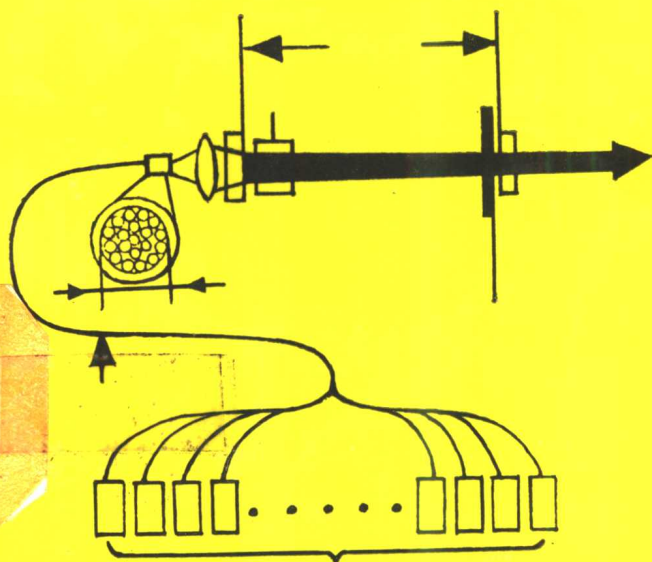


国家自然科学基金资助项目

半导体二极管 泵浦固体激光器

戴特力 编著



四川大学出版社

国家自然科学基金资助项目

半导体二极管泵浦固体激光器

戴特力 编著

四川大学出版社
一九九三年·成都

(川)新登字 014 号

内 容 提 要

本书根据近几年国内外发表的关于半导体二极管泵浦固体激光器的论文,结合作者自己的工作,较全面系统地介绍了泵浦专用的量子阱激光器,新的固体增益材料,泵浦模型理论,各种泵浦几何的实验装置,半导体二极管泵浦下的倍频、调Q和锁模,以及半导体二极管泵浦下的单频和可调谐激光器。为方便作者查阅,本书附有截止到1992年底的参考文献约450篇。

本书可供从事激光器研究的专业人员参考,也可作为高等院校激光专业和研究所激光专业的导师及研究生的教学参考书。

半导体二极管泵浦固体激光器

戴特力 编著

责任编辑:杨守智

封面设计:冯先洁

绘 图:罗于静

四川大学出版社出版发行 (四川大学校内)

四川省新华书店经销 重庆大学印刷厂印刷

850×1168 mm32开本 8.25印张 230千字

1993年11月第一版 1993年11月第1次印刷

印数: 0001—1000册

ISBN 7-5614-0992-3/O·92

定价:10.00元

前 言

近几年,国际上关于半导体二极管泵浦固体激光器的研究工作蓬勃开展,器件的水平不断提高,引起了各发达国家有关部门的极大关注。我国科学院,机电部及有关高科技部门也多次开会讨论开展这项研究的计划。半导体二极管泵浦固体激光器具有效率高,寿命长,结构紧凑和波长多样的优点。这种激光器在光通信,激光雷达,空间武器,医学和原子物理等方面有很好的应用前景。

为配合国内这个项目研究工作的开展,我们根据近几年国内外发表的文章,结合自己在国家自然科学基金资助下进行的理论和实验工作,撰写了这本专著。

本书全面系统地介绍了泵浦专用的量子阱激光器,新的固体增益材料,泵浦模型理论,各种泵浦几何的实验装置,半导体二极管泵浦下的倍频、调Q和锁模以及半导体二极管泵浦下的单频和可调谐激光器。为满足读者进一步研究工作的需要,本书分章列出了约450篇参考文献。本书介绍的研究成果大部份是90年到92年发表的,基本上反映了当前的发展水平。

