

致谢 本文承蒙叶朝辉研究员、朱熙文研究员、李白文研究员和高克林副研究员阅读初稿,并提出宝贵意见,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 郑乐民、徐庚武, 原子结构与原子光谱, 北京大学出版社, (1988).
[2] C. S. Wood, D. Cho, C. Bennett et al., Proc. 14th Int. Conf. on Atom. Phys. (Boulder), Abstracts 1D-1, (1994).
[3] H. Dehmelt, *Rev. Mod. Phys.*, 62(1990), 525.

- [4] 王义道、王庆吉、傅济时等, 量子频标原理, 科学出版社, (1986), 355.
[5] F. Nez, M.D. Plimmer, S. Bourzeix et al., *Atomic Physics 13*, Eds. H. Walther, T.W. Hansch and B. Neizert, American Institute of Physics, (1993), 20.
[6] R. E. Marrs, *Atomic Physics 12*, Eds., J.C. Zorn and R.R. Lewis, American Institute of Physics, (1991), 189.
[7] S. L. Rolston, C. Gerz and P.D. Lett et al., Eds. H. Walther, T.W. Hansch and B. Neizert, American Institute of Physics, (1993), 118.
[8] J. Alper, *Science*, 261 (1993), 556.

量子阱级联激光器¹⁾

李 明

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘要 介绍了一种新型的作于 $4.25\mu\text{m}$ 的半导体激光器——量子阱级联激光器。这种新型激光器是单极性的, 它发光仅依赖于电子而非正负两种电荷。介绍了这种激光器的结构、工作原理和激光特性。

关键词 半导体激光器, 红外激光器, 量子阱

Abstract A new type of semiconductor laser, i. e. quantum cascade laser, which operates at $4.25\mu\text{m}$ is described. It is a unipolar laser operating solely on electrons rather than on positive and negative charges. The structure, operation principle and characters of this kind of laser are also introduced.

Key words semiconductor laser, infrared laser, quantum well

在被光激发的激光介质中, 如果在能级中布居的粒子数发生了反转, 即上能级粒子数大于下能级粒子数, 那么激光介质受激辐射的概率将大于受激吸收的概率。上能级粒子向下能级跃迁并释放光子。这是多数气体或固体激光器的工作原理。半导体激光器, 包括量子阱激光器是通过导带中的电子与价带中的空穴复合产生光子的。所产生光子的能量决定于导带与价带的能带间隙。最近, AT&T 贝尔实验室发明了一种量子阱级联激光器^[1-3]。它是一种多层的量子阱结构。每一层结构包括一个注入区和一个激发区。激发区为三个耦合量子阱。这种激光器的光子产生依赖于电子能级在耦合量子

阱中的台阶式分布。当电子从一个高能级量子阱跃入另一个低能级量子阱中时, 将产生一个光子。从物理内容上看, 这是一种新型激光器。因为它的发光机理不再像激光二极管那样依靠电子与空穴的复合产生光子, 而是电子在具有不同能级量子阱之间的迁移过程中, 释放能量产生光子。因而, 量子阱级联激光器是单极性激光器。

