

## 高校生のページ

### 真空へのいざない

－ 不思議な粒子：電子ビーム・イオンビーム －

極微真空電子工学分野

石川 順三

#### 1. 真空とは

「真空」は、概念的には“物質の存在しない空虚な空間”のことですが、実際にはそのような空間は存在しないので、一般的には大気より数桁程度以上ガス粒子密度が低くなった空間を意味します。真空の程度を表す方法として、ガス粒子密度を使わず、便宜上大気圧力を標準としてその空間がどれだけの圧力を示すかということで表現する方法が長年用いられてきました。真空の程度を示す単位としてよく使われる“Torr”という単位は、1気圧が760mmの水銀柱の高さに相当することを発見した実験で有名なトリチェリ（図1）の名前に由来しており、1 Torrは1/760気圧のことです。最近は絶対圧力（Pa）で表現する場合も多いのですが、ここでの説明は大気や固体との比較が容易なTorrを用いることにします。



図1. エヴァンジェリスタ・トリチェリ

では、電子やイオンビームを扱う場合、どのような真空圧力（真空度ともいう）だと良いのでしょうか。ビーム粒子が残留ガス粒子と衝突すると、それまでの軌道に関する記憶を失うため、ビーム粒子ではなくなってしまいます。ビーム粒子が考えている空間を走行する間に、そのほとんど（ふつうは1%以下）が残留ガスと衝突しないことが、真空の条件です。一般に電子やイオンビームを扱うデバイスの大きさは、扱い易さから人のサイズ（約1 m）に近いことが多いのです。また、ガス粒子の大きさは、原子の大きさ（直径2～3 Å：1 Å=10<sup>-10</sup>m）程度なので、衝突に際してそれらが剛体のように振る舞うと考えると、電子やイオンビームを扱うための真空は、10<sup>-5</sup>～10<sup>-6</sup> Torr程度の真空度が必要であることが分かります。この真空度が、従来の電子やイオンビームを扱う場合の尺度として使われてきました。

ところが最近、電子やイオンビームを扱うデバイスの寸法が大幅に変わってきました。ビームが走行する距離が、短いものではμm以下（真空ナノエレクトロニクスデバイス）から大きいものでは数km以上（蓄積リング：電子やイオンをリング状の真空容器内に閉じ込めながら超高周波で高い運動エネルギーに加速する装置）にもなるので、これらの装置に適切な真空度は上述の尺度とはかなり異なってきています。

さらに、電子やイオンが相手粒子と衝突する際の断面積は、電子やイオンの運動エネルギーの大きさが数eVより非常に大きくなると、急激に小さくなることを知っておく必要があります。原子は、正電荷をもつ原子核（原子の大きさに比べて一万分の一から十万分の一程度の大きさしかない）とその周りを取り巻く負電荷をもつ電子により構成されています。高運動エネルギーの電子やイオンが原子（ガス状の場合もあるし固体の場合もある）と衝突する現象は、これらの電荷粒子同士が互いにクーロン衝突する現象です。クーロン衝突では、相対速度が大きくなるほど衝突断面積が急激に小さ

くなるという特徴があります。したがって、電子やイオンのエネルギーが高くなると、衝突する相手の原子は一見とても小さく見えることになるのです。

たとえば、運動エネルギーが数eV以下の電子は大気中では数十 $\mu$ m走行すると空気分子に衝突してしましますが、1 MeVに加速された電子は大気中でも10 m程度走行できます。この性質を利用して、電子を大気中に取り出して物体に照射することもできます。もっと極端な例として、炭素イオンを数GeVまで加速すると、人間の体（大気より約1000倍原子の密度が高い）の中を数cmから10cm程度走行します。イオンの運動エネルギーが高いときは、ほとんど体の中の原子と衝突しない透過状態のため、それ経路上の細胞が死ぬことはほとんどありません。ある程度エネルギーが少なくなったところから集中的に衝突が起これ、炭素イオンが止まる直前で細胞を破壊することになります。ちょうどその場所に癌細胞があれば、癌治療を行うことができます。この方法は重粒子線治療といって、副作用が少なく、短期間で癌治療ができるので、これからとても期待されている治療法です。

