

篠塚雄三

和歌山大学システム工学部

〒640-8510 和歌山市栄谷 930 E-mail:yuzo@sys.wakayama-u.ac.jp

1. はじめに ナノテクノロジーと励起プロセス

半導体デバイスでは、構造微細化がもたらす新規な物性と機能の飛躍的性能向上により人間生活の量的質的向上をもたらしてきた。今後も将来に向けて、半導体ロードマップ[1]が示すように、さらなる発展が期待されている。しかしそれを実現させるためには「所望のナノ構造を正確かつ効率的に作り出す手法」の開発が不可欠であるが、例えば従来の光リソグラフィの延長（たとえば短波長化）では半導体微細加工技術は早晚行き詰まってしまうことが指摘されている。

そこで、原子レベルで物質を加工するプロセスについて、もう一度原点に立ち戻り考えてみよう。従来のプロセスは、結晶成長であれ化学反応であれ、基本的には物質をその電子的基底状態で取り扱うのが一般的で、加熱による熱的励起では電子的には基底状態の枠内でポテンシャル障壁を乗り越えて原子移動（原子間結合の組み替え）を起こさせている。例えばガラス系では強力なパルスレーザーを照射することで、部分的に瞬時に熔融させてナノ加工を行なっている。しかしこのような熱的プロセスは必然的にランダムさを伴うため、原子レベルの正確さをもつナノ加工を期待することはできない。一方、正確さの面では、STM 探針の先に原子を引きつけて移動させる分子ピンセットの技術が既実現されている。しかし産業的観点からは落第で、量産性に乏しくそのまま応用につなげることはできない。

最近、電子ビームやイオンビーム、放射光、レーザー光などの量子ビームを物質に照射して物質の構造を改変（原子分子操作）する試みが盛んになってきている。これらの量子ビームが物質にあたると、運動量およびエネルギーの付与が生じ、物質系は様々な応答を示す。運動量の付与については質量の重いイオンや高エネルギーの電子線照射において重要になり、その効果については別項の解説（電子線励起：保田氏、イオン励起：松尾氏）を参照していただきたい。一方、エネルギーの付与に関し物質系の電子状態が励起される過程（素励起1個あたり $\sim 1\text{eV}$ ）では、熱的励起に比べ非常に大きな擾乱を物質は受けるため、効率よく原子移動が起こることがある。特に、励起の量子性を活かして特定の電子励起状態を選択することで所望の構造変化を効率よく誘起できる可能性がある。本総論では、なぜ電子励起がナノ加工プロセスに有効であるかに絞って詳しく解説しよう。

なお、本解説では「電子励起」という用語を、「電子線を用いた励起」ではなく、「物質の電子系を励起すること」の意味で用いるので注意されたい。

2. 電子励起誘起構造変化

凝縮物質を光照射などで電子励起すると構成原子の位置が大きくずれたり、原子の凝集形態が質的に変化するような現象は昔から良く知られている[2, 3]。例えば、放射線による物質

谷村克己

大阪大学産業科学研究所

〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘 8-1 E-mail: tanimura@sanken.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

原子・分子配列をナノメートル領域で完全に組織化し、新たな高次機能を発現させる新規構造・デバイスの創製を目指すナノテクノロジーの展開においては、その為の高度な原子・分子の操作手法を開発・確立する事が必須になる事は言うまでもない。その原子・分子操作過程に「電子系の励起」という要素を導入し、新たな展開と可能性を切り拓こうとする構想が励起ナノプロセスである。ここでは、主に物質の励起源として光（電磁波）、特にレーザーを用いた原子操作に関して、その研究展開に必要な基礎的な知識を整理した後、今までの研究を通じて明らかにされてきた成果と問題点、今後の展開方向をまとめる。

