

综述

# 量子阱光电子器件的发展与 中国光电子器件 产业的形成\*



陈良惠

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**[摘要]** 光电子技术发展推动着信息时代的变革, 作为其心脏的半导体光电子器件正带动着一个新兴产业——光电子产业。

量子阱激光器是半导体激光器发展的第三里程碑。因为其性能优越, 成为一代理想的激光器, 在光通信、光存储、光显示等方面得到应用。

目前, 中国光电子产业已具雏形, 已有多家光通信器件制造公司形成年产亿元以上产值。而以光存储、光显示为代表的非通信光电子器件发展势头极其迅猛。其国产化带动数字音像和数字存储产业、全色显示屏、汽车灯、交通灯以至固体白光灯等产业, 年产值规模可望在百亿以上。

**[关键词]** 量子阱; 半导体; 激光器; 光电子; DVD

半导体光电子技术发展极其迅速, 目前已成为引人瞩目的高新技术而得到广泛应用: 它首先驱动信息领域的根本性变革, 这包括光通信技术、光信息处理、光计算等新兴学科的发展; 在近代战争中广泛应用的激光雷达、激光陀螺和激光制导等更显现出光电子技术在军事应用上的巨大威力。作为光电子技术心脏的半导体光电子器件正带动着一个新兴产业——光电子产业, 这就无怪乎国际上有人预言: 21世纪是光电子与微电子紧密结合发挥作用的年代了。

光电子技术是光波技术与微电子技术的有机结合。光电子技术发展的初期, 似乎是独立于微电子技术而发展的, 这首先是因为光电子使用的半导体材料多为Ⅲ~Ⅴ族化合物半导体, 而不是微电子普遍应用的硅材料。此外, 早期光电子器件结构简单, 不需难度太大的微细加工。但随着光电子器件功能要求的提高, 微细加工技术越来越成为进一步发展光电子技术的先决条件之一。

自从1959年前苏联的巴索夫院士提出可以用载流子注入的方法在GaAs材料中实现受激辐射以来, 半导体激光器发展奇速, 留下了辉煌清晰的足迹。在20世纪60年代初期, 半导体激光器为宽接触扩散型同质结构, 此时载流子和光场都未受到很好限制, 仅能在低温条件下脉冲工作。以后, 利用液相外延技术进行异质材料的生长, 发展了单异质结构与双异质结构, 直至70年代后期由分子束外延和金属有机化合物汽相外延发展的量子阱结构使半导体激光器有了飞跃式的突破。如果说在实现巴索夫的科学预言中, 1962~1963年国际上R. N. Hall, M. I. Nathan和T. M. Quist等人相继独立研制成功GaAs激光器是半导体激光器的第一里程碑, 异质结构的引入及其导致的室温连续激射的实现则是第二里程碑, 那么, 量子阱激光器的提出和实现则可誉为半导体激光器发展的第三里程碑。超晶格概念是由江崎和朱兆祥提出的, 著名物理学家黄昆把它称为可与40年代末萧克莱等发明晶体

**[收稿日期]** 1999-07-25

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目

**[作者简介]** 陈良惠(1939-), 男, 福建福州市人, 中国工程院院士, 中国科学院半导体研究所研究员, 博士生导师

\* “八六三”计划资助项目(863-307-07-01-1)

管相比的 20 世纪科学的重大突破。

## 1 量子阱激光器

量子阱激光器就是有源区做成量子阱结构的异质结激光器。鉴于它在阈值电流密度、阈值电流温度依赖性、调制速率、偏振特性以及波长可调谐等方面具有的优越特性，因此被誉为—代理想的半导体激光器。

载流子的态密度分布是半导体激光器的重要物理基础，而量子阱结构导致的量子尺寸效应首先使体材料的抛物形态密度分布发生了根本变化而形成阶梯形态密度分布，它是量子阱激光器优异特性的物理根源。

激射波长的短波化及可调变性：量子阱结构中注入载流子的复合不再是带边的复合，而是导带电子和价带空穴量子能级间的复合，因此发射光子能量向高能方向移动，即发射波长短波化，而且移动大小随阱宽而变，因而提供了发射波长的可调变性。

激光器阈电流密度降低：由于量子阱内电子（空穴）的态密度和能量呈阶梯关系，态密度的降低使增益谱峰值提高，谱宽变窄，为克服一定损耗所需注入载流子数可以大大降低。

阈值电流的温度依赖性减弱：量子阱结构的阶梯形态密度限制了注入载流子的热扩展效应，使阈值增益受温度的影响变小。

调制速率提高，发射谱宽变窄：随着量子限制的增强，微分增益有明显的增长，从而大大提高了作为调制上限的张弛振荡频率，同时也使光谱线宽变窄。

量子阱结构的实验实现是基于分子束外延（MBE）技术和金属有机化合物气相外延（MOCVD）技术的突破。由于 MBE 设备昂贵，生长速度较慢但可进行单原子层生长，因此多用于研究工作，只是在近年才有生产型的一次生长多片的 MBE 设备推向市场。而 MOCVD 设备价格虽与 MBE 相当，但生长速度快，而且已有最高可达 90 片的生产型设备问世，可使产品的成本大幅度降低，而不影响量子阱层材料的生长质量。