由于编著者水平不高,能力有限,本书必定有一些错误和疏漏。敬请各位专家和读者批评指正。

戴特力

1993年10月于重庆

PA018105

目 录

前 言	
引 言	1
第一章 泵浦固体激光器的激光二极管	8
1.1 GaAs/GaAlAs 量子阱	9
1.2 应变层 InGaAs/GaAlAs 量子阱激光器	11
1.2.1 可靠性(14)	
1.2.2 高功率运行(15)	
1.2.3 高温运行(16)	
1.3 应变层 AlInGaAs/AlGaAs 激光二极管	16
1.4 含磷合金在 GaAs 衬底上生长的激光二极管	19
1.4.1 GaInAs(P)/GaInP 激光二极管(19)	
1.4.2 (Al)GaInP / AlGaInP 激光二极管(20)	
1.5 泵浦用大功率激光二极管列阵	21
1.5.1 实际应用对激光二极管列阵的要求(21)	
1.5.2 激光二极管列阵的发展水平(22)	
1.5.3 激光二极管列阵的封装结构(28)	
1.6 模块式微沟道冷却热沉	37
1.6.1 微沟道冷却热沉的功能(37)	
1.6.2 MCC 的设计与制造(38)	
1.6.3 热过程的理论分析(41)	
第二章 新的固体增益材料	44
2.1 钕(Nd)掺杂的增益材料	44
2.1.1 实验描述(45)	
2.1.2 实验结果(47)	
2.1.3 数据分析(51)	
2.1.4 材料 Nd:YAlO ₃ (Nd:YALO)(56)	
2.2 掺 Tm, Ho, Er, Yb 的 YAG 增益介质	57
2.2.1 Tm, Ho: YAG(57)	
2.2.2 Cr, Tm, Ho: YAG(62)	
2.2.3 Cr, Er: YAG 和 Yb, Er: YAG(63)	
2.2.4 Yb: YAG(65)	
2.3 Tm, Ho, Er, Yb 掺杂的其它材料	67
2.3.1 Cr, Tm: YSGG(67)	
2.3.2 Cr, Er: YSGG(67)	
2.3.3 Cr, Tm, Ho: YSGG(68)	
2.3.4 Er: YLF(69)	
2.3.5 Er: BaY ₂ F ₈ (71)	
2.3.6 Yb, Er: 玻璃(73)	
2.3.7 Er: Y ₂ SiO ₅ 和 Er, Yb: Y ₂ SiO ₅ (73)	

2.4 过渡金属的增益材料	77
2.4.1 Ti:蓝宝石(Ti:Sapphire)(77)	
2.4.2 Cr:LiSrAlF ₆ (78)	
第三章 泵浦模型与泵浦几何	80
3.1 速率方程	81
3.2 激光光子数的瞬态增长和阈值功率	84
3.3 斜效率公式	89
3.3.1 近阈值输出的斜效率公式(90)	
3.3.2 强泵浦输出的斜效率公式(91)	
3.4 端面泵浦的模型计算	92
3.5 厄米—高斯光束的交叠积分 ^[13]	95
3.6 端面泵浦的实验装置	96
3.6.1 成像光学系统聚光的端面泵浦(98)	
3.6.2 利用柱面透镜的端面泵浦系统(100)	
3.6.3 椭圆模腔的端面泵浦(102)	
3.6.4 用微棱镜线阵对光束实行几何变换(104)	
3.6.5 自聚焦微透镜聚光的端面泵浦(107)	
3.6.6 多光束端面泵浦(112)	
3.6.7 光纤束端面泵浦(117)	
3.7 侧面泵浦几何的计算	122
3.7.1 圆柱体的侧面泵浦(123)	
3.7.2 板条侧面泵浦的直线谐振腔(123)	
3.7.3 侧面泵浦锯齿腔(125)	
3.8 侧面泵浦的实验装置	128
3.8.1 侧面泵浦直线腔(128)	
3.8.2 侧面泵浦的锯齿腔(136)	
3.8.3 特殊的横向泵浦(141)	
3.9 紧缩折叠腔泵浦的实验装置和模型	141
3.10 变反射率输出镜(VRM)及其谐振腔	148
3.11 端面泵浦中的热透镜模型	150
第四章 激光二极管泵浦下的倍频、调Q和锁模	158
4.1 激光二极管泵浦的腔内倍频	158
4.2 二极管泵浦的外腔谐振倍频	172
4.3 新的倍频材料和自倍频材料	176
4.3.1 高掺 MgO:LiNbO ₃ 的性质(176)	
4.3.2 自倍频晶体(179)	
4.4 二极管泵浦下的调Q	183