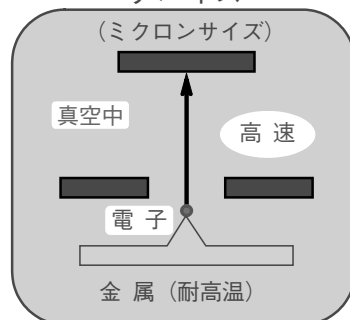
このように、高運動エネルギーのイオンビームは、固体中にほとんど無傷で潜り込むことができる不思議な粒子です。しかも、その入る深さや量は、イオンビームのエネルギーと電流で正確に制御ができます。この特徴を活かした技術が、シリコンのような単結晶半導体へp型やn型となる異種元素をほぼ無傷で打ち込むことができるイオン注入技術です。イオン注入によりシリコン単結晶にはイオンの経路に多少原子の乱れができますが、少し温度を上げてやると（アニール処理）、また元の単結晶状態に戻ります。このイオン注入という方法によって、微小な領域に精度良く異種元素を注入する方法を駆使することによって、現在の大型集積回路が実現できるようになったことは、注目すべきことです。

## 2. 真空中の電子と固体中の電子の違い

トランジスタは固体である半導体中の電子の動きをうまく制御することにより、信号の増幅やスイッチングができる素子です。応答速度の早い（周波数特性の良い）トランジスタを作ろうとすれば、電子が電極間を移動する時間がその応答速度時間より短くないといけませんので、電極間距離をどんどん短くしたトランジスタが作られてきました。現在その電極間距離が65nm程度となっており、微細加工の限界に近い状態です。電極間の電子の移動時間を短くするには、電子の移動速度が早くなって良いので、より電子の移動速度が速い半導体を使う工夫もされていますが、それでもせいぜい2～3倍程度の改善しか見込めません。実は、図2に示すように、半導体中の電子の速度は、格子散乱などの影響で、真空中の電子の速度に比べるととても遅いのです。電極間に同じ電圧をかけたとき、その間を電子が移動する時間は、真空中の方が半導体中より10倍から100倍早いのです。

このことから出てくる発想は、現在のトランジスタと同じ寸法で、電子が移動する媒体を半導体から真空中に替えれば、超高速のトランジスタが実現できるかも知れないということです。このようなデバイス（真空トランジスタとも呼ばれています）を実際に実現しようという研究が十数年前から始まっており、この分野のことを真空ナノエレクトロニクスと呼んでいます。ここでの重要な課題は、このような微小な真空領域に、いかに制御性よく電子を放出させるかということです。つまり、安定な微小電子源を開発することです。

### 極微真空エレクトロニクス デバイス



### 半導体デバイス

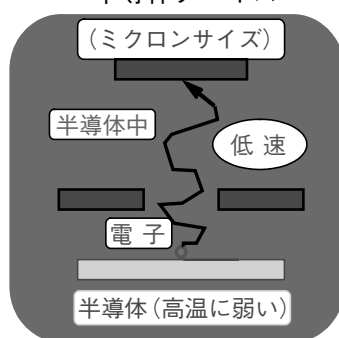


図2. 真空中の電子と半導体中の違い

一方、真空中の電子は残留ガスと衝突をしない弾道性をもった状態で利用するので、信号を増幅させるメカニズムとしてトランジスタにおけるメカニズムとは全く異なる方法を用いることができます。電子ビームを、その走行中に信号に応じて密度を変調するという方法なのですが、扱う信号の周波数がとても高くても大型の装置（電子管）にできるため、大出力のデバイスができます。それに対して半導体では、動作周波数が高くなればなるほど小型化しないとけないため、出力はどんどん下がってきます。この出力の差は、周波数が高くなればなるほど顕著です。たとえば、半導体ではGHz動作で最大数十W程度ですが、電子管ではMWクラスのものができます。さらに周波数が高い100 GHzでも電子管では100 kW程度のものでできます。この周波数帯になると、半導体ではmW程度がせいぜいです。

