

文章编号: 1672-8785(2008)08-0006-05

$\lambda \sim 3\mu\text{m}$ 短波长中红外量子级联激光器的 发展及最新研究成果

石泾波 王一丁

(吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘 要: 量子级联激光器是一种基于子带间电子跃迁的新型单极光源。随着量子级联技术的发展, 短波量子级联激光器的发展尤为重要。文章简单地介绍了最近新发展的短波量子级联激光器全新的工作原理、结构设计思想以及它所固有的特点, 对其研究现状进行了简略总结, 同时对其未来的发展作出展望。

关键词: 量子级联; 有源区; 注入区

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A

Development of $\lambda \sim 3\mu\text{m}$ Short-wavelength Mid-infrared Quantum Cascade Lasers

SHI Jing-bo, WANG Yi-ding

(College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: A Quantum Cascade Laser (QCL) is a new monopolar source based on intersubband electronic transitions. With the development of the quantum cascade technique, it is particularly important to develop short wave quantum cascade lasers. In this paper, the new operation principle, design ideas and features of the short wave quantum cascade lasers developed recently are presented in brief, the current status of the short wave quantum cascade laser research is summerized and its future development is forecasted.

Key words: quantum cascade; active region; injection region

1 传统的半导体激光器

从最早的同质结半导体激光器开始, 人类研究半导体激光器的历史已经超过了半个世纪。传统的半导体激光器都是基于电子空穴的复合机制而发光的, 因而, 激光器的波长基本上是由半导体的材料决定的。但是由于可利用的半导体的材料的数目非常有限, 这就造成了有很大一部分的波长范围用传统的半导体激光器无法

覆盖, 因此, 一种波长范围较广的全新的半导体激光器的研制就日益重要了。这样, 在经过各方的努力后, 量子级联激光器 (QCL) 这种全新的半导体激光器就面世了。

2 量子级联激光器

2.1 量子级联激光器的研制意义及其光原理

波长在 $3\mu\text{m}$ 左右的量子级联激光器在气体探测、环境保护及军事上都有着重要的应用。比

收稿日期: 2008-05-23

作者简介: 石泾波 (1982 —), 男, 河北人, 2005 年于吉林大学电子科学与工程学院攻读微电子与固体电子学硕士学位, 主攻中红外量子级联激光器。

如, 历年来频频发生的煤矿爆炸事故多数是因矿中甲烷的含量超过了安全警戒线而引发的, 而甲烷这种气体的吸收峰就在这个波段, 因此 $3\mu\text{m}$ 的量子级联激光器的研制就尤为重要了。此外, 这种激光器在社会和国防各个领域都有着重要的应用。

传统的半导体激光器, 不论是双异结激光器还是量子阱激光器, 都是依靠导带的电子和价带的空穴复合而发光的, 其激射波长都由有源区的带隙决定。这样, 对于在通信、痕量气体检测 and 环境污染监控等方面非常重要的 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m} \sim 13\mu\text{m}$ 中远红外波段大气窗口, 半导体激光器只能望洋兴叹。自然界中禁带宽度适于这一波段的半导体材料是铅盐材料, 然而科学家们发现用铅盐材料制成的激光器只能在极低的温度下工作, 而且输出功率很低。

为了解决中远红外波段缺乏半导体激光器的问题, 科学家们跳出 p-n 结半导体激光器激射机制的经典理论, 提出了单极子量子级联激光器的设想并最终将其变为现实。

量子级联激光器的最初设想是于 1971 年由 Kazarinov 和 Suris 提出的。他们考虑了如图 1 所示的超晶格。当超晶格的势垒较厚时 ($\geq 10\text{nm}$), 电子态可视为局域态。一个阱中的基态电子通过顺序共振隧穿到达下一阱的第二激发态, 而第二个阱的第一激发态电子通过阱内非辐射过程能很快弛豫到该阱的基态, 这样在第二激发态与第一激发态之间就形成了粒子数反转, 从而有可能出现受激发射, 发射光的波长由第二激发态与第一激发态之间的能级差决定。由于

这个能量差完全取决于量子限制效应而与有源区材料的禁带宽度无关, 所以他们预计这样的激光器的工作波长可以从 $5\mu\text{m}$ 到 $250\mu\text{m}$ (现已成功制作出 $3\mu\text{m}$ 的量子级联激光器)。另外, 由于电子可以在导带子能级台阶上一级一级地跃迁, 并且在每一级上都能发出一个光子, 因此这样的级联工作方式可以使一个电子发出不止一个光子, 而不是像传统半导体激光器那样一个电子·空穴对的复合只产生一个光子。