4.4.1 用 3W 激光二极管泵浦的 1 mJ Tm:YAG 激光器 ^[53] (184)	4.4.2
高光强和高重覆频率的激光二极管泵浦 Nd:YLF 调 Q 激光器(186)	
4.4.3 二极管泵浦的高重覆频率 Tm:Ho:YLF 调 Q 激光器(187)	4.4.4
每脉冲 1 焦耳的二极管泵浦激光器 ^[55] (189)	4.4.5 二极管侧面泵浦调 Q Nd:YLF 激光器(191)
4.4.6 紧缩折叠腔二极管泵浦 Nd:YLF 调 Q 激光器 ^[5] (192)	4.4.7 二极管泵浦下的 Q 开关与腔内倍频合作运行(193)
4.5 激光二极管泵浦下的锁模	196
4.5.1 二极管泵浦下的声光锁模技术(197)	4.5.2 二极管泵浦下的声光锁模倍频技术(199)
4.5.3 克尔透镜(kerr lens)锁模(203)	4.5.4 二极管泵浦下附加脉冲锁模技术(210)
4.5.5 共振被动锁模技术(213)	4.5.6 激光二极管泵浦的瞬态锁模(214)
第五章 激光二极管泵浦单频和可调谐固体激光器	217
5.1 单纵模激光器	218
5.1.1 二极管泵浦单频环形 Nd:YAG 激光器(218)	5.1.2 二极管泵浦扭转模腔 Nd:YAG 单频激光器 ^[9] (219)
5.1.3 二极管泵浦 Nd:YVO ₄ 薄片腔激光器(220)	5.1.4 LD 泵浦,标准具选模的单频 Nd:玻璃激光器 ^[11] (221)
5.2 激光二极管泵浦可调谐激光器	223
5.2.1 宽带可调全固态 Ti:蓝宝石激光器(224)	5.2.2 环形腔连续全固态 Ti:Al ₂ O ₃ 激光器(225)
5.2.3 自启动锁模环形腔 Ti:蓝宝石激光器(226)	
参考文献	228
引言	228
第一章	232
第二章	239
第三章	244
第四章	248
第五章	254

引言

半导体二极管泵浦固体激光器 (Semiconductor Diode-Pumped Solid-state Laser) 是用激光二极管 (Laser Diode) 代替闪光灯去泵浦固体激光增益介质的激光器。早在 60 年代, 用 GaAs 二极管 880nm 的辐射泵浦 Nd:CaWO₄ 已得到 1.06 μ m 的荧光输出^[1]。GaAs 激光二极管 (简称 LD) 发明之后不久, 装置如图 1 的第一台激光二极管泵浦固体激光器 (简称 DPSL) 运行出光^[2]。这台 DPSL 是用 CaF₂:U³⁺ 在 2.613 μ m 波长运转的, 装置被放在液氮中。当时, 虽然已认识到 LD 代替闪光灯作泵浦源有效率高, 寿命长和结构紧凑的优点, 但 LD 在功率和可靠性方面均达不到泵浦光源的要求, 所以研究报告很少。60 年代, Ross 在 170K 低温环境中, 用 GaAs 的 LD (867 nm) 泵浦 Nd:YAG 成功^[3], 并对 DPSL 的优点作了中肯的评述。70 年代, Conant 和 Reno 表演了 LD 横向泵浦的装置^[4], 实验仍然在低温下进行。Jackson 和 Rice 用短脉冲泵浦得到准连续输出^[5]。Farmer 和 Kiang 比较全面地研究了发光二极管 (LED) 横向泵浦的情况^[6]。端面泵浦 (又称纵向泵浦) 也有报导^[7]。在低泵浦功率情况下, 端面泵浦比侧面泵浦 (即横向泵浦) 吸收长度大, 斜率效率较高。室温 LED 泵浦也进行了实验^[8,9]。

Chesler 和 Singh 在均匀分布假定下用理论模型计算了 LD 泵浦的阈值功率, 其结果与实验基本符合^[10]。

70 年代中期, 几种新的固体增益材料出现了。新激光材料的掺杂高于 Nd:

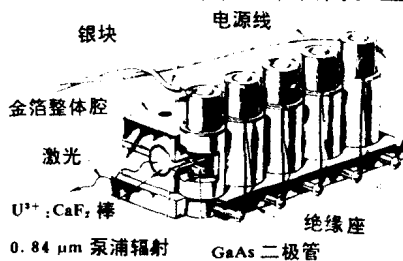


图 1 第一个激光二极管侧面泵浦 U³⁺:CaF₂ 激光器装置图^[2]

