

高级光电子 技术实验

Advanced Optoelectronic
Experiments

陈徐宗 王青 齐向晖 王爱民 赖舜男 / 编著

非外借

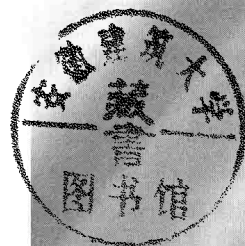


北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

高级光电子 技术实验

Advanced Optoelectronic
Experiments

陈徐宗 王青 齐向晖 王爱民 赖舜男 / 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

高级光电子技术实验/陈徐宗,王青,齐向晖等编著. —北京:北京大学出版社, 2018. 9
ISBN 978-7-301-29865-7

I. ①高… II. ①陈… ②王… ③齐… III. ①光电子技术—实验—教材
IV. ①TN2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 202681 号

书 名 高级光电子技术实验
GAOJI GUANGDIANZI JISHU SHIYAN
著作责任者 陈徐宗 王 青 齐向晖 王爱民 赖舜男 编著
责任编辑 王 华
标准书号 ISBN 978-7-301-29865-7
出版发行 北京大学出版社
地 址 北京市海淀区成府路 205 号 100871
网 址 <http://www.pup.cn> 新浪微博: @北京大学出版社
电子信箱 zpup@pup.pku.edu.cn
电 话 邮购部 010-62752015 发行部 010-62750672 编辑部 010-62765014
印 刷 者 天津中印联印务有限公司
经 销 者 新华书店
730 毫米 × 980 毫米 16 开本 11.75 印张 230 千字
2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

内容提要

本书是根据北京大学信息科学技术学院新开设的“高级光电子技术实验”课程,所编写的配套教材。该课程围绕近几十年发展起来的一些量子技术,以相关诺贝尔奖的工作为蓝本,设计搭建了一系列学生实验平台,构成面向高年级本科生和低年级研究生的专业实验课,帮助他们进行专业方向选择和实验技能训练。全书分原理篇和实验篇两部分。原理篇详细介绍了半导体激光器、激光光谱及其稳频、激光冷却、飞秒光梳和精密测量等原理和技术。实验篇就是围绕这些技术设计了一系列相关实验,目前共有八个实验,分连续光和脉冲光两条线开展,具体来说:前五个实验是基于连续激光,第一个和第二个实验是进行外腔半导体激光器的组装与特性测量,第三个和第四个实验是搭建饱和吸收光谱然后进行激光稳频,第五个实验是磁光阱,属于连续光这条线的综合实验;后三个实验基于脉冲激光,第六个和第七个实验是搭建锁模激光器,然后进行放大、扩谱等,第八个实验是利用飞秒光梳进行铷原子跃迁谱线的绝对频率测量,属于连续光和脉冲光的大综合实验。当然,该课程开设时间尚短,实验内容还在不断扩充完备,后续会不断加入新的实验,比如量子纠缠、原子钟等。

本书内容丰富,紧跟时代潮流,包含激光、电路、机械、原子物理和量子力学等多学科的知识,通过各个实验,把这些知识有机整合在一起,原理介绍和实验设计深入浅出,内容设置注重理论与实践相结合,非常适合锻炼学生的实验动手能力和逻辑思维能力;同时,学生在重复当年的诺贝尔奖工作的过程中,能够切实感受到前辈先贤们那些精妙绝伦的技术创新,有助于提高他们的科研热情。

前 言

20 世纪初,科学家们对原子辐射分离光谱的研究,催生了量子力学;20 世纪中叶,激光的出现,使得科学家们对原子内态和外态的精密控制成为可能,同时也为光的频率精密控制奠定了基础。随着原子物理与量子物理基础研究的发展,催生了量子技术:原子的光抽运技术(1966 年诺贝尔物理学奖)是铷原子钟、原子磁场计等的基础;原子饱和吸收光谱技术(1986 年诺贝尔物理学奖)的发明推动了激光稳频技术的发展;基于激光稳频技术的激光冷却原子技术(1997 年诺贝尔物理学奖)又推动了原子喷泉钟、光钟(2012 年诺贝尔物理学奖)、原子干涉仪、原子陀螺、原子磁场计以及玻色-爱因斯坦凝聚(2001 年诺贝尔物理学奖)、量子模拟、量子计算等的发展。另外,脉冲激光技术的发展,使得科学家们对光学频率的测量与控制更为方便,基于飞秒激光锁模技术的光学梳状发生器(2005 年诺贝尔物理学奖),可以实现微波至光波的精密频率转换与控制,也可以对原子结构以及物理常数进行高度精密的测量。

