

# イオンビームと材料プロセス

工学研究科附属イオン工学実験施設  
施設長 教授 山田 公  
i-yamada@kuee.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

我々を取り巻く電子、機械、情報などの産業はめざましい発展を遂げ、とどまるところを知らない。研究者達は、山積する難題を解決し、新しい技術を生み、新しい産業を創出してきた。これらの傾向はますます加速されるに違いない。特に、家電情報機器、産業情報通信制御機器を構成する種々のマイクロデバイスには、超高速で大量の情報処理能力が求められている。産業機器などに必要な微細機構部品やパワーデバイスは、小型で信頼性の高いことが要求されている。このようなデバイスや部品の研究開発や製造に、今までの材料や加工技術は役に立たなくなってきた。最先端と呼ばれている技術でさえ、原理的な限界に達しつつある。伝統的手法から脱却した、全く新しい材料プロセス技術、生産技術の確立が緊急の課題になっている。

超LSIを構成するMOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) の製作には、イオンビーム技術が用いられている。21世紀には1 GBits以上のデバイスが計画されている。これらのデバイスには20-30ナノメートル以下の極浅ジャンクションを形成する技術が求められている。パソコンなどのハードディスクには、数十から数百GBitsの大容量が要求されている。このためには数ナノメートル精度で、結晶に損傷を与えない高速加工技術が必要である。ナノメートルオーダーの非常に薄い極薄膜を用いるデバイスでは、結晶性の良い高品質の薄膜製作技術の出現が期待されている。

今社会が求めている技術革新をサポートするインフラテクノロジーの整備には、新製造技術の確立が緊急の課題になっている。我々の研究室では、イオンビームを駆使して、このような要求にかなうプロセス技術の研究を行っている。

## 2. イオンビーム技術の新しい展開

原子や分子をイオン化して適当なエネルギーで固体に照射すると、固体中に埋め込んだり、表面の原子を取り除いたり、堆積させることが出来る。この様なプロセスは、それぞれイオン注入、スパッタ、およびデポジションと呼ばれ、産業界の広い分野で応用されている。用いられる装置は、利用分野によって、形、機能、大きさなどが異なり、多種多様である。なかでも、原子を固体の中に注入するイオン注入装置は、精密精巧を極め、その頂点に達している。イオン注入は、現在、半導体デバイスの製作に重要な役割を演じている。イオン注入技術無くしては、超LSIの製造は出来ない。半導体以外の分野では金属やセラミックなどの表面改質に用いられている。スパッタは表面の不純物の除去やパターンエッチングに利用されている。デポジションは湿式メッキや真空蒸着法では出来ない高機能の薄膜形成に活用されている。イオンビームが産業界に威力を発揮し始めてから、まだ30年足らずである。しかしながら、我々の社会が要求する高度の先進デバイスの開発や加工には、このような伝統的なイオンビーム技術ではもはや対処出来なくなってきた。

数百から数千個の原子の塊(クラスター)のイオンを高速で、固体の表面に衝突させると、イオンと固体との相互作用が全く変わる。我々の研究室では、このようなイオンビームの照射によって生ずる新しい相互作用の解明や、これを用いたプロセス技術の研究を行っている。従来プロセスが限界に達している技術分野を、クラスターイオンビームがどのように打破出来るか、— それらの難問を解

決しつある。

### 3. クラスタイオンビームプロセス

数百から数千個の原子や分子の集合体からなるクラスタイオンビームは、ガスをノズルから真空中に噴出させ、断熱膨張によって作る。形成したクラスタイオンビームに電子を当ててイオン化し、適当なエネルギーに加速してプロセスに用いる。クラスタイオンビームプロセスでは、クラスタイオンの種類やエネルギー、クラスタサイズ（一つのクラスタを構成する原子の数）を変えて注入、スパッター、堆積などを行う（図1）。クラスタイオンの場合には、固体の表面の一点に数千個の原子を当てる事が出来る。この様な超高密度の照射は、単原子イオンでは、いくら焦点を定めても出来ない。今までのイオンビームの世界と、どのように原理的な違いがあるのか、どのような新技術が生まれるのか紹介する。