2.2 量子级联激光器的优势

对比传统的带间跃迁的双异质结 p-n 结激光器和量子阱激光器, QCL 有着明显的不同:

(1) 传统的 p-n 结激光器由导带的电子和价带的空穴复合发出光子, 为双极型激光器; 而 QCL 中由电子在导带子带间跃迁产生光子, 跃迁过程只有电子参与, 为单极型激光器。

(2) p-n 结激光器由电子空穴对复合发光, 因此其内量子效率不能超过 100%; 而在 QCL 中, 电子在发出一个光子后并没有被湮没, 可以通过隧穿进入下一周期, 因此 QCL 的内量子效率可以高于 100%。理想情况下, QCL 的内量子效率等于工作层中“有源区/注入区”的周期数。因此在 QCL 中可以获得更大的输出功率。

(3) p-n 结激光器受其复合机制的影响, 出射光子的能量要高于阱层材料的带隙。对给定的阱层材料, 出射光子能量的变化由阱层受到的量子限制效应决定, 能量的变化范围很小, 难以推向长波段。而在 QCL 中, 出射光子的能量与带隙无关, 只取决于导带子带的能量间隔。因此在同样的材料体系中, 通过改变各量子阱的

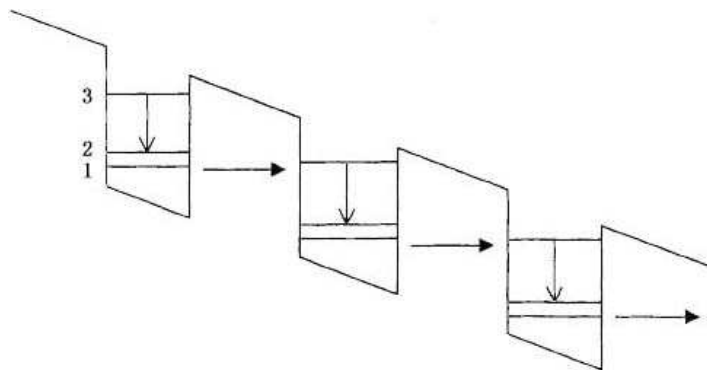


图 1 最初设计的量子级联激光器的原理

宽度和间隔就可以在很大的范围内改变激射能级的间隔,从而调节出射光的波长。目前,在与 InP 匹配的 InGaAs/InAlAs 量子级联激光器体系中,激光波长的覆盖范围已达 $3.6\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$;而在 GaA/AlGaAs 体系中,波长已从 $10\mu\text{m}$ 一直调节到 $88\mu\text{m}$ 。

(4) 在 p-n 结激光器中,电子和空穴的有效质量符号相反,不同波矢的电子-空穴对的能量差异不同,这导致激光器的增益谱随注入电流的增加而展宽。此外,满足某一波长的电子-空穴对的数目是有限的,导致增益在大注入电流下饱和。在 QCL 中,各子带中的电子有效质量接近,不同波矢的电子跃迁对应的能量也非常接近,使得 QCL 的增益谱的谱宽很窄,且不容易饱和。因此理论上 QCL 可以获得更窄的线宽和更高的输出功率,并具有优于量子阱激光器的高频特性。

2.3 短波长半导体激光器研制的现状

20 世纪 70 年代初提出的量子级联理论打破了传统半导体激光器基于电子-空穴复合发光的束缚,它基于单一载流子(电子)在导带子带间跃迁而发光,该理论可谓之半导体激光器理论的一次革命。之后研制成功的量子级联激光器则彻底颠覆了人们对传统激光器的认识,打破了必须借助电子-空穴复合才能使激光器发光的这一理念,使我们认识到单极发光的激光器并不是遥不可及的。

近年来,随着量子级联技术的发展,我们成功实现了过百微米波长的激射。虽然实现了量子级联激光器的长波发射,但是研制短波长的量子级联激光器一直是困扰着各国科学家的难题。传统的量子阱激光器目前可轻松实现 1 微米左右的激射,而量子级联激光器的发射波长普遍在 $5\mu\text{m}$ 以上。但是对于 $3\mu\text{m}$ 左右这一有着极其重要应用的波段,由于受到各种限制,激光器的研制工作的进展还是相对缓慢。因此本文重点介绍最近两年这一波段的量子级联激光器的研究进展。

