ部は平坦部に比べて二次電子の放出比が大きいからである。



(a)



(b)

図 2-23 段差マーク上を 200 keV の Si イオンビームによって走査したときのアライメント信号。
(a) PMT を使用した場合。(b) MCP を使用した場合。

PMT による信号は2つのエッジのピーク波形が非対称であるのに対し、MCP による信号は対称である。これは、図2-20 からわかるように MCP がビーム照射位置に対して対称形状を成している一方、PMT はその構造上試料の側面に配置せざるをえないために、マークエッジの方向によって発生する二次電子の捕捉率に差が生ずるためである。従って、PMT では検出器から遠いほうのマークエッジ信号が小さく、検出精度が悪くなってしまう。このことからアライメント信号検出器としては MCP がすぐれているといえる。以下の実験ではすべて MCP を使用している。

マーク断面形状に対するアライメント信号波形の拡大図を図2-24 に示す。条件は図

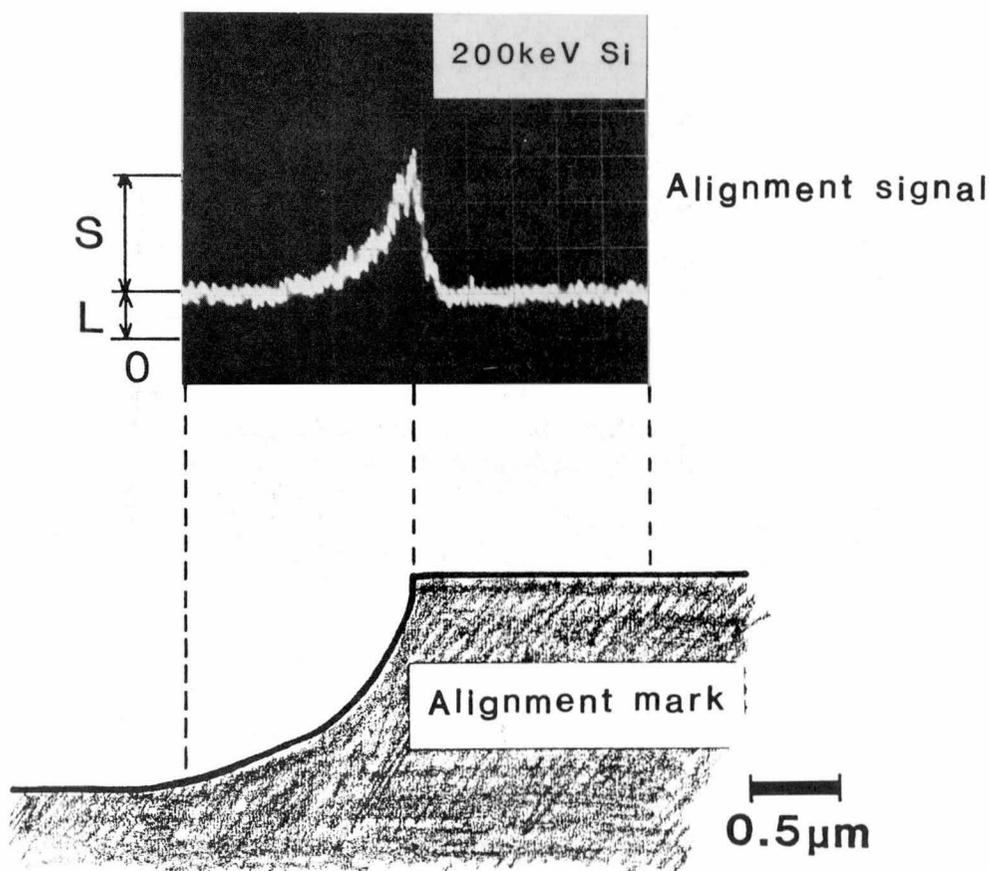


図2-24 アライメントマーク断面形状に対するアライメント信号波形の拡大図。

2-23のときと同じである。波形はマーク段差のスロープ部で徐々に立ち上がり、エッジ部で最大となる。この信号波形は基板の幾何学的形状によって二次電子の放出比が変化することによって生じている。この信号波形について考察を加えるために、図に示したように信号の零点に対してマークの平坦部の信号レベルをL、Lに対してエッジ部で増加する信号をSと定義する。そして200 keVのBe、Si、Au、の3種類のイオンビームによってマーク上を走査したときの信号波形から求めたLとSの値を表2-1にまとめた。表には、比較のために各イオンビームの原子番号(n)を付している。この結果から、Sの大きさはAu > Si > Beの順(イオンビームの元素の原子番号の大きいものほど大きい)であるのに対して、Lの大きさはSi > Be > Auの順になっていることが明らかになった。

表2-1 Be、Si、Auの3種類のイオンビームに対するアラメント信号のLとSの値。(nは原子番号)

	Be	Si	Au
n	4	14	79
L	1.9	2.2	1.7
S	6.5	8.4	11.3

これらの関係をより明らかにするために、各イオン種に対する二次電子信号強度の基板へのビーム入射角度依存性を調べた結果を図2-25に示す⁽²³⁾。ビーム入射角度が0~30°の間では信号強度はSi > Be > Auの順であるが、40°付近からAuによる強度が急激に増加している。すなわち、平坦部では二次電子放出比がSi > Be > Auの順であるが、そのビーム入射角度依存性はAu > Si > Be、すなわちイオンの原子番号が大きい程顕著であることを示している。ビーム入射角度を θ 、飛程をR、二次電子の減衰定数を β とした場合、電子ビーム照射による二次電子放出比は一次近似的に $\exp\{\beta R(1-\cos\theta)\}$ に比例することが知られているが⁽²⁴⁾、イオンビームの場合にも基本的には同様の傾向がある

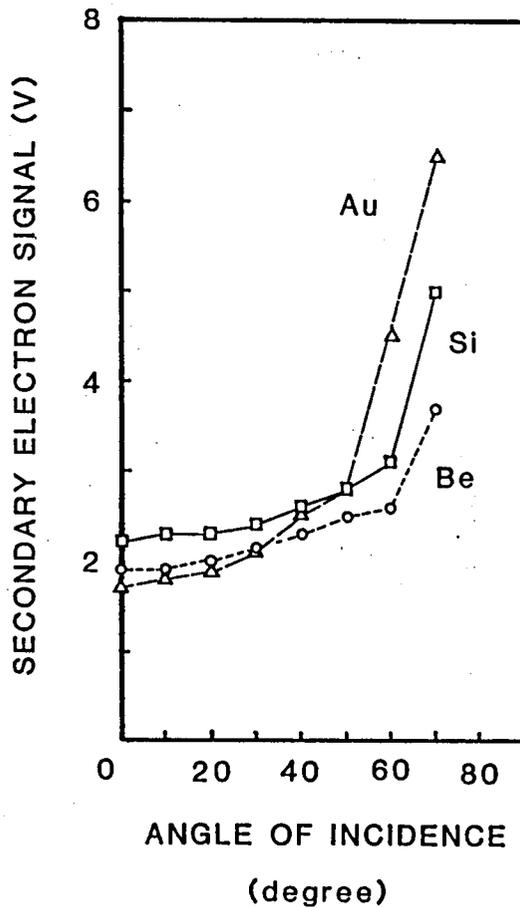


図2-25 Be, Si, Auの3種類のイオンビームに対する二次電子信号強度のビーム入射角度依存性。

と考えられ、図 2-25 の特性を示唆している。また、Svensson らの報告²⁶⁾では、He, Ne, Ar, Xe 各イオンビームを Cu 基板に照射したときの二次電子放出比を調べ、原子番号の大きいイオンビームほど大きなビーム入射角度依存性を持つという結果を得ており、本結果と定性的な一致を見ている。ビーム入射角度 0 のときは、イオンビームが基板に与える運動量の割合がイオンと基板の原子番号が等しいときに最大になるという点で、上記の実験結果を解釈することもできると考えられるが、詳細については更に検討を加える必要がある。図 2-26 は二次電子信号強度のビーム入射角度依存性のデータ(図 2-25)とマークの断面(図 2-24)から求めたマーク信号波形であり、測定結果と定性的な一

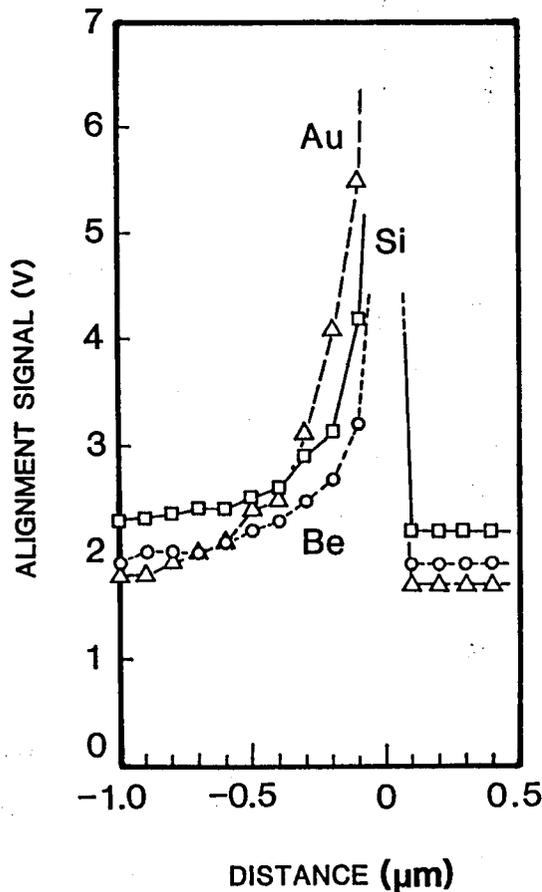


図 2-26 二次電子信号強度のビーム入射角度依存性と、マークの断面から求めたマーク信号波形。

致を見ている。すなわち、基板の幾何形状に応じてイオンビームの基板への入射角度の変化が生じ、二次電子放出比が変化することによってアライメント信号が得られるものと考えられる。図2-25における 90° 付近の測定が困難であったために、マークエッジ付近の信号波形をプロットすることはできなかった。

アライメントを行っている間に、イオンビーム照射によってマークがスパッタエッチングされたり、イオン注入されることによるマーク信号波形の変化が生ずることが予想される。図2-27はAu, Si, 及びBeイオンビームによってSi段差マークエッジ上を走査したときの1回目と100回目の走査に対応するマーク信号を示したものである。ビーム電流は20 pA, 走査速度は100 kHz, 走査ステップは $1/40 \mu\text{m}$ であるので、100回のビーム走査を行ったときはマークは 2×10^{16} ions/cm²のイオンビーム照射を受けたことになる。Auイオンビームの場合は顕著な変化が認められるが、Si, Beイオンビームの場合は全く変化がない。図2-28はこの結果をグラフにしたものであるが、Auイオンビームの場合は走査を行うたびに信号が低下している²²⁾。図2-29はAu及びSiイオンビームによって走査を行った場所をSEMによって観察したものである。Auイオンビームによって走査した場所はスパッタエッチングによってマークエッジ部分が変形してしまっているが、Siイオンビームによって走査した場所は全体的にわずかに色が変わっている(二次電子放出比が変化している)のみで、エッジ部の形状は全く変化していない。これは重い元素から成るイオンビームほどスパッタレートが大きいからである。すなわち、Si, Beといった比較的軽い元素のイオンビームの場合は、 10^{16} ions/cm²程度の照射を行ってもアライメント信号には影響を与えないが、Auイオンビームのような重い元素の場合はビーム走査のたびにスパッタエッチングの影響でアライメント信号波形を変化させてしまうので、高精度なアライメントを行うのに問題を持っているといえる。

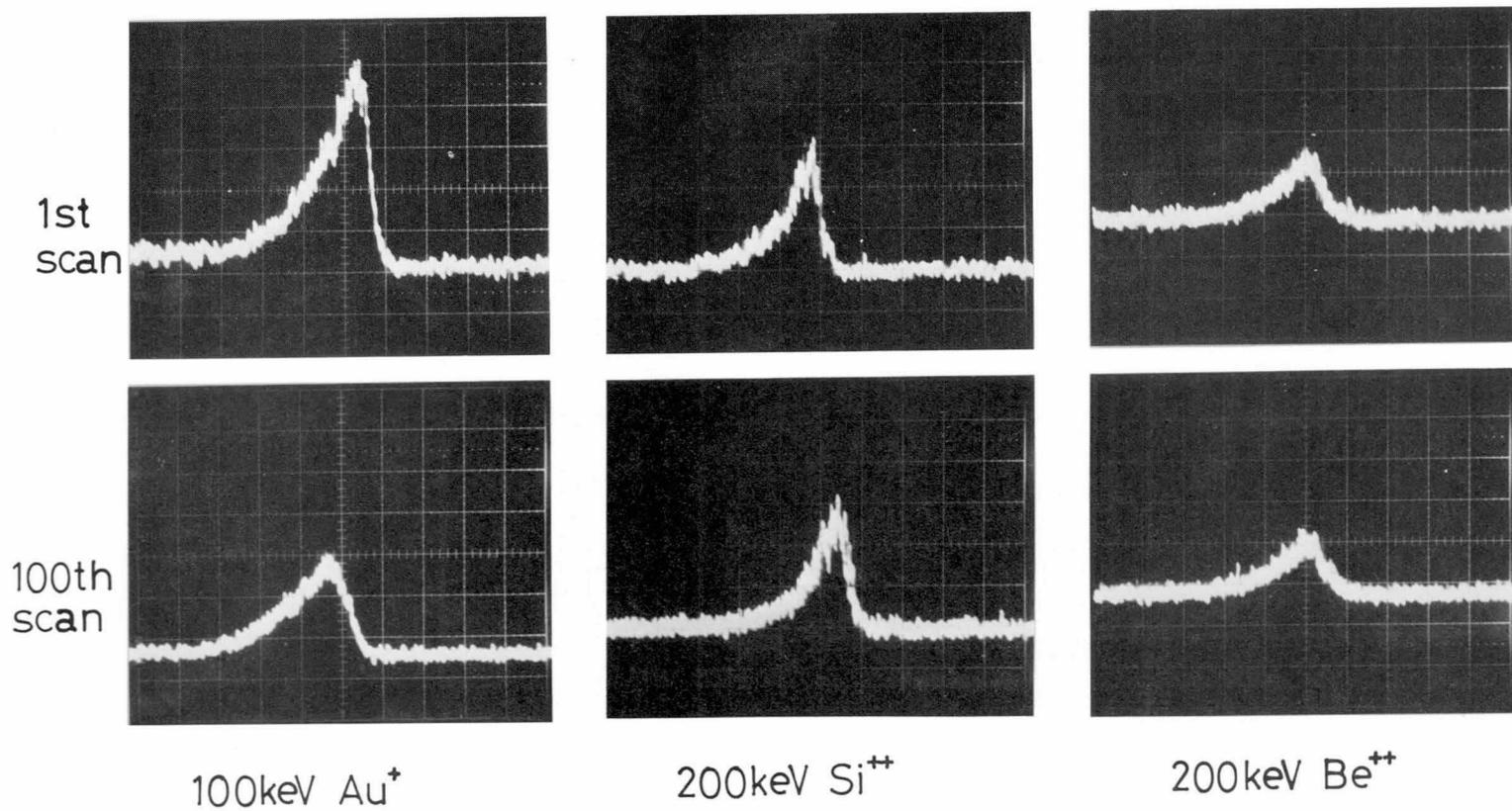


図 2-27 Au, Si, および Be イオンビームによってマーク上を走査したときの, 1回目と 100回目の走査に対応するマーク信号。

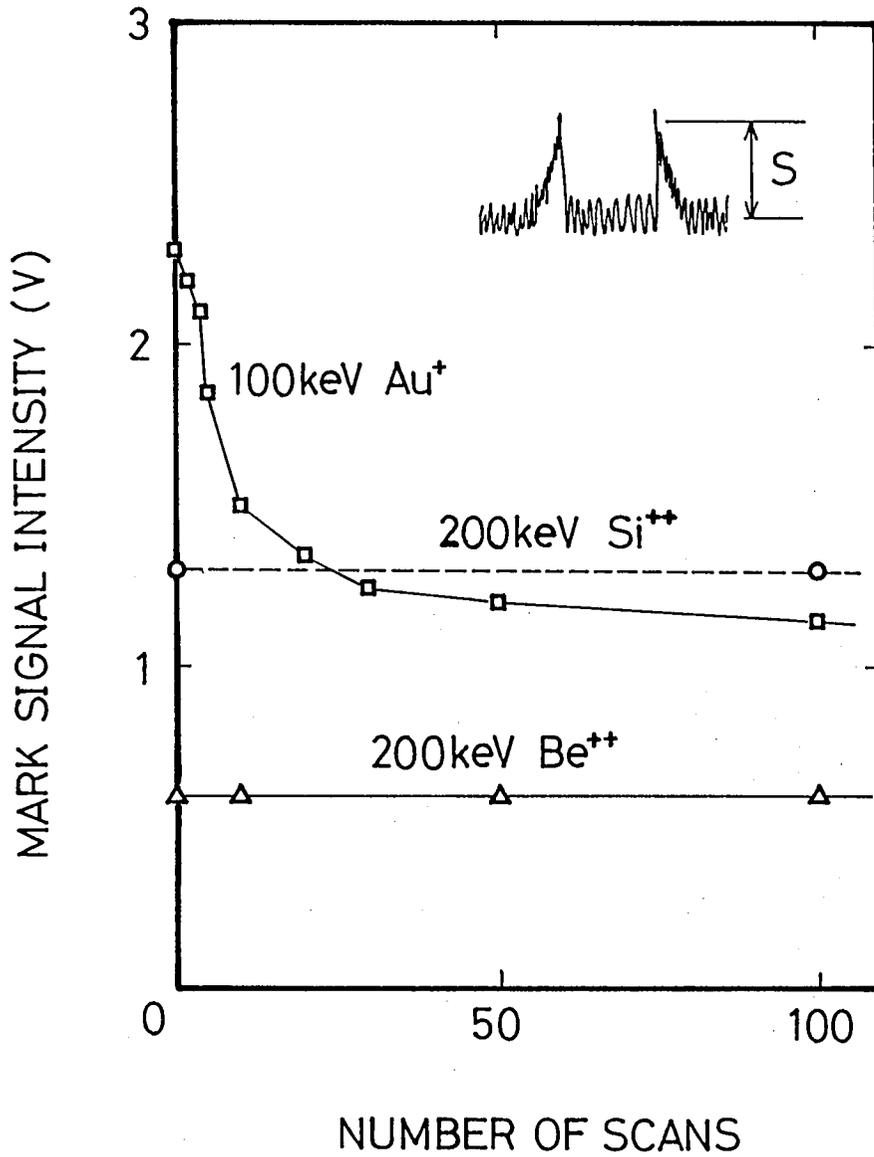
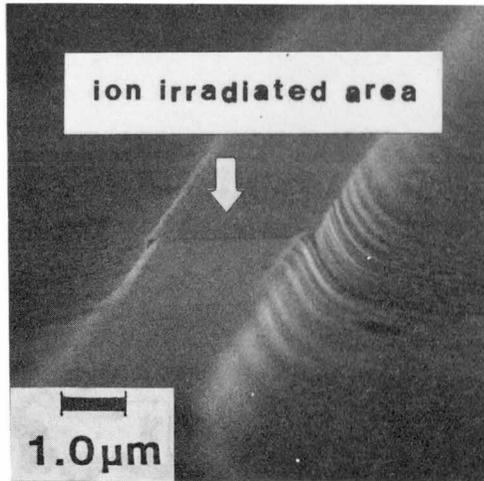
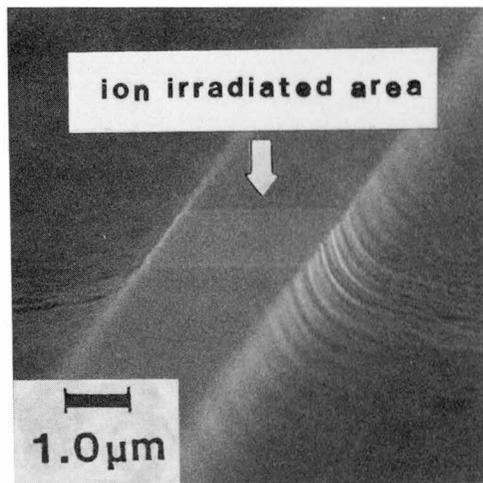


図 2-28 ビーム走査回数に対するマーク信号強度の変化。



100keV Au⁺



200keV Si⁺⁺

図 2 - 29 AuおよびSiイオンビームによって走査を行った後のマーク形状。
(イオンビーム照射量 2×10^{16} ions/cm²)

2-6 結 言

以上、本研究のために試作したFIB装置について述べてきた。まず、Ga, Si, およびBeの液体金属イオン源についての基礎的な特性を明らかにした。さらに、高いエミッション安定性を持つ含浸電極型液体金属イオン源について検討を行い、微細なイオンビームが安定に得られることを確認した。

また、最大加速電圧100 kVで2段レンズ系とE×B型質量分離装置を持つ集束イオンビーム装置を試作し、ほぼ設計通りのビーム集束特性を有することを確認した。

次に、イオンビームと下地基板とのアライメントに使用するために、段差マーク上をイオンビームによって走査したときの二次電子信号検出について検討を加えた。その結果、信号の発生は二次電子放出比のイオンビーム入射角度依存性と密接な関係にあり、イオンの質量が重いほど大きな信号が得られることが明らかになった。また、Si, Beなどの比較的質量が軽いイオンビームを用いた場合はビーム走査時のマークの損傷は無視しうるが、Auのような重いイオンビームの場合はマークの損傷が大きいという結果を得た。

本研究に際して試作したFIB装置は、基礎的な実験に対してはほぼ十分な性能を持っていると考えられるが、今後デバイスへの応用などの実験を行うためには、まだ以下に示すような多くの改良すべき点を残している。

イオン源に関しては、まず必要なすべての元素のイオンビームを安定に引き出すことが必要である。現在までに、Ga, Au-Si, Au-Si-Beを用いてGa, Si, 及びBeイオンビームが比較的安定に得られるようになった。次はSiデバイスへの不純物として、B, As, Sb, P等が望まれるところである。これらに関しては、Pt-B-Au-Ge⁽⁹⁾, Pt-B⁽²⁶⁾, Ni-B⁽²⁷⁾, Sn-Pb-As⁽⁹⁾, Pb-Au-Sb⁽²⁷⁾, Au-Sb⁽²⁸⁾, Cu-P⁽²⁹⁾等の合金を用いた報告がなされているが、長時間安定なエミッションを得るに至っていない。Bは高温でニードル材であるタングステンとの反応性が強く、As, Pは蒸気圧が高いためである。このような問題を解決するために、ニードル材にBと反応しにくいカーボンを使用したり⁽²⁶⁾、電子線衝撃によってニードル先端部のみを加熱する方法⁽³⁰⁾が検討されている。また、2-2-2節で述べた含浸電極型液体金属イオン源も有力な方法であると考えられる。含浸電極型液体金属イオン源は、液体金属の流れを積極的にコントロールすることができるためにイオン源の安定動作に対し非常に有利である。最近、Asの合金を共晶点ではなく、ストイキオメトリックな比率(Pd₂As)で使用すると、融点は高くなるが単体のときとは異なる化学的性質を示し、比較的安定なビームが得られるという発表があり⁽³¹⁾,

今後の動向が注目される。

液体金属イオン源とは異なるタイプのFIB用イオン源として、電界電離型ガスイオン源の研究も行われている^(32,33)。冷却されたチップの先端部にイオン化物質のガスを流し、高電界を印加することによって非常に微細で高輝度のイオンビームが放出される。現在H及びHeのイオン源が報告されており、ナノメートルオーダーの超微細加工用イオン源として将来期待される。

イオン源以外にも解決すべき課題は多い。液体金属イオン源はエネルギー分散が比較的大きい($\approx 10\text{ eV}$)ので、FIB光学系では特に色収差を小さくするような工夫が必要である。イオンビームは質量が大きいので、その集束・偏向のためには静電光学系を用いるが、今後その低収差化を行う必要がある。さらに、FIB装置としてはその応用から加速電圧は数kV～数百kVという非常に広い領域をカバーする必要があるが、加速電圧が高くなると高電圧電気絶縁と低収差光学系との両立が難かしくなるという問題を持っている。また、加速系、レンズ系などの高電圧電源は、その変動がそのままビームの位置及び集束特性の変動となるので、精度の非常に高いものを用いる必要がある。しかし、電圧が高くなるにつれて要求精度がきびしくなるので実現が困難になる。たとえば、ビームのエネルギー変動をビームのエネルギー分散の $1/10$ 以内に抑えるためには200kV加速に対し 5×10^{-6} 以上の精度が要求されるが、これは現在の電源技術をもってしては簡単には達成できないと思われる。ビームのブランキングや偏向にも数百V程度の高い電圧が必要なので高速動作が難しく、描画速度の上限を決める要因となっている。

以上のように、FIB技術の今後の発展のためにはFIB装置における諸問題、すなわちイオン源、光学系、電源・電子回路系の技術のブレークスルーが必要であると考えられる。

第 2 章 の 参 考 文 献

- [1] R.Clampitt, K.L.Aitken, and D.K.Jefferies, "Intense field-emission ion source of liquid metals", *J. Vac. Sci. Technol.* 12(6), 1204 (1975).
- [2] V.E.Krohn and G.R.Ringo, "Ion Source of high brightness using liquid metal", *Appl. Phys. Lett.* 27(9), 479-481 (1975).
- [3] M.Komuro, T.Kanayama, H.Hiroshima, and H.Tanoue, "Measurement of virtual crossover in liquid gallium ion source", *Appl. Phys. Lett.* 42(10), 908-910 (1983).
- [4] 石川順三 "イオン源工学" (アイオニクス, 東京, 1986).
- [5] G.Taylor, "Disintegration of water drops in an electric field", *Proc. Roy. Soc. A*, 280(24), 383-397 (1964).
- [6] H.Morimoto, T.Kato, K.Saitoh, Y.Sasaki, H.Shibata, T.Kato, and S.Namba, "Microfabrication using focused ion beam system", *Proceedings of International Ion Engineering Congress - ISIAT'83 & IPAT'83, Kyoto, 1983 (IEEJ, Tokyo, 1983) p.777-780.*
- [7] A.Wagner and T.M.Hall, "Liquid gold ion source", *J. Vac. Sci. Technol.* 16(6), 1871-1874 (1979).
- [8] H.Arimoto, E.Miyauchi, and H.Hashimoto, "Emission Stability of Au-Si-Be LM ion source in various gas environments", *Jpn. J. Appl. Phys.* 25(7), L567- L568 (1986).
- [9] K.Gamo, T.Ukegawa, Y.Inomoto, K.K.Ka, and S.Namba, "B, As and Si field ion sources", *Jpn. J. Appl. Phys.* 19(10), L595-L598 (1980).
- [10] W.G.Moffatt, "The Handbook of Binary Phase Diagrams", (Genium Publishing Corp. New York, 1984) vol.1.
- [11] T.Kato, H.Morimoto, K.Saitoh, and Y.Watakabe, "A computer-controlled experimental FIB system", *Proceedings of SPIE, Electron-Beam, X-Ray, and Ion Beam Techniques for Submicrometer Lithography IV, Santa Clara, 1985 (SPIE, Washington, 1985) vol.537, p.146-151.*
- [12] E.Miyauchi, H.Hashimoto, and T.Utsumi, "Au-Si-Be liquid metal ion source for maskless implantation", *Jpn. J. Appl. Phys.* 22(4), L225-L226 (1983).
- [13] J.Ishikawa and T.Takagi, "Impregnated-electrode-type liquid metal ion source", *J. Appl. Phys.* 56(11), 3050-3056 (1984).
- [14] H.Onoda, H.Morimoto, T.Kato, J.Ishikawa, and T.Takagi, "An impregnated-electrode-type liquid-metal-ion source applied to microfabrica-

tion", Proceedings of the 10th Symposium on Ion Sources and Ion-Assisted Technology, Tokyo, 1986 (The Research Group of Ion Engineering, Kyoto, 1986) p.27-30.