YAG 而不会引起激光上能级寿命的浓度淬灭。提高掺杂浓度是为了在小的模体积内让增益介质吸收更多的泵浦光能量。第一个这样的材料是 $\text{NdP}_5\text{O}_{11}$ (NPP)。它的一个典型实验表明^[11], LD 泵浦的阈值功率为 7 mW^[12]。它的吸收峰在 580 nm 附近, 并不在 LD 的发射波长范围, 故激光效率只达到 7%。另一种材料是 $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ (LNP), 用 LD 泵浦的阈值功率为 12 mW, 运行在 1.05 μm 和 1.32 μm 的波长上, 可以得到 2 mW 的输出功率^[13]。用波导结构代替块状结构是另一种发展方向。波导激光器可以用光纤来实现^[14]。Stone 和 Burrus 首先实现了这样的光纤激光器, 典型的光纤芯径为 35 μm , 长度为 1 cm^[15]。这种波导激光器用 LD 从侧面泵浦, 可作为光纤中继放大器。其它还有用掺硅 GaAs 发光二级列阵泵浦 Yb:YAG 的实验^[16]和室温下用 LED 泵浦 LiYbF_4 :Tm, Ho 的实验^[17]。在 DPSL 中进行的倍频实验遇到了较大的困难, 因为插入各种光学元件所引起的腔内损耗太大, 泵浦能量太小^[18]。虽然 70 年代 LD 的功率没有很大的突破, 但 DPSL 的研究在 Nd:YAG, 新的化学增益材料和波导激光三方面到得了明显的进展。

80 年代, 由于量子阱的出现, LD 的阈值电流减小, 连续或准连续的功率有了明显的提高, 因而 DPSL 的工作也上了一个台阶。Kuboder 和 Noda 首次^[19]用 GaAlAs 量子阱泵浦 LNP ($\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$), 得到波长 1.3 μm , 功率 1.4 mW 的单纵模激光束。周炳琨及其同事于 1985 年用 LD 泵浦 Nd:YAG 整体腔(腔镜直接镀在 YAG 两端面), 得到了稳定度比闪光灯泵浦高一个量级的激光束。其装置不需水冷, 结构紧凑^[20], 如图 2 所示。Sipes 的报告表明了 LD 泵浦固体激光器的总效率可达到 8%, 明显超过闪光灯泵浦^[21]。Beer 和 Keirstead 用 LD 泵浦, KTiOPO_4 (KTP) 作非线性元件实现了腔内倍频^[22], 输出 11 mW, 0.53 μm 的绿光。

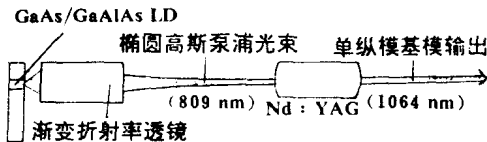


图 2 激光二极管端面泵浦 Nd:YAG 激光器构形^[81]

1984 年, Laidig 及其同事, 用分子束外延 (MBE) 作出应变层量子阱 (SLQW: Strained-Layer Quantum Well), 从此 LD 的功率和效率有极大的提高, 强烈地刺激了 DPSL 的工作。Kane 及其同事用 LD 列阵泵浦整体

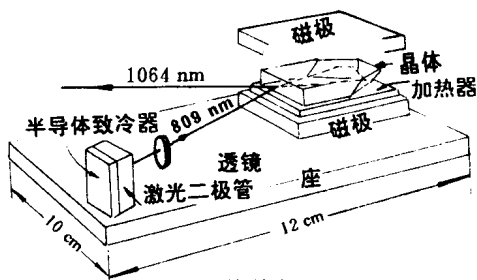


图 3 固体单向非平面环行振荡器的方案^[81]

腔 Nd:YAG 实现了非平面环形光路激光器^[23], 装置如图 3 所示。Kozlovsky 及其同事用掺氧化镁铌酸锂 ($\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$) 实现了腔外谐振倍频^[24]。这种技术给外腔频率锁定提供了可能, 因为谐振倍频输出单纵模光束。Trutna 及其同事用外加磁场对 Nd:YAG 非平面环形几何实现了纵模调制, 获得 $1.319\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.338\text{ }\mu\text{m}$ 的单纵模输出^[25]。Owyong 和 Esherick 还报导说, 在端面泵浦 YAG 棒时, 加压在 YAG 棒上, 可以调节频率^[26]。Risk 及其同事利用腔内 KTP, 让 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的激光与泵浦光在其中混频, 得到蓝色的相干辐射^[27]。

LD 横向泵浦 Nd:YAG 的实验是 80 年代初由 Allev 及其同事和 Smith 及其同事完成的^[28,29]。Hanson 于 1987 年用长脉冲的 LD 横向泵浦 Nd:YAG 得到 $1.06\text{ }\mu\text{m}$, 21 W 的峰值输出^[30]。Rice 和 Krebs 于 1987 年用板条 Nd:YAG 在 LD 泵浦下得到 $1.06\text{ }\mu\text{m}$, 170 mJ 的长脉冲输出, 总电-光转换效率为 6%^[31]。Reed 及其同事用 Nd:YAG 板条, 在 LD 列阵脉冲激光的泵浦下得到平均功率 585 mW, 峰值功率 70 kW 的巨脉冲输出^[32]。

