

大学の研究・動向

ナノテクノロジーを拓く極微電子・イオンビーム技術

工学研究科 電子物性工学専攻
電子物理学講座 極微真空電子工学分野
教授 石川 順三
ishikawa@kuee.kyoto-u.ac.jp
助手 辻 博司
tsuji@kuee.kyoto-u.ac.jp
助手 後藤 康仁
ygotoh@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

極微真空電子工学分野では、荷電粒子ビーム、すなわち、電子およびイオンビームに関わる独創的かつ先端的な研究を展開しています。電子ビームに関しては、ナノメートル法に制御された先端をもつ極微電界電子放出チップをアレイ状に並べた微小電子源の開発があります。この領域は真空マイクロエレクトロニクスと呼ばれ、十数年前から発展した比較的新しい分野です。微小電子源が実現されれば、テラヘルツ動作のナノメートル法真空デバイスや極微小超高周波管、極微センサー、平面型表示素子など数多くの応用が期待されます。一方、イオンビームに関しては、新たなイオンの発生法の確立からイオンビーム装置の開発、応用に至る幅広い研究を展開しています。負イオンビーム材料プロセス技術の開発もその一つであり、当研究室が世界に先んじて独創的研究展開を図っています。負イオン発生法の根本的な見直しにより正イオンに匹敵する電流量の発生に成功し、負イオンを用いた注入や蒸着プロセス技術の開発とその特長を明らかにしてきました。ここでは、これらの研究内容の概要を説明します。

2. 極微真空電子デバイス開発の鍵となる微小電子源

2.1 極微真空デバイスの特長

極微真空電子デバイスは、現在の半導体集積回路の作製プロセスやマイクロマシーニング領域で用いられている微細加工法を駆使して作製する、ナノメートルからミクロンメートル法の非常に小さなデバイスのことです。真空デバイスですから、真空中に電子を供給する必要があるため、デバイス中にはナノメートル法の電界放出チップあるいは薄膜型冷陰極放出面が必要になります。また、用途に応じていろいろなナノメートル法の電極が付いています。このような極微真空電子デバイスをマイクロバキュームチューブ（極微真空管）とか、真空トランジスタと呼ぶこともあります。この極微真空電子デバイスには次のような特長があります。

図1に示すように、真空中の電子は半導体中の電子のように格子との衝突を受けずに進むので、同じ加速電圧でも10倍から100倍早いスピードで電極間を走行します。したがって、極微真空電子デバイスは半導体より10倍から100倍高速で動作できることになり、テラ・ヘルツ（ 10^{12} Hz）デバイス実現への期待が出てきます。真空デバイスですから、大電力動作にも強く、放射線などにも誤動作しません。また、極寒から高温の環境でも問題なく動作します。極微真空デバイスは、このような三極管

型のデバイスだけでなく、真空中の電子のバリスティックな性質を利用して更に超々高周波で動作させることができる超小型のクライストロンのや進行波管的な構造のデバイスが考えられています。

