

猪俣 浩一郎  
INOMATA Koichiro黒部 篤  
KUROBE Atsushi

半導体集積回路や磁気・光記録技術は、21世紀を迎えさらに高集積化・高密度化が期待されているが、半世紀近くにわたる微細化の歴史を経て、今やナノメートルの世界にたどり着きつつある。10年から15年後には旧来の素子動作原理は破たんすると予想され、質的に新しい技術が望まれている。しかしその道筋は見えていない。

ナノメートル領域は、今まで経験したことがないような新たな現象が生みだされる宝庫でもある。電子の波動性やクーロン反発力などとともにスピン効果も顕在化してきており、21世紀の革新技術につながるシーズを模索して、ナノ領域デバイスの提案と試作が活発に行われている。

Microelectronics and storage technologies are expected to continuously provide larger integration and higher density into the 21st century. This means that devices will inevitably have to be shrunk down to the nanometer scale in the near future, when today's devices will cease to function as they are designed to work in bulk materials. New device concepts will be required at that time, but they are still uncertain.

Quantum mechanical phenomena emerge on the nanometer scale, including the wave nature of electrons, Coulomb interaction of individual electrons, and spin-dependent effects. This paper provides an overview of research into nanometer-scale devices which take advantage of these quantum effects.

## ■ ナノ領域研究の背景

半導体を基盤とするエレクトロニクスは、1947年のトランジスタの発明以来、IC、LSI、超LSIへと、シリコン素子の微細化・集積化とともに発展してきた。しかし、素子寸法が1ミクロン(μm: 1mmの千分の一)を下回り、ナノ(nm: 1mmの百万分の1)を単位とする寸法を議論し始めるようになった今、素子動作原理の限界が見え始めた。これを打破するためには、まったく新しい動作原理が必要である。

このような潮流は磁気や光を利用した記録技術にも出現している。ハードディスク(HDD)や光ディスク(ODD)はすでにギガビット(10億ビット)時代を迎えており、数十ギガビットを超えるあたりから、従来とは質的に異なる新しい技術が必要になると言われている(図1)。

一方、微細加工技術の進展は目覚しく、厚さ方向の積層技術と横方向の加工技術とを組み合わせて、ナノ

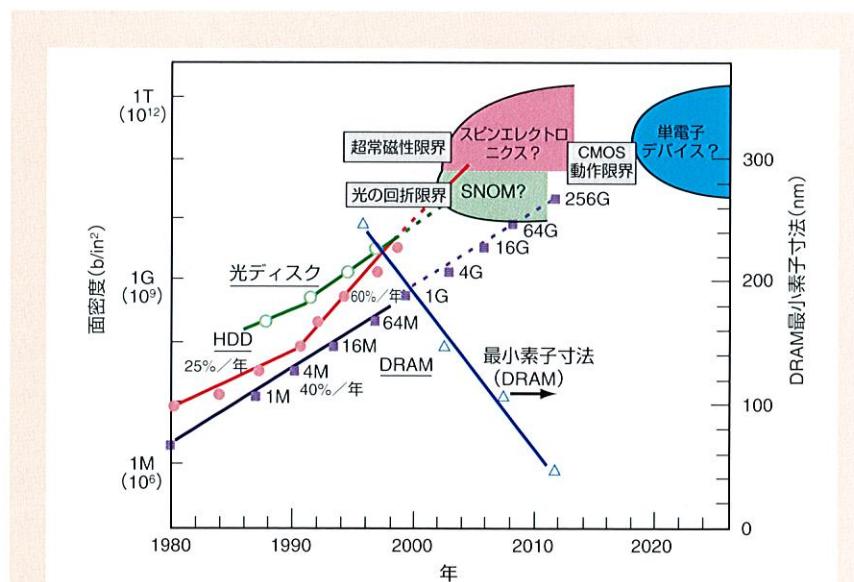


図1. 半導体メモリおよび磁気・光ディスクの記録密度のトレンド 半導体メモリおよび磁気・光ディスクの記録密度は、21世紀初頭に迎えるナノ領域のビットサイズになると物理的限界をきたし、新しい原理に基づくデバイスが要求される。

Trends in DRAM, HDD, and ODD recording density

寸法の三次元的な人工構造物が作製できる。固体をナノ領域まで小さくすると、通常われわれの目にふれる世界とは異なった物理法則が現象を支配するようになる。電子は、“粒”