以上技术的发展,形成了当代量子技术的基础,相关研究领域都是前沿热门课题,对社会发展产生了深远的影响。本教材设计了一系列实验,将上述诺贝尔奖的成果转换到实验课程之中,使得学生能够通过实验感受、理解与掌握量子技术的基本技巧,具体包括连续激光频率稳频技术、饱和吸收光谱技术、激光抽运技术、原子冷却技术、脉冲激光锁模技术、脉冲激光扩谱技术、光梳频率测量技术等;每个实验的设计都以相关诺贝尔奖的工作为蓝本,遵循高起点、低落点的原则,深入浅出,精心设计,保证学生通过一定的独立思考和小组讨论,就能完整地做出实验,从而直观感受先贤们的绝妙设计;实验课程的目标,旨在锻炼学生基本科研技能的同时,培养科研兴趣,激发科研热情。

同时,为了完备实验课程所涵盖的各类量子技术,新的实验也在不断设计补充之中,确保紧跟时代发展潮流。

北京大学信息科学技术学院新开设“高级光电子技术实验”课程,本书的内容选自该课程的基本内容,分为原理篇和实验篇两部分,可以为高级光电子技术实验或量子技术基础实验所用。

本教材由北京大学信息科学技术学院的老师们共同编写:第一章、实验一和实验二由齐向晖编写;第二章、第三章和实验四由陈徐宗编写;第四章、实验六和实

验七由王爱民编写;第五章、实验五和实验八由王青编写,实验三和附录部分由赖舜男编写。本教材实验由陈徐宗负责总体设计与策划,由王青与赖舜男负责校对与修改。在编写过程中得到了北京大学王志军老师、李文新老师、张新祥老师等的热情帮助,在此表示诚挚的谢意。

由于水平有限与时间仓促,错误和不妥之处在所难免,恳请读者指出错误和提出意见,我们至为欢迎!

作者

2018年1月

目 录

原 理 篇

第一章 外腔半导体激光器技术	(1)
1.1 前言	(1)
1.2 半导体激光器产生激光的基本原理	(2)
1.3 外腔半导体激光器	(9)
第二章 饱和吸收光谱与激光稳频技术	(14)
2.1 饱和吸收光谱	(14)
2.2 饱和吸收光谱的实验介绍	(22)
2.3 激光稳频的基本原理	(23)
2.4 半导体激光稳频的基本电路	(32)
2.5 微分信号与频率稳定性测量	(33)
第三章 激光冷却与磁光阱技术	(36)
3.1 前言	(36)
3.2 激光冷却的基本原理	(37)
3.3 磁光阱的基本原理	(41)
3.4 磁光阱有关各项参数的研究与测量	(44)
第四章 超快光纤激光技术	(51)
4.1 前言	(51)
4.2 光纤的基本特性	(52)
4.3 光纤激光器	(55)
4.4 超短脉冲光纤中的传播和测量	(58)
4.5 超短脉冲的测量	(61)
4.6 锁模激光的基本工作原理	(63)
4.7 色散控制与锁模	(65)
4.8 激光器噪声构成	(68)

第五章 光纤飞秒光梳测定光学绝对频率技术	(70)
5.1 前言	(70)
5.2 光学频率链测量光学频率的方法	(70)
5.3 光学频率梳基本原理	(72)
5.4 光纤飞秒光梳	(74)
5.5 利用稳频飞秒激光器测量未知光学频率	(80)

实 验 篇

实验一 外腔半导体激光器的组装	(83)
实验二 外腔半导体激光器特性测量	(97)
实验三 饱和吸收光谱	(102)
实验四 激光稳频	(110)
实验五 磁光阱	(121)
实验六 超快光纤激光器特性测试	(133)
实验七 掺铒光纤锁模激光振荡器搭建	(144)
实验八 光纤飞秒光梳测定光学绝对频率	(150)
附录一 AQ6370C 光谱分析仪操作手册	(160)
附录二 波长计使用说明	(171)
附录三 铷原子参数	(173)
附录四 光电探测器	(176)
附录五 诺贝尔物理学奖获奖人物简介	(178)

