

メソスコピックエレクトロニクスの展望

生駒 俊明*
Toshiaki IKOMA

1. はじめに

微細加工技術の進歩によって、半導体デバイスの寸法は年々微細化され、現在ではナノメートル (nm) のオーダーの構造を作ることが可能となっている。この手法は、何も半導体にものみ適用されるのではなく金属や絶縁物の加工にも応用され、種々の異なった材料を組み合わせ、新しい材料系 (ヘテロ電子材料とも呼ばれる) をナノメータのオーダーで任意の形に加工することが可能である。一方半導体の純度の向上も著しい。そのため分子線エピタキシャル成長 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 法を用いて成長される III-V 族化合物半導体の 2 元系, 3 元系あるいは 4 元系混晶を組み合わせ得られるヘテロ界面に蓄積された二次元電子の移動度は著しく向上し、極低温においては、 $10^2 \text{m}^2/\text{Vs}$ 以上のヘテロ電子材料がルーチン的に得られるようになった。このような試料中では、電子は $10\mu\text{m}$ 程度も散乱されずに進行する。したがって固体中でも、電子は真空中と同様に振る舞い、その違いは周期的ポテンシャルの影響を受けて有効質量が小さくなっていることにあらわれる。

このような微細加工技術と結晶成長技術の進歩のお蔭で、われわれは、極微小な半導体デバイスを作ることができ、これらの極微構造のデバイス中では、通常の大い寸法のデバイスとはまったく異なった物理現象を観測することができる。これをメソスコピック領域の現象と呼ぶ。メソスコピックとはマイクロとマクロの中間という意味をもっている。マイクロな領域では、原子や分子のように、量子力学的に計算されるある物理量の期待値がそのまま観測にかかる。一方マクロな領域では、アンサンブル平均をとることにより、種々の物性を議論できる。メソスコピックな領域では、粒子 (あるいは量子) の数が充分大きくないためアンサンブル平均をとることができず、そのためマクロともマイクロとも異なった現象が発現する。

このような領域の物性は、従来基礎的物性として研究

が進められてきたが、極微構造や材料の性質の人工的制御が可能となってきたため、そのようなメソスコピック物性をエンジニアリングすることによって、新しいデバイスを実現させ、それをベースとした新しいエレクトロニクス分野を創出しようというのが「メソスコピックエレクトロニクス」である。

本領域は、高度なプロセス技術と結晶技術および基礎的な物性とデバイスの知識さらには微小領域の評価技術が必要とするため、大学と企業の研究機関との共同研究を推進するには、うってつけのテーマである。それは単に高度な技術を有する企業と基礎的知識を有する大学の研究者が補完的に研究を進めるという意味を持つだけでなく、現在の LSI の限界を越えるような新しい産業技術を生み出せる研究領域であるとともに、高度な技術を駆使して、物性物理のフロンティアを開拓する学問的意義の高い研究領域であることに由来する。

そのような訳で、1988年に複数の企業と複数の大学研究者との共同研究を開始した。1期3年で2期6年という研究計画を当初設定し、本年はその5年目に当たる。現在の研究組織は別表1に示すとおりであるが、主要なエレクトロニクス企業10社と物理および電子工学を専門とする4大学10名の教官からなるチームで構成されている。本共同研究は、大型基礎共同研究「メソスコピックエレクトロニクス」と名付け、毎月1回の研究会を開催し、ホットな研究成果を持ち寄ったインフォーマルな討論の場を持ち、又年1回泊まり込みで集中的な議論をするための勉強会を開催している。また1990年には東大シンポジウムを開催して、中間成果報告を行った。

本特集号は、その研究成果の一部を報告するものである。

2. メソスコピックエレクトロニクスの特徴

メソスコピック領域の物性については、本特集号の以下の論文に詳しく述べられているが、エレクトロニクスとしての観点からその特徴を抽出すると次の4つになる。

*東京大学生産技術研究所 付属機能エレクトロニクス研究センター

表 1 大型基礎共同研究の研究組織

大学側		
生駒 俊明	東京大学生産技術研究所	教 授
古屋 一仁	東京工業大学工学部	教 授
伊澤 義雅	広島大学工学部	助教授
福山 秀敏	東京大学理学部	教 授
安藤 恒也	東京大学物性研究所	教 授
蒲生 健次	大阪大学基礎工学部	教 授
小宮山 進	東京大学教養学部	教 授
家 泰弘	東京大学物性研究所	助教授
荒川 泰彦	東京大学生産技術研究所	助教授
平川 一彦	東京大学生産技術研究所	助教授
企業側		
大野 清伍	沖電気工業(株)研究開発本部 半導体技術研究所	主席研究員
林 秀樹	住友電気工業(株)研究所	主任研究員
河合 弘治	ソニー(株)中央研究所 光・機能デバイス研究部	主幹研究員
成瀬雄二郎	(株)東芝総合研究所 電子部品研究部	主任研究員
中村 和夫	日本電気(株)基礎研究所 新機能素子研究部	研究課長
平田 一雄	日本電信電話(株) LSI 研究所 量子デバイス研究部	部 長
宇佐川利幸	(株)日立製作所中央研究所 超高速プロセッサ部	主任研究員
横山 直樹	(株)富士通研究所 機能デバイス研究部	部 長
加納 剛太	松下電子工業(株) 電子総合研究所	所 長
竹山 哲	三菱電機(株)中央研究所 量子エレクトロニクス研究部	部 長