本稿では、対象とする物質系を半導体表面に限定する。その理由は：

- 1) 半導体表面は、高効率光触媒機能開発やスピン操作を含めた高次電子・情報機能発現を目指す素子を構築する為の重要な基板であり、その表面上での原子操作（ボンド切断や原子の凝縮制御）が極めて重要な課題になる事、
 - 2) 原子レベルでの構造決定の為の走査型トンネル顕微鏡等のプローブ顕微鏡技術の導入、および、ボンド切断による表面からの原子放出過程を超高感度で検出できるなど、原子レベルの知見に基づいて、励起による原子操作の基礎を構築する格好の研究場を提供する事、
 - 3) 表面における3次元対称性の1方向に関する完全な欠如によって、強い電子格子相互作用と電子相関を内包する擬2次元物質相（再構成構造）が出現し、電磁波に対する構造的応答を理解する為の系統的な対象を設定することが出来る事、
- 等である。

これらの特徴を持つ半導体表面に対するレーザー励起効果は、励起ナノプロセス全体が対象とするより広い系における原子操作を展望する際にも、重要な寄与をなすに違いない。更に、波長・偏光・強度・パルス幅等を自在に制御して、対象を制御的かつ選択的に特定の電子励起状態に変換させるレーザー励起の手法は、他の異なる手法による励起ナノプロセス過程の基礎を構築する上でも、極めて重要な内容を提供する。

2. 電磁波に対する物質系の構造的応答：基礎的知見

太陽電池や種々の光・電子・情報素子として利用されている半導体結晶（アモルファス Si は別にして）に、光をあてて電子や正孔を発生させても、また電流注入によっ

保田 英洋

大阪大学 超高压電子顕微鏡センター

〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘7-1 E-mail: yasuda@uhvem.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

励起ナノプロセスは、励起源の種類にかかわらず物質に付与されたエネルギーがある緩和過程を経て散逸していくときに、ドラスティックな原子移動を誘起する現象を利用するものとして特徴づけられる。電子線を励起源に用いると、化学的にクリーンであること、エネルギーを極めて広範囲にとれること、粒子性と波動性の両方を活用できること、原子サイズ以下の極めて微小なプローブに集束し走査できること等の利点を生かすことができる。こうした性質を利用して、すでに電子線リソグラフィとして工業的にも用いられていることは周知の通りである。

電子線を励起ナノプロセスに利用するためには、まず電子と物質の相互作用について理解することが重要である。ここでは、まず電子が固体中でエネルギーを損失する素過程について、次にそれによって誘起された励起状態の緩和過程について、さらにその緩和過程がどのように原子移動に結びつくかについて示す。例えば、金属の場合には電子励起やイオン化はほとんど熱に変わり後に残る変化を与えない。絶縁体、半導体などでは電子や正孔が捕獲中心にトラップされて可逆的な変化を誘起する場合がある。イオン結晶のような絶縁体では電子励起によって欠陥が導入される。いずれの場合においても、固体中で失われる電子のエネルギーを正確に理解することが重要である。最後に、こうした電子線による励起過程によって効果的に発現したナノプロセスの現象例を紹介する。

2. 電子線の特徴

2. 1 粒子性と波動性

電子を計測するとき、それは必ず整数単位で数えることができる。それが確率波として記述され、(振幅)²が1/10に減少したとしても1/10個の電子が存在するわけではなく、これが、半径 $2.817 \times 10^{-15} \text{m}$ 、質量 $9.110 \times 10^{-31} \text{kg}$ の電子がもつ粒子性である。しかし、その場合、電子は10回の観測で1回しか発見できないことになる。

一方、波であるので広がって存在するため、同時に何カ所にも現れるようにみえる。波動性をもつ電子は、ある波長を持ち、運動量 p を有する電子の波長 λ は、de Broglieの式により

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

と表される。ここで、 h はプランク定数である。運動量 p は

$$p = mv$$

と表される。質量 m は

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

励起ナノプロセス入門 **イオン励起**
基礎過程とその応用

松尾 二郎

京都大学大学院 工学研究科 附属量子理工学教育研究センター
〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 E-mail: matsuo@nucleng.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに - イオンビームとは -

