



夢はバラ色

電子波デバイスに賭ける夢

難波 進*

1. 歴史的展望

トランジスタの発明とレーザーの発明は戦後の2大発明といわれており、それぞれ半導体エレクトロニクスとオプトエレクトロニクスの源流となっている。この2大発明がいずれも米国でなされたことは注目に値する。

この源流をさぐると1940年頃に行われた史上空前絶後ともいえる巨大プロジェクト研究の1つであるレーダの開発研究にさか上らざるをえない。米国は第2次世界大戦中、このプロジェクト研究に巨大な費用と優秀な人材を惜しみなくつぎこんだと思われる。戦後MITから出版された“Radiation Laboratory Series”という数10冊の書物は、このプロジェクト研究の報告書のようなものであるが、1960年頃まで日本のエレクトロニクス研究者のバイブルとも言えたことを思うと、この研究の深さと広がりがかがえる。

レーダとは、発射された短波長の電波が対称物（例えば戦艦）に衝突して反射して返ってくるまでの往復の時間を測定して、対称物への距離と方向を正確に求める装置である。最も重要な要素技術は2つあり、その1つは強力な短波長電波を作るための発振器であり、もう1つは反射して返ってくる弱い電波をSN比よく受信するための検波器である。発振器としてはマグネトロンやクライストロンの研究が、また検波器としてはSiやGeの研究が精力的に行われた。レーダの研究により急速に進歩したマイクロ波技術により、マイクロ波分光光学という電子工学と分光光学を結びつけた新しい研究分野が生まれ、

その研究の流れの中から、新しい短波発振器として1954年にMASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) が生まれ、1960年にLASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) が発明された。また検波器の研究はGe, Si表面の重要性を認識させ、表面の研究の流れの中から1947年にトランジスタが発明されている。

トランジスタの発明を原点とする半導体エレクトロニクスは、その後1960年代に半導体IC (~10 μm ルール), 1970年代にLSI (1K DRAM, ~ μm ルール), 1980年代にVLSI (1MDRAM, 1 μm ルール)と着実な進歩を遂げ、現在のコンピュータ時代、情報化時代実現のための原動力となっており、半導体は産業の米とまでいわれている。

レーザーの発明により加速されたオプトエレクトロニクスは、その後1970年代に低損失光ファイバー (~20db/km), 室温連続発振半導体レーザーの実現, 1980年代にファイバ損失0.2 db/km以下が実現され、また長寿命半導体レーザーの量産化が行われ、光通信時代へと着実な歩を進めており、大容量通信、情報化時代の技術的基盤となっている。

2. 加工の限界

半導体デバイスはここ40年間、微細化・高集積化の一途を追い続けてきており、既に4MDRAMは生産段階にあり、16MDRAMも開発されている。このまま進むと今世紀末には数100MDRAMが出現し、素子の最小寸法も50nm程度となると予想されている。このように半導体デバイスが理論的限界に近づきつつあるという認識のもとに、新しい動作原理に基づく全く

*難波 進(Susumu NAMBA), 大阪大学基礎工学部, 電気工学科, 教授, 工博・理博, 電子工学

新しいデバイスの開発を目指した基礎的研究を進める必要がある。

このような半導体デバイスの微細化の要求に答えるべく、半導体プロセス技術のここ10年間の進歩はまことにめざましいものがある。1 μm ルールのVLSIの量産化を実現するためにはサブミクロンプロセス技術の確立が不可欠であり、0.2 μm ルールのULSIの工業化を実現するためには $\sim 10\text{nm}$ プロセス技術の確立が不可欠である。

加工の限界は原子を1個ずつ特定の位置につけたり外したりすることであるが、IBMの研究者は走査型トンネル顕微鏡(STM)を使って、Ni板の表面に散乱しているキセノン原子を1個ずつ拾いあげて運搬し文字の形に並べることに成功している。勿論、他の原子が入り込んだり、キセノン原子が動き回ったりしないように、試料周辺は超高真空、極低温に保たねばならないし、非常にデリケートな操作を必要とするため、35個並べ終わるのに22時間かかったということであるが、いずれにせよ加工の限界は既に実験室的には達成されたといえよう。

普通の条件下でも、電子ビーム、イオンビーム、X線などを使って、10nm \sim 100nmの加工は既に実現されており、100nmオーダーの三次元構造物を制御性よく作ることはそんなに難しくなく時代に入りつつある。

このようなMacroscopicとMesoscopicの間にあるような寸法領域をMesoscopic領域と呼んでおり、最近この領域における特異な電子現象、すなわち電子波の位相が保たれるような種々の現象が観測され、注目を集めている。

3. 電子波エレクトロニクスの展望

超微細加工の発展により10nmオーダーの超微細デバイスが作られるようになると、デバイス寸法が非弾性散乱長や平均自由行程などの電子の特性長より短くなるため、この中では電子の運動はデバイス形状に制約され、その振舞いはバルク中と異なり、種々の量子効果が現れる。寸法がフェルミ波長程度の量子細線中では、電気伝導に寄与する1次元サブバンドの数、すなわち伝播するモード数は数個程度に減りコヒー

レントな電子波が伝播する。さらに伝播距離が平均自由行程より小さくなると電子はバリスティックに伝導し、電子波は、光導波路中の光のように、電子導波路中を散乱を受けずに伝播したり、曲がりがあると曲がり抵抗が観測されたりする。また、電子がコヒーレンスを失うことなく伝導するようになると、電子の波動性に起因する量子力学的干渉効果が見えてくるようになり、電子波の位相を制御するようなデバイス、すなわち電子波デバイスが可能となる。従来の電子デバイスはすべて電子の数を制御するタイプのものであるが、それに対し電子波の位相を制御するような新しい電子デバイスの可能性が見えてきたといえる。

最も職人的工学である加工技術の最先端に新しいメソスコピック物理が生まれつつあり、またその応用として、半導体エレクトロニクスの延長線上に電子波エレクトロニクスともいえるべき新分野が開かれようとしている。

4. 電子波エレクトロニクスの課題

固体中での電子の波動的現象が観測されて以来、これらを電子波デバイスに応用しようとする提案がいくつかなされてきた。しかし現状ではまだこれらの物性自体十分には明らかにされてない段階であり、電子波エレクトロニクスの展望を開くためには、まだ多くの課題が残されている。

- 1) 干渉効果の理論的解明：アハラノフ・ボーム効果、磁気抵抗ゆらぎ、量子ホール効果などの理論、電子散乱、界面散乱などのコヒーレンスを乱す過程の解明。
 - 2) 極微加工と評価技術：低損傷、クリーンな極微加工技術、原子層エピタキシーと原子スケールの評価技術。
 - 3) 干渉効果の実験的探索：新しい量子干渉効果の探索と不純物、欠陥、素子形状などのパラメーターの影響。
 - 4) デバイス原理の確立と応用：磁界・電界や表面格子などの外場や外部構造による電子波の伝播や干渉の制御。
- などである。

現在、日本学術振興会の中に「極限構造電子

物性 第151委員会（委員長：難波進）があり、産学協同で上記の課題と取り組んでおり、また、文部省重点領域「メゾスコピック領域における電子波干渉効果の基礎」（代表者：難波進）に関する研究が大学関係者約40グループにより平成2年度からスタートしたところである。今後数年間の電子波エレクトロニクスの発展を期待

している次第である。

20世紀は、多くの先人達が電波の発見からラジオ波、マイクロ波、光通信と華麗な電磁波エレクトロニクスの体系を築き上げてきたが、21世紀に向かってわれわれは、電子波エレクトロニクスの構築に大きな夢と期待を賭けたいものである。