Nd 掺杂的 SiO_2 单模光纤在 LD 泵浦下, 实现了 $^4\text{F}_{3/2} - ^4\text{I}_{11/2}$ 跃迁^[33]。用 Nd:YAG 也可以制成光纤, 在 LD 泵浦下, 发出激光。为了提高上能级寿命, 加宽吸收带和扩展激光频率, Nd 三价离子可以掺杂在其它受主材料中。在连续泵浦功率一定时, 脉冲峰值功率与上能级寿命成正比。实验表明, 吸收强度是 LD 泵浦 Nd:YAG 这一类固体激光器的关键参数, 故希望新材料对各种 LD 波长有一个较宽的吸收带。此外, 针对不同的用途, DPSL 应具更多的不同的激光发射波长。

Fan 及其同事进行了 Nd:LiYF(YLF)代替 Nd:YAG 的实验^[34]。Nd:YLF 的上能级寿命比 Nd:YAG 长两倍,因而阈值功率低到 1 mW,斜效率高达 38%。用 MgO:LiNbO₃ 作腔内倍频元件,可输出绿光 145 μ W,其装置如图 4 所示。Kozlovsky 及其同事用 Nd 玻璃作了同样的实验^[35]。尽管非均匀加宽降低了受激发射截面,但增加了吸收带宽。在单条 LD 端面泵浦下激光输出的斜效率达 42%。80 年代出现的另一种新材料是 Nd:MgO:LiNbO₃ 它既有 Nd³⁺ 离子的受激发射性质,又有受主材料的非线性光学性质,可兼作增益介质和倍频材料。实验中 LD 泵浦的阈值功率为 2 mW,斜效率为 3%。^[36,37]

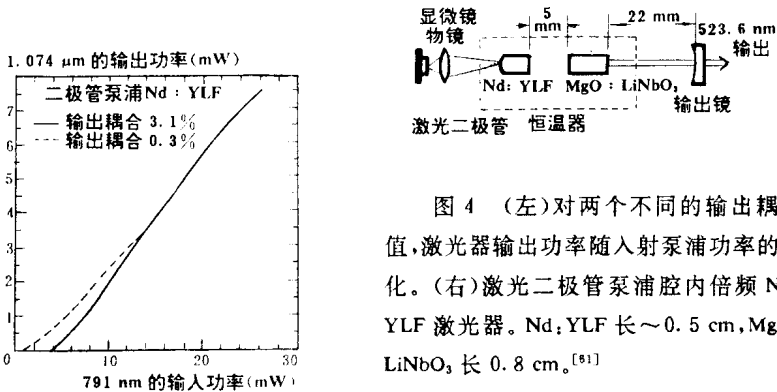


图 4 (左)对两个不同的输出耦合值,激光器输出功率随入射泵浦功率的变化。(右)激光二极管泵浦腔内倍频 Nd:YLF 激光器。Nd:YLF 长 ~ 0.5 cm,MgO:LiNbO₃ 长 0.8 cm。^[61]

为了得到不同波长,Allen 及其同事用 LD 端面泵浦 Ho:YAG 并得到波长为 2 μ m 的激光发射。Ho:YAG 这种材料要用 Er³⁺ 和 Tm³⁺ 离子敏化,而且要在 77 K 低温下才能运行^[38]。Fan 及其同事让只掺 Tm³⁺ 作敏化剂的 Ho:YAG 在室温下运行^[39,40],测得 LD 泵浦阈值功率为 4.4 mW,斜效率为 1%。Fan 和 Byer 用理论模型和实验表明了室温下用 LD 泵浦 Nd:YAG 光纤可以实现 ⁴F_{3/2}-⁴I_{9/2} 跃迁,输出 946 nm 的激光束,阈值 10 mW,斜效率 16%^[41,42]。LiIO₃ 倍频,可得到蓝色激光束^[43]。LiIO₃ 比 KIO₃ 有较小的非线性和较大的 Poynting 矢量(玻印庭矢量)离散角。

用 LD 泵浦 Tm:YLF 可实现 Tm³⁺ 的 ³F₄-³H₅ 的跃迁,得到 2.3 μ m 的激光^[44]。Er³⁺ 的 ⁴I_{15/2}-⁴I_{13/2} 跃迁相对应的波长是 1.6 μ m,十分接近光