イオンビームとは、原子や分子をイオン化したものを電界などにより加速しエネルギーを付与したものである。イオンビームの発見は19世紀末にさかのぼり、電子とほぼ同時期に真空放電現象を調べたときに見つかっている。Goldstein(図1)らは陽極付近から出てくるビームをカナル線と呼び、陰極がエッチングされること(スパッタリング)や酸化物に当たると光ること(蛍光)などイオンビームの持つ様々な性質を報告している[1]。その後放射性物質から α 線が放出されていることが発見され、それが後にHeイオンビームであることが明らかになった。さらに、RutherfordらがAu薄膜を使った α 線の散乱実験を行い原子核を発見し、イオンビームを科学の最先端分野の道具として使う核物理学を切り開いた。その後、加速器で作られたイオンビームは様々な物理学実験に用いられるとともに、その応用技術の研究も開始された[2-8]。例えば、イオンを固体中に注入してそれを不純物として用いるイオン注入技術が半導体の分野で実用化され、いまや欠かすことのできないプロセス技術となっている[6]。この稿ではイオンと固体との衝突により誘起される励起現象に焦点を当て、その基礎過程から応用まで概観する。



図1 カナル線(イオンビーム)を発見した Eugen Goldstein[1]。

2. イオンと固体との相互作用

イオンビームが固体に衝突したときに起こる現象を図2に模式的に示す。図2に示すようにイオンビームは固体に原子、エネルギー、運動量を付与する3つの効果を持っている。イオンビームの特徴として挙げられるのは、電子やレーザービームと比較すると運動量や原子を付与できることであり、それぞれ微細加工技術(スパッタリング)やドーピング技術(イオン注入)として応用されている。これらの特徴は、イオン化された分子・原子をビームとして用いるので、イオンの質量が電子や光子に比べて格段に重いことに由来している。さらに、イオンビームは水素からウランまで様々な元素イオンが利用可能であり、原子付与による新物質創製という観点から見ても極めて多様性に富んでいる。さらに、イオンの質量は100倍以上違い、そのエネルギーは、eV から GeV まで変化させることができるので、イオンの重さやエネルギーによって全く違った励起現象が起こることも、

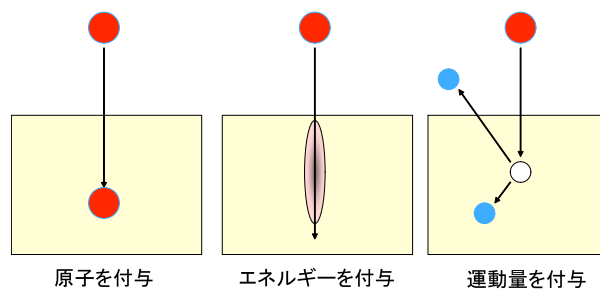


図2 イオン衝突の基礎過程。原子、エネルギー、運動量が付与される。

プラズマ励起

永津 雅章

静岡大学創造科学技術大学院

〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1 E-mail:tmnagat@ipc.shizuoka.ac.jp

1. はじめに

現在、身の回りに使われている多くの電子デバイスの作製には、プラズマを利用した様々なドライプロセス技術が用いられている。例えば、ノートパソコンや携帯電話に使われるULSIなどの半導体デバイスの作製では、すでに32 nm以下のゲート線幅の超微細加工エッチングやフォトレジストアッシング工程にプラズマプロセスが広く用いられている。また太陽電池用シリコン薄膜や各種カーボン系薄膜の作製などにおいても、プラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition、化学的気相成長法) 技術が幅広く活用されている。このようなプラズマの化学的な反応を利用したエッチングや薄膜作製以外にも、スパッタリングと呼ばれるプラズマイオンの物理的性質を利用した薄膜生成方法がある。また、プラズマ中の励起原子による発光を利用した光源への応用や、近年のプラズマディスプレイパネルに用いられる微小サイズのマイクロプラズマなど、様々な分野への利用に向けた研究開発も盛んに行われている。さらに、近年では低圧力のみならず大気圧下で生成したプラズマの医療・バイオテクノロジーへの応用や排気ガス浄化などの環境分野への応用開発も活発に行われており、それぞれの目的を達成するためには、「プラズマを如何に生成し、如何に制御するか」が、プラズマプロセスを効率的に行う上で極めて重要である。このような多岐にわたるプラズマを特徴づけるパラメータとしては、プラズマの形状や大きさなどの巨視的なパラメータ、電子やイオンの密度やエネルギー分布関数などの微視的なパラメータ、さらにプラズマ放電の動作圧力、電源周波数などの動作パラメータなど様々なものがある。目的に合わせてプラズマを有効に活用するためには、単なるブラックボックス的なツールとしてではなく、プラズマの持つ基本的性質を十分に理解した上で、最適なプラズマを利用することが必要である。