众所周知,有一个大气窗口的范围是 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$, 波长在这一波段的激光器尤为重要,可

是由于量子级联激光器是利用电子在材料子带间的跃迁发光,要实现短波激射就必须使光子能量比较高,这就要求有足够大的导带偏移,但是目前多数材料的子带的能量间距本来就比较小,根本无法实现短波的激射,有些材料的导带偏移确实比较大,但是由于一系列原因包括其自身的缺陷、技术水平等各方面的限制,即使利用能带工程技术也难以实现比较短的波长的发射,这就造成了短波长的量子级联激光器发展的滞后。

不过,近几年来短波长量子级联激光器的发展取得了可喜的进展。其中英法德三国的的发展尤为迅猛,取得了举世瞩目的成果。

以 A.N.Baranov 为代表的蒙彼利埃第二大学以 InAs/AlAs 为材料研制波长在 $3\mu\text{m}$ 左右的量子级联激光器取得了令人瞩目的成果。由于 InAs/AlSb 材料体系的导带偏移非常大,为 2.1eV , 非常适于制作短波长的量子级联激光器。2005 年, A.N.Baranov 等人用 InAs/AlSb 材料研制出了波长低于 $3\mu\text{m}$ 的量子级联结构^[1]。样品用分子束外延法(MBE)生长在 GaSb 衬底上,在 InAs 和 AlAs 层之间生长一层类 InSb 界面来提供更好的晶格匹配。在两个渐变层之间嵌入 10 周期的有源区,提供 GaSb 缓冲层和 GaSb 接触层间的能带匹配。在 GaSb 衬底上生长一层 50nm 厚的 InAs 接触层来改善表面的欧姆接触。随后器件被处理成 $160\mu\text{m} \times 160\mu\text{m}$ 的台面,非合金的 Cr-Cu 在 InAs 顶部接触层上, In 合金与底部 GaSb 衬底接触。器件一个边成 45° , 用 In 焊接到铜热沉上。此样品获得了 $\lambda = 2.5\mu\text{m}$ 的带间发射。

到了 2006 年,终于研制出了 $\lambda = 3.1\mu\text{m} \sim 3.3\mu\text{m}$ 的量子级联激光器^[2]。相比于以前的设计,一个主要的发展就是激光器波导的设计,这种器件采用了等离子增强波导,包含重掺杂的 n 型 InAs 包覆层和 InAs/AlSb 超晶格隔离层。高掺杂的包覆层改变了带间吸收边缘。因此高温时在波长 $3\mu\text{m}$ 附近的包覆层中的带间吸收可以忽略不计。超晶格隔离层可以阻止能带间隙为 700meV 和 560meV 的第一第二小能带间吸收。由于重掺杂的包覆层间的模式的交叠,隔离层还可以减小光损失。激光器为 $16\mu\text{m}$ 宽的脊形,

界面不帶有任何涂层, 向下固定在热沉上。此激光器在 83K 时的阈值电流密度接近 3 kA/cm^{-2} , 脉冲模式时的工作温度可以达到 240K。

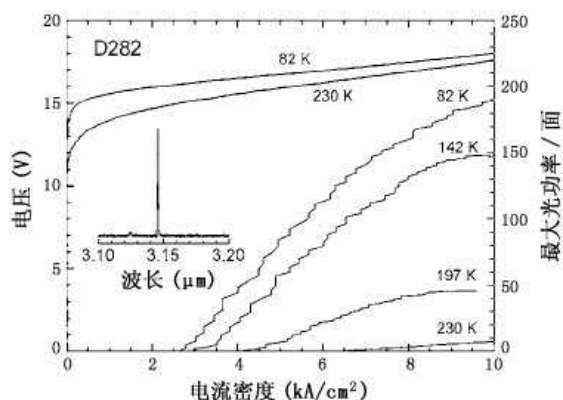


图 2 波长为 $3.15\mu\text{m}$ 的器件的电压与阈值电流密度的关系图

一年之后, 他们又进一步改善了器件^[3]。新的 InAs/AlAs 量子级联激光器的波长低于 $3\mu\text{m}$, 并且性能上并没有衰退。中掺杂的 InAs 包覆层和 InAs/AlSb 超晶格隔离层可以阻止这个波长处的带间吸收。与上个器件不同的是在背面沉积了由 500nm 的 SiO_2 、10nm 的 Cr 和 100nm 的 Au 组成的高反射涂层。在低温时, 带有涂层的器件与不带有涂层的器件相比, 其阈值电流密度要减小 20%。这是因为镜面损失减小了。在 84K 温度下, 器件以脉冲模式工作时的波长为 $2.95\mu\text{m} \sim 2.97\mu\text{m}$, 阈值电流密度接近 3 kA/cm^{-2} 。器件还可以在近室温下工作。