ではなく“波”的性質が顕在化し、トンネル現象などのいわゆる量子効果が見えてくる。

大きな固体を物理的に加工してナノ構造を作製するのとは一味異なっ

## ■ ナノ領域と量子現象

ボールを壁に向かって放り投げれば、放物線を描いて飛んでいく。そして、壁に当たれば跳ね返されて戻ってくる。こんな何でもないことが、原子や分子のようなきわめて小さな世界では成り立たない。

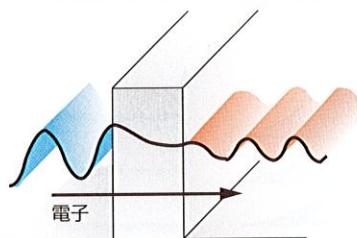
われわれが目にする物体の運動は、りんごの落下から月の運動まで、天才ニュートンが17世紀に集成した古典力学に従っている。しかし、古典力学は原子や分子の世界では成り立っていないことが発見され、古典論を超える理論が今世紀初頭に打ち立てられた。量子力学である。

先の例では、もしもボールが電子であって、量子力学の世界の話であったなら、ボールは、何回かに一度、反射されることなく壁を突き抜けてしまう。これが、有名なトンネル現象である。

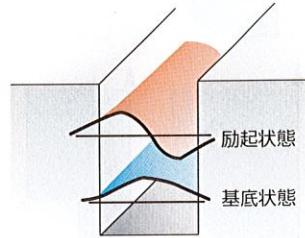
トンネル現象の不思議なところは、壁を突き抜けることだけではなく、何度も一度、確率的にたまたま起こることにある。これは、電子が“粒子”であると同時に“波”でもあるから、と量子論は教える。

電子波とは、電子の“存在確率”を与える数学的表現のことを指し、“波動関数”とも呼ばれる。トンネルでは、波動関数が障壁に侵入して裾を引くために、壁の向こう側にも電子が存在するのである(図(a))。

私たちになじみのある波に、ギター



(a) トンネル現象



(b) 量子サイズ効果

などの弦の波運動がある。弦を弾くと音ができる。弦を弾く強さや弾く位置を変えると、音色が変わる。基本振動、倍振動、…といったとびとびの振動数が励起されるからである。

これと類似のことが電子波でもできて、“量子サイズ効果”と呼ぶ。図(b)のように、電子をきわめて狭い空間 (“量子井戸”)に閉じ込めるだけでよい。すると、弦の音色がとびとびなように、電子のエネルギーも離散的になる。

このように、エネルギーが連続的ではなくて離散的になることを“量子化”と呼ぶ。最低の量子化工エネルギー準位は“基底状態”，それ以外は“励起状態”と呼ばれる。

さて、上の例からもわかるように、固体中で量子現象が顕在化するのは、構造の寸法が電子の波長程度に小さい場合である。ところで、電子の波長は、材料によって違っている。それは、固

体中の電子”が“本当の電子”ではないことに一因がある。

固体に量子論を適用すると、電子はブロック状態と呼ばれる、結晶の周期性を反映した状態になる。この状態の性質は、低エネルギーで、自由運動する粒子と同じになる。そこで、この見かけの粒子を“固体中の電子”とみなすのである。

この電子の質量は、真の電子の質量とは異なるので、“有効質量”と呼ばれる。有効質量の値は材料に固有だが、一般には真の値よりも軽い。たとえば、GaAs 化合物では真の電子質量の 6.7%である。

固体中の電子の波長を有効質量を用いて計算すると、1ミリの100万分の1、すなわちナノメートル(nm)の単位を用いた領域にある。言い換えると、0.1nm から数十 nm の寸法の構造が、固体での量子現象の舞台になっている。

たアプローチもある。分子1個はすでに量子の世界にあるが、化学的に、数百、数千の分子を集合体化し、分子にはない新たな性質をナノ構造で目ざす研究である。ナノ領域はこれら二つの研究分野が交差する領域であるとも言える。

この特集では、ナノ寸法で初めて発現する現象を取り上げた。デバイスへの応用可能性も含めて、当社独自の研究成果の一端を、半導体、磁性体、有機について紹介している。

ここでは、半導体、磁性体の分野を中心に、ナノ領域の先端研究の動

向を概観することで、この特集の技術背景を紹介する。

### ■ ナノ領域は新舞台

98年10月14日の新聞各紙はノーベル物理学賞を報じていた。「分数電荷の励起が存在する量子流体の新しい状態の発見」の功績で、ラフリン、シュテルマー、ツーイの3氏の受賞である。