原理篇

第一章 外腔半导体激光器技术

1.1 前言

激光技术是光电子学各相关方向的基础,自 1962 年第一支半导体激光器问世以来,半导体激光器有了很大的发展。20 世纪 70 年代末,随着半导体激光介质制作工艺的改进和完善,半导体激光器的性能得到了很大的提高,各种类型的新产品不断涌入市场。由于半导体激光器具有体积小、效率高、结构简单、价格便宜、便于调谐等优点,目前已被广泛运用于光纤通信、激光印刷、激光唱机、激光测距、激光医疗等方面。另外在激光光谱、原子分子物理、量子频标、原子核物理等基础研究领域,半导体激光器也越来越发挥其重要作用。

半导体激光稳频是半导体激光实现频率控制的一种重要技术。稳频激光不但可用于长度的精密测量,而且在激光通信、原子钟、纳米科技、三维精密控制、原子分子结构的精密测量和能态的标定以及物理基本常数的精密测量等方面有着广泛的应用,目前常用的稳频半导体激光有 532 nm、633 nm、780 nm、850 nm 和 1 500 nm 等几个波段,前四种主要应用于精密测量、原子钟、激光光谱等领域,后一种主要应用于光纤通信。半导体激光频率标准是稳频半导体激光中稳频精度最高的一种,它是将激光频率锁定于原子或分子的超精细能级间的稳定跃迁频率从而获得高精度的激光频率,并以此作为光频率的标准(简称光频标)。常用的光频标最好的不确定度为 10^{-13} 量级,对于 1km 的长度测量其误差仅为 0.1 nm。目前用于科研的最高精度的光频标的不确定度为 10^{-18} 量级,若用于计时,相当于 300 亿年误差不超过 1 s。

本章详细介绍半导体激光器产生激光的基本原理以及其基本特性,包括其频率调谐特性和功率输出特性,然后介绍应用最为广泛的外延腔半导体激光器,包括外延腔压窄激光线宽的基本原理和外延腔频率调谐的基本原理。

1.2 半导体激光器产生激光的基本原理

半导体激光器是利用少数载流子注入产生受激发射的器件,和其他激光器一样,半导体激光器发射激光也必须具备三个条件:粒子数反转、共振腔和激励源。由于构成半导体激光管的晶体材料不同,半导体激光器从结构上可分为 PN 结激光器、异质结激光器和分布反馈激光器。

半导体晶体是构成半导体激光器的工作物质,由于其晶体内部电子的共有化运动,使半导体晶体内部原子的费米能级形成的能带结构,如图 1.1 所示。

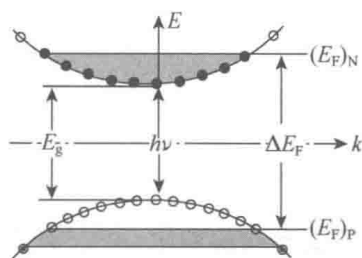


图 1.1 半导体晶体中的费米能级

在晶体中,由价电子能级分裂而成的能带称为价带,如有电子因某种原因受激进入空带,则此空带称为导带。在导带和价带的间隔范围内,由于电子不能处于稳定能态,实际上形成了一个禁区,称为禁带,其宽度常用 E_g 表示。对于直接跃迁,例如电子吸收一个光子,它将从价带顶跃迁到导带底,反之,如从导带底跃迁到价带顶则放出一个光子,放出光子和吸收光子的频率 ν 满足关系:

$$h\nu \cong E_g \quad (1.1)$$

由半导体激光器的理论可知,若半导体晶体中的 PN 结两端电压 U 满足:

$$U > E_g/e \quad (1.2)$$

相互作用区的电子准费米能级 $(E_F)_N$ 和空穴准费米能级 $(E_F)_P$ 则满足产生受激发射的粒子数反转条件:

$$\Delta E_F = (E_F)_N - (E_F)_P \geq E_g \quad (1.3)$$

半导体激光器产生的基本原理是在外部激励源作用下,在半导体晶体中的 PN 结两端加上适当的电压,使载流子形成反转分布,即导带中拥有电子,而其对应的价带中则留有空穴,如图 1.1 所示。导带中的电子向下跃迁至能量低的价带,而发生电子和空穴的复合,跃迁时发出光子,由于谐振腔的反馈作用使特定频率的光子可以在腔内因受激辐射而得到放大,最终产生激光。