[15] 塚克己, "電子光学" (共立出版, 東京, 1979) 第5章.

[16] T.Shiokawa, P.H.Kim, K.Toyoda, K.Gamo, and S.Namba, "100kV ion beam apparatus with mass filtering for fine-focus maskless ion implantation", Proceedings of the 14th Symposium on Ion Implantation and Sub-micron Fabrication, Wako, 1983 (The Institute of Physical and Chemical Research, Wako, 1983) p.173-176.

[17] W.Knauer, "Energy broadening in field emitted electron and ion beams", Optik 59(4), 335-354 (1981).

[18] R.L.Seliger, "E \times B mass-separator design", J. Appl. Phys. 43(5), 2352-2357 (1972).

[19] K.Gamo, T.Matsui, and S.Namba, "Characteristics of Be-Si-Au ternary alloy liquid metal ion sources", Jpn. J. Appl. Phys. 22(11), L692-L694 (1983).

[20] T.Kashiwaki, H.Morimoto, S.Takeuchi, K.Saitoh, Y.Watakabe, and T.Kato, "Mark detection technology for electron-beam direct writing", IEEE Trans. on Electron Devices ED-31(10), 1403-1407 (1984).

[21] Hamamatsu Photonics K.K., "Characteristics and Applications of Microchannel Plates", Technical Manual RES-0795.

[22] H.Morimoto, Y.Sasaki, H.Onoda, and T.Kato, "Detection of alignment signals for focused ion beam lithography", Appl. Phys. Lett. 46(9), 898-900 (1985).

[23] 森本博明, 小野田宏, 佐々木善伸, 蒲生健次, 加藤忠雄, "集束イオンビーム描画における位置合せ信号", 第33回応用物理学関係連合講演会(春季)講演予稿集 4a-Z-4, 1986, p.337.

[24] K.Kanaya and S.Ono, "Interaction of electron beam with the target in scanning electron microscope", Electron Beam Interaction with Solids, (SEM, Inc., Chicago) p.69-98.

[25] B.Svensson and G.Holmen, "Electron emission from ion-bombarded aluminum", J. Appl. Phys. 52(11), 6928-6933 (1981).

[26] T.Ishitani, A.Shimase, and H.Tamura, "Carbon needle emitter for boron and aluminum ion liquid-metal-ion sources", Jpn. J. Appl. Phys. 21(5), L277-L278 (1982).

- [27] K.Gamo, T.Ukegawa, Y.Inomoto, Y.Ochiai, and S.Namba, "Liquid metal alloy ion sources for B, Sb, and Si", J. Vac. Sci. Technol. 19(4), 1182-1185 (1981).
- [28] Y. Gotoh, T. Kashiwagi, H. Tsuji, J. Ishikawa, and T. Takagi, "Impregnated-electrode-type liquid metal ion source (VI) - characteristics of Au-Sb", Proceedings of the 10th Symposium on Ion Sources and Ion Assisted Technology, Tokyo, 1986 (The Research Group of Ion Engineering, Kyoto, 1986) p.19-26.
- [29] T.Ishitani, K.Umemura, and H.Tamura, "Development of phosphorus liquid-metal-ion source", Jpn. J. Appl. Phys. 23(5), L330-L332 (1984).
- [30] T.Okutani, M.Fukuda, T.Noda, H.Tamura, H.Watanabe, and C.Shepherd, "Characteristics of an advanced electrohydrodynamic ion source with additional mode of surface ionization", J. Vac. Sci. Technol. B1(4), 1145-1147 (1983).
- [31] W.M.Clark, Jr., R.L.Seliger, M.W.Utlaut, A.E.Bell, L.W.Swanson, G.A.Schwind, and J.B.Jergenson, "Long-lifetime, reliable liquid metal ion sources for boron, arsenic, and phosphorus", J. Vac. Sci. Technol. B5(1), 197-202 (1987).
- [32] G.R.Hanson and B.M.Siegel, "H₂ and rare gas field ion source with high angular current", J. Vac. Sci. Technol. 16(6), 1875-1878 (1979).
- [33] T.Itakura, K.Horiuchi, and S.Yamamoto, "Focusing column for helium field ion source", Microelectronic Engineering 3(1-4), 153-160 (1985).

第 3 章 集束イオンビームエッチング技術

3-1 緒 言

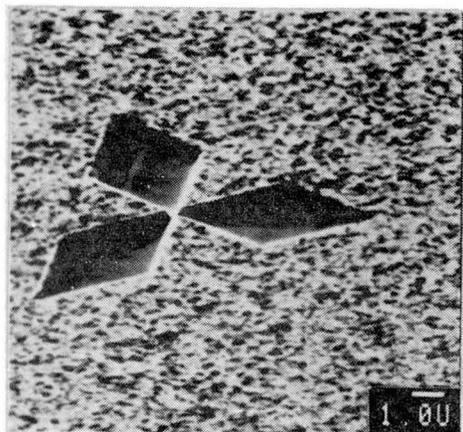
イオンビームは、第 1 章でも述べたように基板表面に物質を注入したり、エネルギーを与えることができるので、FIB を用いることによって種々のマスクレス加工を行うことができる。その中で最も単純なものはイオンビームの持つ運動エネルギーによって基板表面のスパッタエッチングを行うものである。この方法は写真製版工程を用いる必要のない、いわゆるマスクレス加工であるので、非常に簡単な工程で基板の選択的なエッチングを行うことができる。従って、レジストを塗布できない基板（パッケージングされた IC チップ等）の加工も可能である。さらに、微細スポットビームを用いるので非常に微細な加工が可能である。また、イオンビームによって基板上を照射することによって選択的に格子欠陥を発生させた後、ウェットエッチングなどの後工程を経ることにより比較的低照射量でも基板のエッチングが可能である。この方法は FIB を用いた増速エッチングと呼ばれる(1,2)。

本章では、これらの FIB エッチング技術の特性とその例、および増速エッチングによる加工技術について述べる。

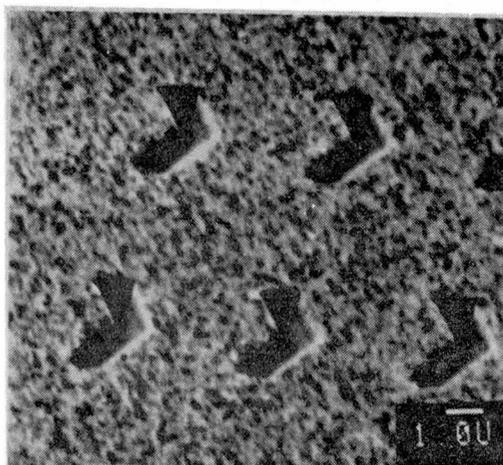
3-2 集束イオンビームによるエッチング特性

図 3-1 は 100 keV の Ga FIB を用いて Si 基板上的 Au 膜（厚さ $0.5 \mu\text{m}$ ）をエッチング加工したものである。図 3-1(a) は三菱マークを、(b) はシェブロンパターンを形成したものである。この写真は加工直後に同一装置でイオンビーム照射を行うことによって得られた二次電子像である。図 3-2 は Si 上に $0.1 \mu\text{m}$ 厚に形成された Au 薄膜上を Ga FIB によって走査を行った時に得られたエッチングパターンの断面 SEM 写真である。表面でのパターン幅はおよそ $0.1 \mu\text{m}$ である。Au 膜は完全にエッチングされ、さらに下地 Si も若干エッチングされている。イオンビームの照射量は、ビーム径を $0.1 \mu\text{m}$ とすれば $4.7 \times 10^{17} \text{ ions}/\text{cm}^2$ である。

FIB エッチングによって深い溝を形成する場合は、エッチング深さ・幅および走査方向がエッチングパターン形状に大きな影響をおよぼす。図 3-3 は 100 keV の Au イオン



(a)



(b)

図 3-1 100 keV の Ga 集束イオンビームによるエッチングパターン。
(a) 三菱マーク, (b) シェブロンパターン

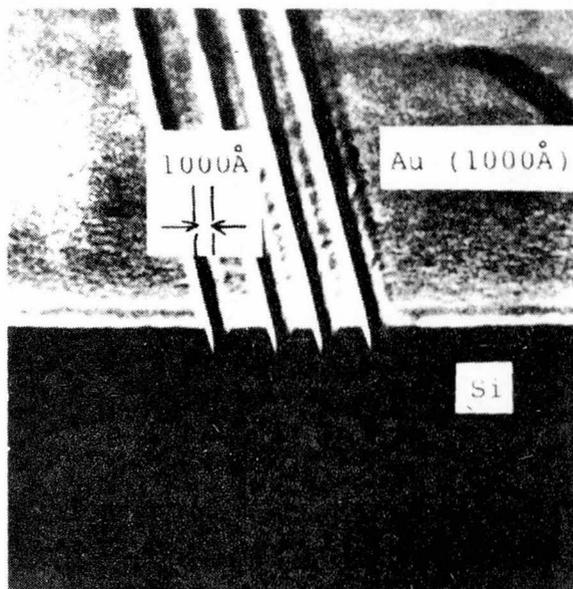


図 3-2 集束イオンビームによる $0.1 \mu\text{m}$ 幅のエッチングパターン。

ビームによってGaAs基板に形成した深いエッチングパターンの断面を示したものである。イオンビーム電流は60 pA、ビーム径は $0.2\ \mu\text{m}$ 、ビーム照射量は $5 \times 10^{17}\ \text{ions}/\text{cm}^2$ であった。エッチングを行うに際して、イオンビームを図の奥から手前方向に走査し、さらにそのビーム走査を左から右へ $0.025\ \mu\text{m}$ ずつ移動している。イオンビーム径は非常に微細なので、ある大きさのパターンを加工するためには、このようなビーム走査が必要である。図3-3(a)~(f)はそれぞれ 0.4 、 1.0 、 2.0 、 3.0 、 4.0 および $5.0\ \mu\text{m}$ 幅の加工を行ったものである。図から、エッチングパターン断面は矩形を示さず、非対称な形状をしていること、また各パターン形成時の計算上のイオンビーム照射量は同一であるにもかかわらず、パターン幅が増加するにつれてエッチング深さが大きくなっているという特異な現象が観測される。

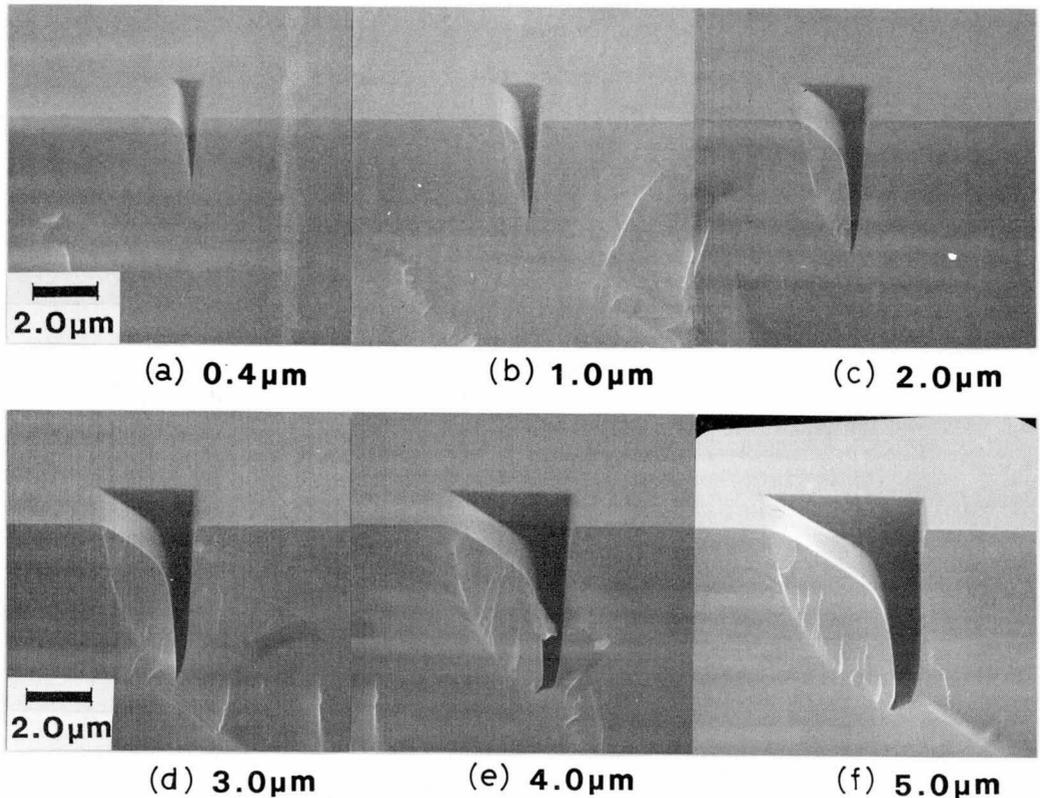


図3-3 100 keVのAuイオンビームによってGaAs基板に形成したエッチングパターンの断面。イオンビーム照射量は $5 \times 10^{17}\ \text{ions}/\text{cm}^2$ 。(a)~(f)はそれぞれ 0.4 、 1.0 、 2.0 、 3.0 、 4.0 、および $5.0\ \mu\text{m}$ 幅の加工を行ったもの。

この現象を明らかにするために、各パターン断面形状を重ね合わせてプロットした結果を図3-4に示す。図中、各パターンの底部を結んだ線はエッチングされた基板面を表わし、その上にエッチングされた基板物質の再付着層が形成されていると考えられる。また、明らかにパターン側壁で反射されたイオンビームによる二次的なエッチング効果も認められる。さらに、スパッタエッチングにおけるエッチレートはビームの基板への入射角度の増加によって増大することから⁽³⁾、最初の平坦な基板をエッチングするのに比べて、ある程度エッチングの進んだときの方がエッチレートが大きくなることが考えられる。また、ビームの強度はガウス分布に近い分布を持っているといわれているが⁽⁴⁾、エッチングパターン幅がビーム径(0.2 μm)に近い場合(パターン幅が小さい場合)は、この分布の影響で実効的なビーム照射量が計算によって得られる値よりも小さくなっていると考えられる。すなわち、FIBエッチングにおいては、パターン側壁での反射イオンビームの効果、ビームの基板への入射角度の増加の効果、およびビームプロファイルの重ねあわせの効果によって、エッチングが進行するにつれてエッチレートが増加する現象と、エッチングされた基板物質がエッチングの終了した部分に再付着する現象とによって、形成されたパターン断面形状は図3-3に示すように非対称になることがわかった。

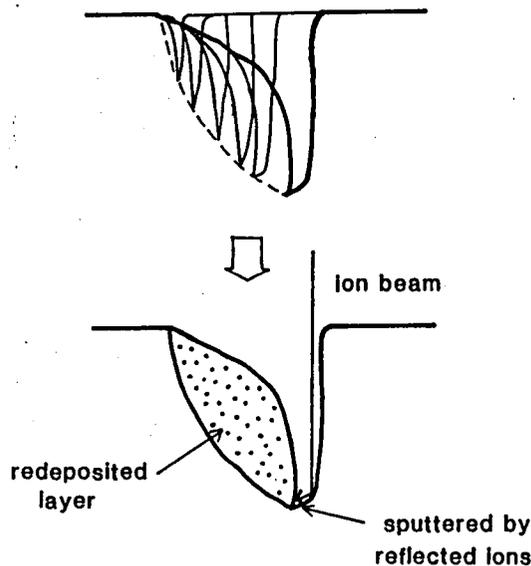
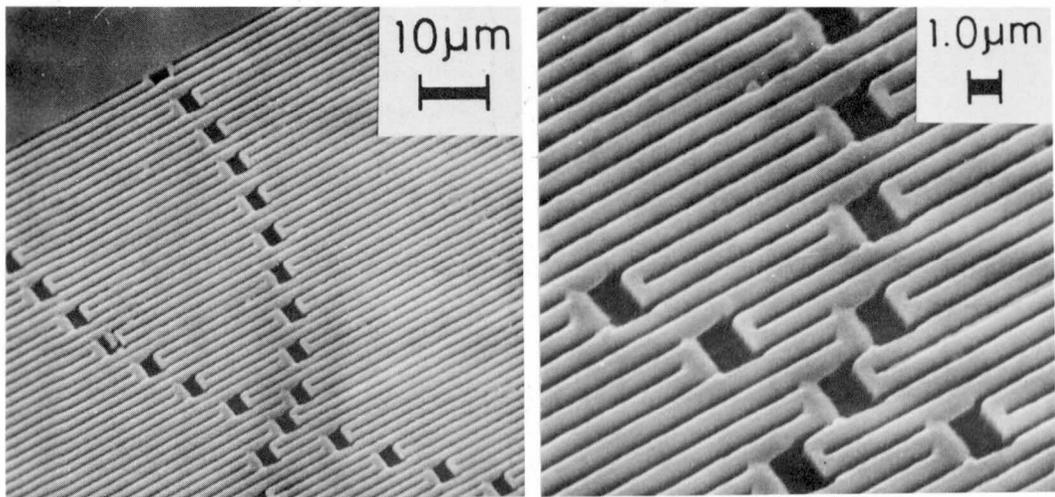


図3-4 図3-3のエッチングパターンを重ね合わせたもの。スパッタされた基板物質の再付着層、およびパターン側面で反射されたイオンによる二次的なエッチング効果が認められる。

図3-5は100 keVのGa FIBによって0.5 μm 厚のAu薄膜を0.5 μm の幅で加工してSAW (Surface Acoustic Wave : 表面弾性波) デバイスのパターンを形成したものである⁽⁵⁾。基板はSiである。拡大写真を図3-5(b)に示すが、パターンの一部に変形が生じているのが観測される。これは前記の再付着効果によるものである。

図3-6(a)はGaAs基板表面をGa FIBによって0.4 μm 幅のエッチング加工を行ったときの断面写真である。前記の理由によってパターン断面は非対称形状を示している。図3-6(b)はエッチング後に10%の希塩酸中で10分間処理を行った後のものである。GaAsは希塩酸には反応しないが、再付着層は取り除くことができる。すなわち、図3-6(b)は再付着効果を取り除いた加工断面形状を示しており、加工が進むにつれてエッチレートが増加している(加工深さが深くなっている)ことが観測できる。半導体デバイスに応用するには、多くの場合このような影響を除去し、矩形断面を持つエッチングパターンを得ることが必要である。このためには、ビーム照射量を減らして(ビーム走査速度を増して)、複数回の「重ね書き」を行うのが有効である^(6,7)。これは、上記のような現象が平均化されるからである。図3-6(c)は、100倍の走査速度で100回の重ね書きを行った結果で、対称性の良いパターン断面が得られている。



(a)

(b)

図3-5 (a) 100 keVのGa集束イオンビームによってエッチング加工を行ったSAWデバイスのパターン。(b)はその拡大写真。パターンの一部に再付着による変形が見られる。

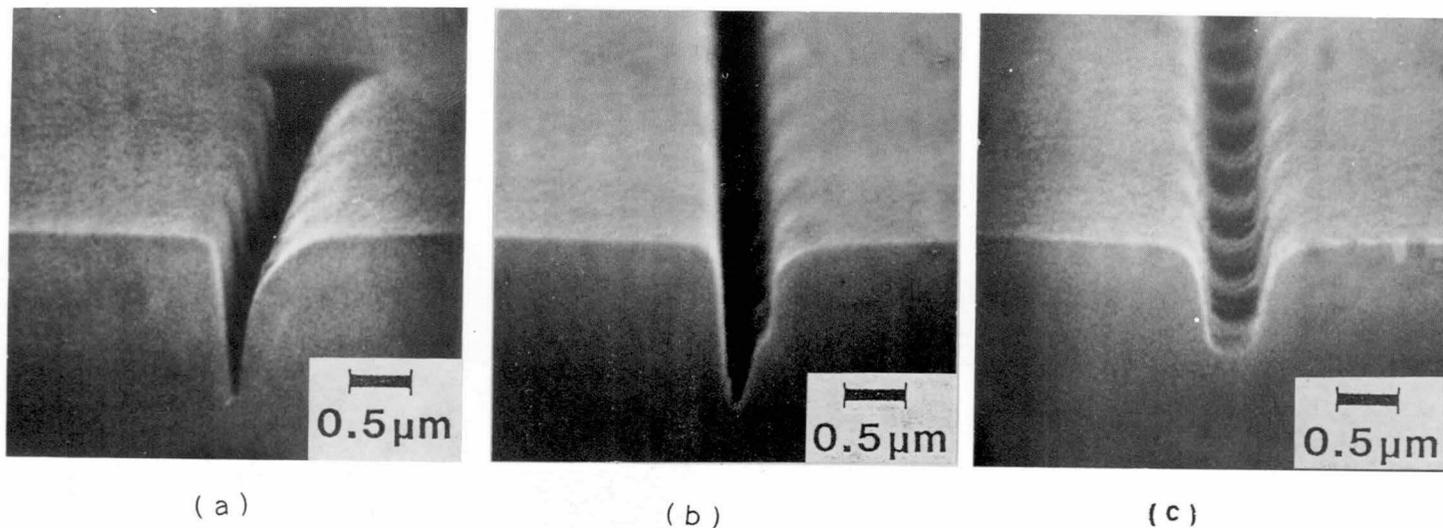


図 3 - 6 (a) GaAs 基板を 100 keV の Ga 集束イオンビームによってエッチング加工を行ったパターン断面。
(b) エッチング後塩酸によって再付着層を取り除いたもの。
(c) 100 倍のビーム走査速度で 100 回の「重ね書き」を行った場合のパターン断面。

3-3 シリコン窒化膜の増速エッチング

基板にイオンビームを照射した後ウェットエッチングを行うと、イオンビーム照射を行った部分のエッチレートが異常に速くなるという現象がある。これはイオンビーム照射によって基板に損傷が誘起されるからである。この現象を利用した基板加工方法を増速エッチング (Damage Enhanced Etching) と呼ぶ。Stangelらは、マスクを通して82 keVのHeイオンビームをSiO₂基板に照射した後弗酸(HF)によってエッチングを行ない、0.2 μm幅のパターンを形成している⁽⁸⁾。イオンビーム照射量は約 1×10^{16} ions/cm²である。また、KomuroらはGa集束イオンビームを用いてSiとGaAs基板のマスクレス加工を増速エッチングによって行っている⁽¹⁾。Siに対してはH₃PO₄、GaAsに対してはHClをエッチャントとして用いている。Siの加工に必要なイオンビーム照射量は $10^{14} \sim 10^{16}$ ions/cm²である。