受賞の対象となった現象は、“二次元”電子系で発見された。二次元電子系は、ナノ構造半導体研究のさ

きがけとなった系である。そこでは、電子の次元性と電子波の制御が深くかかわっている。

電子が波であるとすると、1個1個の電子をつかむことは原理的に不可能である。そこで、電子の“居やすい場所”を空間的に作り、そこに電子を閉じ込めることにする。

電子閉じ込めの典型的な半導体構造は、GaAs薄膜の両側をAlGaAs膜でサンドイッチした構造である。GaAsはAlGaAsよりも電子親和力が大きいので、電子はGaAs層に“落ち込む”。GaAs層を10nm程度ま

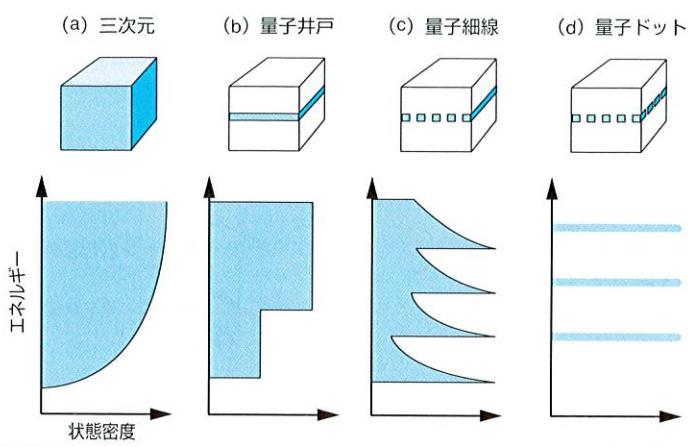


図2. 自由電子の次元性と状態密度 低次元化とともにバンド端の状態密度が大きくなる。(a)三次元(バルク), (b)二次元(量子井戸), (c)一次元(量子細線), (d)ゼロ次元(量子ドット)

Density of states of free electrons at various dimensions

で薄くすると、量子サイズ効果(図み記事参照)が起こる。

この構造では、閉じ込め効果は GaAs層に垂直方向にだけ働き、電子は層面内では自由運動する。そのため二次元電子系となる。

このような量子閉じ込めを、二次元面内方向にも行うと、量子細線(一次元)、量子ドット(ゼロ次元)が達成できる。このようすを図2に模式的に示した。

次元の低下で、状態密度(単位エネルギー当たりに存在する電子状態の数)が変化する。これは後でみると、光素子応用上重要である。

たとえば、二次元系を例にとると、同じ量子化準位であっても、二次元面内ではさまざまな運動エネルギーをもった電子が存在する。これらの電子の集まりを“サブバンド”と呼ぶ。おののおのの二次元サブバンドの状態密度はエネルギーによらず一定なので、量子化エネルギー位置でサブバンドの出現に応じたステップ状の状態密度になっている。

さらに次元が下がると、運動の自由度がさらに小さくなるため、各サブバンドの状態密度が量子化エネルギー近くに集中してくる。究極の量

子ドットでは、量子化エネルギー準位は完全に離散化する。

## ■半導体におけるナノ領域の研究

### ■半導体集積回路はナノ領域に突入

電子産業は60年代以降に飛躍的な発展を遂げた。ここでの半導体デバイスのチャンピオンは、産業の米と言われるシリコン集積回路である。現在に至るまで、素子を継続的に微細化することで、集積度と性能を一緒に向上させてきた。47年にトランジスタが発明されたときは約75 μmであった最小素子寸法が、今では約0.25 μmと、実に300分の1の大きさに縮小されている。

このトレンドは将来も続くと信じられており、2012年の集積化素子の最小寸法は50nmに達し、DRAM集積度は256Gビットであると予想されている(図1)。このようなすさまじい半導体の比例縮小化の歴史において、量子論の役割は大きくなかった。電子の質量を有効質量に置き換えれば、素子動作原理の本質的な部分は古典論による解析でほぼ尽きて

いると言えるであろう。

今後2012年頃までは、この指導原理は大方で変わらず、量子論の修正を受けつつも古典論による動作原理が生き残るとの見方が一般的である。しかし、その先のシナリオは混沌として見えていない状況である。ナノ領域での量子現象を陽に用いる新たな動作原理が必要になる可能性がある。唯一はっきりしているのは、21世紀初頭にナノ領域に本格的に足を踏み入れることだけである。

