

# 1998 (第14回) 日本国際賞受賞者

## 1998(14th) Japan Prize Laureate



### 江崎 玲於奈博士 (日本)

前筑波大学学長  
1925年生まれ

### Dr. Leo Esaki (Japan)

Former President, University of Tsukuba, Japan.  
Born in 1925.

## 「新材料の設計・創製と機能発現」分野

授賞対象業績：人工超格子結晶概念の創出と実現による新機能材料の発展への貢献

江崎玲於奈博士は1969年、1次元の周期的な構造変化を有する人工単結晶、「半導体超格子」の概念を提案した。同博士は、半導体超格子においては、逆格子空間において状態密度が単周期の変調を受ける結果、微分負性抵抗効果など特異な現象が出現すると予言した。また、半導体超格子の実現方法として、薄膜結晶成長の過程において、結晶の合金的組成または不純物濃度を変調させることを提案した。同博士は分子線エピタキシーによる超格子構造の実現に努力し、1972年にGaAlAs系超格子において予言通り微分負性抵抗効果を発見した。同博士はさらに、超格子のポテンシャル井戸に生じる離散的エネルギー準位から、隣接する井戸のエネルギー準位への共鳴トンネル現象を予測し、1973年に実験的に確認した。

超格子に関する同博士の研究が他の研究者に与えた刺激は大きい。第一に、超格子研究の過程で同博士は、変調ドーピング（バンドギャップの大きな領域にドーブした不純物に起因する伝導電子または正孔が、バンドギャップの狭い隣接領域にあふれ出す現象）を提案した。この概念を利用して、高速電界効果トランジスタ、HEMTが1980年に実現され、優れた高周波特性を活かし無線通信などに実用されるに至った。

第二に、超格子構造（多重量子井戸構造と呼ばれることも多い）を利用したエネルギー状態密度の変化を利用した半導体レーザや、半導体受光デバイスが1980年代に実現され、光通信になくはならない素子となった。第三に、1980年代後半、強磁性金属と非磁性金属からなる超格子構造において、巨大磁気抵抗効果が発見され、その後これを磁気記録の読み出しセンサとして用いる試みが盛んになされている。

このように、江崎玲於奈博士による超格子の概念の提案は、半導体から金属にいたる広範な固体結晶材料にわたり、未知の電気的、光学的、磁気的性質の発見、人類の役に立つ応用につながったものであり、今回の賞の対象である「新材料の設計・創製と機能発現」に誠にふさわしい業績である。

なお、同博士は1973年に、半導体PN接合のトンネル効果の発見により、ノーベル物理学賞を受賞しているが、超格子は同博士のなしとげたもう一つの偉大な業績である。

# 半導体超格子の誕生とその発展

江崎 玲於奈

1969年、われわれ（江崎とR.Tsu）は半導体超格子の構想を提案したが、研究者の夢とでもいえる“思い通りに新物質を設計して人工的にそれを作成する”というプロジェクトはこのときに始まったと言えるであろう。超格子とはある1つの方向に対して周期的ポテンシャルを持つ量子構造で、その周期は、例えば10ナノメートル（nm）程度であるから、通常の半導体結晶の周期、例えば0.2nmに比べると極めて長い。しかし、量子構造としての条件を満たすためには、周期は電子の平均自由行程あるいは位相コヒーレント距離よりも充分短く選定する必要があることは言うまでもない。

さて、この提案は、多分、新しい半導体物質を量子力学の原理に基づいて設計し、それを最先端技術を駆使して製作するという事に関しては最初のものであったと思われる。われわれは2つのタイプの超格子を提案した。何れも高度の結晶成長技術を駆使せねばならないが、1つは、p-n-p-nのような不純物ドーピング変調タイプであり、他はGaAs-AlAs-GaAs-AlAsのような組成変調タイプである。考えてみれば、この提案では、月並み（common）の半導体を特別（super）のものに変換（transform）しようと言うのであるから、現代の錬金術（alchemy）と言えるかもしれない。とも角、このプロジェクトにおいては思考実験（gedanken-experiment）を現実のものにしようという試みなど、研究者には今までにない新しい自由度を与えたため、多くの独創的な研究を喚起する結果になった。