増速エッチングは、前節で述べた直接的なエッチングに比べて工程が多いかわりに、上記の例のように加工に必要なイオンビーム照射量を1~3桁減らすことができるので、スループットの飛躍的な改善を期待できる。

本節では、Si集束イオンビームを用いたシリコン窒化膜(SiN)の増速エッチング特性⁽²⁾について述べる。Siイオンビームの発生には、Au-Si合金の液体金属イオン源を使用した。イオンビーム照射後バッファード弗酸(HF: NH₄F = 1:6)によって増速エッチングを行った。

イオンビーム照射量に対するエッチング深さを、エッチング時間をパラメータとして示したものが図3-7である。照射イオンビームのエネルギーは200 keVである。エッチング深さはイオンビーム照射量の増加とともに深くなり、 1×10^{16} ions/cm²付近から飽和の傾向になる。エッチング時間の増加によってもエッチング深さは増加する。 1×10^{16} ions/cm²のイオンビーム照射を行った後90秒のエッチングを行った場合約0.3 μmの深さの加工を行うことができる。LSS理論によれば、200 keV SiイオンビームのSiN内での侵入深さ($R_p + \Delta R_p$)は約0.22 μmであるが⁽⁹⁾、実際に格子欠陥を受けた層はrecoil atom (入射イオンによって撥ね飛ばされた基板構成原子)の影響によってさらに深い領域にまで広がっていると考えられる。エッチング時間が30秒の場合は、イオンビーム照射量 4×10^{15} ions/cm²以上でエッチング深さが減少する傾向が見られた。これは、高照射領域で基板表面にSiリッチな層が形成されるためであると考えられるが、詳細は更に検討を要する。

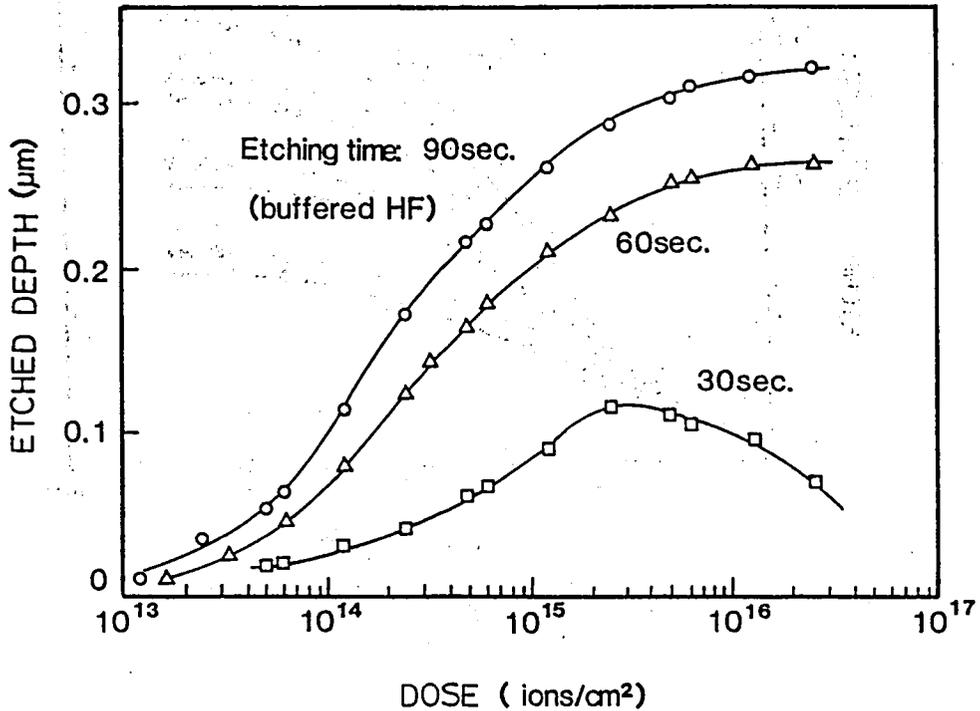


図 3-7 200 keV の Si 集束イオンビームによって SiN 膜を照射した後バッファード弗酸で増速エッチングを行った場合の、イオンビーム照射量とエッチング深さの関係。

図 3-8 は加速エネルギーを変化させたときのデータを示している。加速エネルギーが高いほど深くまでイオンが注入され、深い場所まで格子欠陥が誘起されるのでエッチング深さは大きくなっている。このデータをプロットしなおして横軸を加速エネルギーとしたものが図 3-9 である。照射量が 2.5×10^{15} ions/cm² 以上では、80~200 keV の範囲で加速エネルギーとエッチング深さの関係はほぼ直線的である。

以上の結果から、Si イオンビームを SiN 膜に照射した後バッファード弗酸によってエッチングすることによって加工を行うことが可能であることが明らかになった。このときのイオンビーム照射量は $10^{15} \sim 10^{16}$ ions/cm² であり、直接基板をエッチングする方法に比べてスループットを飛躍的に増大することができた。

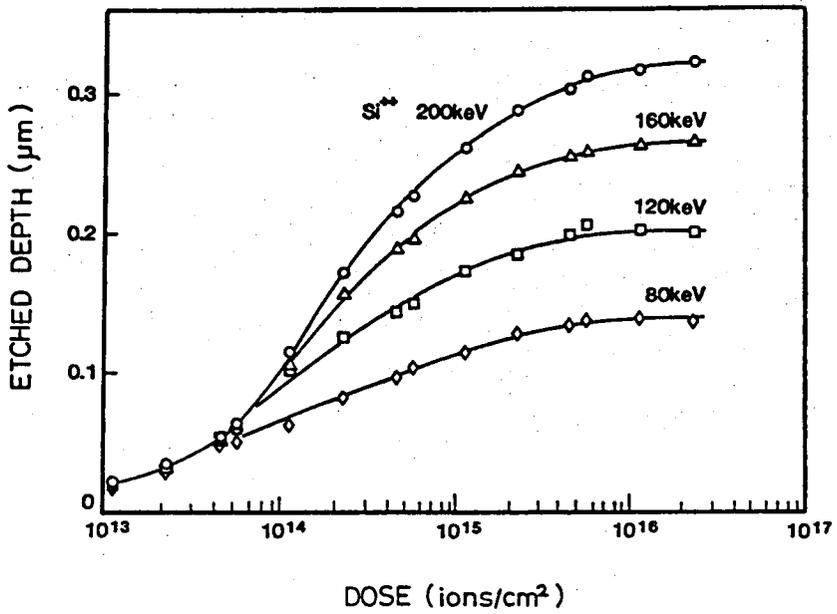


図 3-8 80~200 keV の加速エネルギーに対するエッチング深さとイオンビーム照射量の関係。

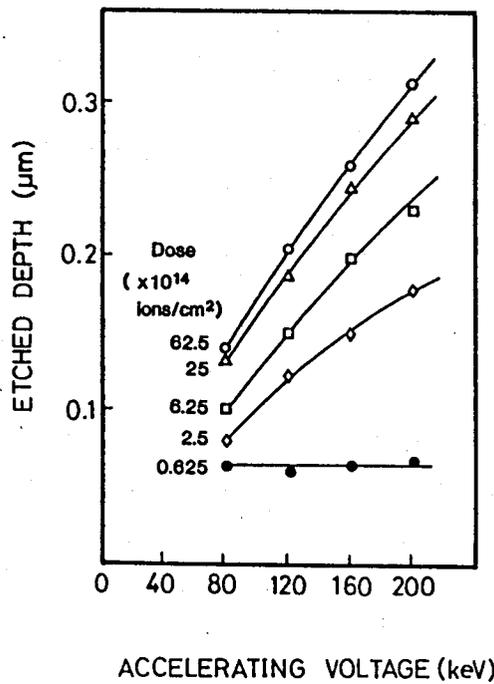


図 3-9 エッチング深さと加速エネルギーの関係。

3-4 結 言

本章では、FIBを利用したエッチング技術に関する検討結果について述べた。FIBエッチングにおいては、パターン側壁での反射イオンビームの効果、ビームの基板への入射角度の増加の効果、およびビームプロファイルの重ねあわせの効果によって、エッチングが進行するにつれてエッチレートが増加する現象と、エッチングされた基板物質がエッチングの終了した部分に再付着する現象とによって、形成されたパターン断面形状は非対称になることが明らかになった。さらに、ビーム照射量を減らして(ビーム走査速度を増して)、複数回の「重ね書き」を行い、この現象を平均化することによって対称性の良い矩形断面のパターンを得ることができるとわかった。

次に、エッチレートを速くする試みとして、イオンビーム照射を行うことにより基板表面を選択的に非晶質化し、後処理を行うことによってマスクレス加工を行う方法を検討した。ここで行ったのは、SiN膜にSiイオンビームを照射したのち弗酸によってイオンビーム照射部の増速エッチングを生じせしめる方法である。この方法により、 $10^{15} \sim 10^{16}$ ions/cm²程度という比較的照射量でマスクレスエッチングを行うことができた。

FIBエッチングは、 $10^{16} \sim 10^{17}$ ions/cm²という高イオン照射量を必要とするので、製造工程に使用するにはスループットの面で非常に不利であるが、マスクレスプロセスであること、 $0.1 \mu\text{m}$ 程度の微細加工が容易であること、また加工位置の高精度な制御が可能であることから、今後フォトマスク・X線マスクの欠陥修正^(10,11)や、LSI回路の不良解析・不良救済等^(12,13)に用いることができると考えられる。

FIBエッチングにおける再付着現象を積極的に利用する試みも為されている⁽¹²⁾。これは、SiO₂によって絶縁されている2層のAl配線パターンを、上層AlとSiO₂をエッチングした後下層Alを少しエッチングすることによりその再付着層で上層と下層のAlをつなぐというものである。

また、基板との反応性ガス雰囲気中でFIBエッチングを行うことによって、反応性ガスのアシスト効果を利用し、エッチレートを100倍程度高速化する手法が報告されている⁽¹⁴⁾。

以上のように、FIBエッチングは当面回路パターンの修正等への応用が期待される一方、今後その応用範囲を広げるには、反応性ガスによるアシストエッチングや増速エッチング等高スループット化の検討が必要であると考えられる。

第 3 章の参考文献

- [1] M.Komuro, H.Hiroshima, H.Tanoue, and T.Kanayama, "Maskless etching of a nanometer structure by focused ion beams", J. Vac. Sci. Technol. B1(4), 985-989 (1983).
- [2] 佐々木善伸, 森本博明, 三井康郎, 加藤忠雄, "増速エッチングによる SiN 膜のサブミクロン加工", 第 45 回応用物理学会学術講演会(秋季)講演予稿集 141-T-1, 1984, p.257.
- [3] C.M.Melliard-Smith, "Ion etching for pattern delineation", J. Vac. Sci. Technol. 13(5), 1008-1022 (1976).
- [4] J.W.Ward, M.W.Utlaut, and R.L.Kubena, "Computer simulation of current density profile in focused ion beams", J. Vac. Sci. Technol. B5(1), 169-174 (1987).
- [5] H.Morimoto, Y.Sasaki, K.Saitoh, Y.Watakabe, and T.Kato, "Focused ion beam lithography and its application to submicron devices", Microelectronic Engineering 4(3), 163-179 (1986).
- [6] H.Morimoto, Y.Sasaki, Y.Watakabe, and T.Kato, "Characteristics of submicron patterns fabricated by gallium focused-ion-beam sputtering", J. Appl. Phys. 57(1), 159-160 (1985).
- [7] H.Yamaguchi, A.Shimase, S.Haraichi, and T.Miyauchi, "Characteristics of silicon removal by fine focused gallium ion beam", J. Vac. Sci. Technol. B3(1), 71-74 (1985).
- [8] G.Stengl, R.Kaitna, H. Löschner, P.Wolf, and R.Sacher, "Ion projection system for IC production", J. Vac. Sci. Technol. 16(6), 1883-1885 (1979).
- [9] J.F.Gibbons, W.S.Johnson, and S.W.Mylroie, "Projected Range Statistics", (Deaden, Hutchinson, & Ross, Inc., Stroudsburg, Pennsylvania, 1975).
- [10] A.Wagner, "Applications of focused ion beams to microlithography", Solid State Technol. May, 97-103 (1983).
- [11] B.W.Ward, D.C.Shaver, and M.L.Ward, "Repair of photomasks with focused ion beams", Proceedings of SPIE, Electron-Beam, X-Ray, and Ion-Beam Techniques for Submicrometer Lithography IV, Santa Clara, 1985,

(SPIE, Washington, 1985) vol.537, p.110-114.

[12] J.Melngailis, C.R.Musil, E.H.Stevens, M.Utlaut, E.M.Kellog, R.T.Post, M.W.Geis, and R.W.Mountain, "The focused ion beam as an integrated circuit restructuring tool", J. Vac. Sci. Technol. B4(1), 176-180 (1986).

[13] Y.Mashiko, H.Morimoto, H.Koyama, S.Kawazu, T.Kaito, and T.Adachi, "A new VLSI diagnosis technique: focused ion beam assisted multi-level circuit probing", presented at the 25th International Reliability Physics Symposium, San Diego, 1987.

[14] Y.Ochiai, K.Gamo, and S.Namba, "Maskless etching of GaAs and InP using a scanning microplasma", J. Vac. Sci. Technol. B1(4), 1047-1049 (1983).

第 4 章 集束イオンビームリソグラフィー技術

4-1 緒 言

GaAs 超高周波 FET 等の先端デバイスの研究開発には、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下のパターン寸法を形成する超微細加工技術が必要である。このために、通常電子ビーム (EB) リソグラフィーが用いられている。しかし、EB リソグラフィーはレジスト中で散乱された電子や、基板からの後方散乱電子の影響によって生ずる近接効果⁽¹⁾のために、 $0.3\ \mu\text{m}$ 以下の微細なパターンを再現性良く形成することは相当困難である。

イオンビームも、電子ビームと同様レジスト膜中にエネルギーを付与し、化学的な分子間の架橋や、主鎖の切断を引き起こした後現像工程を経ることによってレジストパターンを形成することができる。イオンは、電子に比べて大きい質量を持つために、レジスト中の散乱や基板からの後方散乱が少ないので近接効果をほとんど示さない⁽²⁾。従ってイオンビームを用いることによって $0.3\ \mu\text{m}$ 以下の微細なパターンを再現性良く形成することが可能であると考えられる。

例えば、Karapiperis らは金のマスクパターンを通して $40\ \text{keV}$ のプロトンビームによって PMMA (polymethyl methacrylate) の露光を行ない、 $40\ \text{nm}$ 幅のレジストパターンを形成している^(3,4)。また、イオンビームは、露光感度が電子ビームリソグラフィーの場合に比べて 1~2 桁高いという利点も有している。これはイオンビームが電子ビームよりも数倍高いエネルギーを露光時に使用することと、レジスト内でのイオンの飛程が短いのでその運動エネルギーの大部分をレジストに与えるからである。これらの特徴に加えて、集束イオンビーム (FIB) をリソグラフィーに応用することによってレジスト描画機能を持たせることができ、極微細デバイス製作等に対して高い期待が持たれるようになった。

本章では、まず Au-Si-Be 液体金属イオン源から得られる Si 及び Be の FIB を用いて行ったレジスト露光の基本的性質⁽⁵⁾ について述べる。次に、FIB リソグラフィーの特殊な応用例として、異種イオンの飛程の差を利用してレジストパターン断面形状を任意に制御できる新しい露光方法について述べる。最後に、Ga イオンビーム照射後ドライ現像法によってレジストパターンを形成するプロセス及びそのパターンニング特性⁽⁵⁾ について述べる。

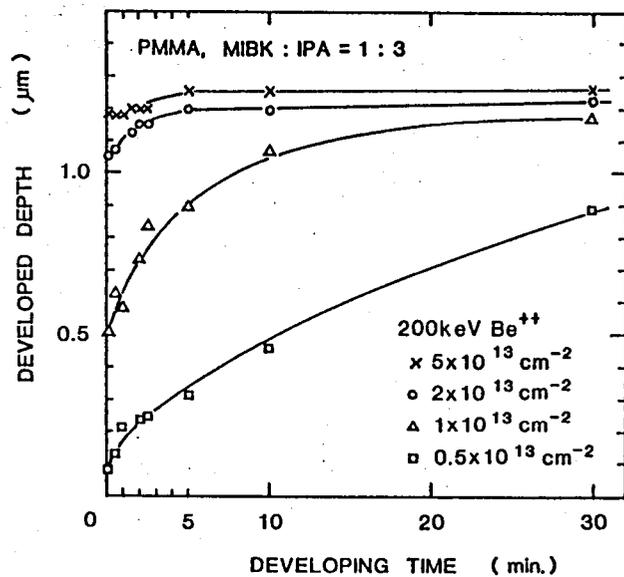
4-2 ベリリウム及びシリコンイオンビームによるリソグラフィ技術

4-2-1 基礎特性

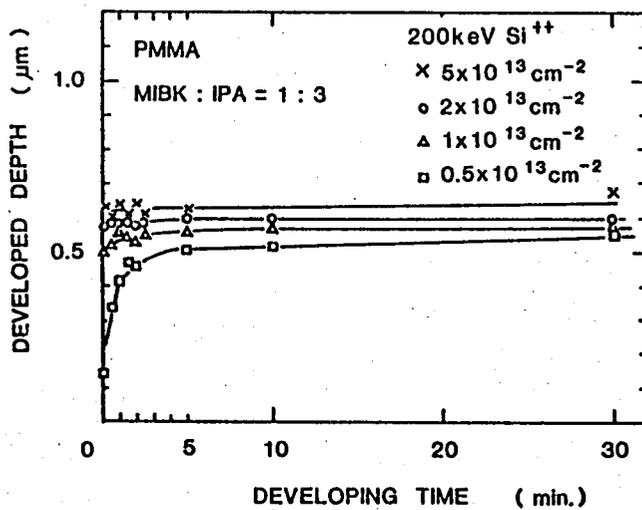
Au-Si-Be 液体金属イオン源からは、1価および2価のAu, Si, およびBe イオンビームが得られることが知られているが⁽⁷⁾, これらのうちSi およびBe イオンビームは質量が比較的軽く、実用的な膜厚を持つレジストを露光できるので、リソグラフィに応用することができる。本実験においてはすべて2価のSi と Be イオンビームを用いた。E×B型質量分離装置によって所望のイオンビームのみを選択している。(2-3節参照)

図4-1は200 keV (100 kV加速時)のBe 及びSi イオンビームをPMMAを照射したときのレジストの現像特性を示している。PMMAは平均分子量500,000のものを用いた。現像は、室温にてメチルイソブチルケトン (methyl isobutyl ketone : MIBK) とイソプロピルアルコール (isopropyl alcohol : IPA) の1:3の混合液に浸すことにより行った。現像により除去された深さ(現像深さ)は表面粗さ計(α -ステップ)によって測定した。低照射量のBeの場合を除けば、5分間の現像で現像深さはほぼ飽和している。イオンビーム照射量が増加すると飽和現像深さも少しずつ増加するが、これはレジストの分解に必要なエネルギーを蓄積された領域がビーム照射量の増加に伴って少しずつ広がるためであると考えられる。BeはSiに比べてかなり軽いので、Beの深さ方向への打ち込み分布はSiよりもかなり広がったものになると考えられるが、これはSiのほうがより短い現像時間内にその現像深さが飽和するという結果と対応している。

図4-2はビーム照射量と現像深さの関係を示したものである。現像時間は5分で、100, 140, 及び200 keVの3種類のビームエネルギーについて実験を行った。Beの場合、ある程度以上のビーム照射量では現像深さはほぼ飽和した。この飽和現像深さは、イオンビームのレジスト中での全飛程(total range)に相当すると考えられる⁽⁸⁾。イオンの価数による露光特性の差を調べるために、100 keVのBe⁺⁺(50 kV加速)とBe⁺(100 kV加速)の両方についてその現像深さを測定したが、両者に差は見られなかった。すなわち、現像深さはイオンビームのエネルギーに依存するが、イオンの価数には影響されないことが明らかになった。Siの場合は、後述するようにrecoil atomの影響で飽和現像深さはイオンの飛程よりも若干広い(recoil atomの飛程分だけ)領域に対応していると考えられる。また、Siの場合高照射量領域(5×10^{13} ions/cm²以上)においてレジスト膜厚の減少が著しくなっているのはイオンビームのスパッタリングが生じているためである。この現像深さの増加分と、別に実験を行ったSiイオンビームによる



(a)

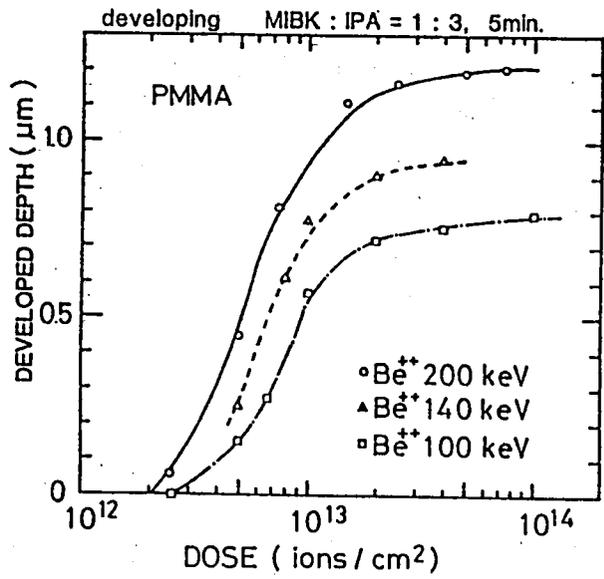


(b)

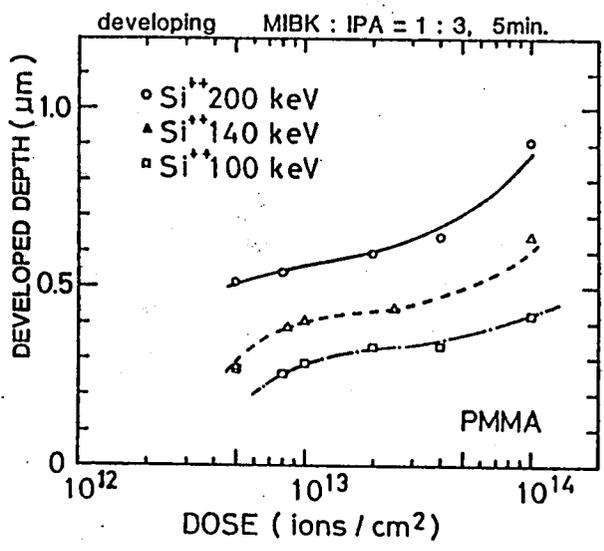
図 4 - 1 イオンビーム照射を受けたPMMAの現像特性。

(a) Beイオンビームの場合。

(b) Siイオンビームの場合。



(a)



(b)

図 4-2 イオンビーム照射量と現像深さとの関係。
 (a) Be イオンビームの場合。
 (b) Si イオンビームの場合。

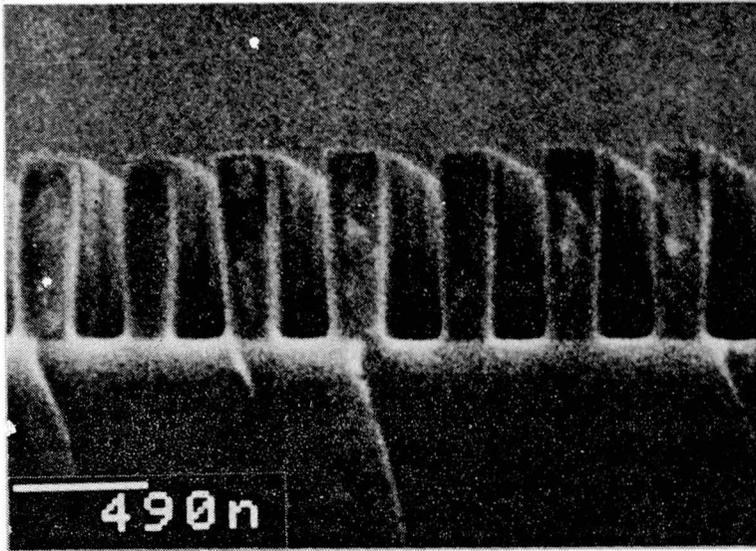
レジストのエッチング量の測定結果とは良い一致を示した。

図4-2はFIBリソグラフィーにおける基本的な特性で、与えられたレジスト膜厚を露光するのに必要なイオンビームのパラメータを示している。たとえば、この図から、レジスト膜厚が $0.5\ \mu\text{m}$ の場合は $200\ \text{keV}$ のBe、 $100\ \text{keV}$ のBe、及び $200\ \text{keV}$ のSiに対してそれぞれ 5×10^{12} 、 1×10^{13} 、 $5 \times 10^{13}\ \text{ions}/\text{cm}^2$ のビーム照射量が必要であることを知ることができる。このようなことが可能であるのは、基板からの反射イオンが無視できる程に少ないからである。電子ビームリソグラフィーの場合は、基板からの反射電子の影響が無視できないので、レジスト膜厚を変えた場合は露光特性の変化が大きく、上記のような手法を用いることはできない。