### 3. 電子ビームの応用分野

真空中の電子は、電界や磁界を利用してその運動エネルギーや軌道を好みに応じて制御できます。このように最小の質量を持った粒子である電子の運動エネルギーを自由に操ったり、その軌道を自由に操ったりできることは、人類が持ち得た道具としては、最も高速で、最も微小で、最も制御性のよいものであると言えます。しかも、地球上の全ての物質の構成要素である原子に数多くの電子が含まれているので、それを無尽蔵にしかも至る処から取り出すことができます。このように電子が特殊な粒子では無いことも、電子の利用や応用が幅広く盛んになってきた大きな理由の一つです。

では、電子ビームは我々のどのようなところで役立っているのでしょうか。図3に電子ビームが工学分野で応用されている装置やデバイスを示します。大出力の超高周波電子管についてはすでに述べましたが、その中でも我々の生活に身近なものとして、料理加熱用電子レンジのマイクロ波を発生させるマグネトロンがあります。電子は高い運動エネルギーまで加速でき、また電界や磁界で精度よく集束させることができるので、非常にエネルギー密度の高いビームを形成することができます。それ

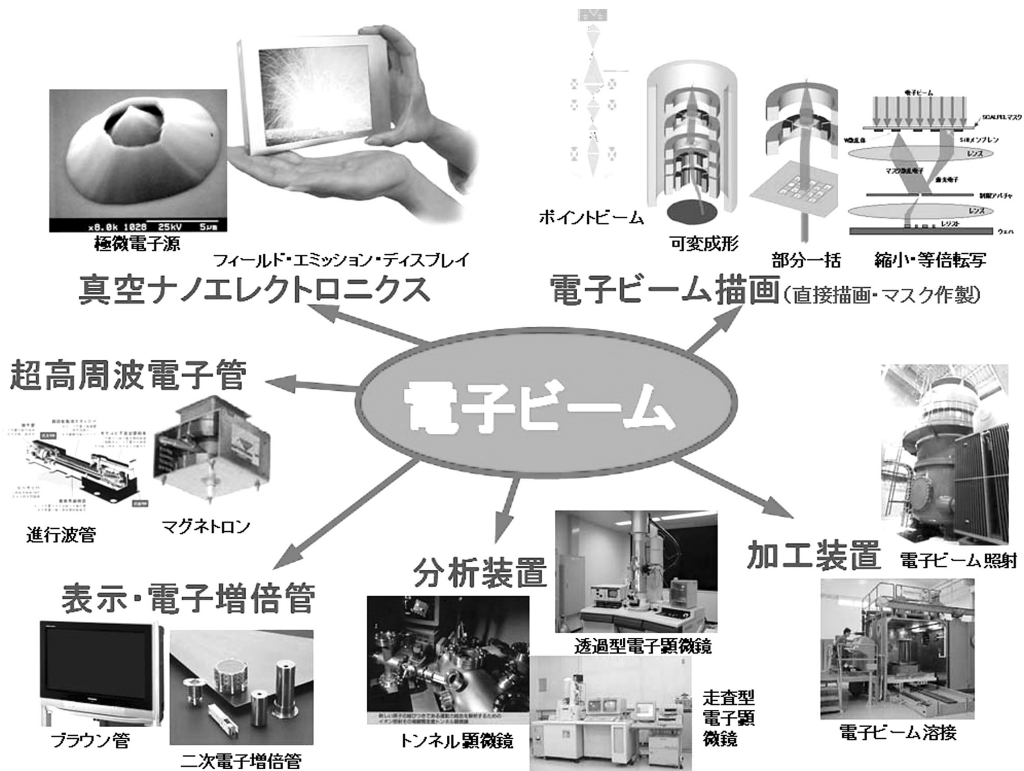


図3. 電子ビームの工学的応用分野

を金属などに当てると瞬時に金属原子が蒸発します。この現象を使うと、電子ビームにより金属の高精度な溶接ができます。初期には高精度を要する人工衛星部品の溶接に利用されていましたが、現在では自動車部品の溶接にも使われています。すでに述べましたが、高い運動エネルギーに加速した電子は、薄い金属箔を通して大気中に取り出すことができます。これをプラスチックに照射すると非常に耐熱性の高い材料に変わります。私たちがよく利用する高耐熱性プラスチックはこの方法で作られている場合が多いのです。電子ビームは電界や磁界によりうまく制御すると原子のサイズに近い数Åの細さまで絞ることができます。この性質を利用して、高分解能の電子顕微鏡や、次世代の微細加工において重要となる電子ビーム描画技術（半導体集積回路の作製プロセスにおけるレジストの露光法として、光露光で対応できなくなった場合の次の技術）が開発されています。さらに、すでに紹介した、真空ナノエレクトロニクス（ミクロン～ナノ寸法の電子源アレイを利用した真空デバイス）は、これからとても期待できる電子ビームの応用分野です。