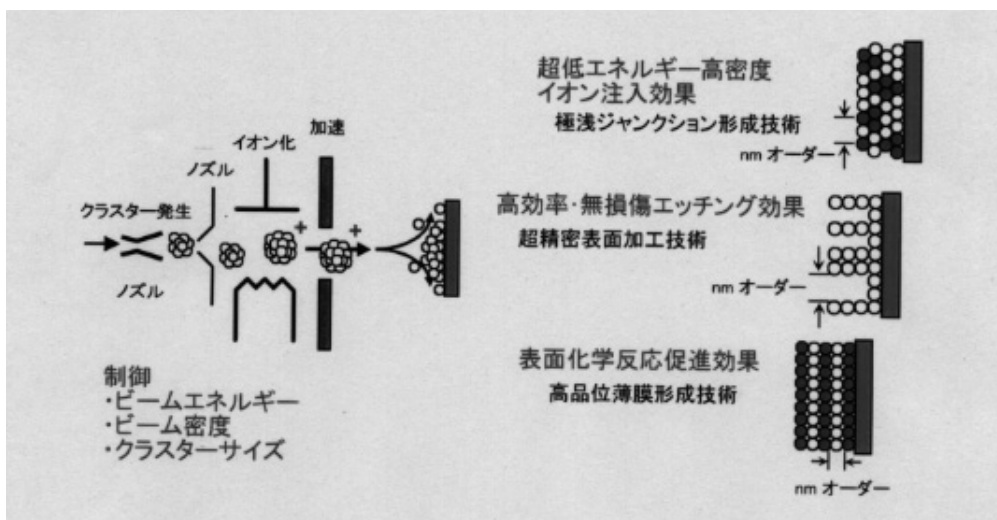


図1 クラスタイオンビームプロセス。注入、加工、薄膜形成プロセス。

#### 3-1. クラスタイオンと固体表面相互作用

クラスタイオンが固体に衝突する様子を計算機でシミュレーションする。超LSIのp-MOSFETは、B原子をSiにイオン注入して作る。B原子が10個集まったクラスタイオンをSiに注入する場合と、B原子1個を注入する従来の場合とを比較する。図2にそれらの結果を示す。B1個の単原子をイオン注入した場合、B原子はSi基板の表面からSi原子の欠陥を数珠のように作って奥深く侵入する。原子10個のクラスタイオンの場合には、B原子は基板の表面にとどまり、注入原子の周りには密度の高いSi原子の欠陥を作る。さらに詳しく調べると、B原子イオンを10分の1のエネルギーで注入した場合と同じ深さに注入されている。これがクラスタイオンの低エネルギー効果である。また、単原子イオンの場合に比べ欠陥形成にも大きな違いが見られる。これも又、浅いジャンクション形成と結晶回復、ドーピング効率に大きく影響している。

スパッター現象をシミュレーションすると、単原子イオンの場合の2桁から3桁高いスパッタ率を示す。さらに驚くべきは、従来の単原子や分子イオンの場合には、イオンを照射すると、固体の表面はだんだん荒れて、凹凸が激しくなるのに対して、クラスタイオンの場合には、それと反対に、荒い表面が平坦になる。このことは、イオンと固体の相互作用が従来の場合と全く違うことを示している。単原子イオンを注入した場合は、固体原子との間の相互作用が主として2体衝突に基

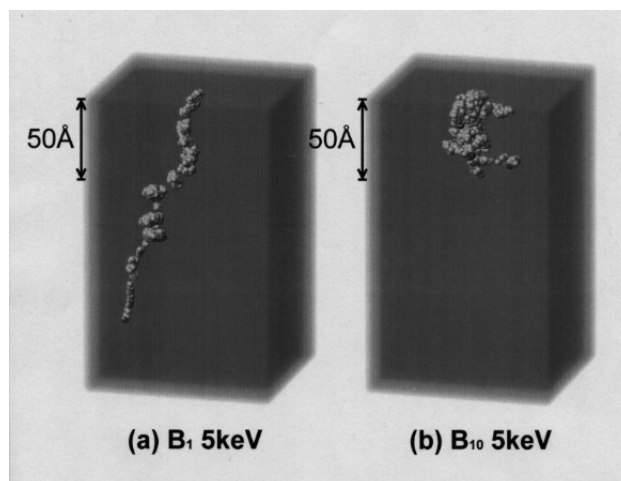


図2 硼素10個のクラスターイオンと単原子の硼素イオンをシリコン基板に5 keVで注入した場合の分子動力学法によるシミュレーション。赤い粒子は硼素原子、黄色い粒子は注入によって変位したシリコン原子。