### ■二次元ナノ半導体素子はすでに身近な商品に

シリコンで集積化が進められたここ四半世紀に、化合物半導体を用いた構造で、種々の量子効果の発見がなされた。端緒は、69年の江崎氏たちによる超格子で、70年代には本格的な基礎研究が進み、昨年のノーベル賞の対象となった分数量子ホール効果が82年に発見された。

二次元半導体素子の応用展開は、70年代にはその原型が生まれて、80年代には洗練され、90年代に製品となって登場し始めている。

ここでは、紙面の都合で、代表的な例を、光素子と電子デバイスで一つずつ紹介する。CDの光ピックアップ用の半導体量子井戸レーザと、携帯電話の低ノイズ増幅器などに使われているHEMT(高電子移動度トランジスタ)である。

量子井戸レーザとは、電子と正孔とが発光再結合する活性層に量子井戸を用いたものである。

図2の状態密度からわかるように、三次元よりも二次元の状態密度はバンド端で大きくなる。したがって、電子と正孔は、より狭いエネルギー範囲に充満でき、発光線幅が狭くなる。その結果、発振に必要な電流密度が1けた程度減少し、より低消費電力のレーザが実現できる。

HEMT素子は、GaAs/AlGaAsヘテロ接合のAlGaAs障壁層に不純物

の添加を行った(変調ドーピング)構造である。不純物から供給された電子はGaAs層に流れ込み、AlGaAs障壁層の帶電したドナーに引き寄せられて、ヘテロ界面に二次元伝導チャネルを形成する。

変調ドープ構造により、不純物と伝導チャネルが空間的に分離されるために、高い不純物濃度まで電子数を増やしても、移動度が高いという大きなメリットがある。

### ■三次元ナノ構造は極限の光素子を生む

二次元系は今でも研究され、さまざまな物理や応用展開が議論されているが、最近ではゼロ次元系の研究が盛んになっている。まだ摸索期にあるが、化合物半導体だけでなくシリコン材料への広がりもしてきた。

ゼロ次元系素子の実用化はまだ先である。しかし、図2のように状態密度が完全に離散化するため、レーザに応用すれば、さらに低いしきい値になるはずである。光学非線型素子応用などにも可能性が広がる。

無損傷な量子ドットを作る簡単な方法に、SK(Stranski-Krastanov)モード成長が知られている。基板と格子定数が異なる薄膜の成長を行うと、数原子層の平坦成長(“濡れ層”)後にドットが自己形成される。成長膜の歪(ひずみ)エネルギーが表面エネルギーを上まわるからである。

この方法で量子ドットレーザが試作されているが、量子井戸構造を凌駕していない。寸法揺らぎがまだ大きく、発光線幅が大きいためであり、均一で高密度の量子ドット作製技術が必要である。

しかし、ドットが不均一であることを逆に利用して、メモリに応用しようとの提案がある。入射光の波長に応じた量子ドットだけを光励起するものである。最大の問題は、書き込み情報の読み出しにある。

発光素子は、GaAsなどの化合物

半導体の独壇場であった。SiやGeは、いわゆる間接遷移型の範囲に入り、光との相互作用がきわめて小さいため発光素子が作れなかつた。

しかし、量子ドットではこの常識が覆されている。Siドット(Siナノクリスタルとも呼ばれる)では、電子と正孔が同じ位置に閉じ込められるため、発光強度が増大する。その発光機構はまだ不明な点があるが、Si集積回路とSi発光素子との集積化も夢ではない。

### ■電子間の反発力が单電子素子の動作原理

ゼロ次元系の電子素子は、従来の半導体集積回路が破たんすると予想される先、つまり、2012年以降を念頭において研究が進められている。そこで主役は、電子の素電荷によるクーロン反発力である。

電子が比較的自由に動けるときは、電子同士が避けあって運動できるが、量子ドットのように同じ場所に詰め込まれると、クーロン反発力が大きくなる。これをを利用して、電子1個1個に敏感な素子(单電子素子)，を作ることができる。

ナノ構造ではあるが、この効果は、量子化準位の形成よりもナノ構造の帯電エネルギーの方が重要である。その意味で、電荷島とも呼ばれる。電荷島では電子数がほぼ確定している必要がある。そこで、外界からある程度孤立させるために、外界との電子のやりとりにはトンネル障壁を用いる。

集積化Si素子であるMOSFET(MOS型電界効果トランジスタ)は、ソース電極—伝導チャネル—ドレイン電極が一列に並んでおり、チャネル上のゲートで電流を制御する(図3(a))。伝導チャネルを電荷島に代えて、電荷島とソース電荷島とドレイン間にトンネル障壁を設ければ、单電子トランジスタになる(図