#### 4. イオンビームは“とても熱い”粒子

イオンは中性原子あるいは分子からその構成電子が外れるか（正イオン）外部から電子が余分に着く（負イオン）ことによって造られます。イオンとなることによって、中性原子や分子より余分に2種類のエネルギーを持つことになります。その一つは、電子の出入りにより生じる電離エネルギー（内部ポテンシャルエネルギー）と、イオンが加速電圧によって得る運動エネルギーです。電離エネルギーは、正イオンにおいては電離電圧と呼ばれておりその絶対値は約10 eVです。負イオンにおいては電子親和力と呼ばれその絶対値は約1 eVです。正イオンの電離電圧は、いろいろな反応を促進します。これに対して、負イオンの電子親和力は、反応を抑制する働きがあります。

一方、イオンは荷電粒子ですから、外部から電界をかけることにより、どのような運動エネルギーにでも加速することができます。工学分野では、普通1 eV程度の比較的低エネルギーから1 MeV程度まで加速したイオンを利用することが多いのですが、特別な場合には、さらに高いエネルギーまで加速したイオンを使うこともあります。常温（300 K）で粒子が熱運動しているエネルギー（熱エネルギー）は、eV単位に直すと約0.03 eVなので、イオンにすることにより2～8桁大きな運動エネルギーを持つ粒子を容易に得られることになります。地球上の空気や固体材料の原子が常温の熱運動エネルギーしか持っていないことを考えると、桁違いに大きな運動エネルギーを持ったイオンと常温の固体材料原子との相互作用では、すでに述べたように固体材料の中へ無傷で侵入するとか、物質形成反応においても常識と考えられている熱化学平衡反応過程とは全く異なる現象が生じます。

このようにイオンは運動エネルギーと電離エネルギーが共存しているため、固体材料と相互作用するときに多様性があり、工学的にとっても利用価値が高いので、多くの材料プロセスに利用されています。

イオン注入による半導体への不純物元素導入法についてはすでに述べましたが、半導体以外の材料にもイオン注入を行って表面を改質し新しい表面物性を持つ材料がつぎつぎと開発されています。イオンと固体原子の質量はそれほど大きく変わらないので、弾性衝突によって比較的大きな運動エネルギーを得る固体原子も存在し