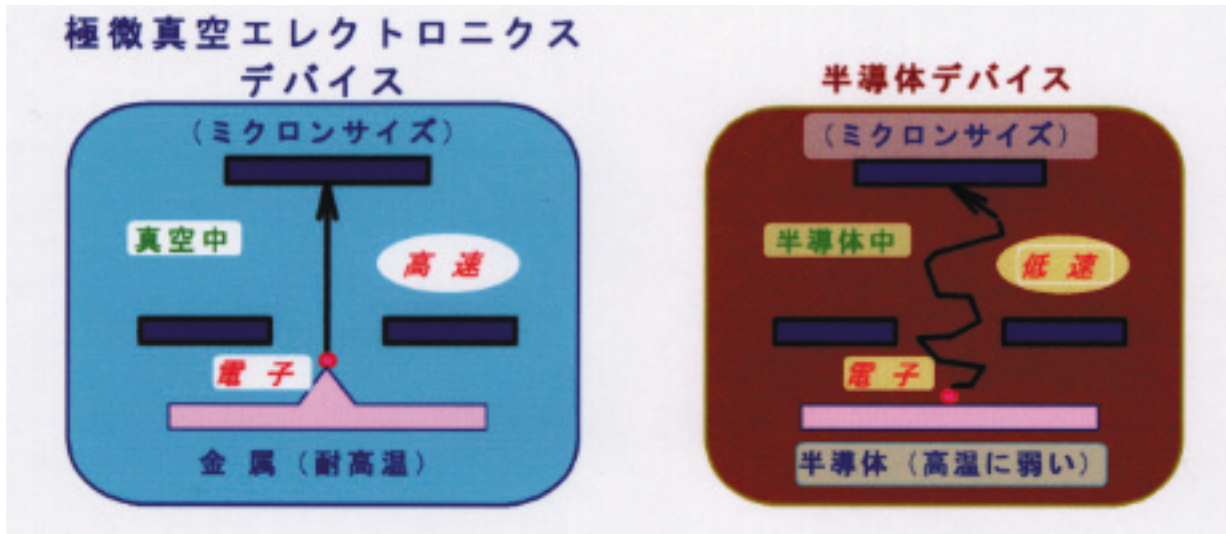


図1 極微真空デバイスと半導体デバイス中の電子の動き

一方、ナノメートルからマイクロメートル寸法の極微電子源が実現できると、次のような新しい領域が展開できます。図2に示すように、平面上に極微電子源を多数配列（微小電子源）し、その前面に蛍光面を配置すれば、厚さが1-2mm程度の超薄型のディスプレイができます。このようなディスプレイは、ブラウン管と同じ優れた特長を備えていますから、液晶のように視野角が狭く応答速度が遅いとか、PDPのように輝度が低く消費電力が多いといった欠点はありません。次世代のフラットパネルディスプレイとして大いに期待されています。さらに、2010年の超LSIのデザインルール（最小線幅）は50ナノメートルが見込まれていますが、それに対応できる技術としてマルチ極

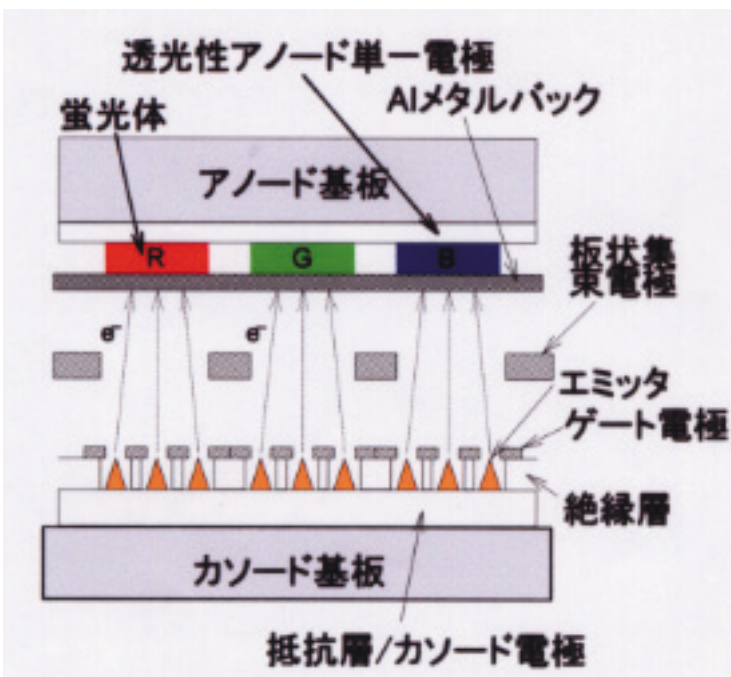


図2 極微電子源を用いたフラットパネルディスプレイの構造図

微電子源（微小電子源）を用いたマルチ電子ビーム露光が注目されています。このように、微小電子源開発は、次世代に向けて数多くの新領域を生み出すことができます。

2. 2 安定な微小電子源開発

微小電子源開発における最も重要な課題は、安定な電子源の実現です。普通、電子源といえば、タングステンなどの耐熱金属を加熱することにより得られる熱電子放出によるものを考えますが、微小電子源ではこの方法は使用できません。エミッタ、ゲート、アノードなどの電極が絶縁膜でつなが

ているため、エミッタだけを独立して昇温することができないからです。したがって、昇温不要で微小領域から電子放出可能な電界放出陰極または薄膜型陰極が用いられます。当研究室では、極微電子源として主として電界放出エミッタ（アレイ）を取り上げ、安定な電子源の実現に向けて研究を進めています。