1.2.1 半导体激光器的频率调谐特性

对于半导体激光器,激光输入的波长由腔长和激光增益二者决定。为了分析方便,可以假设激光波长 $\lambda_c(T)$ 由接近于增益峰值波长 $\lambda_p(T)$ 的腔模 $\lambda_M(T)$ 决定,即

$$\lambda_c(T) = \lambda_M(T) = 2n(T)L/M \quad (1.4)$$

这里, M 是最接近 $2n(T)L/\lambda_p(T)$ 的整数,也即

$$M = \text{int}\{2n(T)L/\lambda_p(T)\} \quad (1.5)$$

由于折射率 $n(T)$ 和温度有关,

$$n(T) = n_0 + pT \quad (1.6)$$

而增益峰值频率 $\nu_p(T)$ 又由禁带宽度决定。当温度变化时,禁带宽度 $E_g(T)$ 随之变化,

$$E_g(T) = E_g(0) - aT^2/(T+b) \quad (1.7)$$

即

$$\nu_p(T) = \nu_p(0) - aT^2/h(T+b) \quad (1.8)$$

对于给定的材料和温度范围, a 和 b 可以看作常数,由此可得激光波长 $\lambda_c(T)$ 和温度 T 的关系为:

$$\lambda_c(T) = \frac{2(n_0 + PT)L}{\text{int}\{(2L/C)(n_0 + PT)[\nu_p(0) - aT^2/h(T+b)]\}} \quad (1.9)$$

由式(1.9)得到如图 1.2(a)的 $\lambda_c(T)-T$ 关系曲线,由于腔模的分裂,导致了跳模现象(Mode Hopping)。为了表述激光波长(频率)随温度变化的敏感性,定义温调率为:

$$F^T = \left(\frac{d\nu}{dT} \right) \quad (1.10)$$

其单位为 GHz/K,对于一般激光管, $F^T \approx 60$ GHz/K。

另外,当改变激光器的工作电流 I 时,由于电流流过激光介质产生的热效应也会改变激光频率,我们将这种激光随工作电流的变化率称为电调率:

$$F^I = \left(\frac{d\nu}{dI} \right) \quad (1.11)$$

其单位为 MHz/mA,对于 SDL-5420 型激光管, $F^I \approx 1.3$ GHz/mA。如图 1.2(b)所示为 λ_c-I 的关系曲线,其中也有跳模现象产生。