纤通信的优选波长,因为此波长在光纤中损耗最小^[45]。Reekei 及其同事完成了这一实验。他们用 LD 泵浦 Er:YLF 得到了 130 μ W 的 1.6 μ m 的激光束。^[46]1986~1987 年间,有一些 LD 泵浦调 Q 激光器产生巨脉冲的实验报导^[47,48,49]。这些实验均用 LD 泵浦 Nd:YAG,插入调 Q 元件的方法完成。可以得到 10 μ J 的脉冲激光。用同样的功率去泵浦 Nd:YLF,其脉冲峰值可提高一倍^[48,49,50]。比如,用 200 mW 的 LD 列阵泵浦 Nd:YAG,经调 Q 后得到 1.2 kW 的峰值功率。用同样的功率泵浦 Nd:YLF 可得到 2.48 kW 的峰值功率,脉宽小于 10 ns^[50]。如果再插入 KTP 倍频元件,便可输出平均功率为 15mW 的绿光,每脉冲能量为 5 μ J^[51]。小型端面泵浦并锁模的 Nd:YAG 激光器可用 LD 或染料激光泵浦^[52]。Basn 和 Byer 用三镜折叠腔在单条 LD 泵浦 Nd:YAG 条件下实现了锁模,其脉冲宽度小于 10 ns,并观察到了自相干现象^[53]。LD 泵浦 Nd:YAG 输出脉冲还可作为“种子”输入到另一个较大的调 Q 激光器中,文章[54, 55, 56, 57]报导了这一工作。作者们用增益开关 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器,输出 60mW 的单纵模激光束,然后将此光束注入到另一个更大的激光器中,迫使它在这个指定的单纵模下运行。

在 80 年代,除了上述实验和理论模型的文章外,还有相当多的工作是评述性质的。比如参考文献[58, 59, 60, 61]。这些文章的作者仔细比较了 LD 泵浦与闪光灯泵浦,指出了 DPSL 的优点和缺点。

上述文章认为,闪光灯泵浦几何中,闪光灯放在椭圆柱内部焦线上,椭圆柱内部有冷却水流动,因而闪光灯光谱中很大一部份波长不能为增益介质吸收,所以总电-光效率低。对 LD 泵浦,由于 LD 外量子效率高,DPSL 的总效率可达 50%以上。其次,由于降低了冷却要求使技术噪声减少,加之 LD 频率稳定,DPSL 的线宽已达到测量极限 3kHz。文章[61]还从另一角度说明了用 DPSL 代替 LD 的好处。[61]的作者认为固体激光器本身的线宽就可能小于测量极限

$$\Delta\nu = h\nu/2\pi\tau_c^2P$$

其中 $\Delta\nu$ 是以赫芝为单位的线宽, τ_c 是腔内光子的衰减时间, $h\nu$ 是光子能量, P 是输出功率。只要腔足够长, τ_c 就可以增大, $\Delta\nu$ 也就减小。而 LF 腔长比一般固体激光器小三个量级(只有 100 μ m 左右),其 $\Delta\nu$ 比固本激

光器的大 6 个量级。所以用 DPSSL 代替 LD 可大大减少线宽。文章[61]还指出, DPSSL 的固体增益介质的上能级寿命比 LD 材料的上能级寿命高, 故而调 Q 产生的脉冲峰值比 LD 能达到的高得多。DPSSL 输出光斑是固体激光器的横模, 呈圆形, 而 LD 输出光束发散角大。单条 LD 远场光斑呈椭圆形。LD 列阵在没有锁相的情况下远场呈多叶片形状。LD 还可借助 DPSSL 扩展发射波长。

LD 泵浦固体激光器在发展过程中已暴露出发射波长调制较困难和泵浦几何复杂这二个缺点。波长的温度调制直接影响了 LD 封装工艺和致冷方式, 而泵浦几何的复杂性和多样性在大功率条件下也增加了设计的困难。

进入 90 年代后, 由于大功率 LD 的发展和 DPSSL 整体设计上的优化, 大功率的 DPSSL 有了大踏步的推进。LD 单片列阵可以连续运行在 76 W 的功率水平上。这种大功率输出的泵浦光源已封装得十分紧凑, 运行可靠, 而且价格最终会降到人们可以接受的水平上。外延 (Epitaxial) 生长的工艺已可以让 LD 的发射波长从 630 nm 扩展到 1.1 μm 。进一步把 LD 单片组合成一维或二线的列阵的各种组合模块已进行试验。怎样把大功率 LD 列阵在峰值发射时产生的热带走, 是进一步提高 LD 列阵输出功率所面临的主要问题。

