

集束イオンビーム技術をめぐって



蒲生 健次*

Overview of focused ion beam process technology

Key Words : focused ion beam, nanometer process, implantation, etching, CVD

1. はじめに

局所選択的な微細加工プロセスは、超LSIをはじめとして多くの分野で必須の技術である。集束イオンビーム技術は、微細なビームを走査して直接任意の局所領域の材料加工を行うものである。集束イオンビーム自体の微細性を用いることにより、微細化の主流であるリソグラフィ技術を特に用いることなく微細プロセスを可能とするところに特徴がある。

イオンビームを集束することによりこのようなピンポイントの加工を実現することは、多くの研究者が考えたことではあるが、輝度の高いイオン源が必要であり、具体化するには液体金属イオン源の開発を待たねばならなかった。70年代にその開発が始まり、すでに79年にはサブミクロンビームが、91年には8nmのGaイオンビームが報告されている。この間、質量分析系を組み込んだイオン光学系や合金イオン源の開発とこれによる利用可能なイオン種の飛躍的な拡大など、いくつかのブレークスルーがあって今日に至っている。この技術は加工の微細性とビームの位置決め容易性を生かして、デバイスの故障解析、透過電子顕微鏡観察のための薄片試料作製やリソグラフィーマスクの修復技術として実用化された。

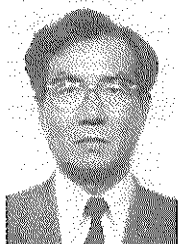
一方、半導体デバイスプロセス技術としては、あまり大きな分野を獲得するには至っていない。大きな理由は、処理速度が低いこと、装置自体の安定性

がなお不十分なことなどが挙げられる。特に半導体デバイスの生産では、超LSIの製造が象徴的なように最終的なデバイスコストの低減が究極の目標となっており、現在の解は大面積の一括処理である。またその生産技術は多くのプロセスを集積しているため、個々のプロセスには高い信頼性、安定性が求められる。集束イオンビームプロセスは多くの特徴があるが、既存プロセスを置き換えるだけの利点と完成度に欠けるのが現状である。しかし今後デバイスの進展と特殊化によって、従来の大規模生産のスキームでは対応できない高機能デバイスの多品種少量生産が求められる可能性が高い。そのとき、集束イオンビームプロセスの特徴が生かされるものと期待される。実際、研究段階におけるプロトタイプデバイスの試作には適しており、量子効果デバイスではプロセスの微細性と柔軟性を有効に利用した例を見ることができる。さらに、最近多くの関心を集めているナノテクノロジーやバイオサイエンスのような新しい分野では、ナノメートルレベルの解像度でピンポイントのイオン照射を行う集束イオンビームプロセスが、大きな意味を持つものと期待できる。

ここでは、装置とプロセスの概要および特徴的な応用について紹介する。

2. 装置とプロセス技術の概要¹⁾

集束イオンビーム照射系の構成例を図1に示す。集束レンズ、対物レンズ、質量分析系偏向、ブランキング、収差補正電極などからなるイオン光学系で、加速電圧10~200keVで動作するのが普通である。さらに低エネルギーで動作する装置では、光学系の終段に減速電界レンズ系を付加し、100eV以下の集束ビームを得ている。解像度の決定要因であるビームスポットサイズは、イオン源のサイズとレンズ系の収差により決まる。これらは光学系の構成以外に、イオンのエネルギー、電流密度など動作条件にも依



* Kenji GAMO
1940年3月生
1968年大阪大学大学院工学研究科博士
後期課程(電子工学専攻)修了
現在、大阪大学大学院・基礎工学研究
科、教授、工学博士、ナノエレクトロ
ニクス、ナノプロセス
TEL 06-6850-6300
FAX 06-6850-6341
E-Mail gamo@ee.es.osaka-u.ac.jp