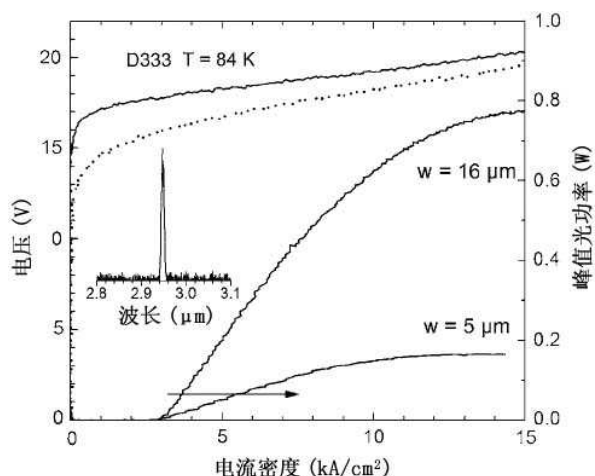


图 3 波长为 $2.95\mu\text{m}$ 的器件的电压与阈值电流密度的关系图

2007 年初, 英国谢菲尔德大学的 D.G.Revin 等人也研制出了波长在 $3\mu\text{m}$ 附近的量子级联激光器^[4], 其能带图如图 4 所示。该器件采用 In-GaAs/AlAsSb/InP 材料体系, 最短波长可以达到 $3.05\mu\text{m}$ 。20K 时的阈值电流密度为 12 kA/cm^{-2} , 脉冲模式的最高工作温度为 110K。当将超晶格周期由 42.8nm 改变为 48nm 时, 该器件的性能有了很大的提升。波长在 $3.4\mu\text{m}$ 到 $3.6\mu\text{m}$ 之间, 工作温度可以高达 300K, 80K 时的阈值电流密度大约为 2.6 kA/cm^{-2} 。

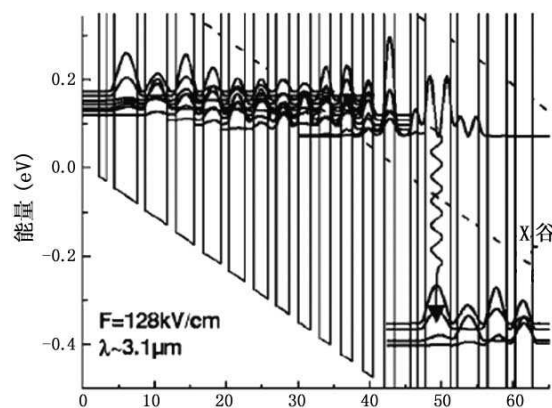


图 4 器件的能带图

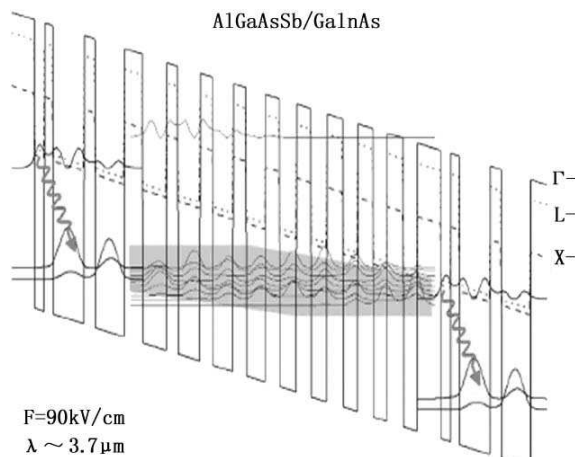


图 5 AlGaAsSb/InGaAs 量子级联激光器的能带示意图

同年, 德国夫琅和费研究所的 Quankui.Yang 等人采用 InGaAs/AlGaAsSb 研制成短波长的最大功率量子级联激光器^[5]。该激光器的峰值功率为 10.5W, 波长为 $3.6\mu\text{m} \sim 3.8\mu\text{m}$, 这应该是波长在 $3\mu\text{m}$ 附近的量子级联激光器的最大功率。