本稿では、ナノテクノロジー分野の研究開発に携わる大学院生や若手の研究者や技術者を対象とした「**プラズマ励起**」についての入門編として、プラズマ放電の基礎過程から各種プラズマ生成法および制御について述べる。また、最近、著者らのグループで行っている医療応用を目的とした磁性体ナノ微粒子のプラズマ表面化学修飾に関する研究成果を加えて、先端的プラズマプロセスを展望する一助としたい。なお、紙面および時間の都合により本稿でカバーできなかったさらに詳しい内容については、多くのプラズマ理工学に関する専門書に譲りたい[1-7]。

2. プラズマ生成の基礎

プラズマは電子、イオン（ガス種によっては、正イオンのみならず負イオンが存在）、および中性粒子から成る電離気体であり、ごく狭い空間内に限定すれば正負電荷の分布の粗

前田康二

東京大学工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 E-mail:maeda@exp.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

プローブ励起とは、走査トンネル顕微鏡 (STM) の金属探針から固体表面に電子 (または正孔) がトンネル注入される際に固体に引き起こされる特異な励起をいう。電子励起としてのプローブ励起の特異性については3. で詳しく説明することにして、ここでは、プローブ励起と関連深い電子線照射効果について研究の歴史をまじえ概観し、励起ナノプロセスにおけるプローブ励起効果の位置づけを示そう。

あるエネルギーを持って物質に入射する電子と物質との相互作用に関する研究は、核物理の課題として原子による電子散乱が1930-40年代に、分子による電子散乱に関しては1960年代にまで、その歴史は遡る。1970年代になると、当時急速な発展を見た透過電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscopy = TEM) の分野で高エネルギーの電子線による損傷の問題に関連して、また表面物理の分野では比較的低エネルギーの電子と固体の相互作用について基礎研究が始まった。特に表面からの電子刺激脱離 (Electron-stimulated Desorption = ESD) の現象は、そのメカニズムへの関心とともに、ESDの分光学的情報から電子-固体相互作用の物理的起源に関する知見を引き出したり、吸着分子の配向方向など吸着構造の解析用ツールとしても用いられるようになった。1980年代になると、TEM技術の進展に伴い試料の局所的な元素分析や構造同定のために、高エネルギーで入射・透過する電子線のエネルギー損失分光 (Electron Energy Loss Spectroscopy = EELS) 測定が使われるようになり、また表面物理の分野では、低エネルギー電子線をプローブにした高分解能 (High Resolution = HR) EELSによって、吸着分子の振動分光測定が行われるようになった。

1982年にBinnigとRohrerによって発明されたSTM [1]は、1 nm オーダーに接近した金属探針 - 試料間にバイアス電圧をかけることによって流れるトンネル電流を利用するが、その開発当初から、STM探針で試料表面を走査すると表面原子が動いたり探針によって引き抜かれたりする現象が見出された。始めのうちは、探針の接触による機械的な力や、探針 - 試料間にかかる大きな電界による分極力 (電界蒸発) などによる原因を帰することが多かったが、その後本稿で取り上げる電流注入 (プローブ励起) によって原子移動が誘起されるケースが少なくないことが分かってきた。ESDなどの研究者にとっては、その延長上にある現象ととらえる向きもあったようであるが、後述するように必ずしも低エネルギーの電子線照射による効果の枠内だけでは理解できない面もあり、本稿でもプローブ励起効果として電子線励起とは別に扱われている。

このテキストでは、冒頭から初学者に難解になることを避けるため、やや論理が飛躍したり前後することも覚悟のうえ、概要から始めて詳細へと話を進めてゆく。まず2. でプローブ励起効果の事例をいくつか紹介して、読者にその具体的なイメージを得てもらおう。そのあと、