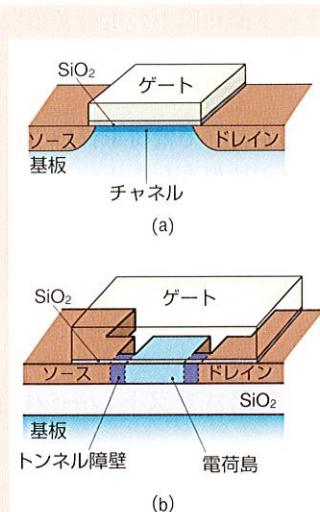


図3. MOSFETと单電子トランジスタの模式図 MOSFETの伝導チャネルを電荷島に代えることで单電子トランジスタとなる。(a) MOSFET, (b)单電子トランジスタ。縮尺は任意。

Comparison of MOSFET and single-electron transistor

3(b))。したがって、構造的にはMOSFETに似た構造である。

電荷島をナノ領域まで小さくして、静電容量が $aF(10^{-18}F)$ 程度まで小さくなると、ソースから1個の電子を電荷島に移すのに約80meVのエネルギーが必要になる。したがって、ゲート電圧で電荷島の電位を下げないと電流は流れない。この現象をクーロンブロッケイドと呼ぶ。

单電子トランジスタは、電子が数個で動作するので消費電力が抑えられる。また、小さい構造のほうが動作温度が上がって有利、クーロンブロッケイド効果によって輸送電子数の揺らぎの問題が回避できるなどの利点がある。

これらの利点は、発熱の問題などの集積回路の破たん要因の一部を解決する可能性がある。しかし、不純物などの影響を簡単に受けてしまうことや利得が得られないなどの課題が山積しているのが実状である。

さらにSiナノクリスタルを用いた单電子メモリも試作されている。基本構造はフラッシュメモリと同じ

で、ゲート酸化膜中の電荷蓄積層をナノクリスタルに代えたものである。

複数の電荷島で電荷を保持するので信頼性が確保されやすい、クロンブロックエイド効果で多値メモリが可能になるなどのメリットが指摘されている。

## ■ ナノを目指すストレージ技術

パソコンの外部記憶装置やディジタルビデオディスク(DVD)などの情報記録装置(ストレージ)には、現在、主としてHDDやODDが使われている。これは高速で回転する円盤(ディスク)上に、磁気やレーザ光を用いて記録・再生するものである。

磁気記録は磁石材料で構成されている磁気記録媒体の上に、音声、画像、コンピュータなどの情報の信号波形に対応して記録し、記録された媒体から信号を読み出し、情報を再生するものである。記録される情報量の最小単位は微小磁石であり、磁性粒子の集合体である。

一方、光記録にはCDなどに用いられている、非晶質と結晶質の反射率の違いを利用した相変化媒体や有機色素媒体を用いるものと、ミニディスクなどに用いられている光磁気記録媒体を用いるものがある。

今後、コンピュータ、音楽、映像などが一体化した本格的マルチメディア時代を迎えると、ストレージには大容量化、高密度化、高速化などの技術革新がますます要求される。

## ■ 高記録密度化の動向

図1のように、HDDやODDの高密度化は、これまで年率20~60%という驚異的なトレンドで増加の一途をたどってきた。現在、記録密度のもっとも高いものは、HDDの面積1平方インチ当たり4Gビット( $4\text{Gb/in}^2$ )であり、2000年に $10\text{Gb/in}^2$ 、2003年には $40\text{Gb/in}^2$ の記録密度が達成され

る勢いである。しかし、このトレンドにも限界が見えはじめてきた。

記録密度がこれ以上になると、1ビットの大きさが $0.1\text{ }\mu\text{m}$ を下回り、現在の磁気記録方式ではビットを構成する磁性粒子が小さくなりすぎ、磁石が熱運動に負けて記録を安定に保持できなくなるからである。これは超常磁性限界と呼ばれている。

一方、光記録では、記録密度が数十 $\text{Gb/in}^2$ 以上になると、記録ビットの大きさがレーザ光の波長以下になり、読出しができなくなってしまう(光の回折限界)。

このような物理的制限によって、 $40\text{Gb/in}^2$ を超える当たりから現在の技術の延長では高密度化の限界が予測されている。そのため、これを克服するための新しい技術が、いろいろ研究されている。