づくものであるのに対し、クラスターイオンの場合は、単原子イオン照射を重ね合わせただけでは得られない非線形効果が現れる。

数百個数千個の大きなクラスターイオンを固体表面に照射すると、固体表面に特異な環境が出来る。たとえば、 $Ar_{141}$ クラスターイオンを10keVで照射すると、照射後400fsの後クラスターイオンが衝突した付近の温度は、 $10^5$ Kにも上昇し、圧力は1 MBarにも達する。宇宙の創成時より高い温度に上昇させることも可能になる。宇宙が出来たときに似た、超高温度と、超高圧力状態をつくり、新材料を合成することもあながち夢では無いかもしれない。

### 3-2. クラスターイオンビームによる新しい材料プロセス

次世代の超LSIにはシリコン基板の表面にホウ素やリン原子を注入して表面の数十ナノメートルの限られた極浅い範囲にp型やn型の領域を作らなければならない。ここで、クラスターイオンの超低エネルギー、超高密度照射効果が威力を発揮する。10個のB原子からなるデカボランを注入して作ったS/Dのエクステンション部のジャンクション深さは7 nmである。p-MOSFETの、実行ゲート長は37nm、閾値電圧は0.15Vで、ドライブ電流の $0.7\text{mA}/\mu\text{m}$ が得られた。最大利得は459mS/mmである。このデバイスは現在世界最小で最高の性能を示している。クラスターイオンを半導体のイオン注入に初めて応用し、成功した例である。試作したデバイスの走査型電子顕微鏡写真像を図3に示す。

クラスターイオン特有のラテラルスパッタ効果は、高効率のエッチングと従来のイオンビームでは得られない超平坦面形成を可能にする。スパッタ率は、実験からも通常のイオンビームの数十から数百倍の値を示している(図4)。この場合、実行照射エネルギーは数eVから数十eVの低エネルギーとなり、基板のダメージは極めて少ない。Si、Ti、Cu、Zr、Ag、W、Auなどの場合、20keVのサイズ3000のArクラスターイオン(等価照射エネルギーは $20\text{keV}/3000$ で約7 eV)のスパッタ率は、10-100atoms/ionである。表面平坦化は種々の金属材料のほか、合金、さらに単結晶、多結晶半導体でも可能である。たとえば、マイクロ波CVDで製作したダイヤモンド薄膜の表面を、クラスターサイズ3000のArクラスターイオンを20keVで $1 \times 10^{17}$ ions/cm<sup>2</sup>照射すると、平均荒さは40nmから8 nmになる(図5)。炭化珪素、高温超伝導薄膜や高硬度炭素系材料でも同様である。X線リソ

グラフィ用のCVDダイヤモンドの平坦化加工、シンクロトン軌道放射光 (SOR) 用ミラーの研磨、超伝導量子干渉デバイス (SQUID) 製作のための高温超伝導薄膜表面の平坦化、プラスチックレンズ用微小非球面金型の平坦化などの応用研究が進められている。

酸素などのガスクラスタライオンビームをSiなどの基板表面に照射すると、室温で効率の高い酸化作用が見られる。ガスクラスタライオンの低エネルギー照射効果と、高密度輸送効果を利用して、クラスタライオン照射と蒸着を併用するクラスタライオンアシスト蒸着によって高品位薄膜の製作が可能である。現在、この方法でディスプレイデバイスに用いられた透明導電膜 (ITO) の低基板温度での製作を進め、従来実用規模で達成できなかった $10^{-5}\Omega \cdot \text{cm}$ 台の低い抵抗値を持つ薄膜を再現性よく作っている。さらに、超高硬度膜、高信頼性光学多層薄膜形成のためのプロセス技術の研究も進んでいる。