在构成二维列阵的想法中, 有一个方案是直接利用列阵代替闪光灯去横向泵浦圆棒或板条状的增益介质。实验报导表明采用这一想法已获得每脉冲 1 J 的能量输出。这个实验所使用的 Nd:YAG 棒所经受的热光象差 (Thermooptic Aberrations) 比用闪光灯泵浦时小。为了把 LD 列阵的功率尽可能地送到增益介质, 就要改善 LD 光束的方向性并使光学元件具有较高的透过率。各种聚光系统的方案包括光纤耦合和微透镜列阵都提出来并进行了实验。但是这些泵浦耦合技术尚未发展完善。一种高增益高效率的泵浦耦合方案: 紧折叠腔 (TFR; Tightly Folded Resonator) 已经实现。在 TFR 中激光在长方形增益介质内沿近法线方向多次内反射, 每一次反射耦合一个 LD 单元列阵的泵浦光。

DPSSL 的另一个明显的优点是可以发射几种人眼安全的波长, 1.5 μm , 2 μm 和 3 μm 。实际上, 发射这几种波长的 Er, Tm, Ho 激光器均属于

准三能级系统,只有从大功率 LD 列阵获得足够高的泵浦速率才能实现有效的运行。人眼安全波长 $1.5\mu\text{m}$ 在大气内传输距离长而 $2\mu\text{m}$ 和 $3\mu\text{m}$ 正好是生物细胞的峰值吸收波长,因而这些波长在相干光学雷达(简称激光雷达, Lidar)和医疗激光器中可以找到应用。所以,80 年代末 90 年代初对 Er, Tm, Ho 激光器展开了较多的研究。

此外,随着 DPSL 设计水平的提高,热荷载减轻和整机小型化技术的发展,窄线宽,可调谐 DPSL 已出现。线宽已达到 1Hz 的水平。利用锁模已获得 ps 级激光脉冲。借助光学参量共振(OPO; Optical Parameter Oscillation),频率转换、谐波产生和宽带可调谐 $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ 激光器都可以在 LD 列阵泵浦下实现。

近几年,另一不可勿视的成绩是对 DPSL 的理论研究。DPSL 的物理量,如斜效率,线宽,稳定度,脉宽,单频等能达到的指标均在理论上超过闪光灯泵浦的固体激光器,为了实现这些指标,就必须对泵浦模型,热荷载模型,腔内倍频理论,和各种新的锁模机制等展开更细致的计算。这些工作给固体激光工程提供了更可靠的设计资料,推动了 DPSL 的发展。

对 DPSL 最大的推动力来自它广泛的应用前景。除了前面谈到的激光雷达、医学、光纤通信等方面的应用外,它在空间武器和可控热核反应方面的潜力已为发达国家所重视。千瓦级的 DPSL 一出现,美国军方就把它列入武器清单。目前,他们正在进行三千瓦级 DPSL 的研制,要求光束发散度优于三倍衍射极限。现有的机载激光武器主要是氧碘,氟化氢和氟化氙, DPSL 与它们比较有结构紧凑,重量轻,光束性质好,能在高重覆频率下稳定工作等优点。这正是早就期待的装备。不过, DPSL 要达到万瓦级或兆瓦级,还有一个过程。日本大阪大学从事可控聚变的科学家也提出了用高功率的 DPSL 来驱动可控热核聚变的概念性设计方案。

以上,我们概述了 DPSL 的历史和发展。下面主要介绍国内外 90-92 年 DPSL 的研究成果。包括:泵浦用激光二极管,新的固体增益材料泵浦模型与泵浦几何, DPSL 的倍频、调 Q 和锁模以及 DPSL 的串频和调谐。

第一章 泵浦固体激光器的激光二极管

从第一次使用 GaAs-AlGaAs 激光二极管泵浦固体激光器到现在已有 20 年了^[1,2]。在这一发展过程中,激光二极管制作技术的进步有效地改善了激光二极管泵浦固体激光器的运行条件。

在过去十年里,(Al)GaAs/AlGaAs 激光二极管的发射波长在 780~810 nm 范围内。它主要用来作 Ho:YAG^[3],Nd:YAG^[4],Tm,Ho:YAG^[5]和 Er:LiYF₄^[6]等激光器的泵浦光源。