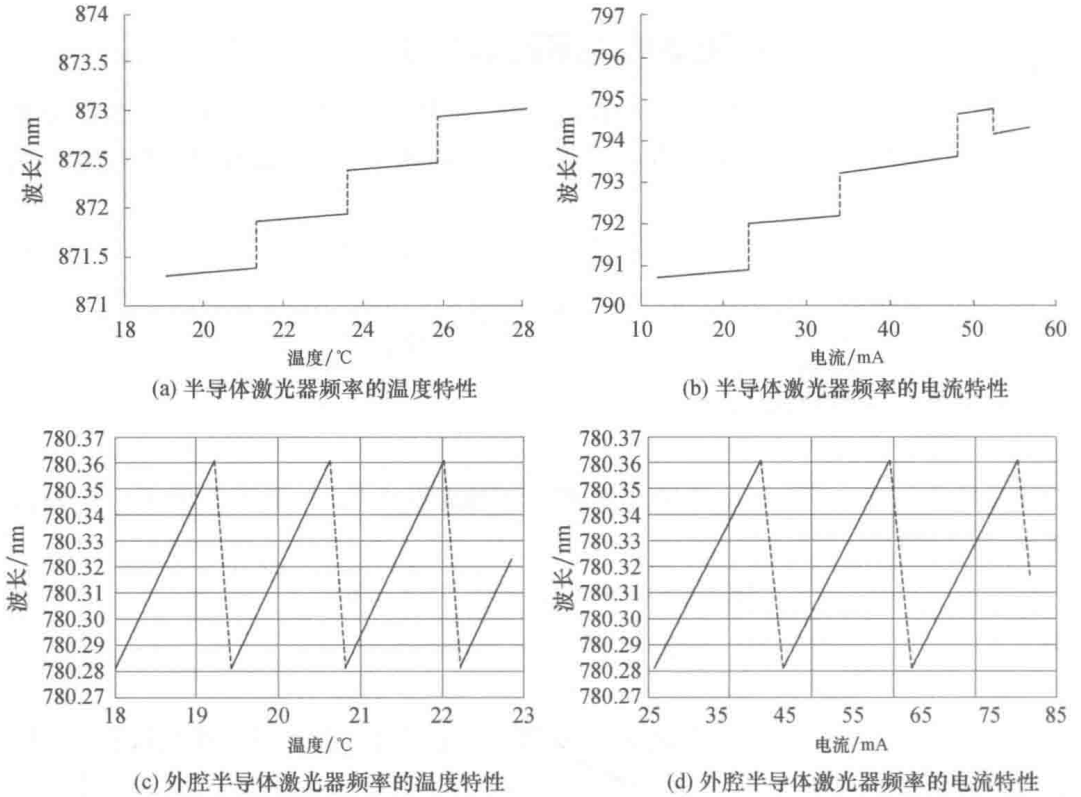


图 1.2 半导体激光器输出频率的工作温度和电流的关系

1.2.2 半导体激光器的功率输出特性

半导体工作物质实现了粒子数反转后,光在谐振腔内传播时就有增益,但能否有效地形成激光振荡,还与腔内损耗有关。只有当光在腔内来回传播一周的过程中增益 G 等于损耗 α 时,才能满足振荡的阈值要求,此时的增益为阈值增益 G_{th} 。如图 1.3 所示,半导体激光介质腔,则有:

$$R_1 R_2 I(0) e^{(G-\alpha)2L} = I(2L) \quad (1.12)$$

亦即:

$$e^{(G_{th}-\alpha)2L} R_1 R_2 = 1 \quad (1.13)$$

或

$$G_{th} = \alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (1.14)$$

式 1.14 的右式中第二项为输出端面引起的损耗,当腔长 L 越短,引起的损耗越大。由于半导体激光器是固体激光器,其能产生受激辐射的粒子密度(非平衡载流子)

要比气体激光器的粒子密度高几个数量级, 所以其增益系数远大于气体激光器的增益系数。因此, 半导体激光器的谐振腔长 L 可比气体激光器的短很多, 另外, 共振腔端面的反射率也不必很高。对于砷化镓(GaAs)半导体激光器, 其增益 G 和工作电流 I 呈线性关系:

$$G = \beta I \quad (1.15)$$

其对应的阈值电流为:

$$I_{th} = \frac{1}{\beta} \left(\alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (1.16)$$

由式 1.16 可知, I_{th} 与反射率 R_1 和 R_2 有关, 通常两个共振腔端面都是天然解理面, 有 $R_1 = R_2 = 0.32$ 和 $\ln(1/R_1 R_2) = 2.28$, 若其中一个端面镀全反膜, 有 $R_1 = 1$, 则 $\ln(1/R_1 R_2) = 1.14$ 。因此, 当一个端面镀全反膜时, 可以降低阈值电流。另外, 当腔长增大时, 也可以降低阈值电流。

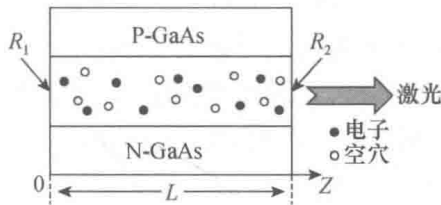


图 1.3 半导体激光介质腔示意图

半导体激光器的输出功率为:

$$P = \eta(h\nu/e)(I - I_{th}) \quad (1.17)$$

其中 η 为量子效率, 如图 1.4 所示, 半导体激光器输出功率和工作电流的关系。

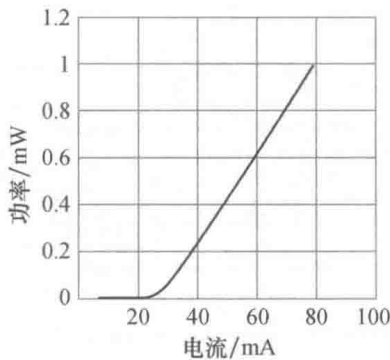


图 1.4 半导体激光器输出功率(部分)和工作电流的关系

1.2.3 半导体激光器的结构和封装

半导体激光器,顾名思义就是用半导体材料作为激光介质的一类的激光器。半导体激光器所涉及的半导体的种类很多,但目前最常用的有两大类,一类是砷化镓(GaAs)和镓铝砷($\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$,下标 x 表示 GaAs 中被 Al 原子取代的 Ga 原子的百分数)系列;另一类是 InP 和 $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ 系列(下标 x, y 表示 In 和 P 的掺杂浓度)。砷化镓和镓铝砷类半导体激光器的波长 λ 取决于掺杂浓度 x ,一般为 $0.85 \mu\text{m}$ 左右,InP 和 $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ 类半导体激光器的波长也取决于掺杂浓度 x 和 y ,一般为 $0.92 \sim 1.65 \mu\text{m}$,其中最常用的波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 。目前光纤通信所用半导体激光波长主要在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近,由于这种波段的激光在光纤中的传输损耗仅为 0.15 dB/km ,适用于长距离光纤通信,因此 $1.55 \mu\text{m}$ 波段半导体激光器倍受青睐。

如图 1.5 所示为双异质结 AlGaAs/GaAs 半导体激光器的典型结构,其中间有源区材料为 GaAs,它在 x 方向上的厚度为 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$,有源区被两层相反掺杂的 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 包围层所夹持,受激辐射的产生与放大就在 GaAs 有源区中进行。该层的 z 方向两端分别镀有反射膜,在出光端的反射率为 $14\% \sim 70\%$,在后向反射端的反射率高达 99% 以上。 z 方向的长度一般为 $300 \mu\text{m}$ 。因此,半导体激光器的腔长为 $300 \mu\text{m}$ 。在 y 方向有源区长度约为 $1 \mu\text{m}$ 左右,周围被折射率较低的半导体材料所包围,形成如图 1.6 所示的二维波导结构。由于有源区在 x 和 y 方向尺度不同,形成了 x 方向光束发散角大(30° 左右), y 方向光束发散角小(10° 左右),如图 1.7 所示。