北島正弘

防衛大学校理工学部

〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20 E-mail:kitaji@nda.ac.jp

1. はじめに

結晶には様々な振動数と波数ベクトルを有するフォノンが存在する。熱励起フォノンの密度関数 $n(\omega)$ は、系が熱平衡にある場合、プランク分布 $n(\omega) = [\exp(\hbar\omega/kT) - 1]^{-1}$ で与えられる。熱的に励起されたフォノンの位相は全く乱雑である。このような時・空間的にランダムに振動するフォノンをインコヒーレントフォノンと呼んでいる。したがって、時・空間平均をとると、個々のフォノンの動きに対応した変化は互いに相殺され、巨視的な物理量としての観測信号には現れない。この場合、ラマン散乱や赤外吸収等の通常の周波数領域の分光によって研究される[1]。

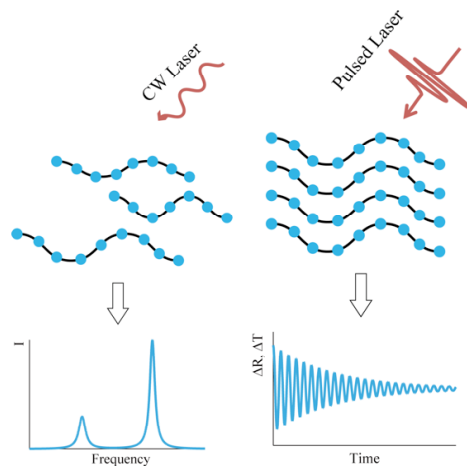


図1 コヒーレントフォノンとインコヒーレントフォノンの概念図

ところで、ここにフォノンの1周期よりも十分短い時間幅のパルスレーザーを照射すると、その衝撃により位相がバラバラだったフォノンが瞬間的に一斉に励起され、時・空間的に位相の揃った振動となる。そのコヒーレントな振動は、統計的平均を取っても相殺されず観測可能な巨視的な物理量（屈折率や分極など）の変化が引き起こされ、それがコヒーレントな応答成分として検出される。このようにパルスレーザー励起による位相の揃ったフォノンをコヒーレントフォノンと呼んでいる。超短パルス（ポンプ）レーザーによって発生したコヒーレントフォノンは、このパルスから τ だけ時間遅延したプローブパルスにより τ の関数として応答信号を検出する「ポンプ-プローブ法」

により観測できる（図1）。この時間領域におけるコヒーレント振動の測定は従来の周波数領域分光と対比して、時間領域分光法と呼ばれる。コヒーレントフォノンの最初の報告は誘電体物質について Nelson らによって 1979 年になされた[2]。以来これまでに、半導体、半金属・金属、高温超伝導体など多くの系で観測されている。最近では半導体表面や金属上に吸着されたアルカリ金属膜³⁾のコヒーレント表面フォノンの検出も行われている。

固体におけるコヒーレントフォノン分光も 2000 年頃には成熟期に入り、更なる高時間分解能や新しい物理現象への挑戦へとモチベーションが変化しつつある。（光学手法（反射率や透過率の変調から計測すること）に限るなら、ある意味では“よいレーザー”が手に入れば大抵の物質のコヒーレントフォノンは観測することができる）。コヒーレントフォノン分光の利点は言うまでもなく、直接時間変動を観察できることである。すなわち、フォノンの振動振幅や振動数の時間変動、および揃った位相が乱れて行く緩和速度(dephasing rate)

励起ナノプロセス入門 第一原理計算

押山淳

東京大学大学院工学系研究科

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 oshiyama@ap.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

電子系を励起することによって、原子の移動を促し、新たな物性を有する構造体を創成する試みが盛んに行われている。こうした電子励起による原子移動の現象は、実は物質中の不純物、欠陥等で古くから知られている現象である。物質中の点欠陥によって引き起こされた電子状態は、欠陥周囲に局在することが多い。それらは複数の電子を収容することができ、従って欠陥は複数の荷電状態を取り得る。荷電状態が異なると、安定な原子構造も異なり、電子注入、電子励起などにより、原子移動が生じることは容易に想像できる。欠陥周囲の原子構造の変化により物理的性質が変化したり、あるいは長距離にわたる原子の移動・拡散が生じることもある。古くから知られているシリコン結晶中の自己格子間原子の非熱的拡散は、荷電状態を変化させることによって、拡散バリアーを超えることなしに原子の移動が生じているものと考えられている[1]。また、GaAs 中の DX センター[2]、SiO₂ 中の自己束縛励起子[3]など、そうした現象の例は枚挙に暇がない。