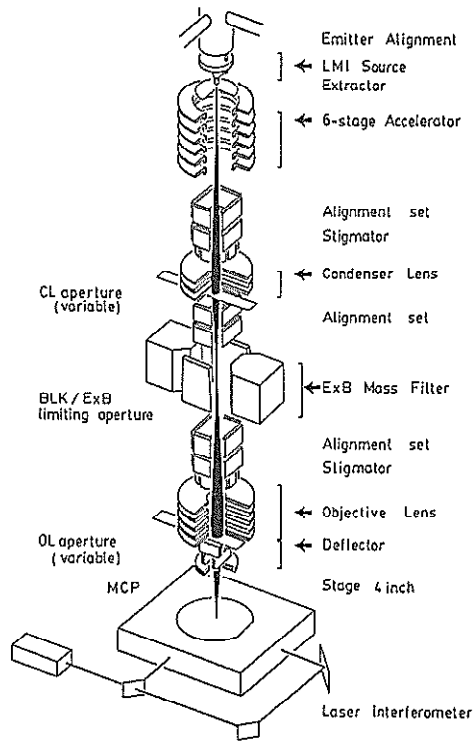


図1 集束イオンビームプロセス装置の光学系

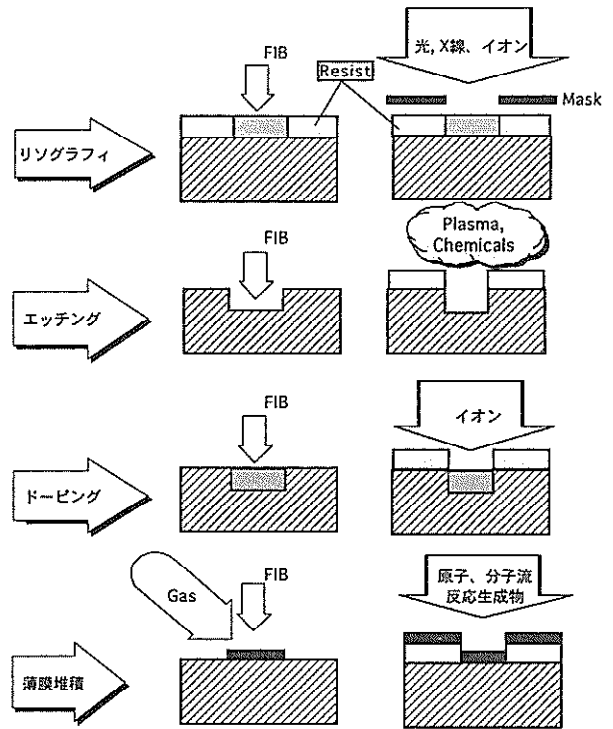


図2 集束イオンビームプロセスと従来のマスクプロセス

存する。Gaイオン源を用いた市販の装置で、公称5nm(30keV)のビームサイズがすでに実現しており、十分ナノプロセスに対応できるものと考えられる。

通常集束イオンビーム装置は、高い輝度をもち点光源として動作する液体金属イオン源を搭載している。これは長さ100 μ m程度、先端直径1 μ m以下の針状電極を液体金属が覆うかたちになっていて、外部引き出し電極との間に数kVの電圧を印加すると針先端でイオン化がおこる。このため動作時にイオンソース材が液体であることが必要であるが、この制約の中でさまざまなイオン源が開発されている。もっともよく用いられるのはGaおよびAu-Si-Be共晶であり、比較的長寿命で安定に動作する。後者により、次に述べるIII-V族化合物半導体のドーピングに必要なイオンは、集束ビームとして得ることができる。このほか、B, Al, P, Mn, Zn, Ge, As, Nb, Sbなどの報告例があるが、その一部は実用に供するには安定性にかける。

イオンが固体に衝突したとき様々な現象が生じるが、プロセス技術の基本過程として重要なものは、イオンの固体内への進入と基板構成元素の弾き出しおよび基板表面の励起である。これらにより、イオ

ン種と材料を選べば、リソグラフィー、エッチング、デポジション、ドーピングの多様なイオンビームプロセスが実現される。さらに固体とイオンのほかに、第三の材料(主にガス)を用いたイオンビーム支援プロセスがある。図2は、従来のリソグラフィー技術を用いた局所選択プロセスと集束イオンビームプロセスを概念的に比較したもので、原理的にはマスクやリソグラフィープロセスを用いることなく、これらすべてのプロセスを、ただ集束イオンビームを照射するだけで実現できる。例えば超LSIプロセスの分野ではリソグラフィー技術の開発に多くの資源が投入されてきたこと、実際の製品プロセスの各ステップにリソグラフィープロセスが必要となることを考えると、従来のリソグラフィープロセスを大幅に削減できる集束イオンビームプロセスの利点は明らかである。個々の集束イオンビームプロセスの開発は80年代を通じて精力的に進められた。その詳細については文献1)2)のレビューを挙げるにとどめたい。

