

理学博士江崎玲於奈君の「エサキダイオードとその応用の研究」 に対する授賞審査要旨

半導体の物性論的研究は数十年來着実に進められてきたが、米国ベル電話研究所におけるトランジスターの発明は、降つて一九四八年のことであり、さらにエサキダイオードの発明によつて新奇な応用の途を開いたのは一九五七年のことであつた。

四価の原子ゲルマニウムまたはシリコンの単結晶はほぼ絶縁性であるが、これに五価原子 P, As, Sb などの極微量を添加すると、自由電子ができて n 型半導体となり、三価の原子 B, Al, Ga, In などの極微量を添加すると自由電子の不足となり、いわゆる正孔をもつ p 型半導体となる。

この p 型と n 型の半導体を接合すればダイオードとしてトランジスターの作用を呈するものとなり、真空電子管に代つて電子技術界に革命を起すこととなつた。

元來 p 型中の不純物たとえば As, P 型中の不純物、たとえば Ga の量が増せばトランジスターの性能を大いに害することが知られていた。

然るに江崎玲於奈君は不純物の添加量をトランジスターの場合の数万倍にも増加したものをもつて単結晶を造り、既知の p-n 接合に見られざる負性コンダクタンスを有する接合を得た。この負性抵抗性は、電子技術上、増幅、発振、検波、スイッチング等、高周波、高速度の技術に格段の進歩を与えるものである。

江崎君は、はじめゲルマニウムの P-n 接合整流器の耐電圧が不純物濃度の逆数にほぼ比例し、純粋なゲルマニウムから造つたものほど高い耐電圧を示すことに着目してこの間の関係を詳しく研究したのであるが、不純物を積極的に多量に添加したゲルマニウムの P-n 接合を研究した結果、意外にも不純物濃度 10^{19} - $10^{20}/\text{cm}^3$ において整流作用が逆転することを認め、また上記のごとき負性抵抗の現象を呈することを見出したのである。

江崎君はこの負性抵抗現象の原因を追求し、これが量子力学的トンネル効果によるものであることを確かめた。その結果は日本物理学会年会（昭三二）において発表し、さらに米国学界誌 *Physical Review* 一九五八年一月号、および *Brussels* における *Solid State Conference*（一九五八年）において発表し、学术界に大なる反響を呼び起し、以後エサキダイオード（トンネルダイオード）の研究が世界各国で競つて行なわれるようになったのである。（電気通信学会雑誌昭和三九年四月、エサキダイオード特集号）

エサキダイオードは電子工学への応用面からみると、トンネル効果の本質上その動作時間が従来のトランジスタよりも著しく速く、従つて高速度計算機への要求を充たすと同時に、理学研究の面からみれば、半導体内のトンネル現象を明らかにしたため、半導体内の電気伝導機構の研究に新しい手段を提供したものと高く評価されるのである。

エサキダイオードの発明以後、これに関する各方面での多量の研究発表も、大別すれば応用への研究と、トンネル現象を用いた物理的研究とに分ち得べく、いずれも各国で大なる興味をもつて研究されているのは、江崎君の画期的発表に刺戟されたものというべきである。

なお江崎君の研究には、新ダイオード発見のほかに別記発表論文表に見るとき半導体関係の諸研究がある。以下論文表の順序に従つてその大要を述べると次の通りである。括弧内の数字は論文番号を示す。

(1)―(3)酸化トリウム陰極の研究 昭二三―昭三七年

酸化トリウム陰極の活性化、仕事函数(1)、電気抵抗(2)、二次電子放射(3)等の実験成果から半導体陰極としての理論を確立した。有住徹弥博士との共同研究。

(4)―(6)ゲルマニウムおよびシリコンの基礎研究 昭二六―昭三〇年

新しい半導体材料として当時漸く世の注目をあびた、ゲルマニウム、シリコンの研究に、いち早く従事し、熱処理効果(4)、電気抵抗および電子放射(6)等の基礎研究の成果を報告した。この分野における本邦の草分けの一人である。

(7)―(12) P-P 接合におけるトンネル効果の研究 昭三一―昭三六年

P-P 接合はトランジスター、ダイオード等すべての半導体素子の出発点であるが、不純物を多量に含む P-P 接合の著者の研究、特にトンネル効果による負性抵抗の発見(7)(9)(10)は大きい意味を持った。(電気通信学会雑誌三九年四月号エサキダイオード特集号参照)