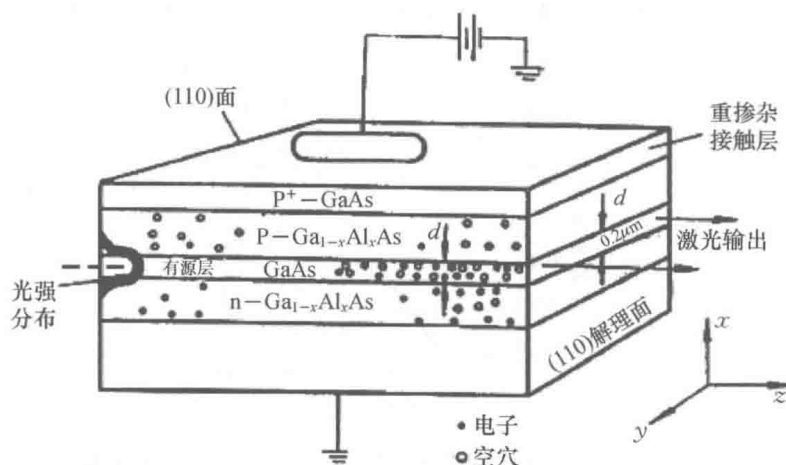


图 1.5 双异质结 AlGaAs/GaAs 半导体激光器的典型结构

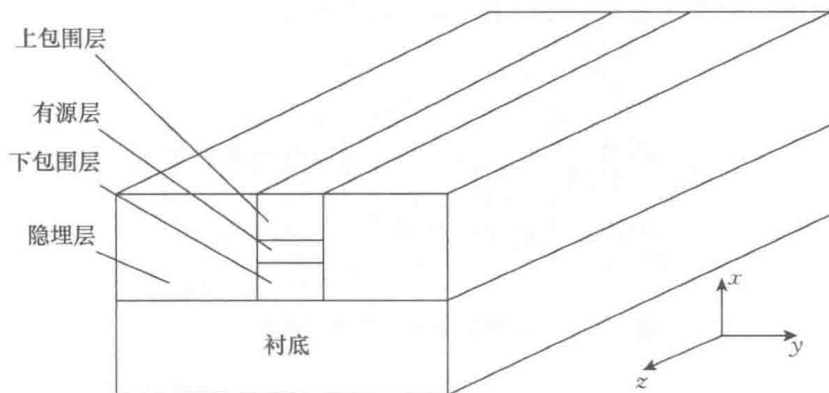


图 1.6 半导体激光的二维波导结构

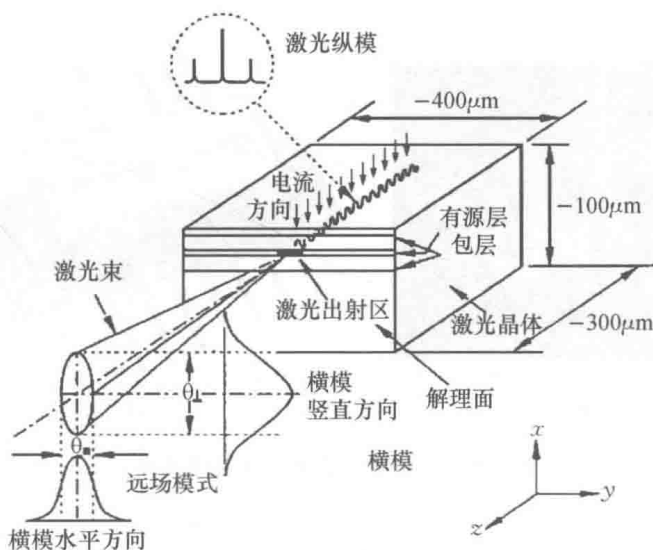


图 1.7 半导体激光光束的输出示意图

半导体发光介质经切割和镀膜后被粘贴在一个导热性能很好的铜制底座上，该底座和激光密封窗、半导体激光器极性引线构成半导体激光器。工作时需要对激光介质进行控温，一般控温的方法是将激光器固定在如图 1.8 所示的热沉块（或散热块）上，半导体制冷器（Thermoelectric Cooler, TEC）的一个端面一般和热沉块相接触，另一个端面与一块更大的散热底板接触，控制 TEC 电流的流向即可对激光器进行加热或者制冷。对于高功率激光器，散热底座要进行水冷，以保证及时换热。半导体激光器的温度控制由 TEC 控制器调整 TEC 的电流来实现。半导体激光器的温度通过测量热沉的温度得到，在半导体激光器工作时，热沉通过热敏电阻将半导体激光器的温度信息传递给 TEC 控制器，通过其中的比较电路得到设置温

度和探测温度的差来决定提供给 TEC 电流的大小和方向,从而实时地控制温度。

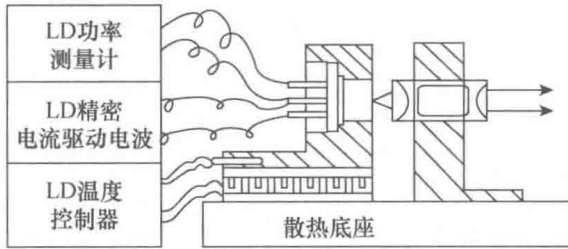
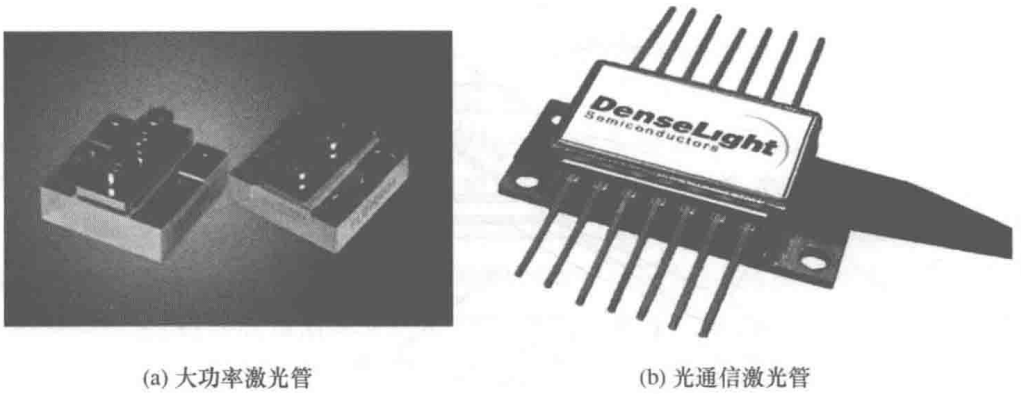