国际上技术先进的国家，在光电子领域无不着力发展量子阱光电子器件，并抢先推向产业化，可以说，现在一般提半导体激光器指的已经是量子阱激光器了。

## 2 中国量子阱光电子器件的进展

中国量子阱激光器研究始于 1985 年，当时在中国科学院半导体研究所筹建了中国第一个量子阱激光器研究小组，开展器件设计和理论研究，并基于国产分子束外延设备进行材料结构的初期生长和器件制作。他们于 1986 年得到国家自然科学基金的支持，立项开展“量子阱激光器物理特性研究”。同年，该项目得到中国科学院重大项目的支持，并取得突破，实现了室温脉冲激射。1987 年，我国“八六三”计划开始启动，信息领域光电子主题在“七五”期间设立第一个相关课题即“高速超短脉冲量子阱激光器”。随之 AlGaAs/GaAs 量子阱激光器取得室温连续激射的重大突破，研究工作也趋向深入。1989 年，在低阈值和高速超短脉冲两个方向分别取得重要成果，通过中国科学院鉴定，其中，量子阱激光器达到 1.55mA 的极低阈值，为当时国际最好水平之一，这些工作得到科技界的高度评价，并被 China Daily 评为 1991 年十大科技成果之一，获中国科学院和国家科技进步奖。随着“八五”计划的开始，我国量子阱激光器的研究不论在深度和广度上都有很大的发展。从基础研究方面，开展了量子线、量子点激光器的研究。从应用需求出发，开展了大功率量子阱激光器，应变量子阱激光器研究，发射波长以 850 nm 为中心向二侧延伸，覆盖了 635 nm, 650 nm, 670 nm, 808 nm, 850 nm, 980 nm, 1.3  $\mu\text{m}$ , 1.55  $\mu\text{m}$ 。在超薄层生长技术上，也随着国家光电子工艺中心的建设，除分子束外延外，又增加了金属有机化合物气相外延设备（MOCVD），到“八五”后期，MOCVD 技术的新发展，促进了我国量子阱激光器的研究的新延拓，此时，“八六三”计划光电子主题支持的量子阱激光器项目达 16 项之多，生长和使用的材料系有 AlGaAs/GaAs, InGaAs/GaAs/AlGaAs, InGaAsP/InP, ZnSe/GaAs 以及 InGaAlP/GaAs 等。新方向包括量子阱 DFB 激光器、量子阱垂直腔面发射激光器与量子阱 SEED 器件等，而特别可喜的是研究工作不少已推及开发和批量生产，研究队伍也从单纯中国科学院这样的研究机构发展到北京大学、清华大学、北京工业大学、吉林大学、南京大学、华中理工大学等大学，特别是扩展到产业部门，如邮电部的武汉邮电科学院，电子部 13 所、电子部 44 所等，这为我国量子阱光电子器件走向

实用化，产业化打下坚实的基础。

### 3 中国光电子产业现状及其发展

中国光电子技术研究一直得到原国家科委、国家计委、国家自然科学基金委、中国科学院等中央部委以及产业部门和地方的交叉支持，先后投资的项目有“半导体激光器制造技术引进项目”，集成光电子国家重点联合实验室，国家光电子工艺中心以及光电子器件国家工程研究中心等，在应用基础研究，新工艺技术的开发和开放服务以及研究成果的工程化、产业化等不同层次发挥作用，在国家自然科学基金的项目支持下，奠定了基础，而在“八六三”计划的旗帜下，得到了发展，取得一系列重要成果，其中量子阱光电子器件的系列性突破，使我国光电子器件跃上量子阱光电子技术的新台阶，被列为“八六三”计划光电子主题以至信息领域的“八五”时期的重大成果，被评为1995年电子科技十大成果之一。在研究工作发展的同时，产业化工作也取得长足进步。邮电部武汉电信器件公司与深圳飞通公司在通信器件方面不但突破技术，而且形成规模，先后通过ISO 9001的认证，在国外公司进逼下，通过奋斗逐步占有光通信用光电子器件市场的一定份额，其中，光电器件组件与模块分别形成年产数万对的生产能力，国产器件已占领了国内通信市场的1/4份额，产值超过亿元，部分产品还出口国外。

在非通信器件方面，光电子器件国家工程研究中心以自身研究成果不失时机进行就地转化，已形成年产数十万支各类量子阱光电子器件的生产能力，其中650 nm红光量子阱激光器以DVD的应用为目标，通过与产业部门结合，引资转制，二年内可望达到年产500万支到1000万支。808 nm与980 nm量子阱激光器向大功率发展（并根据需要用光纤耦合输出）以满足二极管泵浦固态激光器，掺铒光纤放大器以及激光医疗等需要，并已形成年产5万支的生产能力，可望除在满足国内需求外，并在国际相关产品中，占有可观份额。光电子器件发展与集成电路一样至关重要，一个至理名言是：如果一个国家在一代元件上没有足够的投资以发展自主能力，就会给外国竞争者提供进入并占领下几代技术市场的机会。事实上光电子器件发展还将促进二次产业开发，且不说光通信和光显示这样大的规模产业，就如二极管激光器泵浦倍频绿光激

