

半导体异质结及其在光电子学中的应用*

——2000 年诺贝尔物理奖评述

陈良惠

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 瑞典皇家科学院 2000 年 10 月 10 日宣布,将 2000 年度诺贝尔物理奖授予三位科学家,他们是俄罗斯科学院圣彼得堡约飞技术物理研究所的 Zh. I. Alferov、美国加利福尼亚大学的 Herbert Kroemer 和美国德克萨斯仪器公司的 Jack S. Kilby,以表彰他们为现代信息技术,特别是他们发明的高速晶体管、激光二极管和集成电路(芯片)所作出的奠基性贡献. Kilby 由于发明并发展了集成电路技术而获奖,通过这项发明,微电子学成为所有现代技术的基础. Kilby 的获奖成果已有另文(见 2001 年第 3 期《物理》)评述. Alferov 和 Kroemer 则是由于他们在半导体异质结及其在电子和光电子学中的应用方面的突出贡献而获奖. 该文仅就这两位诺贝尔物理奖得主在异质结及其在光电子学中的应用方面的贡献进行评述.

关键词 诺贝尔奖, 物理, 异质结, 光电子学

THE 2000 NOBEL PRIZE FOR PHYSICS

CHEN Liang-Hui

(*Institute of Semiconductor Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract The Nobel Prize in Physics 2000 was awarded by the Royal Swedish Academy of Sciences with one half jointly to Zhores I. Alferov, A. F. Ioffe Physico-Technical Institute, St. Petersburg, Russia and Herbert Kroemer, University of California at Santa Barbara, California, USA, and the other half to Jack S. Kilby of Texas Instruments, Dallas, Texas, USA. The researchers' work laid the foundation of modern information technology, in particular through their invention of rapid transistors, laser diodes, and integrated circuits. Kilby was awarded for the invention and development of the integrated circuits by which microelectronics has become the basis of modern science and technology, this has been reviewed in another paper. Alferov and Kroemer were awarded for their distinguished work in the field of semiconductor heterostructures and their applications in electronics and optoelectronics. The history, applications and future development of semiconductor heterostructures will be discussed briefly.

Key words The Nobel Prize, physics, heterojunction, optoelectronics

瑞典皇家科学院 2000 年 10 月 10 日宣布,将 2000 年度诺贝尔物理奖授予三位科学家,他们是俄罗斯科学院圣彼得堡约飞技术物理研究所的 Zh. I. Alferov、美国加利福尼亚大学的 Herbert Kroemer 和美国德克萨斯仪器公司的 Jack S. Kilby,以表彰他们为现代信息技术,特别是他们发明的高速晶体管、激光二极管和集成电路(芯片)所作出的奠基性贡献.

Kilby 由于发明并发展了集成电路技术而获奖,通过这项发明,微电子学成为所有现代技术的基础. Kilby 的获奖成果已有另文(见 2001 年第 3 期《物理》)评述.

Alferov 和 Kroemer 则是由于他们在半导体异质结及其在电子和光电子学中的应用方面的突出贡献而获奖. 本文仅就这两位诺贝尔物理奖获得者在异质结及其在光电子学中的应用方面的贡献作一评述.

1 两位诺贝尔物理奖获得者简历

1.1 Zh. I. Alferov 简历

Zh. I. Alferov, 1930 年 3 月 15 日出生于白俄罗斯

* 2001-02-05 收到



Zh. I. Alferov
教授

的维捷布斯克. 1952年毕业于列宁格勒的乌里扬诺夫电子技术学院电子系. 他曾经获得物理学和数学博士学位. 他长期担任列宁格勒约飞技术物理研究所所长, 苏联科学院副院长. 他于1970—1971年间作为访问学者在美国伊利诺伊大学短期工作. 从1962年起, 他一直致力于半导体异质结及其在半导体电子器件和光电子器件中的应用研究. 1970年, 他首先实现了半导体激光器在室温连续条件下的受激发射, 为此, 他荣获2000年度诺贝尔物理学奖. 目前他任俄罗斯圣彼得堡约飞技术物理研究所所长, 俄罗斯科学院副院长.