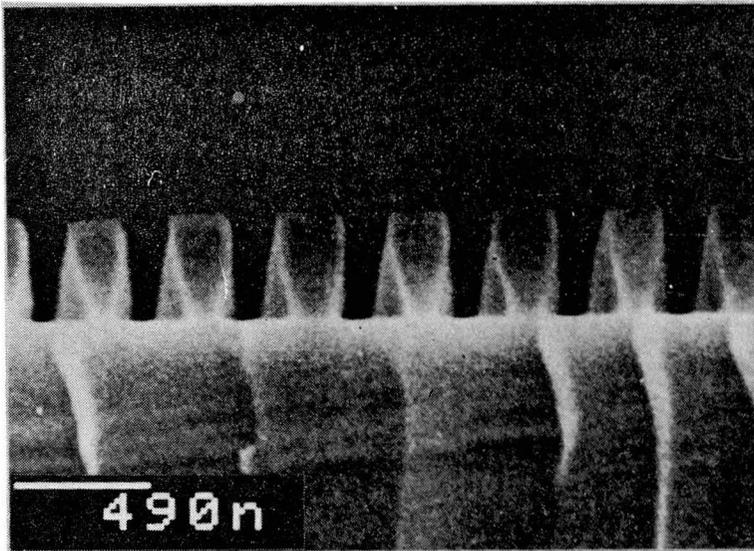
FIBリソグラフィーによって形成したレジストパターンの断面SEM写真を図4-3(a)(b)に示す。いずれも $0.2\ \mu\text{m}$ 幅のパターンをパターン幅の2倍のピッチで形成したもので、(a)は $0.7\ \mu\text{m}$ 厚のレジストに $200\ \text{keV}$ のBeを用いて、また(b)は $0.5\ \mu\text{m}$ 厚のレジストに $200\ \text{keV}$ のSiを用いて露光している。イオンビーム照射量はそれぞれ $2 \times 10^{13}\ \text{ions}/\text{cm}^2$ と $1 \times 10^{13}\ \text{ions}/\text{cm}^2$ である。多層レジスト構造を用いずにこのような高解像度パターンを高アスペクト比で形成できることは注目に値する。

4-2-2 パターン断面形状に関する考察

前節で述べた如く、イオンビームは電子ビームに比べてレジスト内での直進性が良好であるために、非常に微細なパターン形成を行うことができる。しかし、イオンとレジスト構成原子の衝突によるイオンの横方向への広がりのために、形成されたパターンエッジは完全に垂直にはならない。図4-4はイオンの原子番号に対するAZ111レジスト中での横方向へのイオンの広がりをLSS理論によって求めたものである⁽⁹⁾。この図から、軽いイオンほど横方向への広がりが大きいことがわかるが、これは軽いイオンほど基板原子による散乱角が大きいためである。AZ111($\text{C}_8\text{H}_{12}\text{O}$)とPMMA($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$)は組成が若干異なるが、この傾向に本質的な違いはないものと考えられる。



(a)



(b)

図 4 - 3 集束イオンビームリングラフィーによって形成したレジストパターン断面。(パターン幅 $0.2 \mu\text{m}$)
(a) は Be, (b) は Si イオンビームを用いた場合。

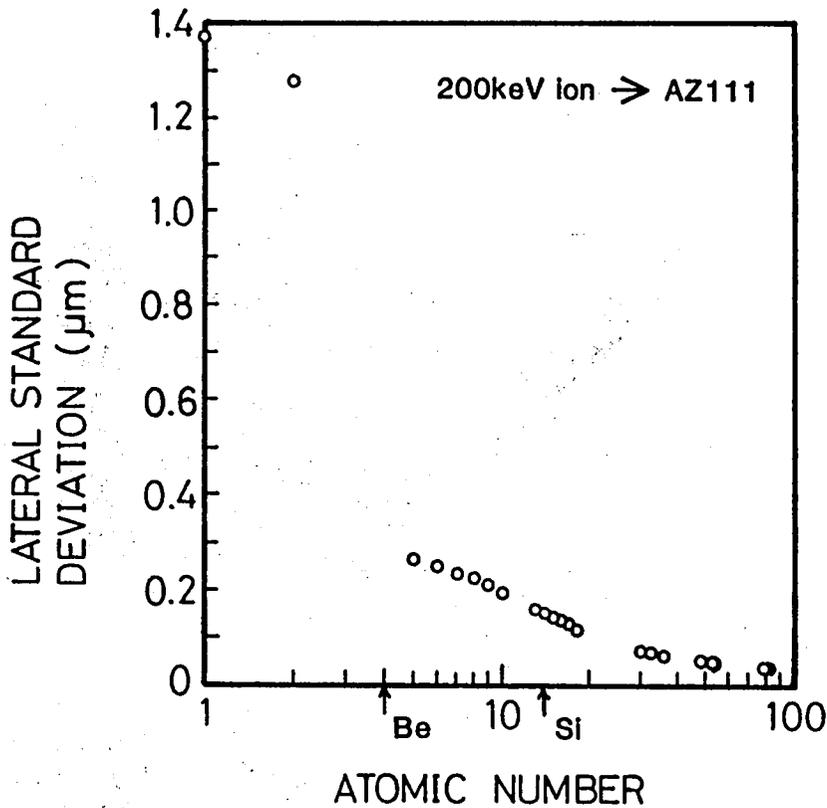


図 4-4 LSS理論によって求めた、レジスト中での横方向へのイオンの広がり。

形成されたパターン断面形状を検討するために、イオンの飛程よりも厚いレジストの露光を行ない、そのパターン断面形状を調べた。その結果を図 4-5 に示す。左側が Be、右側が Si によって露光したものである。露光幅は $0.3 \mu\text{m}$ である。いずれも 0.5 、 1.0 、および $2.0 \times 10^{13} \text{ ions/cm}^2$ の 3 種類のイオンビーム照射量について示している。図 4-3 と比べると、レジスト膜厚 (パターンの深さ) 以外は同一形状を示している。このことは、基板との界面で発生する反射イオンや二次電子の影響が無視しうる程度に小さいことを示している。この図から、Be イオンビームによる露光パターンはほぼ垂直な断面形状をしているが、Si イオンビームによるパターンは下部で広がり、壺型形状になっていることがわかる。この結果は、前記のイオンの基板内での広がりが軽いイオン程大きいという性質と一見矛盾している。

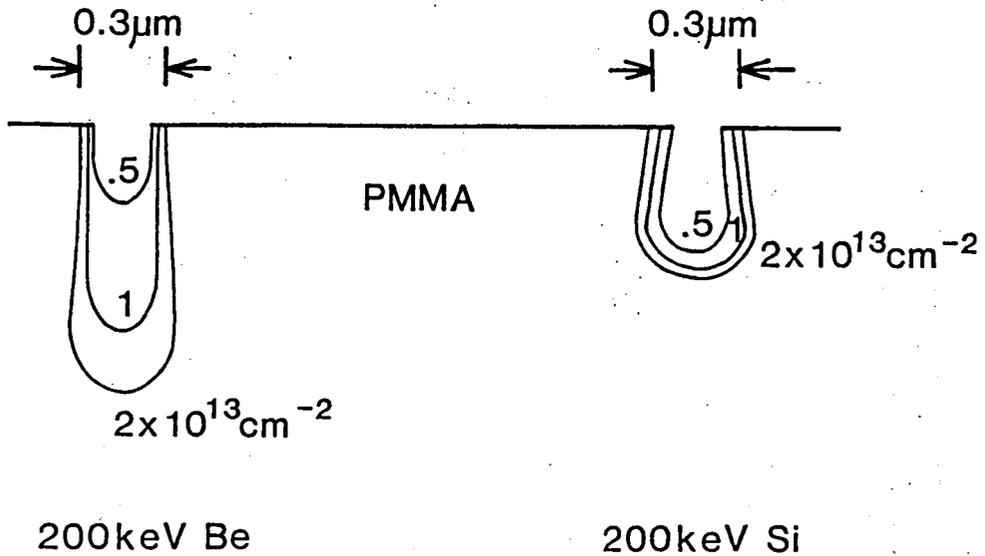
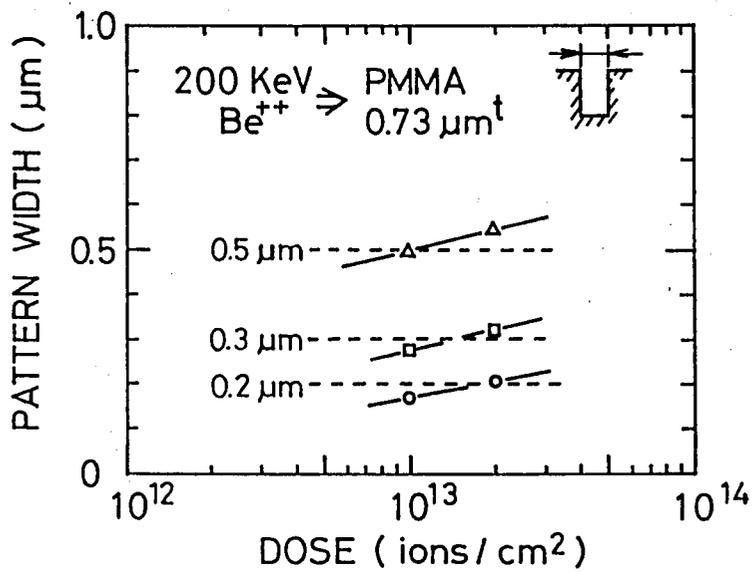


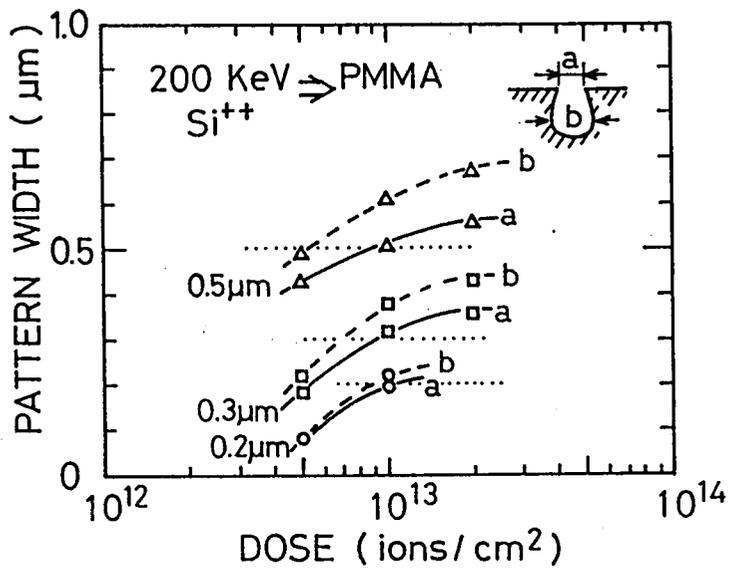
図 4-5 BeおよびSiイオンビーム露光によって形成したレジストパターン断面形状の比較。

Karapiperisらは、Gaイオンビームによって露光したレジストパターン断面形状がやはり壺型になるということをシミュレーション⁽¹⁰⁾及び実験⁽¹¹⁾によって確かめている。この原因は、一次イオンによってはね飛ばされたC、Hなどのレジスト構成原子(recoil atom)が一次イオンの停止する位置よりもさらに遠くのレジストを露光するからである。基板原子の原子核にエネルギーを与えるいわゆる核エネルギー損失は重いイオン程大きく、またイオンが停止する直前で顕著になるので、上記のように重いイオンビームによって露光したパターン断面は壺型形状を示す。Siイオンビームによって形成したパターン断面が壺型を示すのも、このrecoil atomによる再露光効果によるものと考えられる。Beイオンビームによる露光を行った場合は、recoil atomがほとんど発生しないので、形成パターンの横方向への広がり是一次イオンの広がり範囲にとどまるものと考えられる。

実際のデバイス製作を行う上では、露光深さのほかに、形成パターン幅の制御が重要である。図4-6は0.2~0.5μm幅のパターンを露光した場合のできあがったパターン幅とイオンビーム照射量との関係を示したものである。Siイオンビームの場合はパターン断面形状が壺型なので、表面開口部の幅(a)と下部の最も広い部分の幅(b)の2箇



(a)



(b)

図 4-6 露光を行ったパターン幅に対する、形成されたパターン幅とイオンビーム照射量との関係。

(a) Be イオンビームの場合。

(b) Si イオンビームの場合。

所について示している。レジスト表面開口部の幅を形成パターン幅と定義すれば、200 keVのBeと200 keVのSiの場合それぞれ 2.0×10^{13} ions/cm²および 1.0×10^{13} ions/cm²の照射量において0.2 μmから0.5 μmまでのすべてのパターンに対して露光パターン幅と形成パターン幅がほぼ一致するという結果が得られた。すなわち、この値は適正照射量であると考えられる。図4-2から、Beイオンビームの露光深さはSiに比べておよそ2倍であるので、適正照射量におけるレジストに付与したエネルギー密度はほぼ等しいといえる。

電子ビームリソグラフィにおいては、形成パターン幅が0.5 μm以下になるとパターン幅に応じてビーム照射量や描画パターン幅を補正する必要がある⁽¹⁾ことを考えると、上記の結果は、FIBリソグラフィが微細パターン形成に対して非常に有利であることを示している。

4-2-3 異種ビームによる混合露光法

最近、半導体デバイスの製造プロセスにおいては、単にパターン寸法の微細化のみならず、パターン断面形状のコントロールも要求されるようになってきた。例えば、マイクロ波用GaAs FETの場合、デバイス特性を向上させるためにはゲート長を短くすることが有効であるが、ゲート長が0.3 μm以下程度に非常に短くなってくると、ゲート抵抗の増加のためにデバイスの高周波特性が向上しなくなってしまう⁽²⁾。このために、パターン断面をマッシュルーム形状にするなどの方法によってゲート長が短く、かつ抵抗の低いゲート電極を形成することが必要になる。(詳細は5-2節で述べる。)

このようなマッシュルームゲート電極形成を行うために、多層レジスト構造⁽³⁾やサイドエッチング法⁽⁴⁾が報告されているが、プロセスの複雑さやパターン幅の再現精度の点でまだ問題があり、改良が望まれている。そこで、基板内で直進性が良好で、かつその飛程がイオン種によって異なるというイオンビームの性質を利用して、異種イオンビームによる露光を組み合わせることによってマッシュルームゲート形成を試みた。

図4-7はその形成プロセスである。基板にポジ型レジストを塗布し、ゲート電極形成部を200 keVのBeイオンビームによって露光した後イオンビームをSiに切替え、その周辺部を露光する。現像を行うと図に示すようなT型に抜けたレジストパターンが形成され、ゲート電極材料の蒸着・リフトオフを行うことによってマッシュルームゲートを形成することができる。イオン源にAu-Si-Be合金液体金属イオン源を用いることによって、FIB装置の質量分離装置の切替えのみでBeとSiのビームの選択を行うことがで

きる。図4-8にこの手法によって得られたT型レジストパターン及びマッシュルームゲートパターンを示す。レジスト膜厚は $0.7\mu\text{m}$ 、ゲート長は $0.35\mu\text{m}$ 、電極材料の蒸着厚さは $0.6\mu\text{m}$ である。

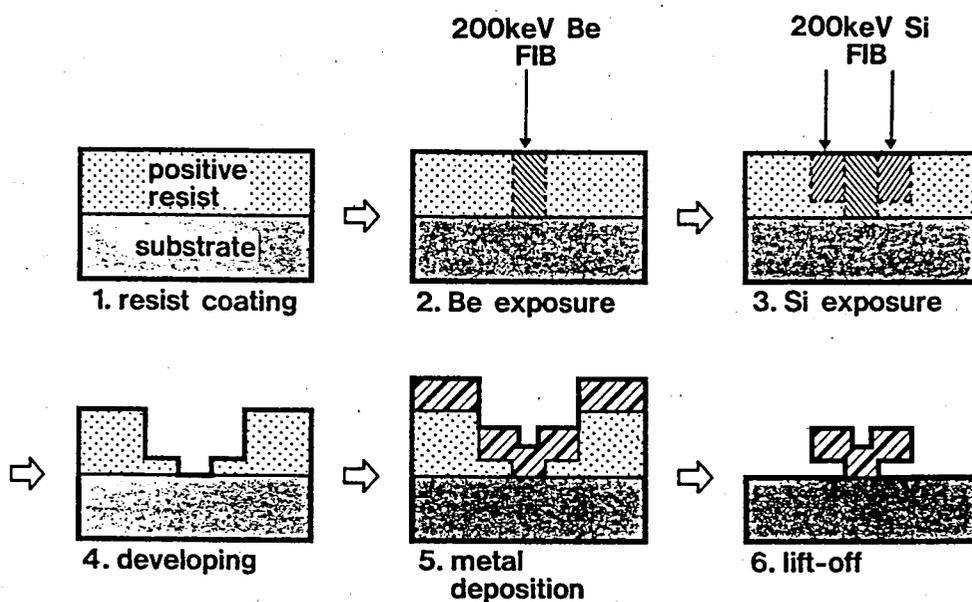
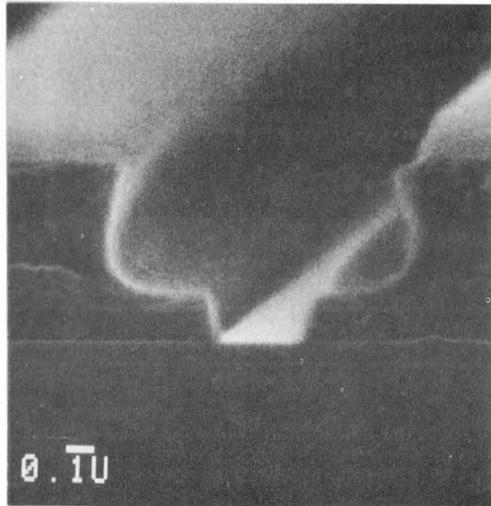
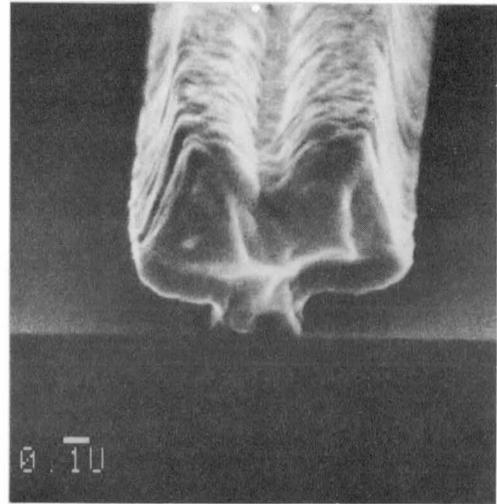


図4-7 異種イオンビームによる混合露光法を用いたマッシュルームゲート形成プロセス。



(a)



(b)

図 4-8 混合露光法によって形成されたT型レジストパターン (a) と、その後蒸着・リフトオフを行うことにより形成されたマッシュルームゲート (b)。

4-3 ガリウムイオンビーム照射とドライ現像法を用いたリングラフイー技術

イオンビームを基板に選択的に注入し、表面の化学的な性質を変えることによってパターン形成を行うことができる。Cr 膜に W, Sb 等のイオン注入を行った領域が CCl_4 のドライエッチングに対して耐性を持つという現象が報告されている⁽¹⁵⁾。また、レジストに Ga や Si イオンビームを照射した後 O_2 によるドライエッチングを行うと、ネガレジストパターンが形成されるという現象も報告されている^(16,17)。これは、注入された物質がドライエッチングガスと反応して耐ドライエッチング性物質 (W_2O_3 , Ga_2O_3 , SiO_2 等) が形成されるからであると考えられている。

本節では、レジストに Ga の FIB を照射した後 O_2 RIE (Reactive Ion Etching: 反応性イオンエッチング) を行うことにより微細レジストパターンを形成するプロセス

についての検討結果について述べる。なお、このプロセスはレジストをドライエッチングによって現像しているとも言えるので、以後「ドライ現像」と呼ぶことにする。

本プロセスの工程を図4-9に示す。基板にレジストを塗布した後、FIBによって選択的にGa イオンビームを照射し、 O_2 RIE を行うことによってネガ型のレジストパターンを得る。イオンビーム照射部はエッチング中に耐エッチング層となるが、エッチングによってある程度膜減りを生ずる。

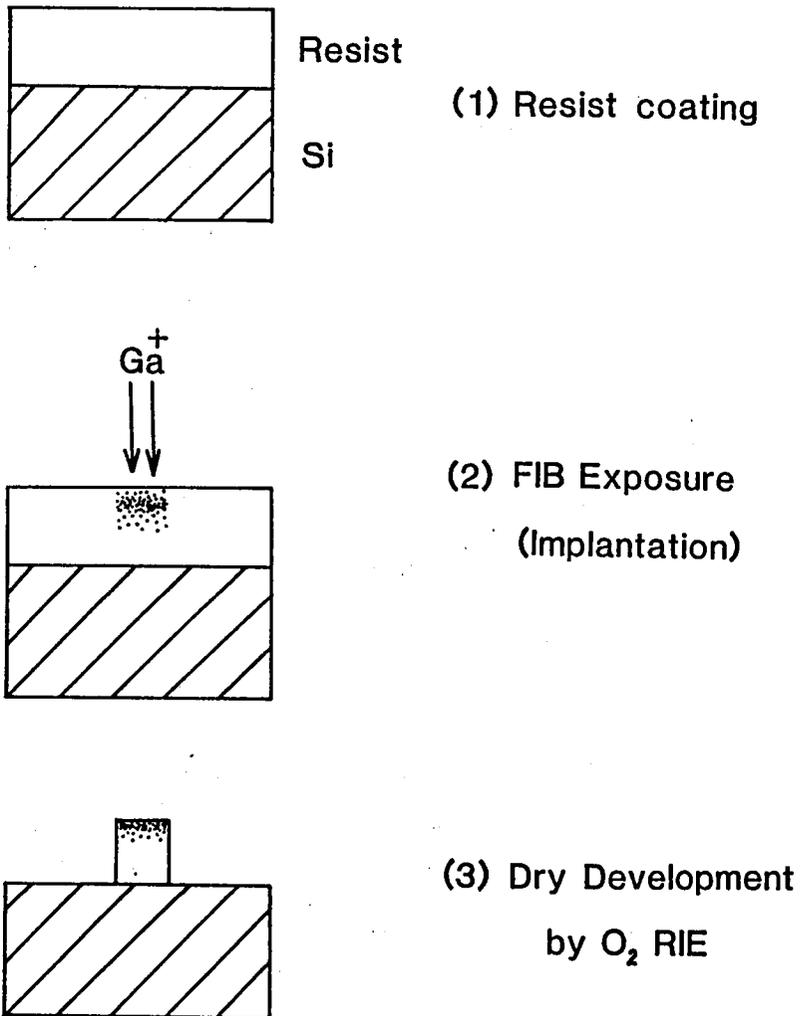


図4-9 集束イオンビームとドライ現像法を用いたリソグラフィ工程。

初期膜厚 $1.0 \mu\text{m}$ のレジストを 100 keV の Ga イオンビームによって照射した場合の露光感度曲線を図 4-10 に示す。レジストは PMMA, AZ 1350, 及び CMS (Chloromethylated poly Styrene)⁽¹⁸⁾ の 3 種類について実験を行った。グラフの縦軸は、イオンビームを照射しなかった部分のレジストがドライ現像によって完全に除去されたときのイオンビーム照射部分の残存レジスト膜厚を初期膜厚で規格化した値 (規格化膜厚) を示している。ドライ現像は高周波パワー密度 0.4 W/cm^2 , ガス圧 10 Pa の条件で行った。イオンビーム照射部の残存レジスト膜厚は初期膜厚に比べて $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 減少しているが、これは露光時のイオンビーム照射によるスパッタリングと RIE による膜減りによるものである。図 4-10 から、パターン形成に必要なイオンビーム照射量 (感度) は PMMA に対しては $2 \times 10^{16} \text{ ions/cm}^2$, AZ 1350 と CMS に対しては $1 \times 10^{17} \text{ ions/cm}^2$ であることがわかる。これ以下のビーム照射量においては、イオン注入層からなる耐エ

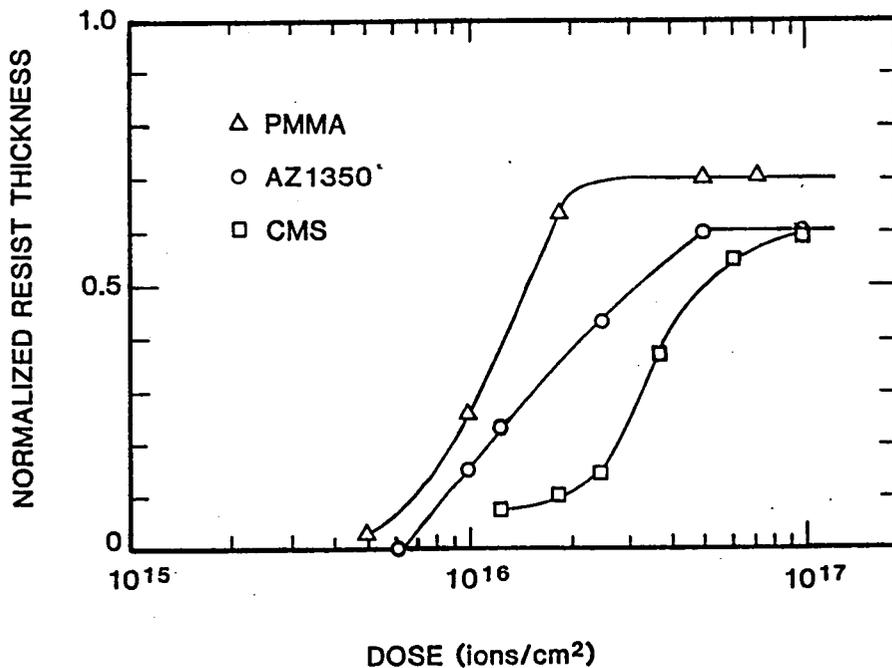


図 4-10 PMMA, AZ 1350, CMS の 3 種類のレジストを 100 keV の Ga イオンビームによって照射した場合の露光感度曲線。

ッチング層がドライ現像中に除去されてしまい、シャープなパターン形状を得ることができない。他のレジストに対して PMMA の感度が高いのは、レジストそのもののエッチレートが大きい（従って現像時間は短い）からである。通常の溶媒による現像（ウェット現像）では、PMMA と AZ1350 はポジレジストの特性を示すが、ドライ現像法においてはその形成の原理から明らかなようにすべてネガレジストの特性を示す。