磁気記録では、媒体を革新することで、超常磁性限界を $100\text{Gb/in}^2$ 程度まで延ばす研究がなされている。この記録密度になると、記録ビットの大きさはナノ領域に入ってくる。光記録では、光の回折限界を克服するため、それによらない光学現象を利用する方法として、走査型近接場光顕微鏡(SNOM: Scanning Near-field Optical Microscopy)を用いる方法が研究されている。

光が物質に照射され全反射すると、物質表面にはエバネッセンス波と呼ばれる近接場光(表面波)が生じる。近接場光の強度は、物質表面から離れる程急激に減少し、減少の度合いは光の波長に依存しない。SNOMはこの性質を利用したものである。

SNOMでは通常、光ファイバを先鋭化させて作製した、光波長より小さい開口をもつ探針を、媒体に対し $10\sim20\text{ nm}$ の距離に近接させる。記録は、探針からレーザ光を照射し、開口からしみ出るエバネッセンス波で行う。読出しへは、エバネッセンス波が媒体に反射され、回折光として

自由空間に放出される反射波を、対物レンズと光電子倍増管を用いて行う。

記録、再生の空間的分解能はエバネッセンス場の体積、したがって探針先端の寸法で決まり、光の回折限界を超える高密度記録が可能で、原理的にはテラ( $10^{12}$ ) $\text{b/in}^2$ も可能である。これまで $200\text{Gb/in}^2$ (ビット径 $50\text{nm}$ )程度の記録密度の可能性が実験で示されている。しかし、微小開口からの近接場光の伝達効率が低いため検出光量が小さく、高速書き込みや読出しが実現されていない。

## ■ 要求される高速読出し

HDDやODDでは面記録密度の向上に伴い、データ転送速度も早くなっている。HDDの最大転送速度は現在 $200\text{Mb/s}$ 程度、ODDはそれより約1けた劣る。転送速度は線記録密度とディスクの回転速度で決まるが、それには限界があり、HDDの転送速度は $20\text{Gb/in}^2$ の記録密度の場合、 $400\text{Mb/s}$ 程度と予測される。

本格的なマルチメディア時代には大量の情報を扱うため、高密度化と並んで読出しの高速性がきわめて重要になる。したがって、21世紀には従来とは原理を異にする、基本的に高速性を備えた新しい高密度ストレージが要求されるであろう。そのシナリオはまだ描けてないが、ナノ領域で初めて発現する現象を利用する事になるかもしれない。

## ■ ナノ領域の新しいパラダイム —スピニエレクトロニクス—

電子は電荷とスピンをもっており、スピンには上向き“↑”と下向き“↓”の2種類がある。半導体電子デバイスは電荷輸送だけを利用している。一方、強磁性の起源は電子スピンにあり、先に述べた磁気記録は磁石というマクロな集団的電子スピンの秩序を利用している。

これまで磁性体の電子伝導が注目されることはあまりなく、半導体デバイスにスピニが利用されることもなかった。これはスピニを利用せずとも、必要とされるデバイス機能を十分実現することができたし、スピニを利用しようにも電子が伝導する間にスピニが緩和して向きを変えてしまい、↑スピニ電子と↓スピニ電子を区別して制御することができなかつたからである。

電子のもつ二つの自由度、スピニと電荷を制御し、それを積極的に利用しようという技術領域をスピニエレクトロニクスと呼んでいる。この分野はまだ研究の歴史が浅く、以下に述べる巨大磁気抵抗(GMR: Giant Magneto-Resistance)効果の発見(88年)以降、特に研究が盛んになってきた。次に、これまで見出されている、スピニを利用した電子現象と機能をいくつか紹介する。

### ■スピニ依存散乱とGMR

電子の平均自由行程は、金属の場合およそ数十nmである。したがって、系の大きさがnmになると、金属中の伝導電子は運動量を保存したまま、試料全体を移動することができる。試料が磁性体の場合にはさらにスピニの効果が顕在化する。

今、図4のように非磁性体の上に強磁性体からなる二つの電極を設け、その間に電流を流す。強磁性体

では伝導を担うフェルミ面での↑スピニ電子と↓スピニ電子の数が異なる(スピニ偏極と言う)ので、スピニ偏極した電子が一方の強磁性体から非磁性体に流れ込み、非磁性体は非平衡的磁性体になる。これをスピニ注入と呼ぶ。