光器、激光诊断或治疗仪、激光夜视等也逐步形成规模，发展产业，如长春新产业光电子技术公司等创业史即为一例。而DVD光学头以及DVD驱动器的生产则是二次开发的明星产业，倘使形成年产值1亿元的DVD用激光器生产能力，则DVD光学头的产值可望达到10亿元，而DVD驱动器包括DVD播放机和DVD-ROM的产值就可达到100亿元了。

### 4 未来发展的展望

以市场驱动来开展科技研究和以科技创新来占领市场，这是发展光电子技术不可偏废的两面。

从开展科学创新和技术创新而言，形成自主知识产权，除继续开展低维量子阱光电子器件研究外，应注意新材料系的探索，如GaN蓝、紫光波段量子阱激光器的发展，以满足新一代超密DVD的需求，达到单层光盘15GB的存储密度；如新型白光光源的发展，以实现节能、长寿型的白炽灯替代产品；如有机发光和激光材料研究，以期得到低价、大面积的面型光源。还要注意新原理的探索。如通过隧道注入提高量子效率的发光和激光器件研制。无阈值激光器，紫外探测器，光子集成和光电子集成等都有待进一步着力探索。

就应用和市场目标而言，应以光通信、光存储、光显示、光互连、光计算、激光医疗以及节能光电子等为服务对象，立项选题。光电子农业应用与光电子环保应用是未来应加强关注的选题。通过产、学、研结合，以期研究成果不至于在发表文章或做出样品后就束之高阁，而是能为国民经济发展和国防建设做出贡献。

我国量子阱光电子产业已成雏形，正处于高斜率的上升阶段，以密集波分复用为代表的光通信应用，以DVD用650 nm红光激光器和GaN蓝光激光器为代表的光存储应用以及以红、绿、蓝LED为代表的全色光显示和白光灯，正预示着中国光电子产业的美好未来。当然，应该看到的是国外实力雄厚的公司也都在窥视着中国市场，机遇十分难得，竞争必然剧烈。

#### 参考文献

- [1] 陈良惠. 量子阱激光器的最新进展 [R]. 信息光电子学术研讨会, 厦门. 1990. 14~17
- [2] Chen Lianghui, Xu Junying, Li Likang, et al. MBE growth and quantum well lasers [J]. International

- Journal of Optoelectronics, 1992, 7 (1): 71~77
- [ 3 ] Chen Lianghui. Quantum well lasers and their applications [A]. Current Research and Development in Optical Fiber Communication in China [C]. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1996. 33~42
- [ 4 ] Chen Lianghui. Quantum well laser in mainland of China [R]. Third Chinese Optoelectronics Workshop, Changchun, 1996. 38~43

## The Development of Quantum Well Optoelectronic Devices and Formation of Chinese Optoelectronic Industry

Chen Lianghui

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

[ **Abstract** ] Optoelectronic technology is promoting the transform of information age, and its key component, optoelectronic devices are bring along a new industry-optoelectronic industry.

Quantum well laser is the third milestone on the semiconductor laser developing history. It has been called as ideal laser diode due to its advantages in all-important parameters.

The breakthrough of quantum well optoelectronic devices in China have been done by Chinese Academy of Sciences, with support by Chinese National Natural Sciences Foundation and Chinese National High Technology Developing Plans. They have been employed in the fields such as optical fiber communication, optical storage, optical display etc. The research teams have expanded from pure academic organizations and universities to industry. This will open up the trails for industrialization of optoelectronic devices.

Recently, Optoelectronic industry in China has formed in embryo. Several companies, who run business in the field of optical fiber communication, have output value beyond one hundred million RMB per year. As to noncommunication optoelectronic devices, it is on the momentum of swift and violent development. To put key components such as visible lasers and high brightness LED into domestic production will bring along industry of the pick-up, loader, even DVD player and DVD ROM, and the industry of full color display, traffic lamp, vehicle lamp and solid white light lamp. Their output value beyond ten billion RMB per year can be expected.

[ **Key words** ] quantum well; semiconductor; laser diode; optoelectronics; DVD

### 卫星 (TM) 影像图 (封面) 说明

该图为内蒙次生林地区 1:50000 卫星 (TM) 影像的一部分。从图上 (见彩图) 可获得如下信息:

- 有明显的几何排列采伐迹地及其更新情况;
- 可区分出不同的树种分布, 如红色为阔叶树,

绿色为针叶树等;

- 有为采伐作业而修建的简便道路以及与外部连接的等级公路;
- 可看到河流、地形及人工建筑物等。