本方法によって形成したレジストパターンの一例を図4-11に示す⁽¹⁹⁾。レジストは CMS, イオンビーム照射量は 1.0×10^{17} ions/cm² で、他のプロセス条件は図4-10の場合と同一である。図4-11 (a) は孤立した $0.1 \mu\text{m}$ 幅のパターンであり、(b) は $0.3 \mu\text{m}$ 幅のパターンを $0.6 \mu\text{m}$ ピッチで形成したものであり、(c) は $0.5 \mu\text{m}$ 幅のパターンを $1.0 \mu\text{m}$ のピッチで形成したものである。図から、3~8の高いアスペクト比を持つレジストパターンが形成されていることがわかる。パターン表面から $0.2 \mu\text{m}$ 程度の部分が Ga が注入されて不揮発性になり、耐エッチング層となっているのが観察される。

各イオン照射量における、イオンビーム描画を行ったときの描画パターン幅（=設計パターン幅：nominal width）と、できあがったパターン幅との関係を測定によって求めた結果を図4-12にプロットしている。測定は SEM によってパターン断面を観測することによって行った。図中 (a) はラインアンドスペースパターン、(b) は孤立したパターンの場合を示す。この結果から、イオン照射量が 1.0×10^{17} ions/cm² のときには、ラインアンドスペースに対しては $0.2 \mu\text{m}$ まで、また孤立パターンの場合は $0.1 \mu\text{m}$ まで描画パターン幅とでき上がりのパターン幅をほぼ完全に一致させることができることがわかる。なお、これよりも微細なラインアンドスペースパターンを形成することは困難であったが、これはパターンの大きさがイオンビームの直径（ $\approx 0.1 \mu\text{m}$ ）に近づき、その分布の重なりあいの影響が出てくるためと、RIEの解像度の限界によるものであると考えられる。より微細なパターンを形成するためには、イオンビームを更に集束すること、及び $0.2 \mu\text{m}$ 以下のパターンに適応できる RIE の技術が必要になると考えられる。

図4-13は本方法によってLSIパターンを形成したものである。ダイナミックRAMの素子分離パターンのメモリセルの一部を縮小したもので、最小パターン幅 $0.5 \mu\text{m}$ 及び $0.25 \mu\text{m}$ のものを示している。100 keV の Ga イオンビームによって $0.5 \mu\text{m}$ 厚の AZ1350 を加工した。イオン照射量は前と同じく 1.0×10^{17} ions/cm² である。

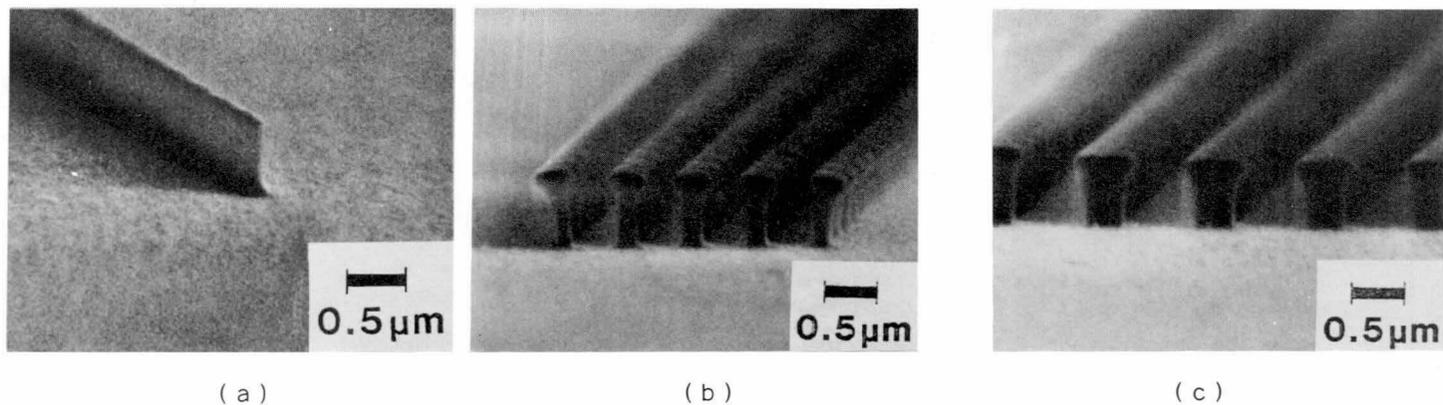


図 4 - 11 Ga 集束イオンビーム照射とドライ現像法を用いて形成したレジストパターン (イオンビーム照射量： 1.0×10^{17} ions/cm², O₂RIE 条件：0.4 W/cm², 10 Pa)。
(a) 0.1 μm 孤立パターン, (b) 幅 0.3 μm, ピッチ 0.6 μm,
(c) 幅 0.5 μm, ピッチ 1.0 μm。

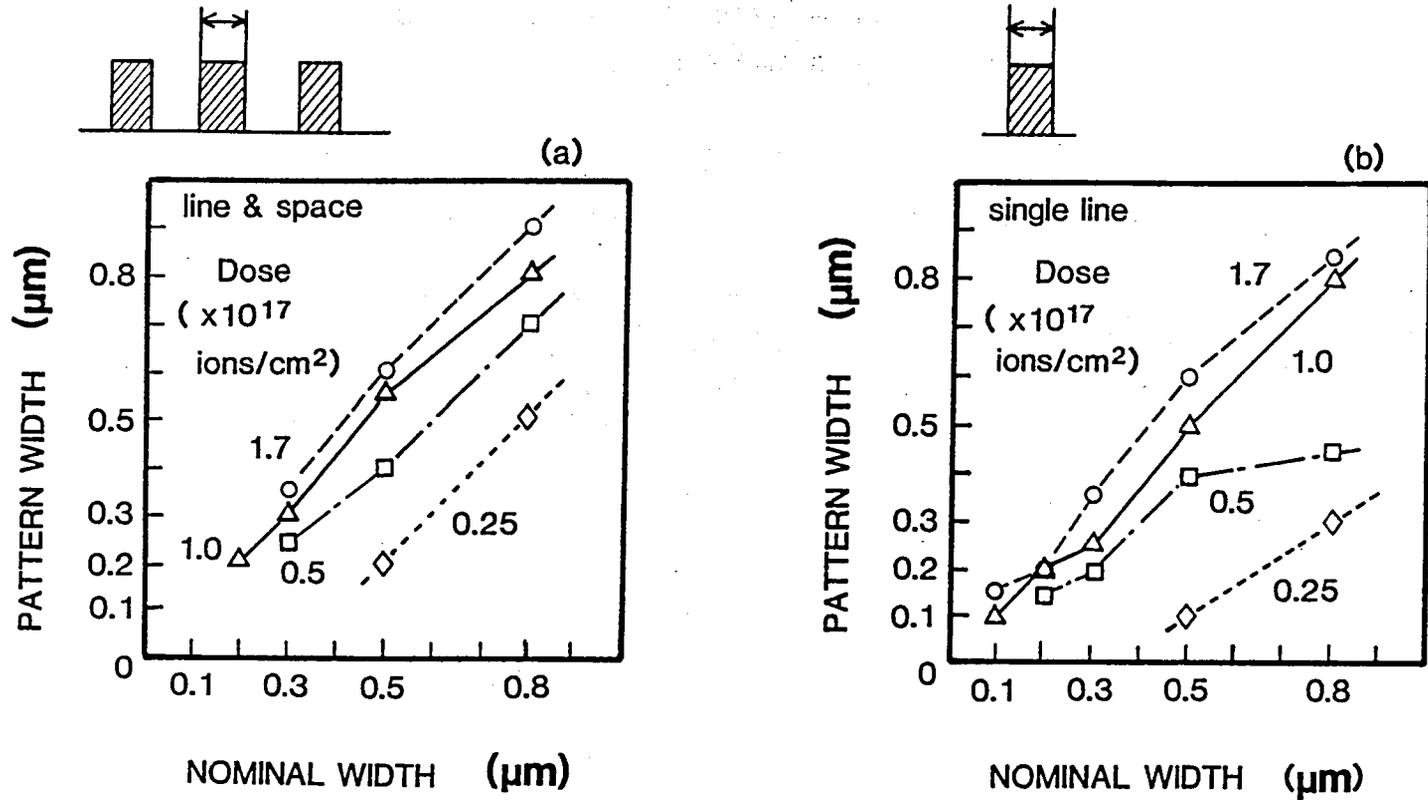
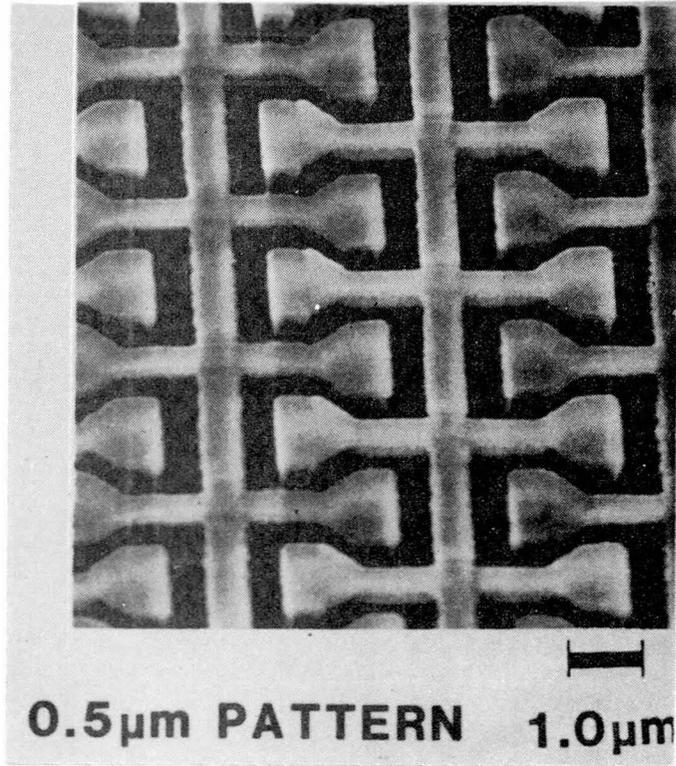
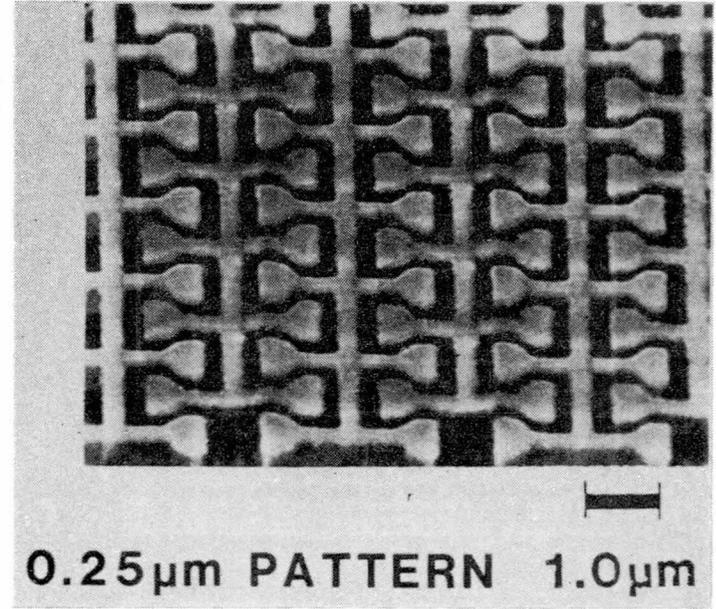


図4-12 描画パターン幅と形成パターン幅の関係。
(a) ラインアンドスペースパターンの場合。
(b) 孤立パターンの場合。



(a)



(b)

図 4 - 13 集束イオンビーム照射とドライ現像法を用いて形成した L S I パターン。
((a) 0.5 μ m パターン, (b) 0.25 μ m パターン)

本方法による加工技術を用いて、 $0.2\ \mu\text{m}$ 程度までの微細なパターンを、単層レジストプロセスによって実現することができた。通常 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下のパターン形成には三層レジストプロセスを用いる必要がある。これは、光露光においては焦点深度の、また電子ビーム露光においては近接効果の関係で高アスペクト比のパターンを露光することが困難なために、まず薄いレジストパターンを形成しておき、そのパターンを下層の金属膜にエッチングによって転写し、さらにその金属パターンをマスクにして下層のレジストパターンをエッチングにより形成するというものである。この方法では工程が複雑になる上に歩留りが低下し、コストも高いので、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下のパターン形成を単層レジストプロセスによって形成できることは大きな利点であると考えられる。

このような高い微細加工性は、イオンビームの基板内での直進性が良好であること、及びイオンビームを注入しているのがレジストのごく表層のみであることによっている。更に高い解像度を得るには、イオンビーム径の微細化と RIE 技術の改善が必要であると考えられる。

本方法は、さらに、照射したすべてのイオンをレジスト内（厚さ $0.5\sim 1.0\ \mu\text{m}$ ）にトラップするので、余分なイオンビームの基板への影響が生じないことと、現像時のレジストの膨潤が生じないという利点を持っている。一般的に、レジストを現像液によって現像するとき、レジストの膨潤現象が生じてパターンの解像度が低下したり、パターンがうねりを持つことが知られているが、本方法では、現像を溶媒を用いずにドライプロセスによって行うので膨潤現象を生じない。

しかし、本方法は、現在のところ $10^{17}\ \text{ions}/\text{cm}^2$ という高いイオン照射量を必要とするので、一般的なデバイスの製造に使用するには時間がかかりすぎるという問題を持っている。実用になるには少なくとも 2 桁以上の感度の改善が必要である。本研究では FIB 装置の関係で $100\ \text{keV}$ のイオンビームを使用した方が、もっと低エネルギーな領域を使用した場合は 1～2 桁高い感度が報告されている¹⁶⁾。また、RIE の条件に対してもガス圧、ガスの種類、パワー密度、電極形状等の検討を進めることによってさらに高スループット化を実現できる可能性があると考えられる。

4-4 結 言

本章では、FIBを用いたリソグラフィ技術に関する研究結果について述べた。リソグラフィを行うには実用的なレジスト膜厚(0.5 μm 程度以上)の露光を行う必要があるため軽い元素のイオンビームを使用するのが望ましい。そこで、まず液体金属イオン源を用いて比較的容易に得ることのできるBeおよびSiイオンビームによる露光特性について調べた。その結果、電子ビームによって露光した場合に比べて1~2桁感度が高く、かつ微細加工性が優れていることが明らかになった。また、Siのように少し重い元素を用いて露光を行った場合はrecoil atomによる再露光現象が生じ、できあがったパターンの断面が壺型になることが明らかになった。次に、FIBリソグラフィ独特の応用例として、イオン種の違いによる飛程の差を利用してGaAs FETのマッシュルーム型ゲートを形成できることを示した。

FIBリソグラフィの異なった方式として、レジスト表面にイオンビームを照射した後ドライエッチングを行うことによってレジストパターンを形成する方法についても検討を行った。この方法はかなり多いイオンビーム照射量を必要とするが、オールドライプロセスであるという点で微細加工性において優れていると考えられる。

以上のように、FIBリソグラフィ技術は、微細加工性に優れ、またドライ現像法など試料表面の改質効果を利用することによって新しい微細加工技術への発展性を持っており、将来の先端デバイス開発への応用が期待できる。

第 4 章の参考文献

- [1] T.Kato, Y.Watakabe, and H.Nakata, "Proximity effect correction in electron-beam lithography", J. Vac. Sci. Technol. 19(4), 1279-1285 (1981).
- [2] L.Karapiperis, I.Adesida, C.A.Lee, and E.D.Wolf, "Ion beam exposure profiles in PMMA - computer simulation", J. Vac. Sci. Technol. 19(4), 1259-1263 (1981).
- [3] L.Karapiperis and C.A.Lee, "400-Å high aspect-ratio lines produced in polymethylmethacrylate (PMMA) by ion-beam exposure", Appl. Phys. Lett. 35(5), 395-397 (1979).
- [4] L.Karapiperis and C.A.Lee, "Ion beam fabrication of 400Å, high aspect-ratio lines in polymethyl methacrylate (PMMA)", J. Vac. Sci. Technol. 19(4), 1176-1181 (1981).
- [5] H.Morimoto, H.Onoda, T.Kato, K.Saitoh, and T.Kato, "Unique resist profiles with Be and Si focused ion beam lithography", J. Vac. Sci. Technol. B(1), 205-208 (1986).
- [6] T.Kato, H.Morimoto, K.Saitoh, and H.Nakata, "Submicron pattern fabrication by focused ion beams", J. Vac. Sci. Technol. B3(1), 50-53 (1985).
- [7] E.Miyauchi, H.Hashimoto, and T.Utsumi, "Au-Si-Be liquid metal ion source for maskless implantation", Jpn. J. Appl. Phys. 22(4), L225-L226 (1983).
- [8] I.Adesida and L.Karapiperis, "The range of light ions in polymeric resists", J. Appl. Phys. 56(6), 1801-1807 (1984).
- [9] J.F.Gibbons, W.S.Johnson, and S.W.Myroie, "Projected Range Statistics", (Deaden, Hutchinson, & Ross, Inc., Stroudsburg, Pennsylvania, 1975).
- [10] L.Karapiperis and D.Dieumegard, "Effect of recoil atoms on resolution in ion-beam lithography", Nucl. Instrum. Method. 209/210, 165-171 (1983).
- [11] L.Karapiperis, D.Dubreuil, Ph.David, and D.Dieumegard, "Ion beam lithography - an investigation of resolution limits and sensitivities of ion-beam exposed PMMA", J. Vac. Sci. Technol. B3(1), 353-357 (1985).

- [12] S.G.Bandy, Y.G.Chai, R.Chou, C.K.Nishimoto, and G.Zdasiuk, "Sub-micron GaAs microwave FET's with low parasitic gate and source resistance", IEEE Electron Device Lett. EDL-4(2), 42-44 (1983).
- [13] P.C.Chao, P.M.Smith, S.Wanuga, J.C.M.Hwang, W.H.Perkins, "Electron-beam fabrication of quarter-micron T-shaped-gate FETs using a new tri-layer resist system", Digest of Technical Papers, International Electron Device Meeting '83, 613-616 (1983).
- [14] S.Takahashi, F.Murai, and H.Kodera, "Submicrometer gate fabrication of GaAs MESFET by plasma etching", IEEE Trans. Electron Devices ED-26(10), 1213-1218 (1978).
- [15] T.Yamazaki, Y.Suzuki, and H.Nakata, "Gas plasma etching of ion implanted chromium films", J. Vac. Sci. Technol. 17(6), 1348-1350 (1980).
- [16] H.Kuwano, K.Yoshida, and S.Yamazaki, "Dry development of resists exposed to focused gallium ion beam", Jpn. J. Appl. Phys. 19(10), L615-L617 (1980).
- [17] I.Adesida, J.D.Chinn, L.Rathbun, and E.D Wolf, "Dry development of ion beam exposed PMMA resist", J. Vac. Sci. Technol. 21(2), 666-671 (1982).
- [18] K.Sukegawa and S.Sugawara, "A high resolution negative electron resist chloromethylated poly- α -methylstyrene (α M-CMS)", Jpn. J. Appl. Phys. 20(8), L583-L586 (1981).
- [19] H.Morimoto, K.Tsukamoto, H.Shinohara, M.Inuishi, and T.Kato, "Submicrometer-gate MOSFET's by the use of focused-ion-beam exposure and a dry development technique", IEEE Trans. Electron Devices ED-34(2), 230-234 (1987).

第 5 章 集束イオンビーム技術の半導体デバイスへの応用

5-1 緒 言

本章では、第 3・4 章にわたって述べてきた、FIB による微細加工技術を半導体デバイス製作に応用した結果について述べる。まず、FIB エッチング技術を二層構造プロセスに応用して GaAs MESFET (Metal-Semiconductor Field-effect Transistor: 金属-半導体ショットキーゲート電界効果型トランジスタ) の微細ゲート電極を形成した結果について述べる。次に、FIB リソグラフィ技術を用いた高周波 GaAs FET 及びサブミクロンゲート MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-effect Transistor: MOS 電界効果型トランジスタ) の試作結果について述べる。GaAs FET 試作では、異種イオンビームの混合露光法を用いて形成したマッシュルームゲートをもつ FET の試作についても触れる。また、MOSFET のゲートパターン形成にはドライ現像法を使用した。

5-2 集束イオンビームエッチングによる GaAs FET の試作

第 3 章で述べた FIB エッチング技術を二層構造プロセスに応用し、微細ゲートパターンを形成することによって GaAs MESFET の試作を行った。図 5-1 はその製作工程である。n 型エピタキシャル層 ($\text{Si}: 3 \times 10^{17} / \text{cm}^3$) を持つ GaAs 基板に Au から成るソース・ドレイン電極を形成した後、 $1.5 \mu\text{m}$ 厚の AZ1350 を塗布し、その上に $0.1 \mu\text{m}$ 厚の Au を蒸着し、二層構造にする。そこで、FIB を用いたスパッタエッチングによってゲートパターンに対応する Au 薄膜を除去し、その Au パターンをマスクにして下地のレジスト層を O_2 RIE によってエッチングする。FIB エッチングには 100 keV の Ga を用いた。イオン照射量は $1.0 \times 10^{17} \text{ ions}/\text{cm}^2$ である。また、RIE はガス圧 10 Pa 、パワー密度 $0.4 \text{ W}/\text{cm}^2$ の条件で行った。FIB 描画時に 2-5 節で述べたように下地パターンとイオンビームのアライメントが必要であるが、このアライメントマークにはドレイン電極中にあらかじめ形成した Au の抜きパターンを使用した。次に、ショットキーメタル (Ti) と電極材料 (Au) の蒸着を行なった後リフトオフによってゲート電極の形成を終了する。

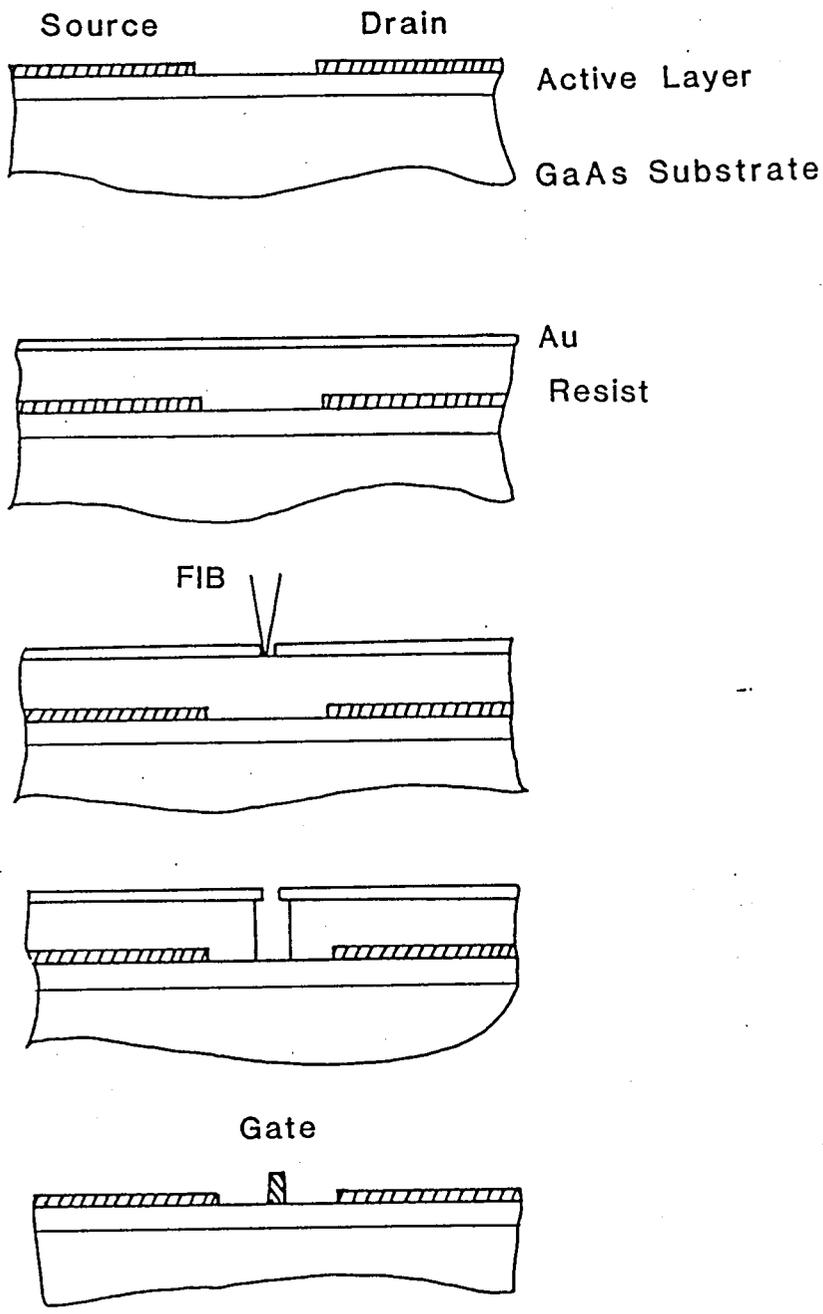


図 5-1 集束イオンビームエッチング技術を二層プロセスに応用した GaAs MESFET の製作工程。

FIBエッチング時の照射Gaイオンの一部はAu薄膜の下部のレジスト中に注入されるが、イオンの飛程(100 keVで約 $0.2 \mu\text{m}$)はレジスト膜厚($1.0 \mu\text{m}$)に比べて充分短いので、余分なイオンはレジスト中ですべて捕獲され、基板に影響を及ぼすことはない。ゲートパターン形成前と形成後のソース・ドレイン電流(I_d)の変化は全く観測されず、GaAs基板にイオン照射による結晶欠陥や不純物準位が発生していないことを示している。また、照射Gaイオンのうちレジストに注入されるものの大部分はレジストの表層に止り、 O_2 RIEに対する耐性を増加させる⁽¹⁾。その影響を軽減させるためにRIE工程直前に HCl による処理を行った。