图 1.8 半导体激光器的温度控制示意图

另外还有大功率半导体激光器和激光通信专用半导体激光器,如图 1.9 所示。大功率激光器实际上是由许多单管叠加而成的,一般称这种激光器为半导体激光器阵列,如图 1.10 所示。



(a) 大功率激光管

(b) 光通信激光管

图 1.9 工业领域常见两类型激光管

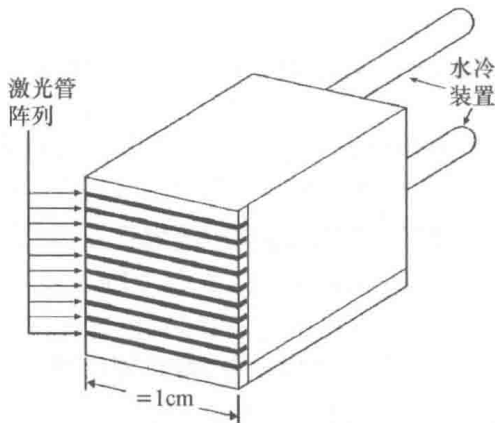


图 1.10 大功率半导体激光器结构图

1.3 外腔半导体激光器

1.3.1 外腔半导体激光器压窄线宽的基本原理

在半导体激光器的诸多应用中,半导体激光器的线宽是一个非常重要的指标。目前常用的半导体激光器的线宽一般在 15~100 MHz 左右,若加外延腔形成光反馈则激光线宽可以减小几十倍,一般都能压窄到 1~5 MHz 左右。虽然它对于一般应用(如激光光线通信、激光印刷、激光医疗等)已经满足要求,但是对于基础研究(如高分辨率光谱、激光冷却、囚禁原子和量子频标等)仍然不能满足要求。为了让半导体激光器在基础研究中发挥作用,就必须设法将其线宽变窄。半导体激光器线宽的压窄方法主要有两种,电反馈法和光反馈法。由于光反馈法结构简单,已经为大家普遍采用。

半导体激光器在工作时,腔内同时存在着受激辐射和自发辐射两种过程。自发辐射产生的光子相位是随机分布的,彼此不相干。由于这种相位的随机分布,形成了激光场线宽的下限,即激光本征线宽,其计算由著名的 Shawlow-Townes 关系式给出:

$$\Delta\nu = \frac{\pi h\nu (\Delta\nu_c)^2}{P} \quad (1.18)$$

此计算式只适用于单模激光,其中 P 是激光输出功率, $\Delta\nu_c$ 是无源腔的自然线宽,它由下式表示:

$$\Delta\nu_c = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi[L/(\alpha c)]} \quad (1.19)$$

其中 L 为无源腔的光学长度, α 为腔的单程损耗, c 为光速。由以上两式可以看出,激光的功率越大,激光器的腔长越长,激光的本征线宽就越窄。由于半导体激光器的腔长比气体激光器的腔长要短许多,因此它的本征线宽会比气体激光器大很多。

引入 $a = \Delta n_1 / \Delta n_2$,其中 $n_1 + in_2$ 为半导体激光介质的折射率。在半导体激光器中,自发辐射不仅引起相位的起伏,还能引起光场强度的起伏,这种强度的变化引起载流子密度的变化,从而引起了介质折射率的变化。这种效应将使单模激光的线宽增大为 $(1+a^2)\Delta\nu$ 。

为了使现有的半导体激光器的线宽能得到有效的压窄,常用的方法是利用外腔光反馈,如图 1.11 所示。从原理上讲,外腔光反馈可以从两个方面使线宽压窄:加外腔等效于腔长的增加;引入光反馈,有利于增强受激发射而抑制自发辐射。