著者は続いてその雑音特性(8)、ダイオードの回路素子としての特性解析(11)、磁場効果(12)等を報告した。この部面の研究業績が最も創意あるもので、本要旨記述の前半にのべたところである。

(13)―(16)半金属の研究 昭三六―昭三八年

著者は元来不純物を多く含む半導体に興味をもち、これはとりもなおさず多くの電子あるいは正孔を含むトンネルダイオード用材料であるが、蒼鉛、アンチモン等の半金属は純粹な状態で電子および正孔を多く含むので、一種の不純な半導体とも見なされる。著者は低温、強磁場下で電気伝導を研究し、ある電場以上では電子のエネルギーが音響量子(Phonon)に移り、この音響量子の発生(または音波の発生)のため非線型電流電圧特性、発振現象⁽³⁾が見られることを発見し、電子装置への応用を示唆した⁽⁴⁾。また低温における結晶の Scattering Time の直接決定法について報告した⁽⁵⁾。

(7) (18) HETERO 接合の研究 昭三八—昭三九年

気相結晶成長技術 (Epitaxial Vapour Growth Technology) によつて砒化ガリウム GaAs の単結晶上にゲルマニウム単結晶を成長させることが可能であり、しかも二つの結晶間に結晶論的には連続性があり、電気的には障壁すなわち一種の接合が形成される。その接合面つまり結晶内表面 (Interface) において障壁との関連にある電気伝導機構について説明した⁽⁶⁾。

以上述べた通り江崎玲於奈君は半導体とその接合および半金属について研究し、特に p-n 接合におけるトンネル効果の研究からエサキダイオードの特異現象を明らかにして電子工学の進歩に寄与した功績は顯著である。

主要な著書及び論文目録

- 1) T. Arizumi and I. Esaki: On the Thoria Coated Cathode. J. Phys. Soc. Japan, 5, 163 (1950).
- 2) ...: Conductivity and Electronic Energy State of Thoria Coated Cathode. J. Phys. Soc. Japan, 5, 174

- (1950).
- 3) ... : On the Secondary Electron Emission from the Thoria Coated Cathode. *J. Phys. Soc. Japan*, **6**, 113 (1951).
- 4) L. Esaki : Properties of Thermally Treated Germanium. *Physical Review*, **89**, 1026 (1953).
- 5) ... : Thermal Treatment of Silicon Rectifiers. *Physical Review*, **89**, 398, (1953).
- 6) ... : Electrical Resistivity and Thermionic Emission of Silicon. *J. Phys. Soc. Japan*, **8**, 347 (1953).
- 7) ... : New Phenomenon in Narrow Germanium p-n Junctions. *Physical Review*, **109**, 603 (1958).
- 8) T. Yajima and L. Esaki : Excess Noise in Narrow Germanium p-n Junctions. *J. Phys. Soc. Japan*, **13**, 1281 (1958).
- 9) L. Esaki : Properties of Heavily-doped Germanium and Narrow p-n Junctions. *Solid State Physics in Electronics and Telecommunications*, Academic Press Inc., London, p. 514 (1960).
- 10) L. Esaki and Y. Miyahara : A New Device using the Tunneling Process. *Solid State Electronics*, **1**, 13 (1960).
- 11) L. Esaki : Characterization of Tunnel Diode Performance. *IBM J. of Research and Develop.*, **6**, 170 (1962).
- 12) L. Esaki and R. R. Haering : Magnetic Field Effects on InSb Tunnel Diodes. *J. of Applied Physics*, **33**, 2106 (1962).
- 13) L. Esaki : New Phenomenon in Magnetoresistance of Bismuth at Low Temperature. *Phys. Rev. Letters*,

8, 4 (1962).

- 14) L. Esaki and J. Heer: Non-linear Magnetoresistance due to Electron-Phonon Interaction. Report of Int. Conf. on Physics of Semiconductors, Exeter, p. 603 (1962).
- 15) L. Esaki: A Proposed New Bismuth Device. Proceedings of IRE, **50**, 322 (1962).
- 16) L. Esaki and J. Heer: Direct Determination of the Scattering Time in Bismuth and Antimony-Bismuth Crystals at Low Temperatures. J. of Applied Physics, **34**, 234 (1963).
- 17) L. Esaki, W. E. Howard, and J. Heer: The Field Effect Interface Conductance in Ge-GaAs n-n Heterojunctions. Applied Phys. Letters, **4**, 3 (1964).
- 18) ...: The Interface Transport Properties of Ge-GaAs Heterojunctions. Surface Science, **2**, 127 (1964); Proc. Int. Conf. on Solid Surfaces.