電界電子放出量を定める主要な要因は、エミッタ材料の仕事関数と表面形状です。電子放出面にガスが吸・脱着すると局部的に仕事関数が変化して雑音の原因になります。電子放出面にイオン衝撃があったり原子が表面をマイグレーションすると表面形状が変わり電界集中の程度が変化して、やはり雑音の原因になります。当研究室では、フィールドエミッタから発生する雑音量にはエミッタの仕事関数と相関があり、仕事関数が低いほど雑音量が少ないことを明らかにしてきました。したがって、雑音の少ない安定なフィールド・エミッタ材料は、低仕事関数で、マイグレーションが起こりにくい高融点で、イオン衝撃に耐える強い原子間結合をもつものがよいことになります。当研究室では、フィールドエミッタ材料として最適な材料を探索するために、強い原子間結合性、膜の配向性制御に優れたイオンビームアシスト蒸着法を用いて種々の新材料を作製しています。ターゲットとしている材料としては、主として、遷移金属窒化物、炭化物および炭素系材料などがあります。図3は、これらの陰極材料を用いて作製した微小電子源の拡大図の例です。

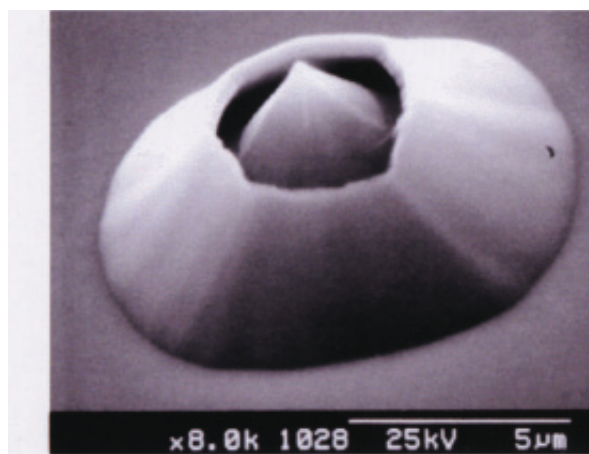


図3 作成した微小電子源の拡大図

3. 高精度制御が可能な負イオンビーム材料プロセス技術

3.1 負イオンビーム装置開発

当研究室では、イオンの発生法を原点から見直し、表面効果法の詳細な研究から従来不可能と言われてきた負イオンの多量発生法を確立することに成功しました。これまでに数多くの負イオン源を開発してきましたが、その中でも大電流が得られるものとしてRFプラズマスパッタ型負イオン源があります。種々の元素の負イオンが連続動作でmA級得られます。このイオン源を搭載した負イオン注入装置（図4）や、放電用ガスを用いないイオン源を搭載した負イオンビーム蒸着装置を世界で初めて開発してきました。

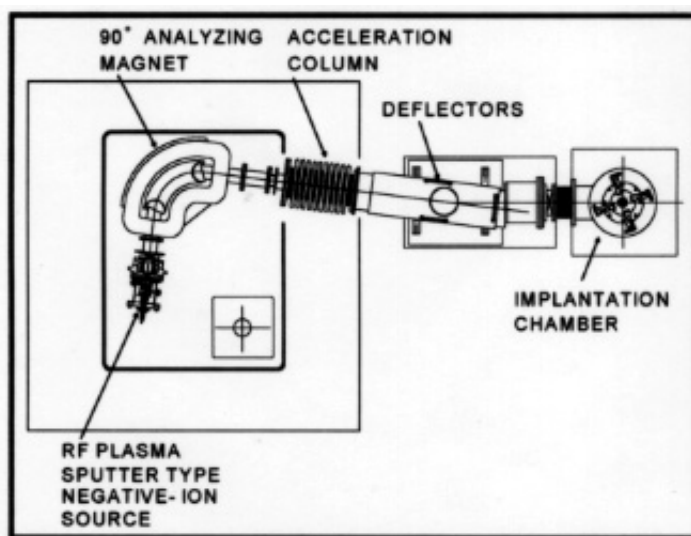


図4 開発した負イオン注入装置

3.2 負イオンと固体表面相互作用の特長

負イオンと固体表面の相互作用の特長の一つは、ビーム照射表面が絶縁性材料であってもほとんど帯電しないことです。これは、固体表面に負の電荷をもったイオンが入射しますが、放出される二次