贝尔实验室设计的这种激光器的工作波长为 $4.25\mu\text{m}$ 。可根据要求, 通过改变激发区量子阱的阱宽改变电子能级, 从而使得激光器的工作

1) 1994年8月24日收到初稿, 11月7日收到修改稿。

作波长发生改变。4.25 μm 是大气窗口,在这一波段附近大气对光的吸收很小。因而,这种量子阱级联激光器在自由空间信息传输、激光雷达等方面将有很好的应用前景。

这里我们将介绍量子阱级联激光器的结构。激光器的工作原理以及激光器的工作特性。

1 量子阱级联激光器的结构与工作原理

量子阱级联激光器的有源区是能带呈台阶形的级联量子阱结构^[4]。贝尔实验室使用了 GaInAs/AlInAs 作为量子阱材料。有源区共有 25 级。每一级包含一个激发区和一个注入区。图 1 为量子阱级联结构中导带能级图的一部分。图中虚线部分为注入区,实线部分为激发区。每个激发区中有三个量子阱。自左向右,第一个量子阱阱宽为 8 \AA ,第二个量子阱阱宽为 35 \AA ,第三个量子阱阱宽为 28 \AA 。隔离三个量子阱的是四个势垒,它们的宽度分别为 45 \AA , 35 \AA , 30 \AA 和 30 \AA 。电子从注入区隧穿过 45 \AA 的势垒壁进入第一个量子阱,到达势阱中心位置的能级 E_3 。当电子从第一个量子阱 E_3 能级跃入到第二个量子阱中心能级 E_2 时,电子需释放能量,即产生一个光子 $h\nu = E_3 - E_2$ 。电子继续从第二个量子阱隧穿到下一个量子阱中,并达到能级 E_1 。在此过程中,声子将通过散射带走能量 $E_2 - E_1$ 。最后,电子从 E_1 能级的量子阱逃逸到注入区。贝尔实验室使用 GaInAs 为势阱材料,使用 AlInAs 为势垒材料。根据量子阱的结构和所使用的材料,用量子阱理论计算,得到 $E_3 - E_2 = 295\text{meV}$, $E_2 - E_1 = 30\text{meV}$ 。

注入区的作用是冷却在上一个激发区被加速了的电子。高速电子具有很高的动能,如果直接进入激发区,它将不落在 E_3 能级的量子阱内也不会跃迁到 E_2 能级,而直接穿过三个耦合量子阱。在这个过程中,并不释放光子。只有很慢的电子才与量子阱发生作用,并产生光子。为了使高速电子减速,设计了注入区。尽管图

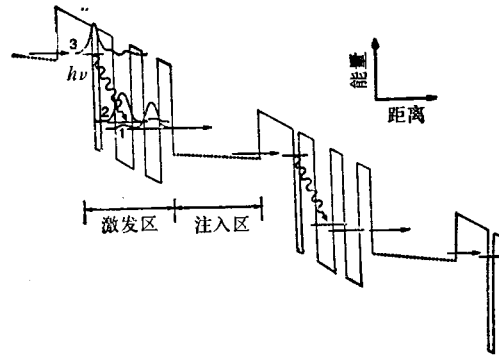


图 1 量子阱级联激光器的结构

1 虚线部分没有给出注入区的结构,但它却是一个具有六个周期的超晶格结构^[5]。每个周期 30 \AA 。每个周期势垒与势阱宽度各不相同。自左向右,势垒占超晶格的晶格常数的比从 40% 到 60% 阶跃变化。这种结构形成了六个能级台阶。电子从上一个激发区中逃逸到注入区具有一定速度。六个能级台阶形成了势能坡,它使电子逐渐减速,慢慢滑落到激发区。在理想的情况下,一个电子穿过 25 个级联激发区,将产生 25 个光子。

量子阱级联激光器是一个四能级工作系统。注入区能级、 E_3 , E_2 和 E_1 组成了这四个能级。能级 E_3 , E_2 应保持粒子数反转,即处在能级 E_3 的电子数应多于处在能级 E_2 的电子数,只有这样才能保证受激辐射大于受激吸收。这是激光产生的必要条件。量子阱级联结构在 10^5V/cm 电场的作用下,能级 E_3 到能级 E_2 之间的跃迁时间 τ_{32} 为 4.3ps。而能级 E_2 到 E_1 之间的跃迁时间相对较快, $\tau_{21} \sim 0.6\text{ps}$ 。电子从 E_1 逃离激发区的时间 $\leq 0.5\text{ps}$ 。这些说明了:电子在激发态 E_3 所驻留的时间相对较长,而在能级 E_2 所驻留的时间相对较短。因而,这个系统的粒子数反转是可以实现的。