図5-2はRIE後の二層構造の断面形状および形成されたゲートパターンを示してい

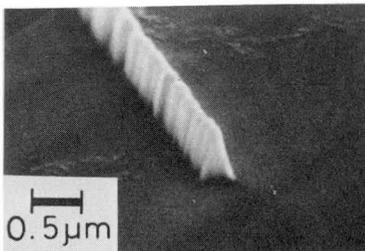
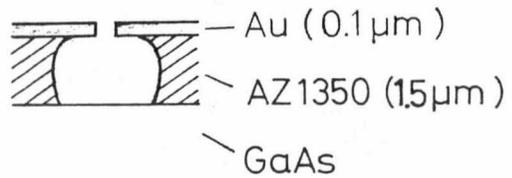
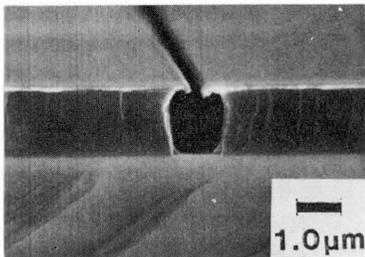


図5-2 RIE後の二層構造の断面形状および形成されたゲートパターン。

る。上層の Au は幅 $0.25 \mu\text{m}$ でエッチングされている。下層レジストはサイドエッチングによって若干オーバーハング形状になっている。上層の Au のエッチングパターンを反映して、リフトオフ後のゲートパターンの底部は $0.25 \mu\text{m}$ の幅を持っている。ゲート電極厚は $0.5 \mu\text{m}$ である。断面形状は三角形になっているが、これはゲート電極の蒸着が進むにつれてマスクである Au パターンの開口部の幅が狭まり、最終的には開口部がなくなってしまうからである。

図 5-3 は本方法によって試作した、ゲート長 (L_g) $0.25 \mu\text{m}$ 、ゲート幅 (W_g) $50 \mu\text{m}$ 、ソース・ドレイン間隔 $3 \mu\text{m}$ の FET である。試作したデバイスの $I-V$ 特性を図 5-4 に示す。相互コンダクタンス (g_m) は 160 mS/mm である。

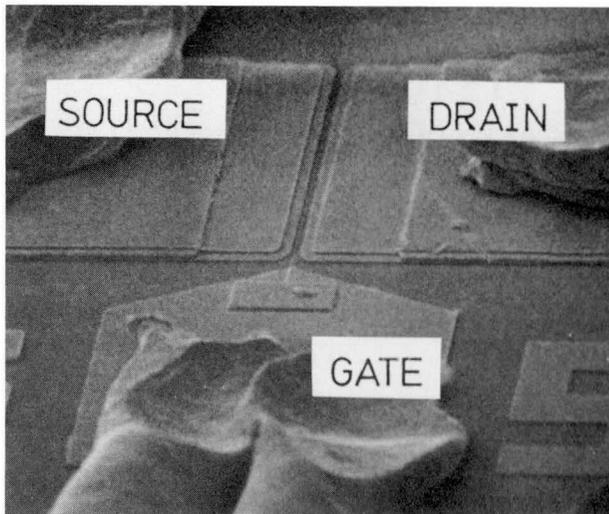


図 5-3 二層プロセスを用いて製作した
GaAs MESFET。

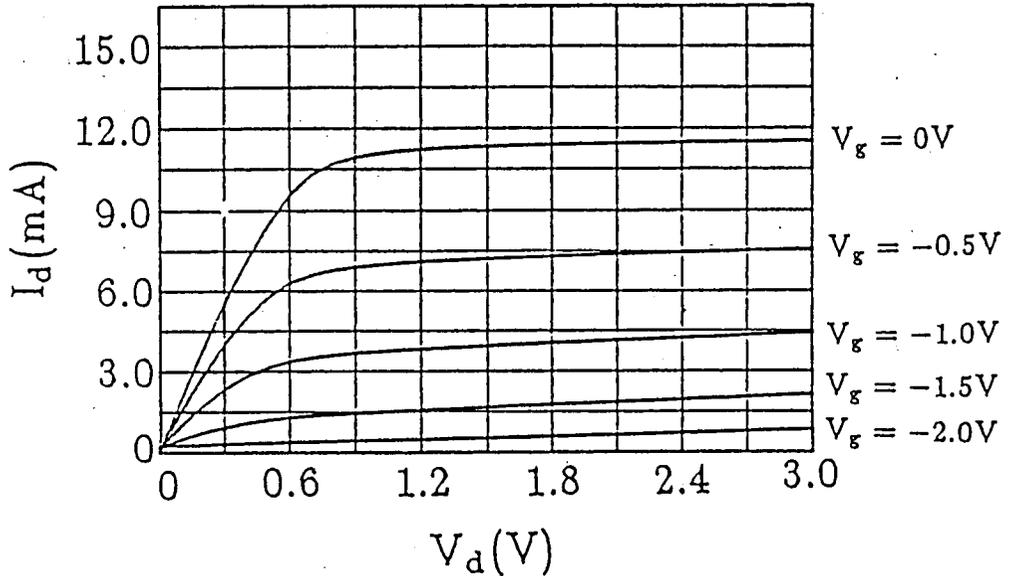


図 5-4 試作 FET の I-V 特性。

5-3 集束イオンビームリソグラフィーを用いた GaAs FET の試作

5-3-1 低雑音 FET の試作

低雑音 GaAs FET において、最小雑音指数 (NF_0) は次のように書ける⁽²⁾。

$$NF_0 = 1 + K_f C_{gs} \sqrt{\frac{(R_g + R_s)}{g_m}} \quad (5.1)$$

ここで、 K はフィッティングファクタ、 f は周波数、 C_{gs} はゲート・ソース間の静電容量、 R_g はゲート抵抗、 R_s はソース抵抗、 g_m は相互コンダクタンスである。この式から、ゲート長を短くすると C_{gs} が減少し、低雑音化に有効であることがわかる。本節では、FIB リソグラフィーの高解像性に注目し、FIB リソグラフィーを用いて試作した

ゲート長の短い低雑音 FET について述べる⁽³⁾。

図 5-5 はその製作プロセスを示している。ソース・ドレイン電極形成後レジストを塗布してゲートパターンの露光・現像を行ない、蒸着・リフトオフによってゲート電極を形成するというもので、従来から使用されている光リソグラフィーや電子ビームリソグラフィーによるものと同様のものである。レジストは $0.5\ \mu\text{m}$ 厚の PMMA を使用し、露光は $200\ \text{keV}$ の Si によってビーム照射量 $1 \times 10^{13}\ \text{ions/cm}^2$ で行った。イオンビームと下

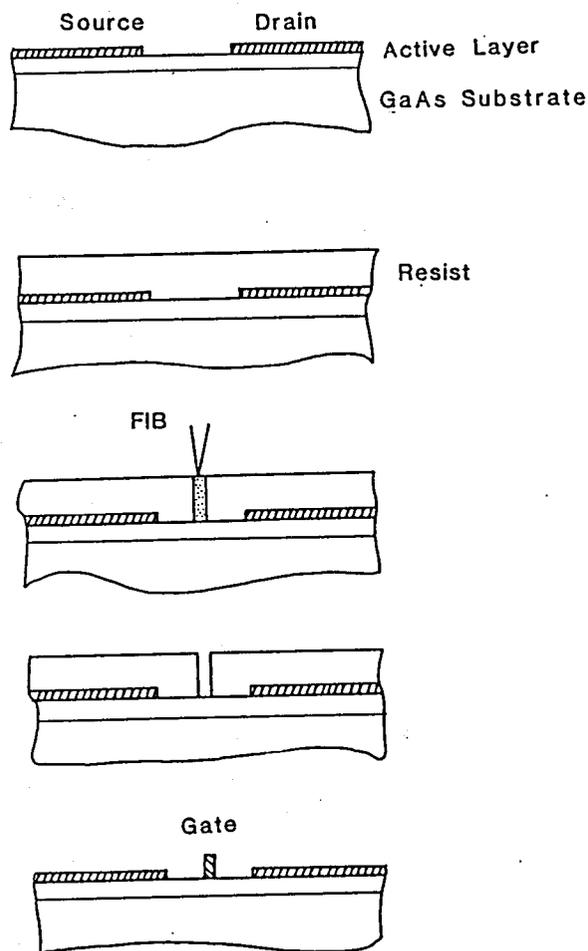


図 5-5 集束イオンビームリソグラフィーを用いた GaAs FET の製作工程。

地パターンとの位置合せに用いるアライメントマークとするために、ソース電極形成時に十字状のAuの抜きパターンを形成した。

この方法によれば、イオンビームの特徴を生かして簡単な工程で高解像パターン形成を行うことができる反面、レジストを突きぬけたイオンが基板に注入されてデバイス特性に悪影響を与えてしまうという問題が生ずる。この問題について検討を行った結果が図5-6である。これは、レジスト膜厚を変化させたときの下地基板へのイオンビームの影響を表わしたもので、縦軸は、イオンビーム露光前の値に対するソース・ドレイン電流(I_d)の露光後の減少の割合を示している。 I_d の減少はレジストを突きぬけたイオンビームが基板に注入されることによって生ずるので、この値はイオンビームによる下地の損傷を表わしている。レジスト膜厚の増加に従って下地の損傷は減少し、 $0.55\mu\text{m}$ 以上のレジスト膜厚になると損傷の影響は観測されなくなる。ゲート長(露光線幅)の増加に従って下地の損傷が大きくなっているのは、イオンビーム径が $0.1\mu\text{m}$ 程度で形成パターン幅とほぼ等しい領域にあるために、パターン幅が増加するにつれて実効的なイオンビーム照射量

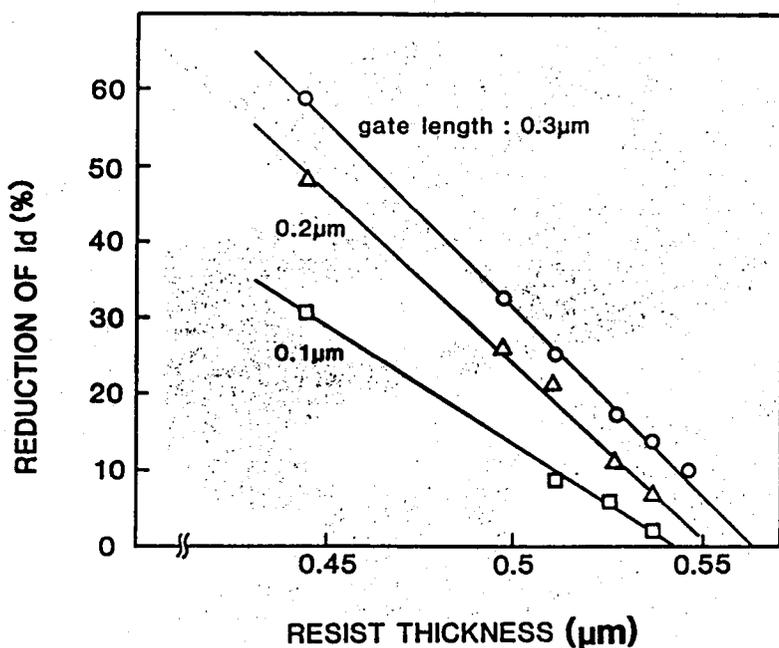


図5-6 レジスト膜厚に対するソース・ドレイン電流(I_d)の減少。

が増加するからである。これは、パターン描画に際して微細スポットビームをある一定の間隔で移動させる（走査する）ことを行っているために、ビームプロファイルの重ねあわせの効果がでてくることによる。図から、レジスト膜厚を $0.55\mu\text{m}$ 以上にすればイオンビームによる照射損傷をなくすることができるが、この条件では露光部のレジストを完全に除去することができない。本製作工程においては、パターン幅 $0.2\mu\text{m}$ のときの露光深さに合わせてレジスト膜厚を $0.5\mu\text{m}$ とした。実際のデバイス試作においては、ゲート電極形成前に、チャンネル部分の厚さ調整のためにゲート領域のGaAs基板を $0.2\mu\text{m}$ 程度エッチングを行う（リセスエッチング）ので、基板に生じたイオンビーム照射損傷部分を完全に除去することができた。

図5-7は試作したデバイスの概観図である。ゲートは $50\mu\text{m}$ 幅のものが4本で1素子を形成している。ソース電極中にアライメントマークが見えている。

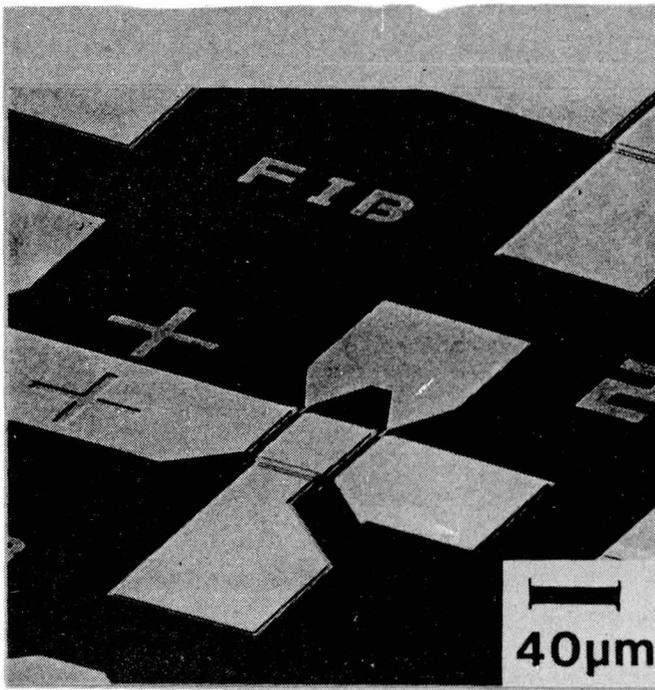


図5-7 集束イオンビームリソグラフィーを用いて試作したGaAs MESFET。

図5-8に試作したFETのI-V特性を示す。 $g_m = 174 \text{ mS/mm}$ が得られた。形成したゲート長(L_g)は $0.2 \mu\text{m}$ 、ゲート幅(W_g)は $50 \mu\text{m}$ である。図5-9は高周波特性を示したもので、Sパラメータ(S_{11} および S_{22})の周波数軌跡を表わしている。比較のために、従来の光学露光法によって同一条件のもとで形成したデバイス(ゲート長 $0.5 \mu\text{m}$)のデータを併記している。この2つの図から、 S_{11} と S_{22} の位相回転量は従来法によるデバイスに比べて小さな値となっており、ゲート長の微細化による寄生容量の低減効果が確認された。このSパラメータの値から等価回路解析を行った結果、ゲート容量(C_{gs})は約30%減少しているが、その反面ゲート抵抗(R_g)は約30%増加していることが明らかになった。このことはゲート長が短縮されている現象を良く説明している。

雑音最小となる入出力整合回路を形成し、高周波領域における雑音指数(NF: Noise Figure)と付随利得(G_a : Associated Gain)を測定した結果を図5-10に示す。 $I_d = 4 \text{ mA}$ のときに、NFの最小値 1.08 dB が得られた。従来法によるデバイスではこの値は 1.5 dB 前後であり、FIBリソグラフィーを使用したゲート長短縮の効果が確認された。

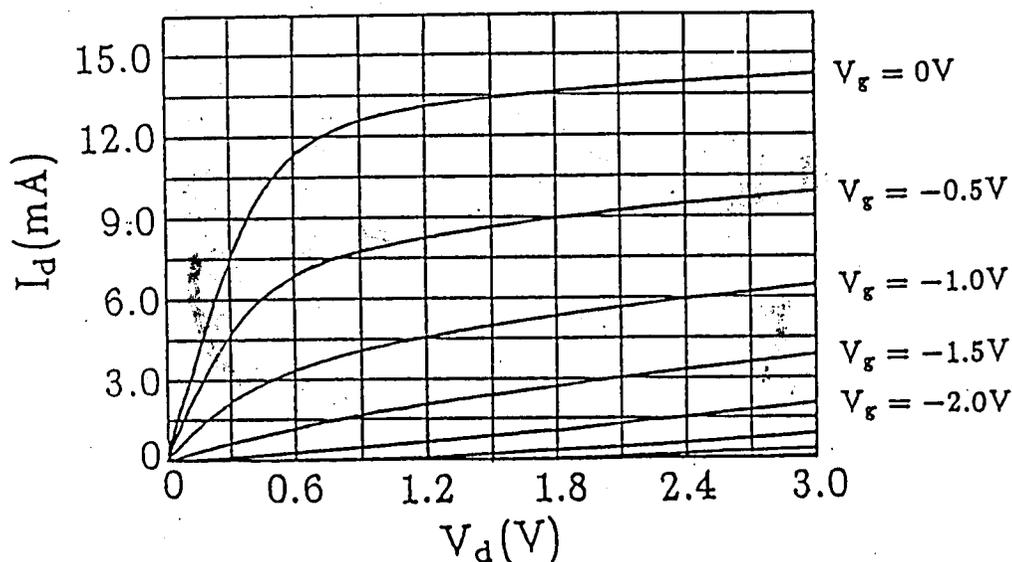
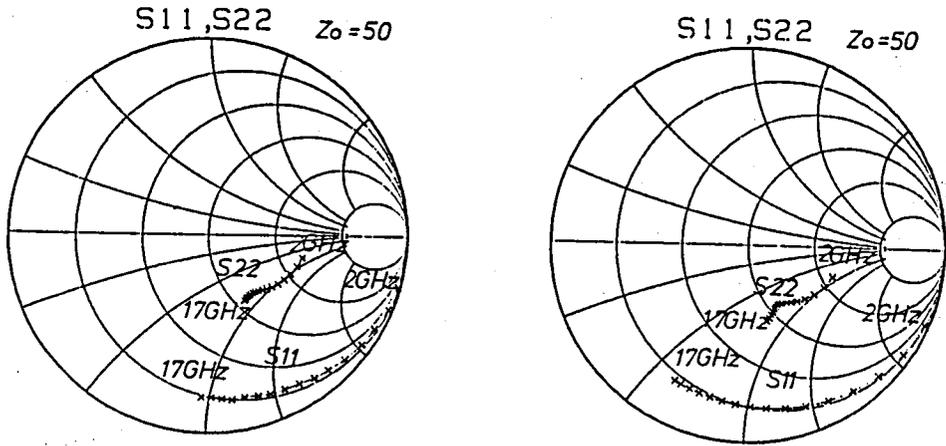


図5-8 集束イオンビームリソグラフィーを用いて試作したGaAs FETのI-V特性。



(a) FIB ($L_g: 0.3 \mu\text{m}$) (b) conventional ($L_g: 0.5 \mu\text{m}$)

図 5-9 試作した FET の S パラメータの周波数軌跡。
 (a) FIB を用いたもの。 ($L_g = 0.2 \mu\text{m}$)
 (b) 従来法を用いたもの。 ($L_g = 0.5 \mu\text{m}$)

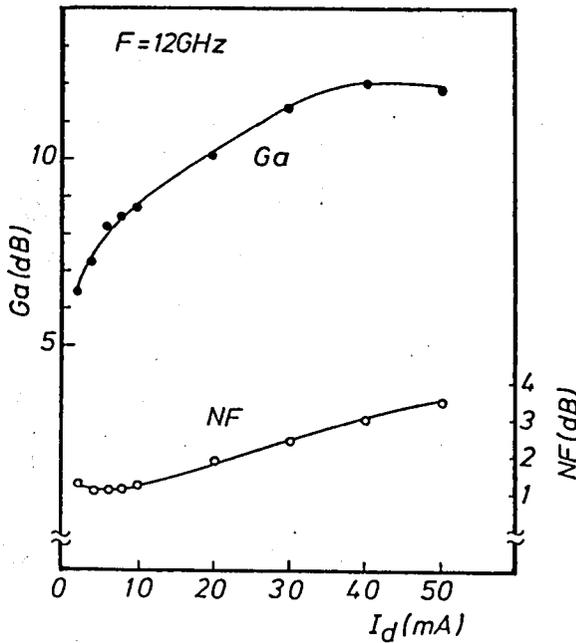


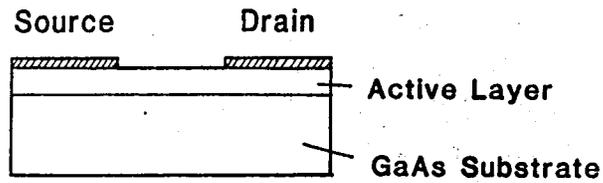
図 5-10 動作周波数 12 GHz における雑音指数 (NF) と付随利得 (G_a)。

5-3-2 異種ビームによる混合露光法を用いたマッシュルームゲートFETの試作

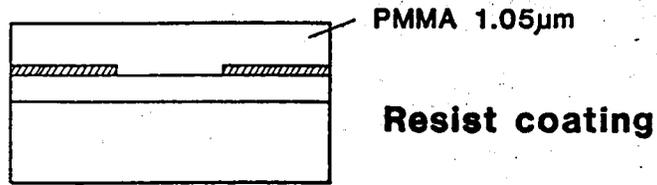
低雑音FETを実現するためにはゲート長を短くすることが非常に有効であるが(5-3-1節参照),ゲート長が非常に短くなってくると,ゲート抵抗(R_g)が増加してくるので,(5.1)式からも明らかなように,雑音指数は減少しなくなるという問題が生ずる。このために,接地面積は小さいが断面積は大きいマッシュルーム断面形状を持ったゲート構造が有効である。マッシュルームゲートの製作方法として,多層レジスト構造⁽⁴⁾,サイドエッチングを利用したプロセス⁽⁵⁾等が試みられているが,プロセスの複雑さ・再現性とといった点で問題があった。このマッシュルームゲート構造を持ったGaAs MESFET製作に,4-2-2節で述べた異種の集束イオンビームを組み合わせた混合露光法を応用した⁽⁶⁾。この方法によれば,単層レジスト構造を用いたシンプルなプロセスで微細なゲートパターンを再現性良く形成できる。

本方法によるマッシュルームゲートGaAs FETの試作プロセスを図5-11に示す。基板はnタイプのエピタキシャルウエハである。ソース・ドレイン電極形成後,1.05 μm 厚のPMMAレジストを形成する(図5-11(a))。その後,200 keVのBeイオンビームによってゲート部を露光し,次にその周辺部を100 keVのBeイオンビームを用いて露光する(c)。露光量は共に 2.0×10^{13} ions/cm²である。Au-Si-Be合金液体金属イオン源から放出される1価と2価のBeイオンビームを100 keVで加速した後E×B型質量分離装置で選択することによってビームを切り換えている。レジスト中での100 keVのBeイオンビームによって露光できる深さは0.7 μm 程度であるから,図に示すように100 keVのビームで露光した部分はレジストの上層のみが露光された状態になっている。室温でMIBKとIPAの1:3の混合液に10分間浸すことによって現像を行った。100 keVで露光した部分は上層のみが現像除去され,断面形状がT字型に抜けたレジストパターンが形成される。下地に余分なイオンが注入されるのを最小限にするために,レジスト膜厚は200 keVのイオンビーム露光で現像除去できる膜厚よりも少し厚く設定した。現像後薄く残存するレジストは,酸素ガスを用いたRIEによって除去した(d)。リセスエッチを行った後,ショットキーメタル(Ti)と電極材料(Au)が蒸着され(e),リフトオフを行うことによってMESFETが形成される(f)。