3. 応用 例

我々のグループで取り組んできたものを中心に、集束イオンビームプロセスの可能性を示すイオン注

入, エッチングおよび物質堆積の例を紹介する。

【低エネルギー集束イオンビーム注入】

イオンビームプロセスで常に問題となることは、イオン照射欠陥の影響である。これを避ける方法は、低エネルギー化を図ることが一つの解決策である。これによって、欠陥発生の抑制と先鋭な注入分布が期待される。さらに同位体も分離した純度の高い薄膜の直接堆積のプロセスが可能となり、電極技術やマスク修復技術として利用できる。

不純物ドーピングを行うとき、低エネルギー化をすると注入飛程が短いために、表面状態の影響を強く受ける。このため、その特長を生かすには表面の影響を避け埋め込み構造にする以外にない。3次元的に制御したデバイス構造の実現を目指して、分子線結晶成長と低エネルギー集束イオンビーム注入を組み合わせたその場プロセスの開発に取り組んできた¹⁾。これにより積層方向には格子間隔レベルで、面内は集束イオンビームの解像度で3次元的に制御した新しいデバイス構造の実現を期待している。

低エネルギー注入の効果を示す実験例を図3に示す³⁾。これは50~400eVおよび30keVのエネルギーでSiイオンを注入したGaAsのキャリア分布である。ここでは、イオン注入後連続して、分子線成長により250nmのGaAsを再成長している。注入層は再成長時に530℃(1hr)の高温過程を経る以外にはアニール処理を行っていない。50eVおよび200eVのSiは活性化され半値幅20nm程度の鋭いピークを示す。一

方400eVと30keVの注入では、キャリアは活性化せず、格子欠陥の影響を受けてキャリアは減少している。10keV以上のエネルギーでSiイオンを注入したGaAsでは、不純物を活性化するため800℃程度のアニールが必要である。これらを考慮すると、この結果は低エネルギー注入の利点を実証している。

ここで得られたキャリア分布は、分子線成長でSiを δ ドーピングしたものに匹敵する先鋭なキャリア分布である。注入イオンの半値幅は理論的には1.6nm(200eV Si)程度と予想されるので、キャリアの拡散を考慮しても若干広がっている。この原因として、再成長時のSi自体の拡散が考えられる。さらに先鋭な分布を得るには、ヘテロ構造や変調ドーブ構造として、作り込まれたポテンシャルで閉じ込める必要がある。これらの技術との整合性が高いことから、量子デバイスに必要なナノサイズ導電層の形成が達成できるものと期待される。

集束イオンビームと分子線成長とを組み合わせたプロセスはCambridge大学のグループでも研究されており、GaAs/AlGaAs系の2次元電子ガスの形成や量子構造の電極技術として成果を挙げている⁴⁾。ここではSiドナーの注入以外にGaイオンの注入による高抵抗化を巧みに利用して素子分離層の形成を行っている。この集束Gaイオン注入による高抵抗化技術は、量子構造デバイスのプロセスとして有用で、量子ポイントコンタクト、量子細線、結合量子ドットおよび単電子トランジスタが試作されている⁵⁾。

【集束イオンビームエッチングとプロセスのその場モニター】

素子の微細化を図るため、プロセス条件の設定は厳しくなる。このため、プロセス時に加工状況をその場観察することにより加工精度を向上することが、ひとつの方法である。その試みとして、集束ビームによるエッチングの際に、エッチング対象薄膜の抵抗を同時連続測定し、プロセスをモニターする方法を開発し、金属系の2重トンネル障壁構造の試作に用いた⁶⁾。図4はそのプロセスを示したもので、最終的にはエッチングにより形成した金属薄膜ギャップ端面の酸化膜を利用した横方向の2重トンネル構造を作製する。微小な金属ギャップの形成が最重要のステップであり、ここでは100keVのGaイオンを用いたエッチングプロセスを、金属薄膜抵抗の測定から同時モニターしている。図5はその一例で、電