1.2 Herbert Kroemer 简历



Herbert Kroemer
教授

Herbert Kroemer 于1952年获得德国哥廷根大学理论物理学博士学位, 其论文是研究当年新发明的晶体管中的热电子效应. 毕业后他一直致力于研究半导体物理、半导体技术和半导体器件. 1963年, 他提出了双异质结构激光器的概念, 是这一领域的先驱者之一. 到80年代时, 这种理念和相应的技术才被大量应用开来. 在到美国加利福尼亚大学后他转向实验研究, 着力于应用这些技术于新材料系, 自1985年以来, 他们研究集中在 III - V 族半导体材料方面, 因为他认为这些材料将可能为未来的新器件提供基础. 目前他的研究集中在两个十分不同的领域, 一是带有超导电极的半导体和超导体混合结构, 二是在强电场下半导体超晶格中的电流输运及其导致的布洛赫(Bloch)振荡. 由于他的贡献, 他得到多种奖项, 2000年获得诺贝尔物理学奖.

2 异质结概念的提出和发展

异质结意指不同物质之间的界面(即结), 而半导体异质结则专指不同单晶半导体之间的晶体界面. 从能带论角度来看, 异质结是指不同禁带宽度的半导体的界面; 反之, 如果界面两侧由具有相同禁带宽度的半导体组成, 即使其导电类型不同, 都为同质结.

在20世纪30年代初期, 前苏联列宁格勒约飞技术物理研究所的学者就开始了对于半导体异质结的探索. 作为晶体管的发明者, 肖克利(W. Shockley)在第一个关于 p - n 结晶体管的专利中, 就提出用宽禁

带发射区来实现单向注入的建议. 但是, 早期异质结理论最重要的开拓者当数美国学者 Herbert Kroemer. 早在1957年, 他就预言异质结有着比同质结大得多的注入效率, 同时对异质结在太阳能电池中的应用也提出了许多有益的构想. 到1963年前后, 前苏联学者 Alferov 和美国的 Kroemer 各自独立地提出基于双异质结的激光器的概念. Alferov 提出利用双注入获得高密度的载流子注入和反转粒子数密度的可行性, 并特别指出, 同质结激光器在温度较高时, 要实现连续激射是不可能的.

应该说, 现在的半导体器件, 不能不考虑采用异质结构以全面提高其性能, 没有异质结, 很难想象当今固体物理学会是什么样子.

3 半导体激光器的室温连续激射

让我们首先回顾一个半导体激光器发展初期的轨迹吧!

20世纪50年代后期, 电子回旋共振技术取得了突破性的进展, 发现电子在磁分裂能级间可能产生粒子数反转, 国际科学界力图开发出新型大功率微波激射源微波相干振荡器, 称之为 maser. 与此同时, 国际光学界的科学家也提出了一种新的科学思想: 如果把基质中分裂能级的能量间隔加大, 移到光频域, 就有可能在这样的能级体系中实现光的受激发射和振荡, 从而获得高强度的单色相干光输出. 这一思想激励着国际著名实验室(如美国的贝尔实验室、IBM、RCA 和前苏联科学院列别捷夫研究所等)中的科学家们开展相应的实验探索. 1960年, 美国首次研制成功第一台掺 Cr 红宝石激光器. 随后苏联的巴索夫院士又以电子束泵浦的方法在化合物半导体 GaAs 中首次实现了受激光发射.

1962年9月, 美国 GE 公司的 R. N. Hall, IBM 公司的 M. I. Nathan 和 MIT 的 T. M. Quist 等人各自独立宣布实现了半导体激光器的低温脉冲受激发射, 这是半导体激光器的第一里程碑. 此时是在 GaAs 衬底上进行热扩散形成 PN 结的, 属同质结. 在此期间, 人们尽管在条形的制作、通过解理形成谐振腔、欧姆接触等技术方面取得重大突破, 但正如 Alferov 所预言的那样, 一直只能在低温脉冲下工作.

Kroemer 建议用双异质结来限制有源区中的载流子, 他指出用异质结间的注入现象, 可以实现很多间接带半导体的激射, 也可改善直接带半导体的激射. 历史证明, 只有当异质结的概念引入半导体激光