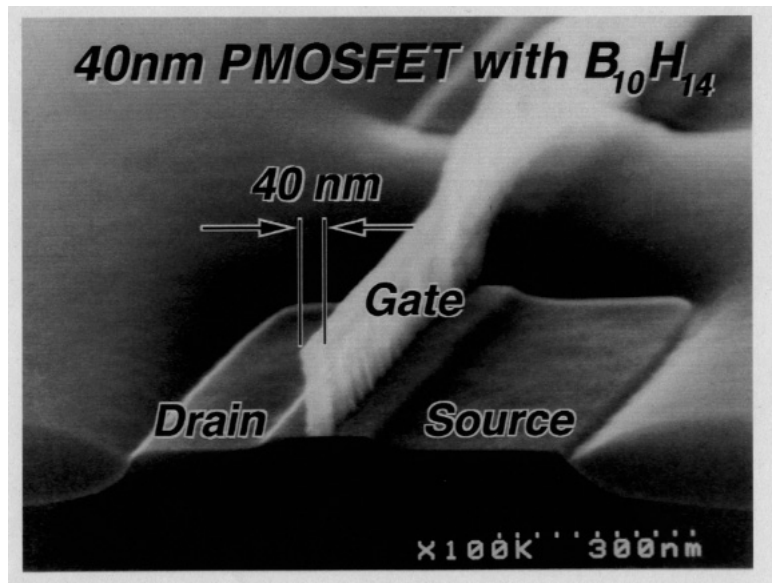


図3 クラスタライオン (デカボラン) 注入で作成した40nmゲートを持つp-MOSFETの走査型電子顕微鏡写真。

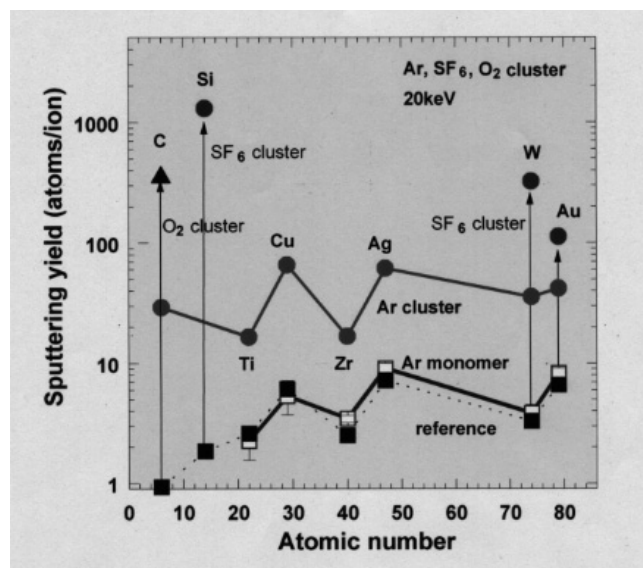


図4 クラスタライオンによるスパッタ率 (1イオンあたり放出される原子数)。monomerは同じ装置で単原子アルゴンイオンを用いて行った実験値、referenceは文献に記された値。



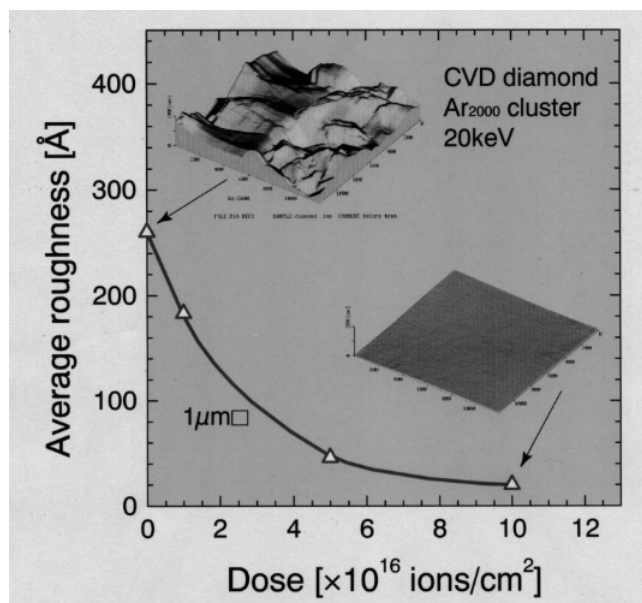


図5 CVD法で製作したダイヤモンド薄膜にアルゴンクラスターイオンを照射して表面が平坦になる様子。横軸はクラスターイオンの照射量、縦軸は平坦度。原子間力顕微鏡写真はArイオン照射前と照射後の表面形状（面積1  $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ ）。

#### 4. あとがき

単原子イオンを含まない強力なクラスターイオンビームの生成、クラスターイオン特有の超低エネルギー・超高密度照射効果などの発見が、クラスターイオンビームプロセスの展開につながった。ここに述べた研究開発は、クラスター生成の可能性を探る研究を始めてから、10余年が経過した。ようやく実用化の研究が科学技術振興事業団や通産省でスタートした。京大で始めた本技術は米国でも商務省と米国標準局の援助で先端科学プロジェクトとしてスタートした。今後、クラスターイオンビームプロセスの科学と技術の展開に向けた研究が、他大学や研究所さらに民間企業で活発に行われ、プロセス技術として貢献できることを期待している。