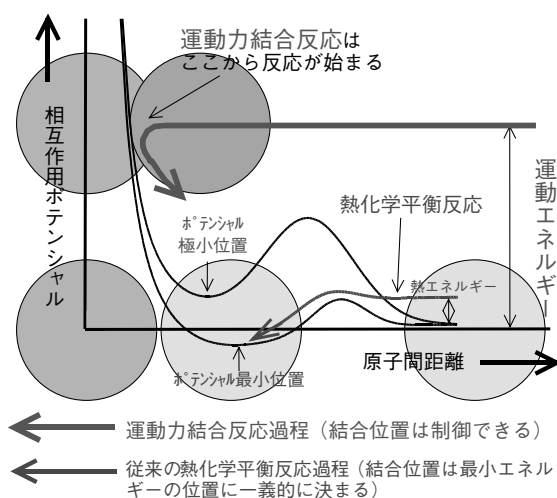


図4. 運動力結合の説明図

ます。複数回の衝突によって運動方向が表面脱出方向になったものは、表面から飛び出る場合があります。この現象はスパッタリングと呼ばれており、原子オーダーでの加工（穴掘り）技術として、現在の大規模半導体集積回路の製造には欠かせないプロセスの一つとなっているのです。また、原子同士の結合エネルギー程度（数eV）の低運動エネルギーイオンと固体原子の相互作用では、運動エネルギーが主体となって原子間結合が生じる運動力結合が起きる可能性があります。この運動力結合は、地球上の全ての物質が形成されたと考えられている熱化学平衡反応とは全く異なる物質形成過程です。熱化学平衡反応では原子間結合は形成エネルギー障壁を熱エネルギーによって越えたものが、相互作用ポテンシャルが最小となる原子位置に落ち着きます。ところが、原子結合エネルギー程度の運動エネルギーを持つ原子は、形成エネルギー障壁を容易に越え、まず原子間距離が運動エネルギーが零となる位置まで近づきます。そこから原子結合過程が始まり、相互作用ポテンシャルが極小の位置に落ち着く場合があります。このような結合状態の材料を準安定物質と呼びますが、準安定物質は従来物質と結合状態が異なるので今までにない新しい性質を持った材料になります。例えば、炭素原子が安定に結合した物質は黒鉛ですが、準安定結合した材料はダイヤモンドです。イオンビームを利用するとこの準安定材料を制御性よくできる特徴があります。

5. イオンビームの応用分野

イオンビームは、半導体集積回路の製造ではイオン注入技術なしでは不可能な状況にあることはすでに述べましたが、イオン注入によって母材表面に異なる元素を導入したり、母材表面にイオンビーム援用蒸着などによって新たなコーティング膜を被覆することにより、材料の機械的特性や光学的特性などを変えることができます。イオンビーム処理によって、炭化、窒化、硼化したり、窒化チタン、炭化チタン、炭窒化チタン、ダイヤモンドライク膜、窒化炭素膜、窒化硼素膜などを形成して、耐環境・耐摩耗特性を大幅に向上させることができます。



図5. イオンビームの工学的応用分野

これらの技術は切削工具の長寿命化、タービンブレードの耐酸化性向上、ベアリングの無潤滑性向上など工業応用に広く利用されているだけでなく、シェーバーのような家電製品でも表面コーティングによる長寿命化が行われています。また、光学レンズの表面にコーティング膜を被覆して光学特性を改善したり、保護膜として利用されています。将来的には、自動車エンジンの内部を低摩耗表面材料で被覆しオイルレスエンジンの実現への研究がなされています。このようにイオンビームを利用した材料の表面改質は広く利用されており、我々の生活に深く関連しています。

さらに、人工関節、人工歯根などの表面にカルシウムや銀などをイオン注入して、その寿命や抗菌性を大幅に向上させることができます。生体に適合する人工材料があれば、生体材料の補助として利用できますが、イオン注入で表面の生体適合性を向上させたカテーテルや人工血管は近未来に利用できるまでできています。イオンビーム処理した高分子材料表面に神経細胞を任意に配列させることもでき、神経情報伝達などの解明や神経情報と電子回路を結ぶバイオインターフェースの可能性も出てきています。イオンビームの医療応用として、イオンビームを人体に照射して実際に癌治療に利用され始めていることはすでに述べました。

また、ラザフォード後方散乱分析法や二次イオン質量分析法などイオンを用いた分析技術も広く利用されています。核融合プラズマを水素の中性粒子ビーム入射により加熱する研究も進んでいます。

## 6. 電子・イオンビームの新しい研究分野

電子・イオンビームの新しい研究分野として、研究室では、電子ビーム関係の研究として“真空ナノエレクトロニクスの研究”を、イオンビーム関係の研究として“負イオン注入の研究”と“イオンビームを用いた新材料形成の研究”を行っています。

### 6. 1 真空ナノエレクトロニクスの研究

この研究分野における最も重要な課題は、安定に電子放出ができる微小な電子源アレイの開発であることはすでに述べました。研究室では、安定な微小電子放出源のための陰極材料開発をイオンビームアシスト蒸着法やスパッタリング法を用いて行うと同時に、次世代イオン注入装置の帯電緩和素子としての全シリコン製微小電子源の開発も行っています。また、微小電子源の新しい評価法として、FNプロットの切片と傾きを両軸として描いたS-Kチャート法を提案し、現在では世界の多くの研究者に利用されるようになってきました。