器并在实验上得到实现,才翻开了半导体激光器新的一页.1970年,苏联的 Alferov 小组、美国贝尔实验室的 I. Hayashi 和 M. B. Panish 等发表了激动人心的以异质结为基础的半导体激光器室温连续激射,他们在 GaAs 增益有源区两侧引入了高带隙低折射率的 AlGaAs 势垒层,势垒限制作用增强,注入载流子的利用效率大幅度提高,又具有约束波导的功能,这也是半导体激光器的第二里程碑.从此,摆脱了杜瓦瓶的连续工作的半导体激光器才开始得到了真正的应用,使光通信、光存储、光信息处理、光计算等应用都进入了新的时期.其后,美国、前苏联、英国、日本以及包括巴西、波兰和中国在内的许多大学和研究所都展开了异质结和 III - V 族化合物电子和光电子器件的研究热潮.此时,人们意识到半导体异质结的最重要的优越性是载流子的超注入,对光场的限制和对电子的限制.此间许多能体现异质结特点的器件相继推出,包括低阈值室温连续工作的双异质结激光器、高效发光二极管、异质结太阳能电池、异质结双极晶体管、异质结 p - n - p - n 半导体整流管、红外和可见波段光转换器以及高效冷阴极等.此外,人们还着力寻找晶格匹配的异质结,努力进行材料系的开拓,并开始探讨用周期性的异质结代替 F - P 腔形成光反馈实现受激发射,即后来的分布反馈激光器.图 1 为同质结与双异质结半导体激光器示意图.

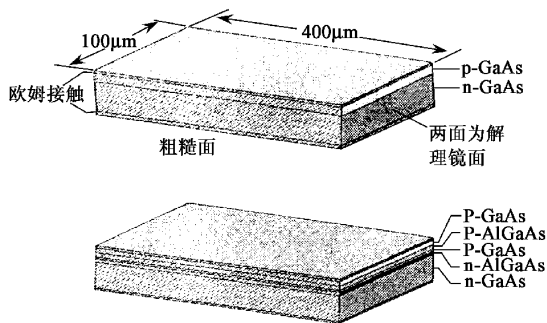


图 1 同质结(上图)与双异质结(下图)半导体激光器

4 量子阱激光器及更低维激光器

半导体异质结的进一步发展,带来了量子阱结构的引入.量子阱超晶格可以作为异质结三明治结构在中间层超薄层化的延伸.1970年,江崎和朱兆祥研究了超晶格中的电子输运情况,开创了对超晶格结构的实验研究.1974年,R. Dingle 等人在研究 GaAs 量子阱异质结时,观察到吸收谱中的具有特征

性的阶梯状结构.势阱中载流子的态密度的类阶梯形分布,产生了新一代的量子阱激光器.其后发展的应变超晶格导致极低阈值半导体激光器的出现,后来得到广泛应用特别作为光纤放大器泵源的 980nm 应变量子阱激光器就是一例.接着是更低维的量子结构的引入,进而形成了量子线与量子点.

5 异质结与量子阱的材料生长

早期异质结材料的生长方法主要有气相外延和液相外延,而低维异质结的实验实现,得益于超薄层材料生长技术的出现,从美国贝尔实验室卓以和先生的开创性工作以来,经过张立纲、曾焕添等人出色的工作,使分子束外延(MBE)成为 III - V 族化合物半导体异质结量子阱生长的重要手段,并成功地应用于量子阱激光器的结构生长.在 H. Manasevit 最早提出金属有机物化学气相沉积(MOCVD)的概念后,R. Dupuis 和 P. Dapkus 采用 MOCVD 技术,成功地研制出室温连续激射的 AlGaAs 半导体激光器.尽管目前 MBE 也有生产型设备面市,但人们还习惯认为 MBE 更多地用于研究工作中,而 MOCVD 已被广泛用于 III - V 族化合物异质结量子阱材料的生长,特别是可用于生产中,以形成批量,降低成本.

调制掺杂的超晶格的研究使其迁移率比体材料有了很大的提高,并因此极大地促进了微波放大所需要的高电子迁移率的二维电子气的研究和新型高速晶体管的研究成功,这就是高电子迁移率晶体管,即日本学者命名而为世界广泛接受的 HEMT.

6 异质结技术的新发展

目前,半导体物理、半导体材料以及半导体器件的任何新发展,诸如利用 II - IV 族硒化物和 III - 氮化物制成的蓝、绿光短波长发射源都取得重大进展和可喜成果,异质结的概念和生长技术都起到重要作用.可以预期,异质结构及作为其延伸的量子阱、量子线和量子点的发展提供了一种合成新材料异质结半导体技术,在未来的半导体物理、固体物理以至整个世界科技的发展中,都会发挥越来越大的作用.

参 考 文 献

- [1] Frenkel Ya I, Joffe A F. Phys. Z. Sowjetunion, 1932, 1, 60
- [2] Shockley W. U. S. Patent No. 2,569,347, 1951

(下转第 229 页)