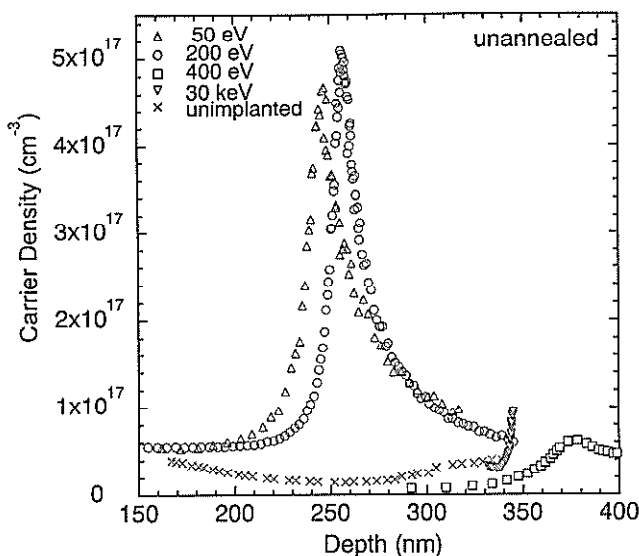


図3 Siイオン注入GaAsのキャリア分布

流の急減は薄膜の切断に対応する。これをもとにプロセスを最適化しAl-Al酸化膜(1.6nm)-Ni-Al酸化

膜-Alの2重障壁構造を作製し、トンネル障壁の存在を示す電流電圧特性を得た。

【集束イオンビーム支援CVDプロセス】

単にイオンと基板のほか第三のガスを用いるとプロセス技術は、さらに拡大できる。我々のグループでは、イオン照射表面にガスを供給して行うイオンビーム支援プロセスを提案し実証してきた¹⁾。このビーム支援プロセスを用いて、姫路工大、NECとセイコーインスツルメンツのグループは、図6に示すような炭素からなる微細な立体構造を試作している²⁾。ここでは、エネルギー30keV、ビーム径7nmの集束Gaイオンビームを用いており、ガスの密度によって堆積物の成長方向が上昇または下降することを巧みに用いてビームを円形に走査し、直径2.75μm高さ12μm肉厚100nm以下のウイングラスや線幅80nm直径600nmのコイルが形成されている。基本的なプロセスは、集束Gaイオンビーム照射によって発生した2次電子が原料ガスC₄H₁₀を分解するもので、堆積物はアモルファスの炭素(DLC)である。これは、ナノサイズの集束ビームの走査条件と原料ガス供給の精密制御によって、はじめて形成が可能になった。このような構造は、マイクロメカニクスの分野にも応用の可能性があり、その力学的性質と堆積条件の相関が調べられている。