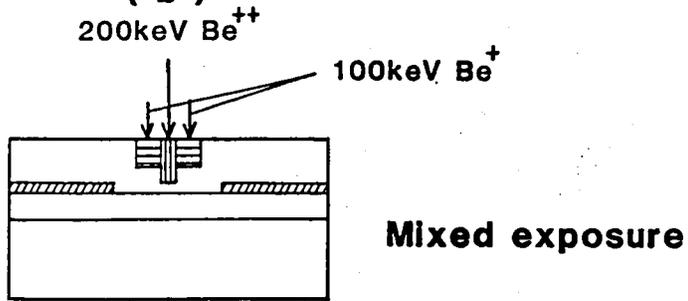
GaAs基板の余分なイオンビームによる照射損傷を,イオンビーム露光前後におけるFETのソース・ドレイン電流の測定によって評価した。図5-12は,レジスト膜厚を変化させたときのソース・ドレイン電流の減少をプロットしたものである。実際のFETの露光と同じ条件,すなわち200 keVのBeイオンビームによって 2×10^{13} ions/cm²



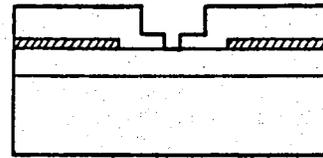
(a)



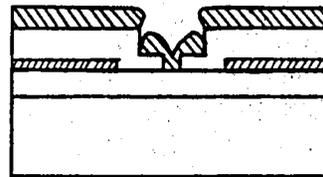
(b)



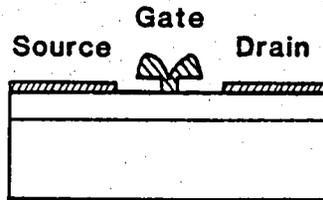
(c)



(d)



(e)



(f)

図 5 - 11 混合露光法を用いたマッシュルームゲート GaAs MESFET の製作工程。

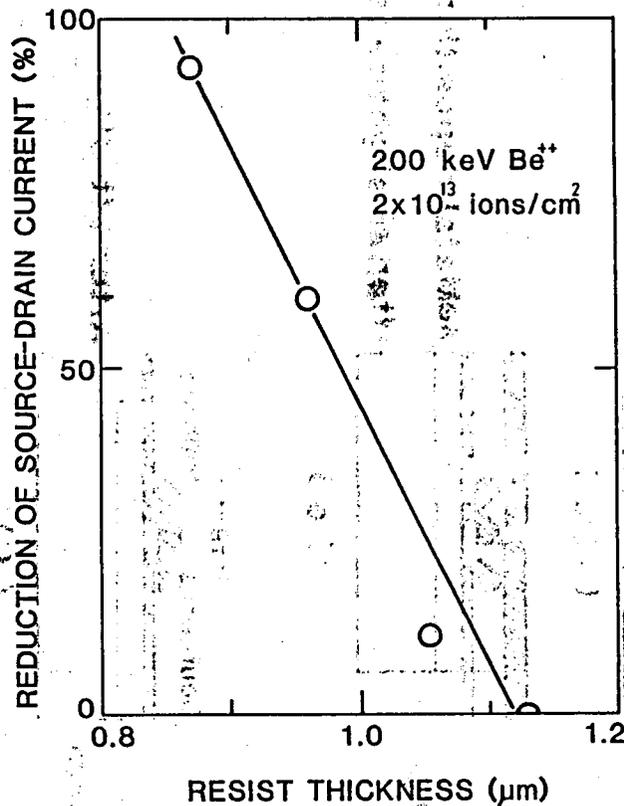


図 5 - 12 レジスト膜厚に対する露光後のソース・ドレイン電流の減少。

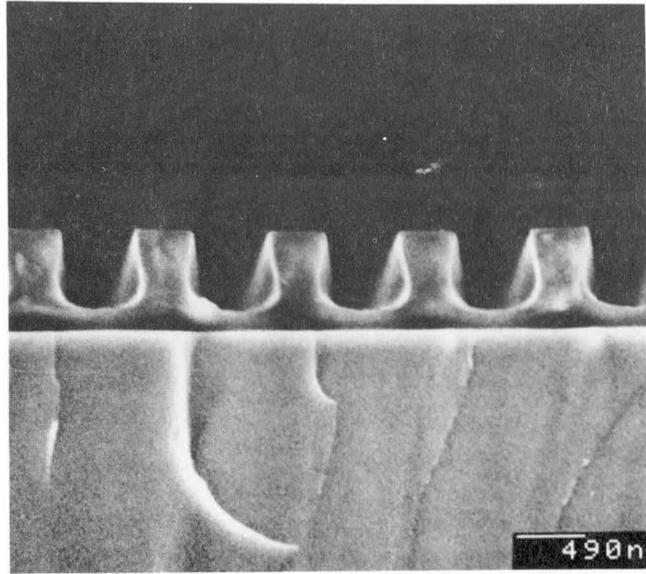
で照射している。レジスト膜厚が $1.13 \mu\text{m}$ よりも大きい場合はソース・ドレイン電流の減少は観測されないが、レジスト膜厚が薄くなるにつれて電流の減少が顕著になり、レジスト膜厚 $0.8 \sim 0.9 \mu\text{m}$ で電流が流れなくなってしまふ。このソース・ドレイン電流の減少は、イオン照射による格子欠陥によるものと考えられる。上記の条件で露光を行った場合の現像深さは充分大きなパターンに対しては $1.21 \mu\text{m}$ であるが、FETのゲート部に対しては $1.0 \mu\text{m}$ である。これは、露光パターン幅が非常に小さい ($\approx 0.25 \mu\text{m}$) ために、実効的な照射量が少ないためである。従って、露光によりレジストを完全に除去するためにはレジスト膜厚を $1 \mu\text{m}$ 以下に設定することが必要になる。しかし、レジスト膜厚を $1 \mu\text{m}$ にした場合、下地への照射損傷によってソース・ドレイン電流は 55% に減

少してしまう。電極材料（Au又はAu-Ge合金）は融点が低いために、アニールによる結晶回復を行うことはできない。従ってこの照射損傷を防ぐことが必要になってくる。

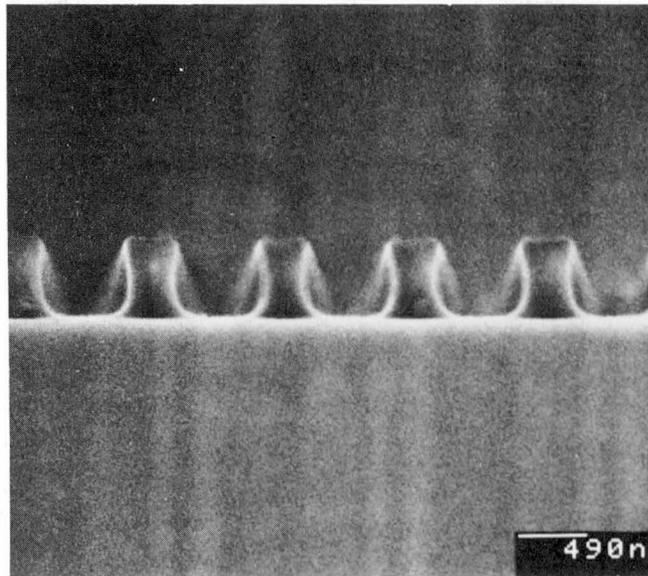
この照射損傷を防ぐためにRIEアシスト現像を用いた。これは基板に少し厚めにレジストを塗布しておき、現像後に酸素ガスを用いたRIEを行うことによって露光部に残存するレジストを除去する方法である。一例を図5-13に示す。図中(a)は $0.7\ \mu\text{m}$ 厚のPMMAに $200\ \text{keV}$ のSiイオンビームを用いて形成したパターンの断面SEM写真である。ビーム照射量は $1.0 \times 10^{13}\ \text{ions}/\text{cm}^2$ である。現像深さは $0.55\ \mu\text{m}$ なのでパターン下部にはまだレジストが $0.15\ \mu\text{m}$ 残存している。この条件では基板へのイオンビームによる損傷はほとんど生じない。その後 $10\ \text{Pa}$ 、 $0.4\ \text{W}/\text{cm}^2$ の条件で酸素のRIEを行った結果が(b)である。パターン下部に残存していたレジストは除去されている。全面エッチを行うために、未照射部のレジストも膜厚が減少しているが、パターン断面形状は比較的良好に保存されている。

実際のFETのゲートを露光したときのレジストパターンを図5-14に示す。前に述べたように、ゲート部を $200\ \text{keV}$ 、その周辺部を $100\ \text{keV}$ のBeイオンビームで露光している。塗布レジスト膜厚は $1.05\ \mu\text{m}$ で、露光部に残存する $0.05\ \mu\text{m}$ のレジストはRIEによって除去した。この場合レジストパターン幅は $0.25\ \mu\text{m}$ と小さく、パターン底部のエッチレートが他の部分に比べて極端に遅くなってしまうので、RIEは $3\ \text{Pa}$ 、 $0.2\ \text{W}/\text{cm}^2$ と異方性の強い条件で行った。エッチング時間は1分である。図5-12からもわかるように、 $1.05\ \mu\text{m}$ のレジストでは基板に少し損傷が生ずるが、この部分はリセスエッチングのときに完全に除去されてしまう。

試作したFETのSEM写真を図5-15(a)に示す。ゲート長は $0.25\ \mu\text{m}$ 、ゲート幅はトータルで $200\ \mu\text{m}$ ($50\ \mu\text{m} \times 4$ 本)である。図5-15(b)はゲート部分を拡大したものである。FETの静特性を図5-16に示す。 g_m は $120\ \text{mS}/\text{mm}^2$ である。マッシュルームゲート構造にした場合のゲート抵抗の低減効果を確認するために、同一ウェハ上に形成した従来構造のゲートとともにゲート抵抗の測定を行った。抵抗測定には4探針法を用いた。その結果、従来構造のものは平均 $80.9\ \Omega$ 、マッシュルーム構造のものは平均 $18.5\ \Omega$ であった。すなわち、マッシュルーム構造をとることでゲート抵抗はおよそ $1/4$ に低減され、高周波低雑音FETに対して有効であることが示された。



(a)



(b)

図 5 - 13 R I E アシスト現象の例。

(a) $0.7 \mu\text{m}$ 厚の PMMA を 200 keV の Si イオン
ビームによって露光したレジストパターン断面。

(b) R I E を行った後のパターン断面。

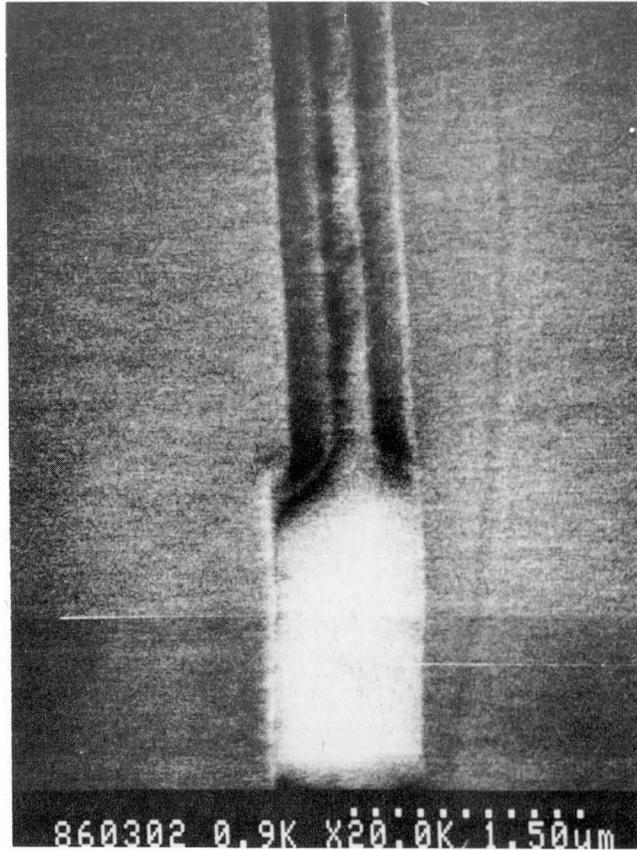
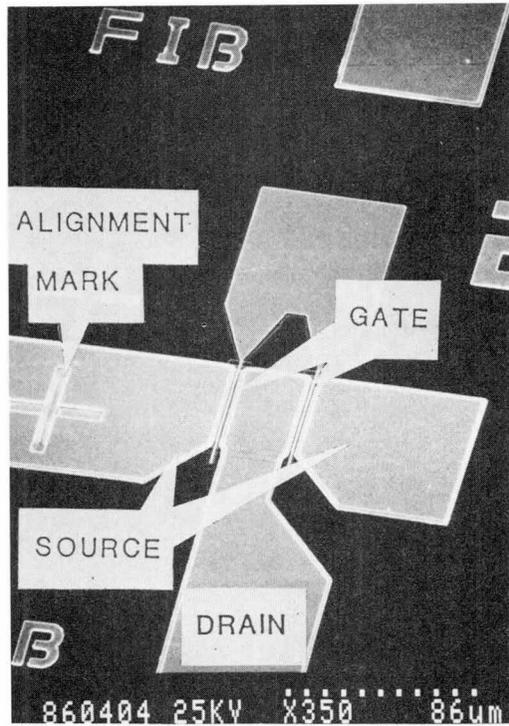
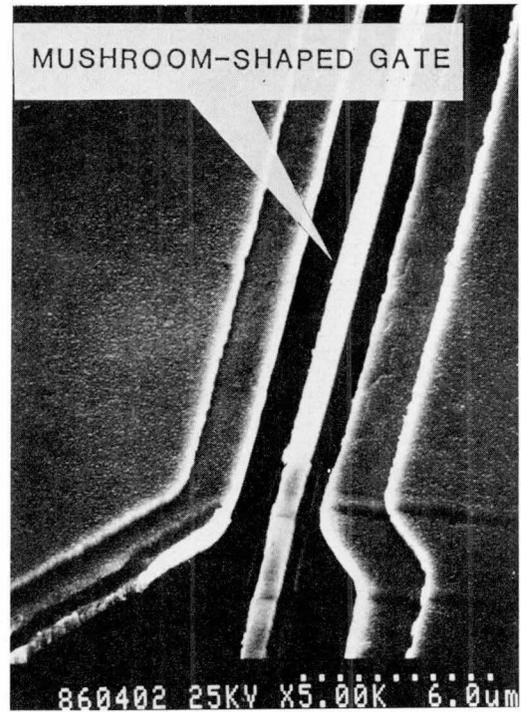


図 5 - 14 マッシュルームゲートのレジストパターン。
(中心のパターンを 200 keV の Be , その周辺部
を 100 keV の Be を用いて露光している。)



(a)



(b)

図 5 - 15 混合露光法によって試作したマッシュルームゲートGaAs MESFET。

(a) 全体像。 (b) ゲート部の拡大像。

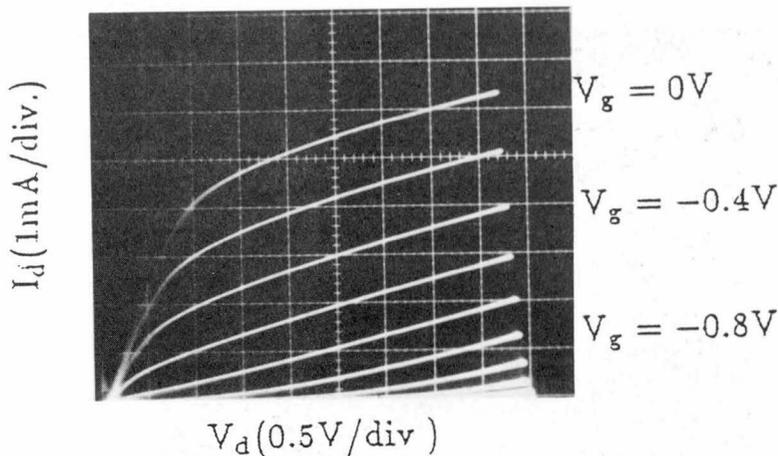


図 5-16 マッシュルームゲート GaAs MESFET の I-V 特性。

5-3-3 マッシュルームゲート GaAs HEMT の試作

GaAs HEMT (High-electron-mobility transistor: 高移動度トランジスタ) は高周波領域において優れた雑音特性を示す。5-3-2 節で述べた、異種イオンビームによる混合露光法を用いて、マッシュルームゲート GaAs HEMT を試作し、その性能の評価を行った⁽⁷⁾。

GaAs 基板上に MBE (Molecular Beam Epitaxy: 分子線エピタキシー) を用いてノンドープ GaAs (厚さ $1\ \mu\text{m}$), $n\text{-Ga}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}$ ($\text{Si}: 1.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 厚さ $40\ \text{nm}$), $n\text{-GaAs}$ ($\text{Si}: 2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 厚さ $150\ \text{nm}$) の三層構造を形成し、最上層の $n\text{-GaAs}$ 層に対し約 $100\ \text{nm}$ のリセスエッチングを行った後ゲート電極 (Ni/Al) を蒸着することによりデバイスを形成する。ソース・ドレイン電極は AuGe/Ni/Au である。ゲートパターンの描画には $192\ \text{keV Be}^{++}$ と $260\ \text{keV Si}^{++}$ の混合露光法を使用した。イオンビーム照射量はいずれも $2 \times 10^{13}\ \text{ions}/\text{cm}^2$ である。

パッシベーション膜 (SiN) を形成した後のデバイスの断面 SEM 写真を図 5-17 に示す。ゲート長は $0.25\ \mu\text{m}$ である。 g_m は $300\ \text{mS}/\text{mm}$ が得られた。18 GHz における雑音指数 (NF) と付随利得 (Ga) の測定結果を図 5-18 に示す。12 GHz および 18 GHz における最小雑音指数 (NF₀) はそれぞれ $0.68\ \text{dB}$ および $0.83\ \text{dB}$ であり、従来にない高い値が得られた。すなわち、高周波低雑音デバイス製作に対する FIB リソグラフィの有効性が明らかになった。

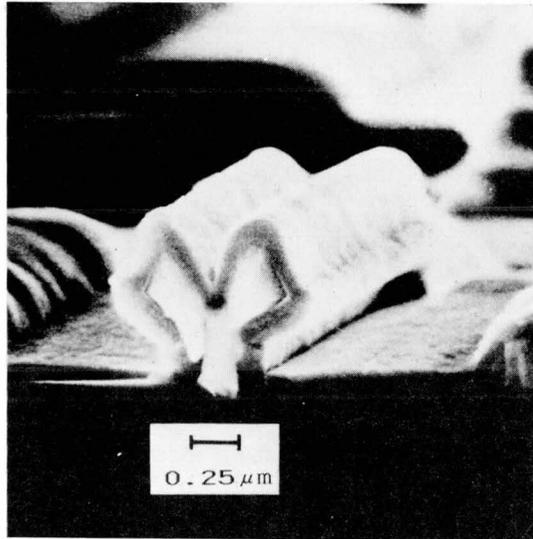


図 5-17 マッシュルームゲート GaAs HEMT の断面 SEM 写真。

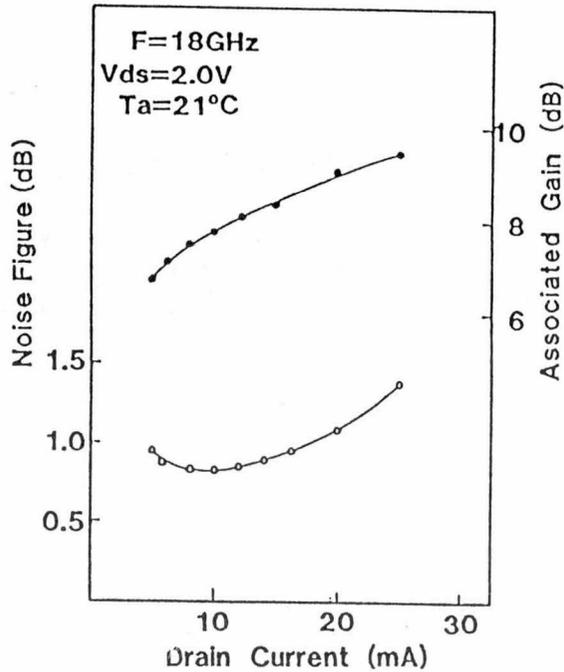


図 5-18 18 GHz における雑音指数と付随利得の測定結果。

5-4 ドライ現像法を用いたサブミクロンゲートMOSFETの試作

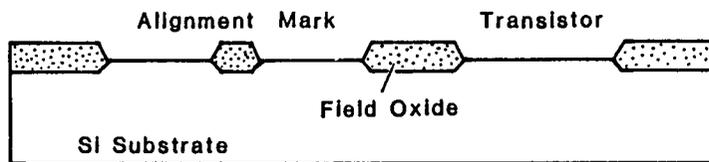
4-3節で述べたドライ現像法を用いたFIBリソグラフィ技術の有効性を検討するために、サブミクロンゲートを有するMOSFETの試作を行ない、その特性を測定した⁽⁸⁾。試作したMOSFETのプロセスパラメータを表5-1に示す。デバイスはNチャネル・エンハンスメント型で、設計上で0.3, 0.5, および0.8 μm 長のゲートパターン形成をFIBリソグラフィによって行った。ゲート酸化膜厚は20 nmである。チャネルドープはB, ソース・ドレイン形成はAsを、それぞれ 7×10^{11} ions/ cm^2 および 1×10^{15} ions/ cm^2 の照射量でイオン注入を行った。ゲートパターン形成に用いたFIB露光条件およびドライ現像条件は4-3節で述べたものと同一である。すなわち、1 μm 厚のCMSをレジストとして使い、100 keVのGaのFIBによって 1.0×10^{17} ions/ cm^2 の照射量で露光を行った後10 Pa・0.4 W/ cm^2 のO₂RIEによるドライ現像を行っている。ゲート工程以外のリソグラフィ工程は従来の光学方式による5:1縮小投影露光法を用いた。

表5-1 試作したMOSFETのプロセスパラメータ。

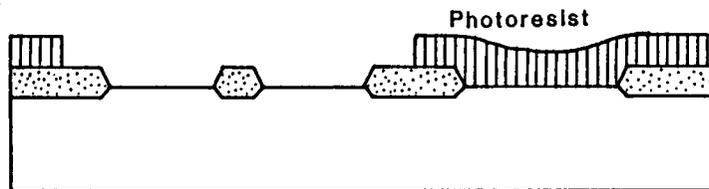
SUBMICRON MOSFET PROCESS

Device Parameters	Type	N-Channel Enhancement
	Gate Length	0.3, 0.5, 0.8 micron
	Gate Oxide	20 nm
	Channel Doping	Boron, 7×10^{11} ions/ cm^2
	Source-Drain	Arsenic, 1×10^{15} ions/ cm^2
Gate Lithography	Exposure	100 keV Ga, 1×10^{17} ions/ cm^2
	Resist	CMS, 1 micron thick
	Developing	Oxygen RIE, 10 Pa, 0.4 W/ cm^2

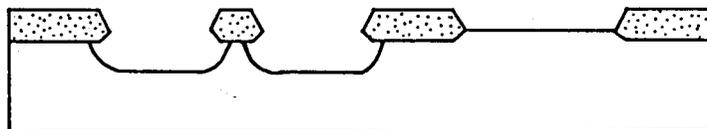
イオンビームの位置合せに用いるアライメントマーク上に厚いレジストを塗布した場合、アライメント信号が得られなくなってしまうという問題が生ずる。これは、露光に用いる Ga イオンの飛程が短い ($< 0.2 \mu\text{m}$) こと、検出すべき二次電子のレジスト中での飛程が短い ($< 0.01 \mu\text{m}$) こと、およびレジスト表面はアライメントマークの形状を忠実に反映せず、なだらかな形状になっていることによる。そのために、アライメントマーク形成には特別な工程を使用した。その概略を図 5-19 に示す。まず、フィールド酸化膜形成時に、アライメントマーク部分にも同時に酸化膜を形成しておく。その後、マーク以外



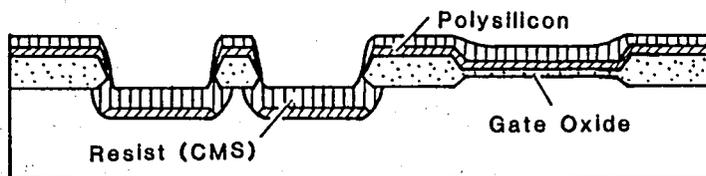
1. Active region definition



2. Resist patterning for alignment mark



3. Alignment mark formation by isotropic etching



4. Alignment mark with resist coated

図 5-19 アライメントマークの形成プロセス。

の部分レジストでマスクングを行って CF_4 プラズマを用いた等方性エッチングを行うと、図に示したようにフィールド酸化膜がマスクとなってサイドエッチングのためにオーバーハング形状のアライメントマークが形成される。マークの高さは約 $2\ \mu\text{m}$ である。このような構造のアライメントマーク上に $1\ \mu\text{m}$ 厚のレジストを塗布した場合、マークエッジ部はオーバーハング形状になっているのでレジストの段切れが生じ、このマークエッジ部をイオンビーム走査によって検出することができる。図 5-20 はレジストを塗布した時のアライメントマークの断面写真である。マークのエッジにはレジストがついていないことが確認できる。このアライメントマーク形成工程は、フィールド酸化膜形成工程のフォトマスクによってマークが形成されるので、特別なフォトマスクを使用した場合に比べるとマークの位置精度が良いという特徴も備えている。