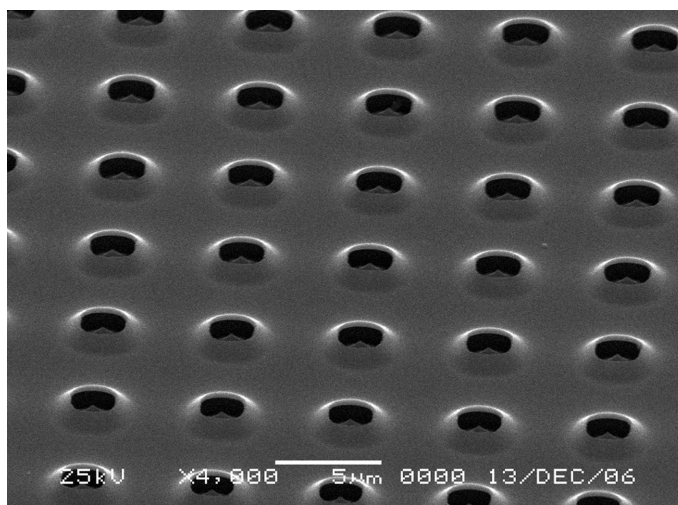


図6. 研究室で開発した微小電子源アレイ

## 6. 2 負イオンビーム技術の開発と負イオンビーム材料プロセス技術の研究

負イオンビーム技術は、研究室が世界に先駆けて開発してきた独創的な研究の一つです。負イオンの発生に関する基礎的研究から、大電流負重イオン源開発、負イオン注入装置開発など、負イオンビームの装置開発において、この研究領域の発展に大きく貢献してきています。

負イオンを絶縁性の材料表面に照射したとき、表面の帯電電圧が数V程度と低く、正イオン照射の場合（正イオンの加速電圧まで帯電する）に比べると桁違いに低くなることを明らかにしてきました。

この特長を活かすことにより、いろいろな新しい材料プロセスの可能性（帯電緩和素子不要の半導体負イオン注入、微粒子表面の負イオン注入による改質など）が出てきます。さらに負イオン注入技術を、ナノ粒子を用いた量子効果デバイス開発や、高分子材料表面の生体適合性制御に適用する研究を行っています。

また研究室では、この運動エネルギーが主体となって原子間結合反応が促進されるプロセスを“運動力結合”と命名し、この運動力結合を積極的に制御して、新しい性質をもった材料（準安定材料）の形成を目指して研究を進めています。

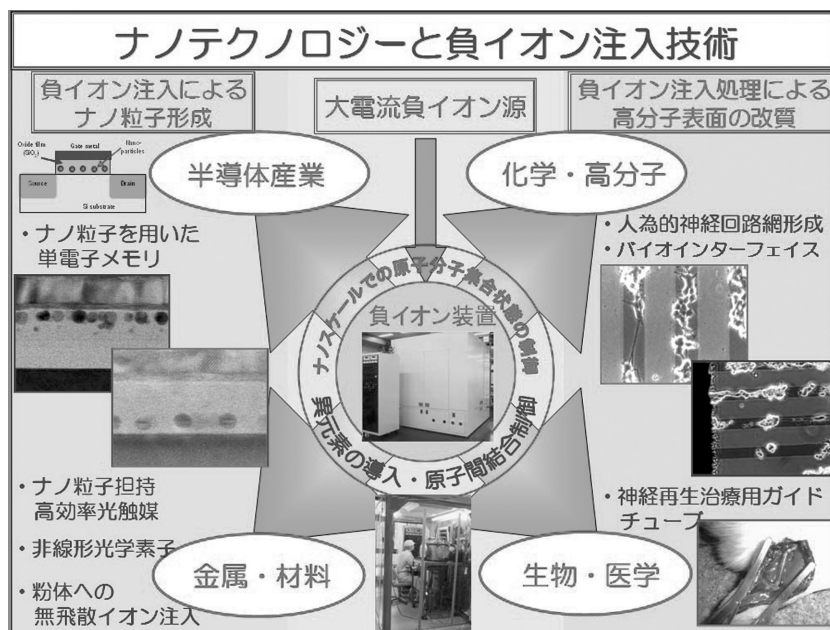


図7. 負イオン注入技術の応用分野