超格子の概念に到達する前に、われわれは薄膜結果成長技術による二重障壁（double barriers）作成の可能性を検討していた。この二重障壁構造においては、中央の量子井戸における束縛電子と同じエネルギーを持つ入射電子に関しては、何ら減衰することなく2つの障壁を透過するという、いわゆる共鳴トンネル効果

を期待することが出来る。これは、光学におけるファブリーペロー共振器（Fabry-Perot resonator）と同じように、入射と反射のドゥ・ブローイ（deBroglie）電子波の相互干渉に由来するものである。ところで超格子は、第1図に示すように、2重、3重、……N重と障壁構造を延長した処に生まれたものである。図では、単一の障壁を持つエサキトンネルダイオードから出発し、次に二重障壁の共鳴トンネルダイオード、最後は超格子に到達する模様を図式的に示した。

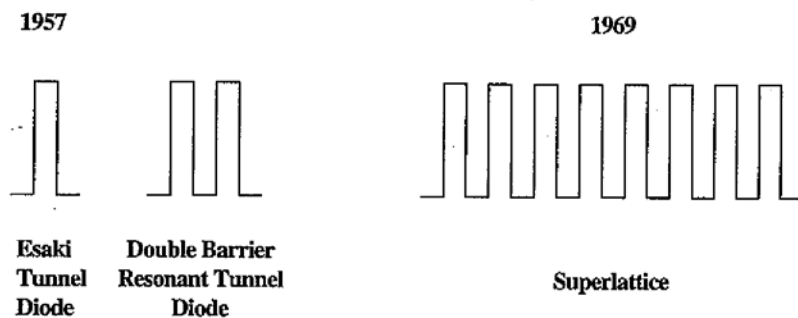
本提案とそれに続く江崎グループによる先駆的な実験では負性抵抗、共鳴トンネル効果、光電流など、注目に値するさまざまな興味ある結果を報告した。この成果は多くの研究者を刺激し、実験と理論、多方面における研究活動を喚起することになり、半導体研究の重要な新分野を開拓することになったのである。超格子の周期や量子井戸の巾はナノメートルスケールであるから、これらは、現在盛んに研究されている量子ワイヤー、量子ドット、シングル電子デバイスなどのナノ構造に対して、先駆的役割を演じたことは確かであろう。実際、分子線エピタキシー（MBE）、有機金属気相成長（MOCVD）などの超薄膜結晶成長技術によって生まれた新しい人工構造半導体は自然の結晶には決して見られないさまざまな電気伝導、光学特性を示した。例えば異常に高い電子易動度、大きな結合エネルギーを持つ励起子（exciton）、電流-電圧特性における負性抵抗、電場を加えたときに見られるルミネッセンスの大きなシュタルクシフト（Stark shift）、明確に測定できるワニエ-シュタルク階段（Wannier-Stark ladder）、観測可能なブロッホ（Bloch）発振などである。

本研究領域は低次元半導体物理学、電子デバイス、結晶成長の3つの分野の緊密な協力によって発展して来た。このフロンティアにおける半導体物理学の活発な研究活動は新しい電子デ

バイスの開発に大きな刺激を与え、画期的な半導体デバイスの誕生を促すことになった。例えば高速度、低雑音のHEMT (high electron-mobility transistor) や量子井戸を備えた高性能半導体レーザなどがそれである。

本分野の発展の状況はこれに関連する研究論文数の増加によって推定することができる。2年おきに半導体物理学の国際会議が開催されるが、そこで発表された超格子、量子井戸、ナノデバイスなどヘテロ構造に関する論文数は1970年代終り頃から指数関数的に増大し、1990年代になると増加の度合いが弱まるが、約50%に到達する。従って、現在、約半数の半導体物理学者がこの分野の研究に携わっているといえるであろう。

この研究をはじめた私のグループには、R.Tsu、L.L.Chang、E.E.Mendez、榊裕之(現東大教授)をはじめ世界の多くの若い研究者が参加し、それらの人びとの多大の貢献によってこのプロジェクトが発展して来たことを付言しなければならない。



第1図 左：エサキダイオード、中央：共鳴トンネルダイオード、右：超格子