粒子の低エネルギー電子も同じ負の電荷をもっているため、帯電が著しく緩和されるからです。

また、負イオンは正イオンに比べるとイオン内部に持っているポテンシャルエネルギーが非常に小さく固体表面との相互作用においてほとんど無視できます。負イオンはこの固体表面との相互作用において、イオンの運動エネルギーだけの効果を選択して調べることができる粒子として最適な特性を持っています。

3. 3 負イオン注入

負イオンビーム照射における特長を活かして、帯電のない負イオン注入技術が開発できます。負イオン注入法では絶縁性材料表面の帯電電位が±数V以内であることから、次世代のULSIやカラー液晶用TFTの作製において低耐電圧のゲート絶縁膜でも破壊がおこらない先端プロセスとして注目されています。また、負イオンを使えば粉体を飛散をおこすことなくその表面に精確なイオン注入ができるようになります。粉体の表面改質ができれば、各種の医用材料や触媒材料の形成が可能となり、新しい分野が開けます。さらに、ガラスのような絶縁性材料に金属負イオンを多量に注入し適度な温度でアニールすると、ナノメートルからマイクロメートル寸法の金属超微粒子が形成できます。金属超微粒子を配列した材料は非線形光学素子や量子ドット素子への適用が期待されています。

高分子材料表面を負イオン注入により改質すると、その生体適合性を正確に制御できます。図5は、スピンコートしたポリスチレン膜上にパターン化したAg負イオン注入後、その領域へのPC12h神経細胞の接着培養を行ったときの様子を示します。パターン化した形状(約60 μ m幅の線状)内に、神経細胞が接着するとともに、黒い筋状の分化・伸展した神経突起も観測できます。当研究室では、この方法を用いて人為的に神経回路網を構築しようとしています。さらに将来は、神経細胞の情報伝達や蓄積機能などの解明、さらには、生体神経と外部半導体回路のインターフェースとして神経制御による次世代の義手・義足の開発に繋がりたいと考えています。

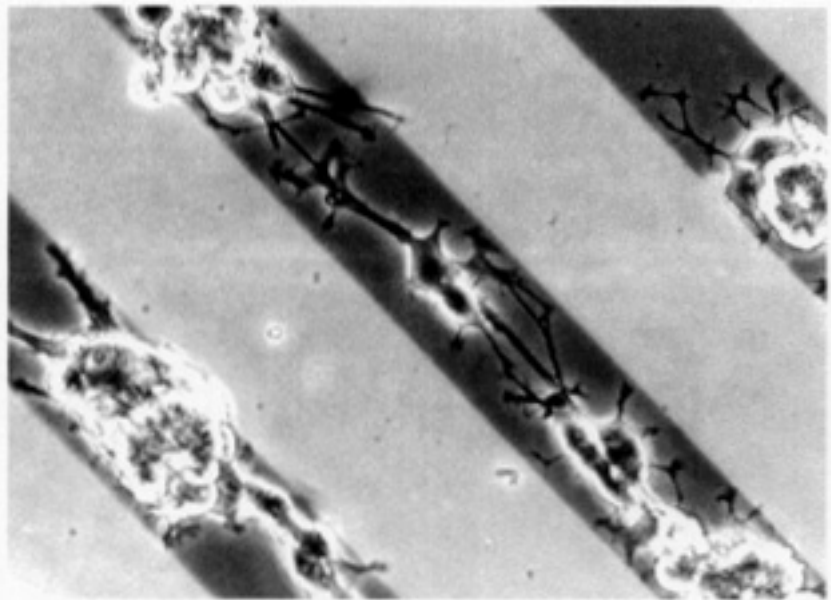


図5. 負イオン注入領域(60 μ m幅)に接着した神経細胞

3. 4 運動力結合制御

数十eV程度の運動エネルギーを持ったイオンが固体表面原子と相互作用すると、運動エネルギーが主体となった原子間結合反応が起こります。従来、総ての物質合成反応と考えられてきた熱化学平衡反応と区別して、当研究室では運動力結合と呼ぶことにしています(図6参照)。この新しい原子間結合反応である運動力結合のメカニズムを解明することも当研究室の研究課題です。負イオンは、イオン自体に内部ポテンシャルエネルギーをほとんど持っていませんので、運動エネルギーだけをもちその値や軌道を自在に制御できる粒子です。当研究室では、正確に運動エネルギーや質量などを制

御した負イオンビームを用いて蒸着した膜や固体表面を詳細に評価することにより、運動力結合の解明をしようとしています。炭素負イオン蒸着では、ある特定の範囲内の運動エネルギーで形成した膜は sp^3 結合割合の非常に高いことが観測されています。イオン一個々の固体表面との相互作用をSTM観察する研究も行っています。