虽然被激发的量子阱级联结构中的粒子数反转是成立的,但是这个系统的辐射效率很低,仅为 10^{-4} 量级。这使得系统的阈值电流很高。贝尔实验室制做的器件阈值电流为 1A 左右,这大大高于目前商用的半导体激光器的阈值电流。大的驱动电流会使激光器过热。设计者必

须考虑冷却系统。事实上，量子阱级联激光器是在低温环境下获得激光输出的。

2 量子阱级联激光器的制作

首先，根据所需要的工作波长和所使用的半导体材料，利用量子阱理论计算出 E_3 和 E_2 所在量子阱的阱宽和垒宽，并决定其他量子阱以及注入区宽度等参数^[6]。用分子束外延 (MBE) 的办法，在半导体衬底上生长出所设计的量子阱级联结构。

贝尔实验室按照表 1 所给出的材料、掺杂浓度以及厚度生长出量子阱级联结构。所用的

表 1 量子阱级联结构各层掺杂浓度和厚度

材 料	掺杂浓度 (cm^{-3})	厚 度 (nm)	
GaInAs (掺 Sn)	$n = 2.0 \times 10^{20}$	20.0	阻 触 层
GaInAs	1.0×10^{18}	670.0	
AlGaInAs	1.0×10^{18}	30.0	
AllnAs	5.0×10^{17}	1500.0	阻 隔 层
AllnAs	1.5×10^{17}	1000.0	
AlGaInAs (注入区)	1.5×10^{17}	18.6	波 导 层
激发区	无掺杂	21.1	
GaInAs	1.0×10^{17}	300.0	
AlGaInAs (注入区)	1.5×10^{17}	14.6	
AlGaInAs (注入区)	1.5×10^{17}	18.6	
激发区	无掺杂	21.1	
GaInAs	1.0×10^{17}	300.0	
AlGaIn	1.5×10^{17}	33.2	
AllnAs	1.5×10^{17}	500.0	
InP 衬底			

衬底为 n 型掺杂的 InP。激发区和注入区的势垒材料 AlInAs 和势阱材料 GaInAs 保持与 InP 晶格匹配。在激光工作区的上下都长有一定厚度的 AlInAs 限制层。工作区与限制层之间折射率梯度较大，这使得在工作区中的光子辐射平行于工作区。包括接触层、限制层、工作区几个组成部分的量子阱级联结构共有 500 层。将这种结构的样品腐蚀成 12—25 μm 宽的波导、并切成 500—2800 μm 长。端面作为激光腔镜，它们的反射率为 27%。以接触层和衬底为电极对样品施加电流驱动激光器工作。

量子阱级联激光器的制作难点在于量子阱级联结构的设计和测量。量子阱级联结构的生长只需要用计算机控制分子束外延设备按照所规定的程序运行。一个量子阱级联结构样品的生长时间为 3h。原则上说，一个样品可以做几万个量子阱级联激光器。

3 量子阱级联激光器的工作特性

贝尔实验室的科学家使用量子阱级联结构实现了连续和脉冲激光运转。

连续量子阱级联激光器的尺寸为 12 × 720 μm^2 。它的工作波长为 4.26 μm 。当温度为 10K 时，其阈值电流为 11kA/cm²。其激光特性曲线如图 2 所示。激光器最大输出功率超过 38.5 mW。激光器工作模式为多模，纵模间距为