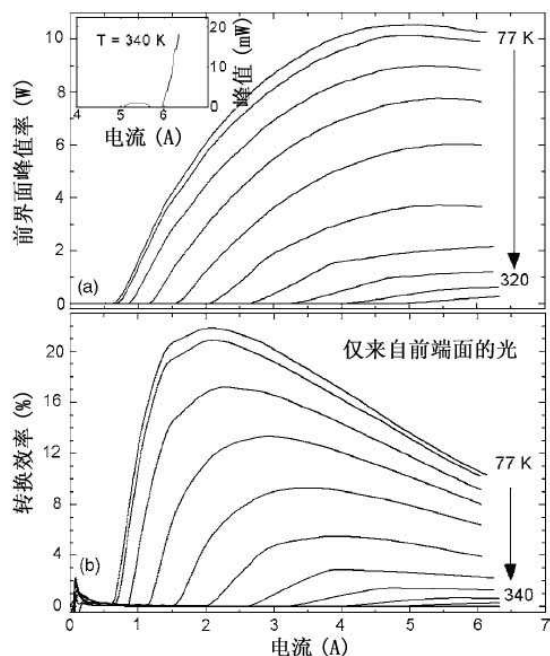


图 6 不同热沉温度下的 (a) 光输出与注入电流示意图 (b) 温度与转换功率示意图

他们的创新之处在于采用四元的 AlGaAsSb 代替了三元的 AlAsSb，并且改变了有源区，使量子

阱中的垂直跃迁变为斜跃迁，再在背面加一层高反射涂层，这样就极大地提高了峰值功率。四元化合物 AlGaAsSb 作为制备量子级联激光器的限制层材料与三元的 AlAsSb 相比，可以增强结构总体的电子隧穿几率和降低界面的氧化，并且因此增加寿命。斜跃迁增强了注入区基态和有源区上激光能级的耦合，提高了注入效率。高反射涂层可以降低镜面损失。因此，可以获得更高的激光器的峰值功率。

参考文献

- [1] D Barate, R Teissier, Y Wang, et al. Appl. Phys. Lett., 87, 051103 (2005) [J].
- [2] J Devenson, D Barate, O Cathabard, et al. Appl. Phys. Lett., 89, 191115 (2006) [J].
- [3] J Devenson, R Teissier, O Cathabard, et al. Appl. Phys. Lett., 90, 111118 (2007) [J].
- [4] D G Revin, J W Cockburn. Appl. Phys. Lett. 90, 021108 (2007) [J].
- [5] Quankui Yang, Christian Manz, Wolfgang Bronner, et al. Appl. Phys. Lett., 90, 121134 (2007) [J].

国外专利介绍

红外成像系统及其所用的透镜组件

美国专利 US7368716

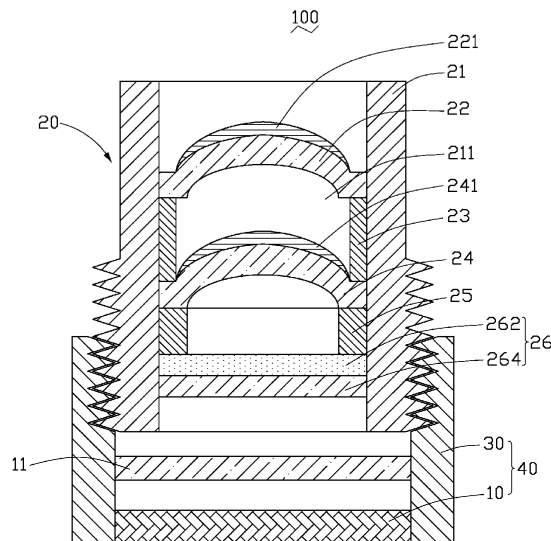
(2008 年 5 月 6 日授权)

红外光的波长比可见光的波长长。红外光具有可见光的许多特性，但其不同的波长又使其具有若干独特的特性。例如，对可见光不透明的材料可能对红外是透明的，反之亦然。此外，红外光受烟雾或尘埃散射和吸收的影响比可见光小得多，而且红外光是人眼看不见的。

本发明提供一种红外成像系统，它包括一个成像组件和一个与之相配的透镜组件。透镜组件中有一个用以限定通孔的镜筒，通孔中至少安置有一个透镜，而整个镜筒中还安置了一个用以滤除可见光的红外带通滤光片。该红外成像系统可以防止红外传感器受可见光的影

响。

本专利说明书共 6 页，其中有 3 张插图。



高 编译