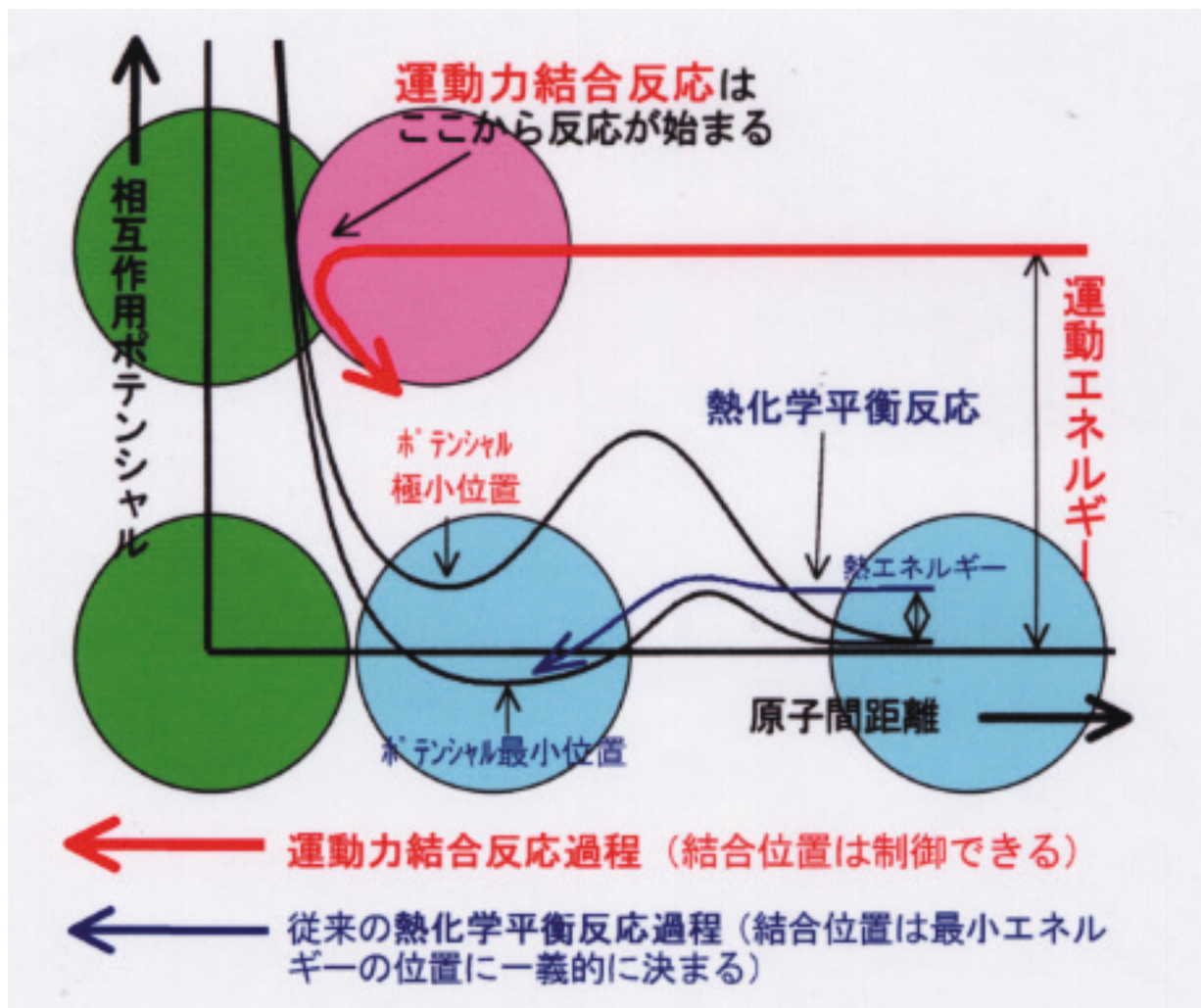


図6. 運動力結合を説明する図

4. おわりに

電子およびイオンビームはナノメートル寸法から原子寸法の範囲における加工を最も得意としています。当研究室では、これらの技術の活用と独創的な考え方を融合することによって、今求められているナノテクノロジーをさらに推進していきたいと考えています。