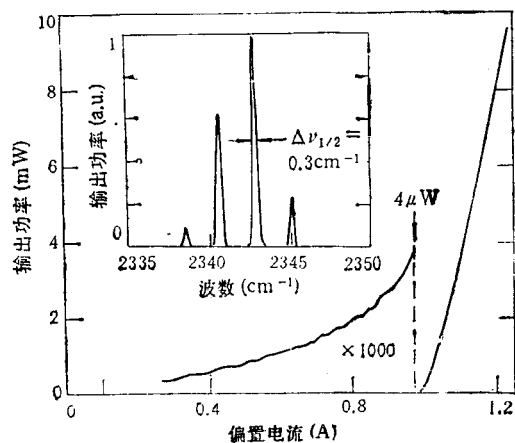


图 2 连续量子阱级联激光器的工作特性曲线和纵模特性

2.13cm^{-1} , 单模线宽 $\Delta\nu_{\frac{1}{2}}$ 为 0.3cm^{-1} , 激光输出发散角为 $\pm 40^\circ$. 实验表明, 当温度上升到 90K 时, 激光器仍能维持工作. 但它的阈值电流密度升至 $14\text{kA}/\text{cm}^2$. 实验还证实了, 当驱动电流较小时, 激光器的纵模多, 线宽较宽; 当驱动电流较大时, 纵模少, 线宽窄.

贝尔实验室在后来的工作中, 发展了这种激光器. 在相同的量子阱级联结构下, 做出了 $25\mu\text{m} \times 2800\mu\text{m}$ 的激光器, 并成功地实现了脉冲激光运转. 在温度为 102K 时, 激光峰值功率达 30mW . 阈值电流密度为 $5.8\text{kA}/\text{cm}^2$. 在温度为 10K 时, 激光功率为 120mW , 阈值电流密度为 $4.1\text{kA}/\text{cm}^2$.

贝尔实验室制作的这种多级量子阱激光器在结构上是全新的. 它的激光产生区别于通常半导体激光器的发光原理, 而仅依赖于电子在量子阱之间的能级跃迁. 通常的半导体激光器是电子、空穴复合发光. 电子、空穴的 $E-K$ 色散曲线是两条方向相反的抛物线. 因此, 在不同 K 值的电子跃迁时, 会造成激光输出具有较

宽的线宽. 单极性激光器中, 电子的激发态与基态的 $E-K$ 色散曲线是方向相同的两条抛物线. 直接跃迁的结果, 使量子阱级联激光器线宽很窄. 量子阱级联激光器的另一个优势在于可以根据需要设计量子阱宽, 从而产生所要求波长的激光. 尽管量子阱级联激光器在结构上是新颖的, 其应用前景也看好, 但要达到商品化还需要一段时间. 困难在于量子阱级联激光器的阈值很高. 然而, 无论如何量子阱激光器使人类第一次在中红外波段得到半导体激光.

参 考 文 献

- [1] B. G. Levi, *Physics Today*, **47**(1994), 20
- [2] J. Faist, F. Capasso, D.L. Sirco, et al, *IEEE Electronics Letters*, **30**(1994), 865
- [3] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sirco, et al, *Science* **264**(1994), 553
- [4] J. Faist, F. Capasso, C.Sirtori, et al, *IEEE Electronics Letters*, **29**(1993), 2230
- [5] F. Capasso, H.M. Cox, A.L. Hutchinson, et al, *Appl. Phys. Lett.*, **45**(1984), 1193
- [6] D.F. Nelson, R. C. Miller and D. A. Kleinman, *Phys. Rev. B*, **35**(1987), 7770

蓝 绿 光 激 光 器 现 状¹⁾

宁永强 元光 李树玮 金亿鑫

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

摘要 结合最近几年国际上研制蓝绿光激光器的主要进展, 介绍了实现蓝绿色激光输出的几个途径, 即: (1) 用非线性光学晶体倍频方法; (2) 研制宽带隙半导体材料激光器; (3) 掺入稀土离子, 利用上转换效应发射蓝绿激光.

关键词 蓝绿激光器, 倍频, 硒化锌, 上转换

Abstract On the basis of some of the new progress in the field of blue-green laser, we review several methods for generating blue-green laser, including frequency doubling with nonlinear optical crystals, wide band gap semiconductor lasers, and upconversion pumping in optical fibers doped with rare earth ions.

Key words blue-green laser, frequency doubling, ZnSe, upconversion

近年来, 随着光盘存储的高密度化和激光打印机的高精度化, 越来越需要小型、高输出的

1) 1994年5月20日收到初稿, 8月24日收到修改稿.