しかしながら、電子励起ナノ構造創成を制御した形で行うには、電子励起による原子移動のメカニズム解明が不可欠である。それは図 1 のような複数の断熱ポテンシャル面間の乗り移りの問題と関係する。量子論の第一原理に立脚した理論計算で、現象の微視的機構を解明し、さらには新現象を予測することに、大きな期待がよせられる。しかし現状では、第一原理計算の手法は、こうした励起ナノプロセスの問題に十分に切り込めているとは言い難い。だが端緒的な成果はいくつか得られている。本稿においては、こうした電子励起原子移動現象に対する、第一原理計算によるアプローチの基礎となる理論の紹介とその現状を概観する。講演では理論手法について詳しく触れる時間はないので、本稿が講演を補完できれば幸いである。最後に SiO₂ のレーザー励起現象のシミュレーションを紹介する。

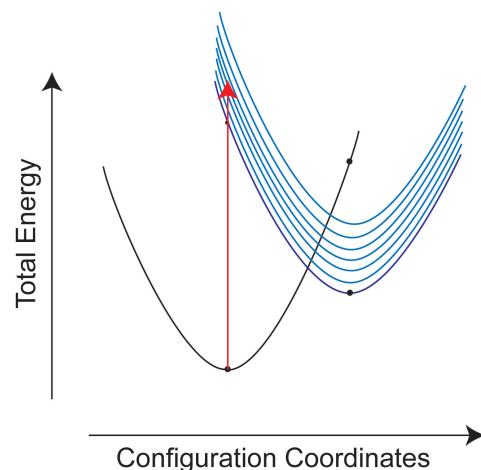


図 1 : 複数の断熱ポテンシャル面がある場合の電子励起原子移動の模式図。

腰原伸也

東京工業大学 理工学研究科 物質科学専攻

〒152-8551 東京都大田区大岡山 2-12-1-H61 E-mail:skoshi@cms.titech.ac.jp

1. はじめに -今日の物質科学に果たす励起状態の役割-

豊かな物質的文化を人類にもたらして来た物質科学にも、今、ひとつの転機が訪れていると思われる。それは日進月歩の情報技術の発展に伴う情報量と情報処理速度の増大に対処するための高密度・超高速の情報処理技術の開発や、エネルギー利用技術の効率化、環境対策など多くの問題を解決するためには、既存の材料設計方針だけに頼るのは無理であり、従来に無い新しい物質の開拓が不可欠の事態となったことである。従来の物質科学によって創り出されて来た膨大な種類の各種機能材料の主要部分は、平衡状態下での均一な構造を基盤としており、その枠組みにより規定される物性が基本特性を決定している。そこでは静的に安定した構造が基本的な概念とされてきた。従来型の物質を利用した機能素子設計では、この考え方が十分に有効な指導原理であったが、その反面で、ある種の物質に秘められている動的な構造と、それがもたらす多彩な物性とその機能の可能性を見通す事を妨げてきた。この障害を乗り越えるべく、「変化」し「揺らいでいる」物質の構造や状態が本質的な役割を担う場である「非平衡状態」において、物質の特性やその発現機構解明を行おうとする、「非平衡物質科学」とも呼べる新規な物質科学領域の創出の試みが、今まさに始まっている（図1参照）[1, 2]。この非平衡物質が特性を発揮する機構をナノスケール・オングストロームスケールの検索法で理解し、制御しようとする試みの一つがまさに本スクールの主題とする「励起ナノプロセス」である。