通常、非磁性体中で伝導電子のスピニが緩和して向きを変えてしまう距離(スピニ拡散長)は、平均自由行程よりも長いことが知られている。したがって、電極間距離がnmサイズのとき、スピニは緩和することなくそのまま他方の強磁性電極に流れ込む。このように、nm領域では電子はその運動量とスピニを保存したまま伝導でき、スピニに依存した伝導現象が観測可能になる。

これは、人工的にnmサイズで構造を制御した物質を作製すれば、その構造を反映した伝導現象が観測されることを意味する。

例えば、nmサイズで膜厚を制御した、磁性金属と非磁性金属からなる金属人工格子では、磁性金属のフェルミ面での状態密度が↑スピニ電子と↓スピニ電子で異なるため、界面で伝導電子の受けるポテンシャルがスピニに依存する。すなわち、伝導電子のスピニが磁性体の磁化と同じ向きのときの界面でのポテンシャルは、逆向きの場合に比べて小さく、前者の方が散乱を受けにくい。

このことは、外部から磁場を印加して磁性体の磁化方向を制御すれば、それを反映して界面でのスピニに依存した散乱現象が、磁気抵抗として観測されることを意味する。これがGMR効果である。GMRは発見から10年後の98年、HDDの磁気ヘッドに実用化され、高密度化に貢献している。

### ■スピニ依存トンネルとTMR

電子のスピニを反映した伝導現象にはもう一つ、強磁性トンネル効果が知られている。nm厚の薄い絶縁

層を二つの金属層でサンドイッチし、その間に電圧を印加すると、電子の波の性質を反映してトンネル電流が流れることは先に述べた。

金属が強磁性体の場合にはフェルミ面での状態密度がスピニに依存するため、トンネルする電子の数がスピニによって異なる。また、トンネルする際、通常、スピニの向きは変わらないことが知られている。したがって、二つの強磁性層の磁化が互いに平行な場合と反平行な場合とで、強磁性体の状態密度を反映してトンネル電子のコンダクタンス(抵抗の逆数)が大きく異なる。

この性質を利用して、二つの磁性層の磁化を外部磁場で互いに平行あるいは反平行に制御すれば、抵抗が大きく変化し、トンネル磁気抵抗(TMR: Tunnel Magneto-Resistance)を得ることができる。その大きさは磁性体の種類に依存するが、理論的には50%以上が可能である。

TMRは75年にすでに知られていたが、当時は値が小さく注目されなかった。注目されるようになったのは95年に室温で抵抗変化18%が報告されてからである。当社では後述するように97年、トンネル障壁を二つ備えた二重トンネル接合素子の開発に成功した。これを用いると将来、スピニ依存共鳴トンネル効果素子など、新しいスピニ機能3端子デバイスが期待される。

### ■半導体スピニの利用

スピニに依存した伝導はGMRやTMRなど金属磁性体のほか、これまで電荷しか利用してこなかった半導体でも注目されるようになってきた。その一つが強磁性体から半導体へのスピニ注入である。

InGaAsとInAlAsを用いてその界面に二次元電子系を作り、二つの強磁性電極(ソースとドレイン)間に電圧を印加してスピニ注入する。注入されたスピニ偏極電子は、界面電界

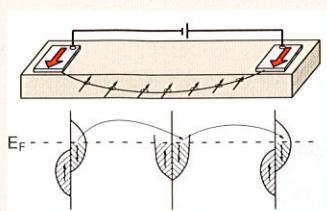


図4. スピニ注入 数十 nm の素子サイズでは、一方の磁性電極から非磁性体に注入されたスピニは緩和することなく他方の磁性電極に到達できる。

Spin injection

に起因するスピン軌道相互作用(スピンの向きが電子の軌道運動に支配される作用)によって、伝播中にスピンの向きを変え得ることが、90年に理論的に示された。

この構造で、二つの強磁性電極のスピンの向きを同じにしておけば、注入された電子のスピンが $\pi$ だけ変化すると伝播が抑えられ、 $2\pi$ だけ回転して元に戻ると伝播できる。スピンの回転角は、第三のゲート電極を設け、その電圧によって制御することが可能である。このデバイスはスピンFETと呼ばれている。磁性体と半導体の界面を制御して素子を作製するのが難しいため、このデバイスはまだ実現していない。

半導体におけるスピンの効果は光の現象にも現れる。GaAs/AlGaAsなどの量子井戸構造では基底状態のエネルギー準位がスピンによって分かれしており、これに円偏光を照射すると一方のスピン(例えば↑スピン)をもったキャリア(電子と正孔)だけが励起する。