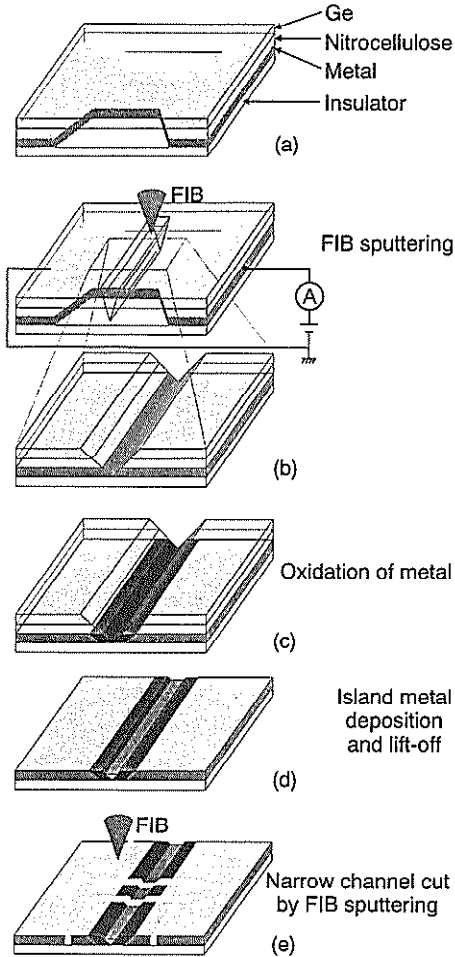


図4 集束イオンビームエッチングを用いた二重障壁トンネル構造の作製プロセス

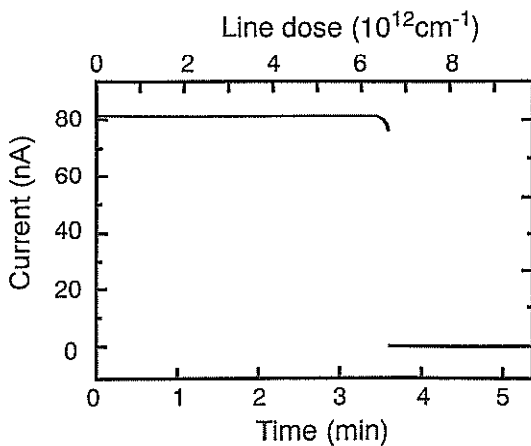


図5 イオンエッチング時の薄膜の電流(抵抗)変化

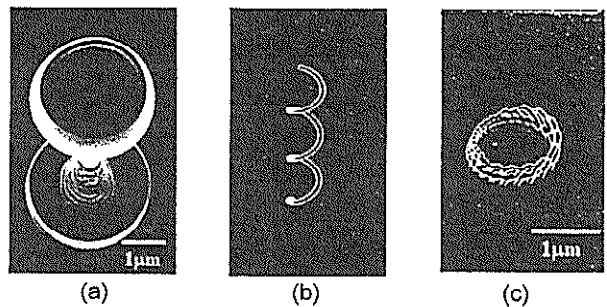


図6 集束ビームCVDを用いて作製されたマイクロウイングラス、コイルおよび王冠

4. おわりに

集束イオンビーム技術は、これまで紹介したように微細加工技術としてすでに確立され、ナノメートルプロセスにも対応できる優れた可能性を持っている。しかし周辺技術などの完成度は、たとえば電子ビーム技術にくらべると今後につけこむべき点が多い。この分野の進展のための最大の課題は、その特徴を

最大限発揮できる応用分野の開拓である。産業応用の面で最も実用化が進んでいるのは、電子デバイスの不良解析ツールとしての応用で、ここでは任意の場所の断面加工がイオンエッチングにより可能であることが生かされている。また高機能デバイスのプロトタイプを製作技術としての可能性は、すでに指摘されているところである。しかし、イオンと固体の相互作用がもたらす効果はさらに多彩であり、局所選択性と組み合わせたプロセス技術の応用はまだ未開拓である。この技術の開発に初期から携わり、いくつかのブレークスルー生み出しその進展を見守ってきた立場からみると、これまでのところその可能性の一部が取り上げられたのみであり、潜在的な可能性はなお高いと考えられる。逆に言えば応用面で開拓の余地は広く残されており、今後の発展が期待されるナノテクノロジー、マイクロメカニクスさらにはバイオサイエンスが絶好の分野の例である。このような分野で特徴ある集束イオンビームプロセスが実用技術として確固たる位置を占めることを期待したい。

文 献

- 1) K.Gamo and S.Namba, Proc. of 1989 Intern. Symp. on MicroProcess Conf. JJAP Ser.3(1990)293
- 2) S.Matsui and Y.Ochiai, Nanotechnology 7(1996)247
- 3) J.Yanagisawa, T.Goto, T.Hada, M.Nakai, F.Wakaya, Y.Yuba and K.Gamo, J.Vac. Sci. Technol. B17(1999)3072.
- 4) J.H.Thompson, D.A.Ritchie, G.A.C.Jones, E.H.Linfield, J.E.F.Frost, A.C.Churchill, G.W.Smith, D.Lee, M.Houlton and C.W.Whitehouse, Surf. Sci. 267(1992)69.
S.Vijendran, P.See, A.Ahmed, H.E.Beere G.A.C.Jones and C.E.Norman, J.Vac. Sci. Technol. B19(2001)2761.
- 5) Y.Hirayama, T.Saku and Y.Horikoshi, Phys. Rev. B39(1989)5535,
T.Fujisawa, T.N.Oosterkamp, W.G.van der Wiel, B.W.Broer, R.Aguado, S.Tarucha, L.P.Kouwenhoven, Science 282(1998)932.
- 6) M.Nakayama, J.Yanagisawa, F.Wakaya and K.Gamo, Jpn. J. Appl. Phys. 38(1999)7151.
- 7) S.Matsui, T.Kaito, J.Fujita, M.Komuro, K.Kanda and Y.Haruyama, J.Vac. Sci. Technol. B18(2000)3181.