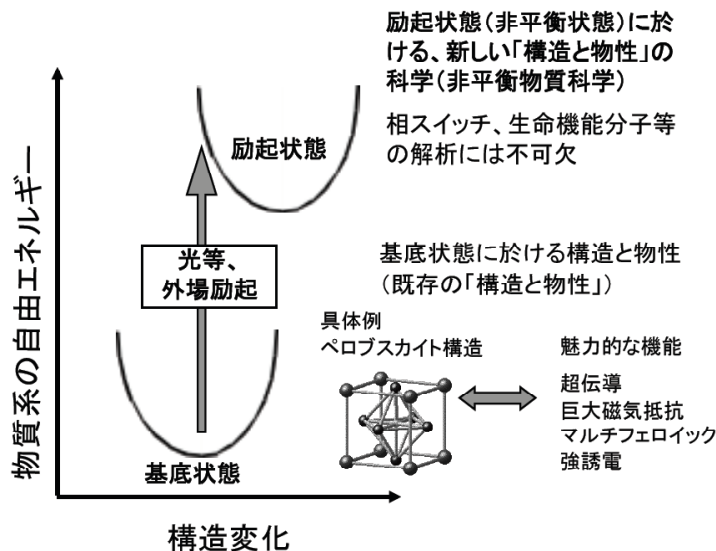


図1：非平衡物質科学と従来の物質科学の概念的違い[2]。

松井真二

兵庫県立大学高度産業科学技術研究所

〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-102 E-mail:matsui@lasti.u-hyogo.ac.jp

1. はじめに

現在の高度情報化社会を支えるパーソナルコンピュータや携帯電話機器は我々の日常生活にとって、不可欠のものとなっている。これらの最先端情報機器には、超微細加工によって製造された半導体デバイスが搭載されている。超微細加工は、半導体製造プロセスとして、1980年代以降急速な発展を遂げ、今では、ウイルスの大きさ（直径 100nm: ナノメートルは 10 億分の 1）よりも小さい 40nm の大きさの超微細構造をデバイスに組み込むことができるようになっている。この超微細構造形成プロセスに、電子ビーム露光が光露光用マスクパターン形成に用いられ、光露光で形成された基板上レジストをマスクとして、イオンビームを用いたドライエッチングにより、マスクパターンが基板へ転写される。さらに、マスク修正技術として、電子およびイオンビーム励起ナノプロセスが用いられている。このように、電子およびイオンビームを用いた励起ナノプロセスは半導体の超微細加工に重要な必須の技術である。

図 1 は、電子、イオン、光を用いた Top-down ナノ加工と高分子ブロック共重合体の自己組織化を用いた Bottom-up ナノ加工の現状を示している。直接描画技術である電子ビーム描画の解像度は 125kV 高加速を用いて 4nm のパターン形成が可能であり、また Ga イオン源を用いた集束イオンビーム (FIB) では、30kV 加速で 10nm パターン形成が可能となっている。さらに、最近 He ガス FIB が開発され、30kV 加速で 5nm のパターン形成も可能になっている。電子ビーム描画は、その高解像性および長期安定性のために、広くデバイス作製およびマスク描画に使用されている。FIB は長期安定性の確保が難しいために、マスク修正および透過電子顕微鏡の試料作製等に用いられている。転写技術としては、光露光とプレス加工であるナノインプリント技術がある。光露光は、光源の波長の短波長化、光源の照明系の工夫、近接効果補正、レジスト開発等によって、現在では波長 193nm の ArF 液浸露光により、32nm hp（ハーフピッチ）までの露光が可能になっている。22nm hp 以降では、波長 13.5 nm の極端紫外線露光 (EUV) 実用化されつつある。ナノインプリント技術は、1995 年に現プリンストン大の Chou 教授によって提案され、10nm の微細パターン転写を実証した。現在では、11nm の半導体パターン転写、2nm のナノチューブパターン転写も実証され、基本的に解像度がモールドの解像度によって決定されることが明らかになっている。光露光は 4 分の 1 縮小ステップを用いており、マスク上のパターンサイズは転写パターンの 4 倍であるが、ナノインプリントは等倍転写であるために、マスク作製の難易度は高い。

高分子ブロック共重合体の自己組織化を用いた Bottom-up プロセスは長年研究が行われてきたが、長周期でのパターン規則性の不安定のために実用化が困難であった。最近、パターン加工した基板上に自己組織化させる、グラフォエピタキシ法、および基板上に表面エネ