励起した↑スピンのキャリアは時間とともに、一部が↓スピン状態に緩和し、↑、↓スピンのキャリアが半々になったところで平衡に落ち着く。このときの時間は数十ピコ( $10^{-12}$ )秒と速く、この性質を利用し

て、ピコ秒の高速で動作する全光学的光スイッチが95年に試作されている。繰返し動作に問題があるが、スピン緩和の利用を模索する興味深いデバイスと言える。

半導体に磁性の性質をもたせようとする研究も行われている。希薄磁性半導体(DMS)がそれである。これはGaAsやInAsなどの半導体中のGaやInの一部をMnで置換したもので、強磁性が発現し半導体と磁性体の性質を兼ね備えている。97年、低温であるが、光を当てると強磁性になる、(In,Mn)As/GaSbヘテロDMSも発見されている。

### ■スピンエレクトロニクスへの期待

スピンエレクトロニクスはナノ領域で初めて発現する、スピンに依存した電子現象や機能を利用するもので、スピンと伝導、スピンと光の結合がキーワードになる。この分野は上述したように、豊富な物理現象や、半導体と磁性体のもつ相補的な性質ゆえに、次々と新しい材料系やデバイス構造の提案を生み続けている、ダイナミックな研究分野と言える。21世紀の電子産業を支える、革新的な電子デバイスの実現を可能にしていくものとして期待されている。

最後に、スピンエレクトロニクス

の概念、ならびにスピンを利用した電子現象と機能、期待されるスピン機能デバイスをまとめて図5に示しておく。MRAM(Magnetic Random Access Memory)はGMRやTMRを利用した不揮発固体磁気メモリ、スピントランジスタ(90年提案)はスピン注入を利用した、金属だけからなる3端子デバイスである。

### ■ナノ領域研究の意義

半導体デバイスの基本となるトランジスタは50年前、磁気記録は100年前に発明されている。この間、それぞれの技術は大きく進歩したが、その基本原理は変わっていない。

真空管からトランジスタになってエレクトロニクス社会へと世の中が一変したように、大きな技術革新は従来技術の延長ではなく、質的に異なる物理現象から生まれる。ナノ領域の研究に期待されるのは、まさにそのようなロードマップのない革新的なシーズの探索であり、筋の良い新しいデバイスの提案である。当社ではそのような研究を目指して、基礎的に取り組んでいる。

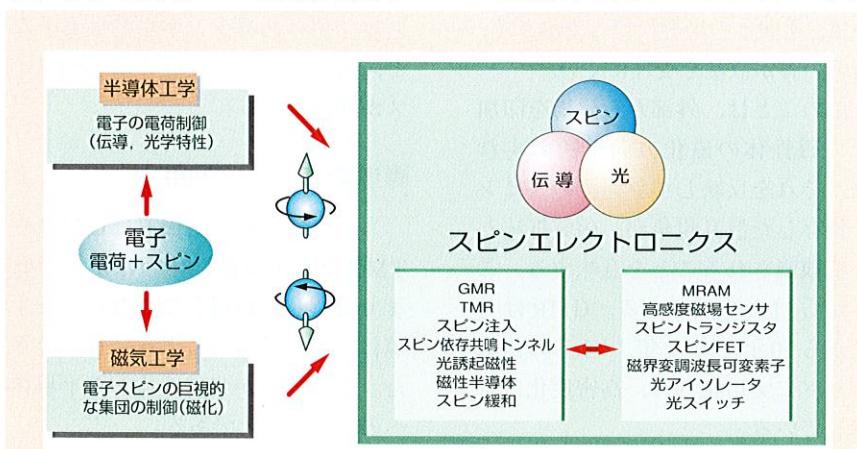


図5. スピンエレクトロニクスの概念と期待されるデバイス　スピンエレクトロニクスはナノ領域で初めて発現する、スピンに依存した電子現象や機能を利用するもので、スピンと伝導、スピンと光の結合がキーワードになる。

Concept of spin electronics and expected devices



猪俣 浩一郎  
INOMATA Koichiro. D. Sc.

研究開発センター 首席技監、理博。  
磁性材料・薄膜の研究に従事。  
日本物理学会、応用物理学会、日本応用磁気学会、電気学会、日本金属学会会員。  
Research and Development Center



黒部 篤  
KUROBE Atsushi. Ph.D.

研究開発センター 基礎研究所研究主幹、理博。  
低次元系半導体電子デバイス・光デバイスの  
研究に従事。  
日本物理学会、応用物理学会、英國物理学会、  
米国光学会会員。  
Advanced Research Laboratory