ゲート長 $0.5\ \mu\text{m}$ のデバイスの $I-V$ 特性を図 5-21 に示す。ゲート幅は $5\ \mu\text{m}$ なので g_m は $108\ \text{mS/mm}$ である。スレッショールド電圧は $0.3\ \text{V}$ で、そのばらつきは $0.1\ \text{V}$ (3σ) であった。ゲート長 $0.3\ \mu\text{m}$ のデバイスは $g_m = 140\ \text{mS/mm}$ であったが、ソース・ドレイン間のリークが生じていた。このトランジスタを用いた E/E 型のイ

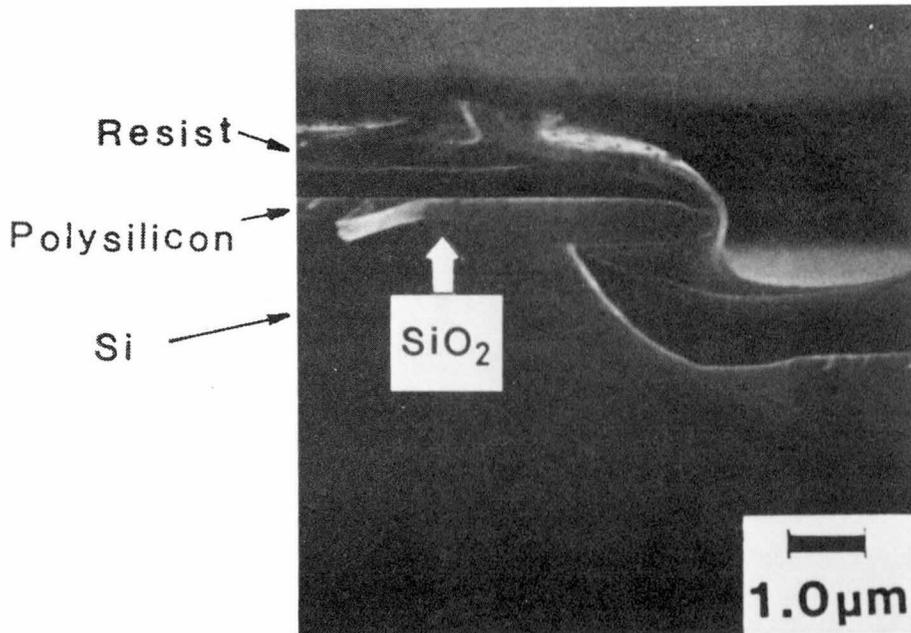


図 5-20 レジスト塗布後のアライメントマーク断面。

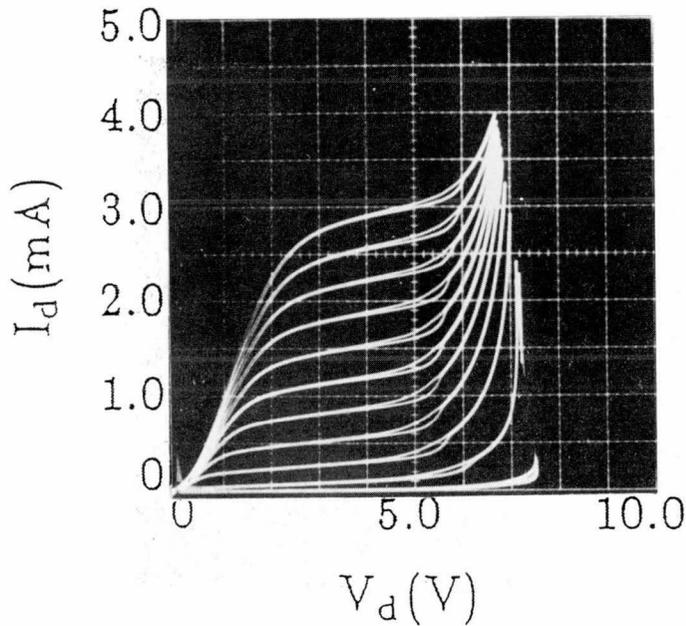


図 5 - 21 試作 MOSFET の $I-V$ 特性。
(ゲート電圧: 0 V より $+0.5\text{ V}$ ステップ。)

ンバータ (エンハンスメント型のロードおよびドライバ・トランジスタからなるインバータ) によって 19 段のリングオシレータを製作した。図 5 - 22 にその写真を示す。十字型のパターンはアライメントマークである。単体のトランジスタやインバータも同時に製作している。この写真はゲート長 $0.5\ \mu\text{m}$ のものである。

図 5 - 23 はゲート長 $0.5\ \mu\text{m}$ のトランジスタから成るリングオシレータの発振波形である。1 段当たりの遅延時間は $63\ \text{ps}$ である。このときの条件は V_{dd} (電源電圧) $= 7\ \text{V}$, V_{gg} (ロードトランジスタのゲート電圧) $= 7\ \text{V}$, V_{bb} (基板電圧) $= -4\ \text{V}$ で温度は室温であった。ゲート長 $0.3\ \mu\text{m}$ のトランジスタから成るリングオシレータは発振しなかった。ゲート長 $0.5\ \mu\text{m}$ と $0.8\ \mu\text{m}$ のリングオシレータによって測定した, 1 段当たりの消費電力とゲート遅延時間の関係を図 5 - 24 に示す。

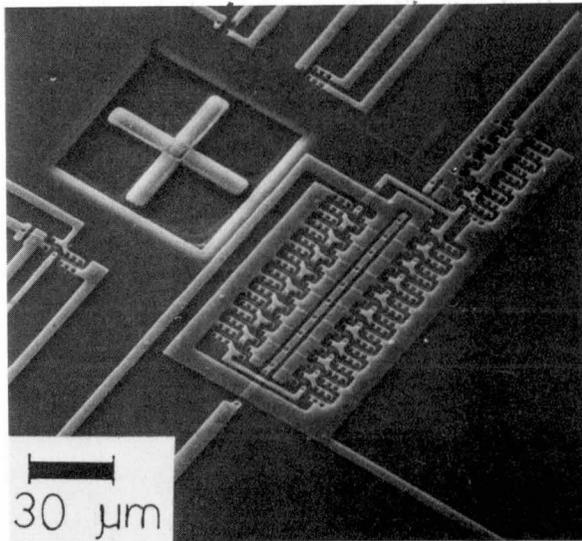


図 5 - 22 試作した 19 段のリングオシレータ。

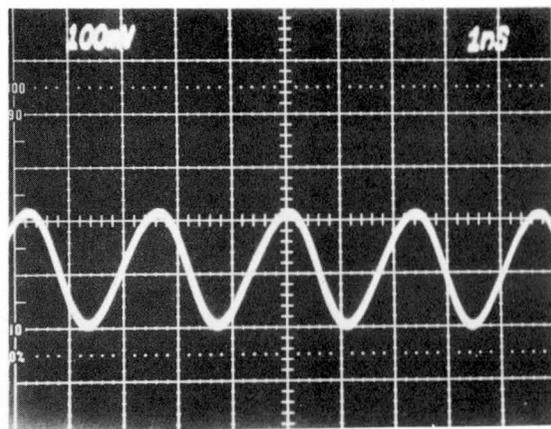


図 5 - 23 リングオシレータの発振波形。

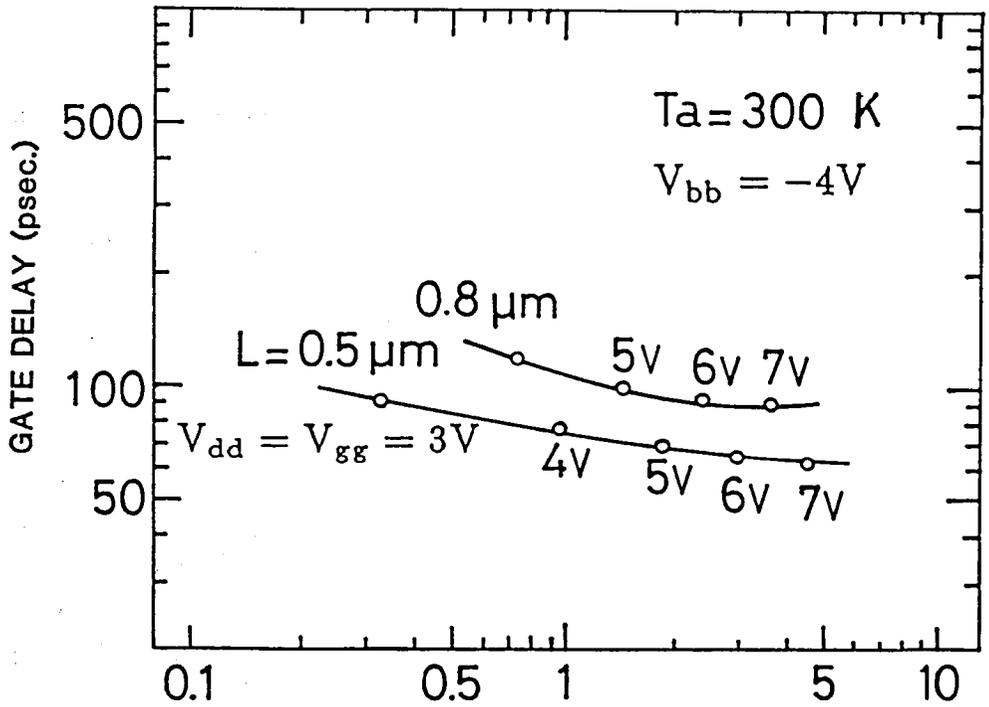


図 5 - 24 1 段当たりの消費電力に対するゲート遅延時間。

5 - 5 結 言

以上、FIBエッチング及びFIBリソグラフィーを用いた半導体デバイス試作について述べた。まず、FIBエッチング技術を二層プロセスに応用することにより、 $0.25 \mu\text{m}$ 幅のゲート電極を持つGaAs MESFETの試作を行った。次に、FIBリソグラフィーによって高性能のGaAs高周波低雑音FETを試作した。さらに、異種イオンビームのレジスト中での飛程の差を利用して、GaAs FETのマッシュルーム型ゲートの形成を行ない、微細なゲート長を持ち、かつ抵抗の低いゲート構造を実現した。このマッシュルーム型ゲートの構造をGaAs HEMTに応用した結果、従来にない優れた低雑音特性が得られた。また、ドライ現像法を用いてゲート長 $0.5 \mu\text{m}$ のSi MOSFETを試作し、19段のリングオシレータの発振波形よりトランジスタの高速動作を確認した。

これらの試作結果から、FIB技術を半導体デバイス製造に応用することが可能であることが示された。今後、FIBの持つ種々の特徴を生かすことによって、従来製造が不可能であった新しい構造を持つデバイスの開発が期待できると考えられる。

第 5 章の参考文献

- [1] H.Kuwano, K.Yoshida, and S.Yamazaki, "Dry development of resists exposed to focused gallium ion beam", Jpn. J. Appl. Phys. 19(10), L615-L617 (1980).
- [2] H.Fukui, "Optimal Noise Figure of Microwave GaAs MESFET's", IEEE Trans. Electron Devices ED-26(7), 1032-1037 (1979).
- [3] Y.Sasaki, H.Morimoto, H.Onoda, M.Kobiki, M.Komaru, Y.Mitsui, O.Ishihara, and T.Kato, "Low noise GaAs MESFETs fabricated by focused ion beam lithography", Inst. Phys. Conf. Ser. 79(9), 487-492 (1986).
- [4] S.G.Bandy, Y.G.Chai, R.Chow, C.K.Nishimoto, and G.Zdasiuk, "Sub-micron GaAs microwave FET's with low parasitic gate and source resistance", IEEE Electron Device Lett. EDL-4(2), 42-44 (1983).
- [5] P.C.Chao, P.M.Smith, S.Wanuga, J.C.M.Hwang, and W.H.Perkins, "Electron-beam fabrication of quarter-micron T-shaped-gate FET's using a new tri-layer resist system", Digest of Technical Papers, International Electron Device Meeting '83, 613-616 (1983).
- [6] H.Morimoto, H.Onoda, Y.Sasaki, Y.Mitsui, O.Ishihara, and T.Kato, "A GaAs metal-semiconductor field-effect transistor with a mushroom gate fabricated by mixed exposure of focused ion beams", J. Vac. Sci. Technol. B5(1), 211-214 (1987).
- [7] K.Nagahama, M.Nakanishi, Y.Sasaki, K.Hosono, H.Morimoto, T.Kato, R.Hirano, T.Murotani, and A.Kawagishi, "Super low noise HEMT using focused ion beam lithography", to be published in Electronics Lett.
- [8] H.Morimoto, K.Tsukamoto, H.Shinohara, M.Inuishi, and T.Kato, "Submicrometer-gate MOSFET's by the use of focused-ion-beam exposure and a dry development technique", IEEE Trans. Electron Devices ED-34(2), 230-234 (1987).

第 6 章 結 論

本論文は、集束イオンビームを用いた半導体デバイス製造における微細加工技術に関して研究を行ってきた結果をまとめたものである。本章では、上記内容に関する研究成果を総括し、今後に残された課題について述べる。

以下、本研究で得られた主な結論を列挙する。

(1) 高いエミッション安定性をもつ微細加工用イオン源として含浸電極型液体金属イオン源について検討し、Ga および Au-Si-Be を材料として実験を行った結果、微細なイオンビームが安定に得られることを確認した。(第 2 章)

(2) 最大加速電圧 100 kV で 2 段レンズ系と E × B 型質量分離装置を持つ集束イオンビーム装置を試作し、ほぼ設計通りのビーム集束特性を持つことを確認した。(第 2 章)

(3) イオンビームと下地基板とのアライメントに使用するために、段差マーク上をイオンビームによって走査したときの二次電子信号検出について検討を行ない、信号の発生は二次電子放出比のイオンビーム入射角度依存性と密接な関係にあること、および軽いイオンビームを用いた場合はマークの損傷は無視しうることを確認した。また、検出器としてはマイクロチャンネルプレートが優れていることを見いだした。(第 2 章)

(4) 集束イオンビームを用いたエッチングによって 0.1 μm 程度の微細な加工をマスクレスで行うことができるが、再付着などの影響で形成パターンが変形してしまう現象が明らかになった。この現象は、イオンビーム照射量を減らして(ビーム走査速度を増して)複数回の「重ね書き」を行うことによって低減することができた。(第 3 章)

(5) 集束イオンビームを照射して選択的に SiN 膜に格子欠陥を生ぜしめた後、弗酸を用いた増速エッチングを行うことによってマスクレス加工を行う方法を検討した。この方法によれば、直接イオンビームによってエッチングする方法に比べて低照射量で ($10^{15} \sim 10^{16}$ ions/cm²) 基板の加工を行うことができた。(第 3 章)

(6) Si と Be の 集束イオンビームによるリソグラフィーについて検討を行った結果、電子ビームリソグラフィーに比べて感度が1~2桁高いこと、Siを用いた場合 recoil atom の影響で形成パターンの断面が壺型になること、およびイオン種の違いによる飛程の差を利用してレジストパターン断面形状を制御することが可能であることが明らかになった。(第4章)

(7) レジスト表面にイオンビームを照射した後ドライエッチングを行うことによってレジストパターンを形成する方法(ドライ現像法)について検討した結果、 $0.1\ \mu\text{m}$ 幅のパターンを形成することができた。(第4章)

(8) 集束イオンビームによるマスクレスエッチング技術を金属膜-レジスト膜から成る二層構造に応用し、GaAs FETのゲート電極形成が可能であることを示した。(第5章)

(9) 集束イオンビームリソグラフィーによって高性能のGaAs高周波低雑音FETを試作した。また、ゲート電極をマッシュルーム形状にすることで、さらに高性能化をはかることができることを示した。(第5章)

(10) ドライ現像法を用いてゲート長 $0.5\ \mu\text{m}$ のMOSFETを形成し、19段のリングオシレータの試作結果よりトランジスタの高速動作を確認した。(第5章)

本研究で得た主な成果は以上のようなものである。まとめると、集束イオンビームを用いたエッチングおよびリソグラフィー技術によって従来よりも高いレベルの微細加工が可能であり、さらにデバイス製作への応用も可能であることを示した。しかし、集束イオンビーム技術そのものがまだ新しい技術であり、イオン源の高輝度化や描画方式の改良による高スループット化、およびイオン源の高安定化や高精度な制御系・機械系等の採用による高精度化が必要である。また、従来不可能であったデバイス構造が超微細加工技術やマスクレス加工技術によって実現できるとみられ、応用技術に関してもより一層の検討が必要であると考えられる。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、終始懇切な御指導と御鞭撻を賜った京都大学工学部教授高木俊宣博士に心より感謝いたします。

また、本論文の作成にあたり、御懇篤なる御検討と御教示を賜った京都大学工学部教授佐々木昭夫博士、同教授山田公博士に厚く御礼申し上げますとともに、本研究を進めるにあたって極めて有益な御助言と御指導を賜った京都大学工学部助教授石川順三博士に深く感謝致します。

本研究遂行にあたって御指導と御鞭撻を賜り、本論文作成の機会を与えていただくとともに終始激励いただいた三菱電機株式会社 L S I 研究所所長柴山恭一博士、同研究所副所長中田秀文博士に心から感謝いたします。

また本研究の遂行および論文の作成にあたり数々の御教示と有益な討論をいただいた L S I 研究所プロセス開発第一部部長加藤忠雄博士、同ビーム応用技術グループマネージャ渡壁弥一郎博士に厚く御礼申し上げます。

L S I 研究所半導体開発部部長藤川恭一郎氏、G a A s I C 第一グループマネージャ石原理博士、三井康郎博士、佐々木善伸氏、同研究所最先端デバイス構造プロジェクトデバイス構造グループマネージャ塚本克博博士の各位にはデバイスの試作および評価にあたって御指導と御協力をいただきましたことを感謝いたします。

実験の遂行にあたって御協力いただきました L S I 研究所プロセス開発第二部加藤高秋氏、マイクロプロセッサ開発部齊藤和則氏、プロセス開発第一部小野田宏氏、細野邦博氏に深く感謝致します。

集束イオンビーム装置の試作に対しては日本電子株式会社半導体機器本部 I E M グループ担当次長相原龍三氏に御協力いただきました。また、含浸電極型液体金属イオン源の試作には日本電子材料株式会社専務取締役菅谷潔氏の御協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

また、本研究の期間中、終始有益な討論と協力をいただいた三菱電機株式会社 L S I 研究所の各位に深く感謝いたします。

記 号 表

B	E × B 型質量分離装置における磁場の強度
C _c	色収差係数
C _{cc}	コンデンサ・レンズの色収差係数
C _{co}	対物レンズの色収差係数
C _{gs}	ゲート・ソース間の静電容量
C _s	球面収差係数
C _{sc}	コンデンサ・レンズの球面収差係数
C _{so}	対物レンズの球面収差係数
d	アドレスサイズ
d _f	E × B 型質量分離装置の電極間隔
D	イオンビームの照射量
D _b	E × B 型質量分離装置における，除去すべきイオンの中心軸からのずれ量
D _o	E × B 型質量分離装置の色収差
e	電子の電荷
E	E × B 型質量分離装置における電界の強度
f	周波数
f _w	描画速度
g _m	相互コンダクタンス
G	定数
G _a	付随利得
I _d	ソース・ドレイン電流
I _e	イオンビームのエミッション電流
I _p	試料上でのイオンビーム電流
k	角倍率
L _d	E × B 型質量分離装置の電極とアパチャーとの距離
L _f	E × B 型質量分離装置の電極長さ
L _g	ゲート長
m	レンズの倍率（光学系全体の倍率）

m_c	コンデンサ・レンズの倍率
m_i	イオンの質量
m_o	対物レンズの倍率
m_p	E×B型質量分離装置により直進させるイオンの質量
m_s	E×B型質量分離装置により除去するイオンの質量
n	イオンの価数
NF	雑音指数
NF ₀	最小雑音指数
q	イオンの持つ電荷
q_b	E×B型質量分離装置により直進させるイオンの質量
q_s	E×B型質量分離装置により除去するイオンの質量
r_c	コンデンサ・レンズによるクロスオーバー半径(イオン源側で定義)
r_p	試料上でのビーム半径
r_s	ビームのソースサイズ(半径)
R	電子ビームの固体内での飛程
R_g	ゲート抵抗
R_s	ソース抵抗
S	描画面積
T	イオンビーム描画に要する時間
v	イオンビームの速度
V	イオンビームの加速電圧
ΔV	イオンビームのエネルギー分散
V_a	イオンビームの加速エネルギー
V_e	イオンビームの引き出しエネルギー
V_f	E×B型質量分離装置の印加電圧
W_g	ゲート幅
α	イオンビームの放射半角
α_p	試料上へのビーム入射半角
α_s	イオン源からのビーム放射半角
β	二次電子の固体中での減衰定数

本論文に関する著者発表論文

番号	論文題名	著者	発表誌	本論文との対比
1	Mask fabrication for VLSI using an electron beam exposure system	Y.Watakabe T.Kato A.Shigetomi H.Morimoto	J.Vac.Sci.Technol. Vol.21, No.4, Nov./Dec. (1982) p.1005-1011	第1章 第2章
2	Technologies for electron beam direct writing	T.Kato Y.Watakabe K.Saitoh H.Morimoto	Microelectronic Engineering-Vol.1, No.1, Sep. (1983) p.69-90	第1章 第2章
3	Submicron pattern fabrication by focused ion beams	T.Kato H.Morimoto K.Saitoh H.Nakata	J.Vac.Sci.Technol. Vol.B3, No.1 Jan./Feb. (1985) p.50-53	第1章 第2章 第3章 第4章
4	An impregnated-electrode-type liquid-metal-ion source applied to microfabrication	H.Onoda H.Morimoto T.Kato J.Ishikawa T.Takagi	Proceedings of the 10th Symposium on Ion Sources and Ion-Assisted Technology, Tokyo, 1986 (The Research Group of Ion Engineering, Kyoto, 1986) p.27-30	第2章
5	A computer-controlled experimental FIB system	T.Kato H.Morimoto K.Saitoh W.Watakabe	Proceedings of the SPIE, Electron-Beam, X-Ray, and Ion-Beam Techniques for Submicrometer Lithographies IV, Santa Clara, 1985 (SPIE, Washington, 1985) p.146-151	第2章
6	Mark detection technology in electron-beam direct writing	T.Kashiwaki H.Morimoto S.Takeuchi K.Saitoh Y.Watakabe T.Kato	IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.ED-31, No.10 Oct. (1984) p.1403-1407	第2章
7	Detection of alignment signals for focused ion beam lithography	H.Morimoto Y.Sasaki H.Onoda T.Kato	Appl. Phys. Lett. Vol.46, No.9, May (1985) p.898-900	第2章
8	Microfabrication using focused ion beam system	H.Morimoto T.Kato K.Saitoh Y.Sasaki H.Shibata T.Kato S.Namba	Proceedings of the International Ion Engineering Congress - ISIAT'83 & IPAT'83, Kyoto, 1983 (IEEJ, Tokyo, 1983) p.777-780	第2章 第3章 第4章

9	Submicron pattern fabrication by focused ion beams	T.Kato H.Morimoto H.Nakata	Proceedings of the SPIE, Electron-Beam, X-Ray, and Ion-Beam Techniques for Submicrometer Lithographies IV, Santa Clara, 1985 (SPIE, Washington, 1985) p.188-195	第 2 章 第 3 章 第 4 章
10	Characteristics of submicron patterns fabricated by gallium focused-ion-beam sputtering	H.Morimoto Y.Sasaki Y.Watakabe T.Kato	J. Appl. Phys. Vol.57, No.1, Jan. (1985) p.159-160	第 3 章
11	Focused ion beam lithography and its application to submicron devices	H.Morimoto Y.Sasaki K.Saitoh Y.Watakabe T.Kato	Microelectronic Engineering Vol.4, No.3, (1986) p.163-179	第 3 章 第 4 章 第 5 章
12	Unique resist profiles with Be and Si focused ion beam lithography	H.Morimoto H.Onoda Y.Sasaki T.Kato K.Saitoh T.Kato	J. Vac. Sci. Technol. Vol.B4, No.1, Jan./Feb. (1986) p.205-208	第 4 章
13	Low noise GaAs MESFETs fabricated by focused ion beam lithography	Y.Sasaki H.Morimoto H.Onoda M.Kobiki M.Komaru Y.Mitsui O.Ishihara T.Kato	Inst. Phys. Conf. Ser. Vol.79, No.9 (1986) p.487-492	第 5 章
14	A GaAs metal-semiconductor field-effect transistor with a mushroom gate fabricated by mixed exposure of focused ion beams	H.Morimoto H.Onoda Y.Sasaki Y.Mitsui O.Ishihara T.Kato	J. Vac. Sci. Technol. Vol.B5, No.1, Jan./Feb. (1987) p.211-214	第 5 章
15	Submicrometer-gate MOSFET's by the use of focused-ion-beam exposure and a dry development technique	H.Morimoto K.Tsukamoto H.Shinohara M.Inuishi T.Kato	IEEE Trans. Electron Devices, Vol.ED-34, No.2, Feb. (1987) p.230-234	第 5 章