A. ゆらぎあるいは振動が本質的となる。

超微細構造 (10nm オーダ) をもつ量子ドット中の電子の数は100以下となるから、その数にゆらぎが生じ、それが観測にかかることは容易に想像される。しかし、そのような数のゆらぎのみではなく、次に述べる電子波の干渉効果のためにコンダクタンスにゆらぎが発生する。これをユニバーサルなコンダクタンスゆらぎ (Universal Conductance Fluctuation, UCF) と呼んでいる。さらに不純物や界面のラフネスに基づくポテンシャルのゆらぎが存在し、それに基づく電流やコンダクタンスの振動現象がしばしば観測される。

B. 単量子現象が観測される。

メソスコピックな系では、電子の数が少ないため、電子一個の変化が観測にかかる。電子一個の変化によるポテンシャルエネルギーの変化は $e^2/2C$ で与えられる。ここで C は静電容量で、 $e^2/2C > kT$ を満たすような低温では、外部から供給させるエネルギーがこの値を越えないと電子の移動が起こらず電流が流れない。これをクーロンブロッケードと呼ぶ。このため、電流-電圧特性は階段状となる (クーロン・ステアケース)。このような現象を観測するには、当然 C はきわめて小さくする必要がある。実際、10nm オーダの半導体量子ドットや金属-絶縁薄膜-金属の微小容量を形成してこのような現象が観測されている。またこのような量子ドットに三つの端子を設け、第3の端子で電子のトンネルによる放電を制御するシングルエレクトロントランジスタなども研究

されている。

C. 電子波の位相が保たれる。

メソスコピックな系では電子は波としての性質が顕著になる。特にある一定の距離以内では電子波の位相が保たれて伝播する。このため電子波は干渉し、弱局在や AB 効果などが観測される。また電子波の位相を制御した電子波デバイスが提案されている。このような系では、電子伝導体は電子導波路とみなされ、コンダクタンスを与える表式もマクロな系と異なり、波動伝播に対する S-マトリックスが適用される。この系での S-マトリックスに対応する表式は、IBM のランダウアによって初めて導入されたのでランダウア公式と呼ばれる。

D. 電子は無衝突で伝播する。

前述したようにきわめて純度の高いエピキシャル層を用いた選択ドープヘテロ構造では、電子は不純物や欠陥に散乱されることなく、バリスティック (弾道的) に伝導する。ただし温度が高くなるとフォノンと散乱が起きる。低温ではこのようなバリアスティック電子を利用した新しいデバイス実現の可能性がある。

以上の4つが、メソスコピック系の電子物性としての特徴である。この特徴を種々制御して新しい機能を持ったデバイスを実現させるのがメソスコピックエレクトロニクスである。

3. メソスコピックエレクトロニクス研究の意義

このような極微小な半導体構造の電子物性の研究は、新しい物理現象の発見と解明という研究者の好奇心を満足させるものであるが、もう少し産業技術的側面からの意義について考えてみると次のようになる。

A. 現在の ULSI は微細化高集積化が進められているが、技術的にも又物理的にもほぼ $0.1\mu\text{m}$ のトランジスタが限界であると考えられている。したがってその先を考える時、Si を用いた ULSI も必然的にメソスコピックな領域に入る。したがって Si を含めてメソスコピックの物性をよく理解しておくことは、従来の ULSI の限界を打破する上からでも重要である。この立場からは、むしろメソスコピックな領域でもマクロスコピックな性質をいかに持たせるかという研究になるかも知れない。また、ゆらぎが本質的なものとすれば、回路システム設計にそれを考慮した新しい手法を導入する必要が生じてこよう。

B. メソスコピックな現象を利用した新しいデバイスの実現は、最も望まれるところであり、すでに種々なデバイスの提案や実験的な試作が発表されている。一番の問題点は、電子波の可干渉長やバリステック長が温度の上昇とともに急激に減少することである。メソスコピックな物性は温度によるボケによって消滅してしまう。このような観点からは、いかにして高温までメソスコピックな特性を保持させるかという方向の研究が重要となろう。また一次元細線中の一つの電子波チャネルを用いる場合には電流値がきわめて小さく、実用的見地からは問題が多い。ランダウアが指摘したとおり、この種の実験はロックインアンプの技術を用いて低雑音下で測定しなければならないものであるから、即実用化を考えるのは難しい。しかしこの点に関しては種々な工夫によって克服できるのではないかと思われる。

C. メソスコピックな物性は、結晶の性質やデバイス構造、表面、界面に非常に敏感である。たとえば電子波が境界面で反射される場合、そのラフネスによって、反射波の性質が異なってくる。このような性質を調べることによって境界面のミクロな凹凸などを調べることができる。さらに積極的に微小な領域の物性を測定する必要があるため、走査型トンネル顕微鏡を種々な側面から利用することが考えられる。このような技術は即現在の ULSI やマイクロ波、ミリ波デバイスの研究開発に役立つものとなる。このように、メソスコピックエレクトロニクスの研究は、現在の半導体技術に大きなインパクトを与えるものと思われる。

以上は、メソスコピックエレクトロニクスを応用面から考えた時の効用である。

4. メソスコピックエレクトロニクス研究の4本の柱

以上述べたように、メソスコピックな物性に基づいたエレクトロニクスを発展させるためには、4本の柱がある。

A. メソスコピック物性の深い理解

2節に述べたような基本的な電子波の物性に基づいた新しい現象が種々観測されており、物性の基礎においてその理解が進んでいる。しかしこれからも新しい現象が見つかる可能性が大きい分野である。特にデバイス応用を考えた時は、外部へエネルギーを取り出す必要があるため、熱平衡からずれた系の物性の理解が必要である。現在のところは、平衡状態に近い系が主として調べられているので、今後は応用を考えた系の物性を研究する必要があるであろう。

B. 新しいデバイスの創出とシステム応用

2節で述べた4つの性質の中で、バリステックでコヒーレントな電子波を利用したデバイスの考案とその実現は最も夢のあるものであり、そのような研究開発プロジェクトが助新機能素子研究開発協会の主導のもとに始まった。真に実用化を目指すデバイスは、中途半端なものであっては駄目であり、はっきりとした指標のもとに研究開発を進める必要がある。今迄にもいくつかの新しいデバイスが提案されているが、まだ本命と思われるものはない。しかしこれらの種々な着想から、新しいエレクトロニクスが生まれる可能性を秘めており、この分野の研究をさらに活発化させる必要がある。また研究者人口をさらに増加させることも大事である。

C. ナノメートル領域におけるプロセス技術と高純度な完全結晶の成長技術

電子波の波長は数十ナノメートルであるから、ナノメートルの精度でデバイスをつくるプロセス技術の確立が、メソスコピックエレクトロニクスの実現には不可欠である。特に電子のバリステックな特性を利用するには、結晶欠陥、表面欠陥が導入されないクリーンな加工技術が重要となる。加工技術は、従来の電子ビームやイオンビームを細く絞って用いる方法（リソグラフィなど）と、原子を一つ一つ積み上げていってデバイスをつくる新しい技術がある。後者についても新しいプロジェクトが通産省の主導のもとに始まろうとしている。

さらに、欠陥や不純物の少ない結晶成長技術をさらに発展させる必要があるであろう。

D. 微小領域(メソスコピック領域)の物性評価技術
材料の微小な領域の物性を計測する技術を確立することも、メソスコピックエレクトロニクスにとってはきわめて重要である。これには、種々なビームを細く絞って材料に照射し、相互作用によって発生する種々な物理量を計測する方法がある。現在最も細く絞れるのが電子ビームである。また軽いイオンを表面に当て、極く表面に近い原子との相互作用を調べることによって表面の第一原子層の電子状態を調べる方法なども将来が期待される。

また最も原始的と思われる、金属針の先端を尖らせて物質表面に近づけ、そのトンネル電流や原子間引力を計測する方法(走査型トンネル顕微鏡など)は、この分野の研究に重要な研究手段となろう。このような微小領域の計測評価技術の研究は科学技術庁の推興調整費によって推進されている。

5. おわりに

メソスコピック・エレクトロニクスを概観し、その将来を展望した。冒頭に述べたように、この分野は未だ大変基礎的な研究段階にあって、本命と見られるデバイス応用が見えている訳ではない。しかしこの分野は、物性領域の基礎学問と技術・応用とが一体となって発展して行く分野であって、産官学の共同研究に丁度適した学問分野であるといえる。また半導体技術の将来を見る時、この分野の研究から新しい概念が創出され、次世代への産業技術が足がかりを得る可能性が高いと思われる。さらに多くの人達が有機的に協同して研究を進め、21世紀への新たな発展を期待する。

本共同研究を遂行するに当たりご尽力頂いた関係各位に感謝する次第である。(1993年1月7日受理)