近十年来,激光二极管的阈值电流已明显降低,转换效率也有所提高,输出功率成倍增长,使用寿命也显著增长。这些进展一是归因于晶体生长技术,分子束外延^[7](MBE:Molecular Beam Epitaxy)和有机金属化合物气相外延^[8](OMVPE:Organometallic Vapor Phase Epitaxy)的日愈成熟;二是归因于量子阱^[9](QW:Quantum-Well)结构的出现。90 年代头二年,泵浦用的激光二极管在新量子阱材料的使用上有较多的成就:可见光激光二极管的材料是 (Al)GaInP/AlGaInP,它们与 GaAs 衬底是晶格匹配的。发射波长在 0.78~1.1 μm 的材料是 (Al)InGaAs,它们是通过应变层(Strained Layer)生长在 GaAs 衬底上的。发射波长在 0.87~1.3 μm 之间某些频带的材料是 InGaAs-AlGaAs。这些新量子阱材料的出现使得一些在受主材料中掺杂的其它激光离子可以找到 LD 泵浦光源。比如紫翠玉 Cr:BeAl₂O₄ 可以用发射波长在 680 nm 和 665 nm 的 GaInP/AlGaInP 激光二极管泵浦^[9];Yb:YAG 可以用发射波长为 970 nm 的应变层 InGaAs/AlGaAs 激光二极管泵浦^[10]。另一方面的改进就是把 Cr,Yb 和 Er 等离子掺在其它吸收带较宽的受主材料中,降低了使波长准确匹配的温度调制的要求。

随着发射功率增大,激光二极管必然用线阵或面阵的方式组合。各

种形式的组合都是为了泵浦几何的需要。但是,组合的密集程度受到激光二极管热效应的限制,这又带来了热沉材料选择和形状设计的问题。列阵的组合与热沉的构形对整个管子的封装又有直接的影响。诸如此类的问题至今还没有一个最佳的答案。此外,单元线阵内部各发光条之间,如果有锁相的结构,比如波导耦合,衍射耦合,那么远场花样可以是单瓣的(Single-Lobed)。为此,出现了非平面量子阱(Nonplanar Quantum-Well)结构的激光二极管。它是在形成量子阱的工艺中,各个阱之间同时形成的横向联结波导。

1.1 GaAs/GaAlAs 量子阱

GaAs/GaAlAs 是制造工艺十分成熟的半导体材料。在 GaAs 衬底上外延生长异质结(Heterojunction)时,由于 GaAs 与 GaAlAs 的晶格常数($5.64 \text{ \AA}$)相差很小(见图 1-1)^[11],不会引起晶格失配位错的生成,也不会产生应变。新的外延技术,比如说金属有机物化学汽相淀积(MOCVD; Metalorganic Chemical Vapor Deposition)技术发展到了十分精细的水平,可以把外延层的生长控制在几十个埃($\text{\AA}$)的厚度,量子阱结构便可以在 GaAs/GaAlAs 材料上实现。

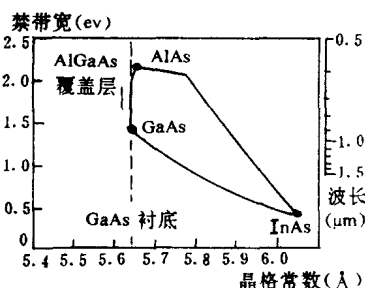


图 1-1 AlInGaAs 四元合金
禁带宽随晶格常数的变化^[11]

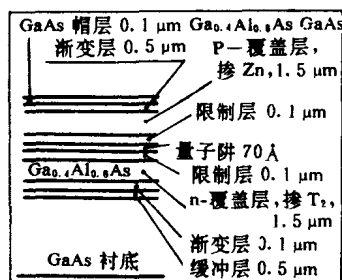


图 1-2 渐变折射率(GRIN)
SCH 单量子阱(SQW)的结构

图 1-2 是一个典型的 GaAs/GaAlAs 渐变折射率分别限制异质结单量子阱(GRIN SCH SQW; Graded-Index Separate-Confinement Hete-

rostructure Single Quantum Well)的结构示意图^[12]。与双异质结(DH; Di-heterojunction)相比较,我们会发现在激活区中央有一层 $50\sim 70\text{ \AA}$ 未掺杂的 GaAs,这就是量子阱。

一般的双异质结是由夹在两层宽禁带覆盖层之间的激活层构成,激活层典型厚度是 $1000\text{ \AA}\sim 3000\text{ \AA}$ 。而量子阱的厚度只有 $50\sim 70\text{ \AA}$ 。在这个层中电子和空穴沿垂直于层面方向的运动受到限制。其结果载流子在该方向的动能被量子化成分立的能级,和量子力学中一维势阱情况一样。所以称为量子阱激光器。

只要激活层厚度,或者说受到宽禁带半导体限制的窄禁带半导体层的厚度和载流子的德布洛依(de Broglie)波长可比拟,量子力学效应就发生^[104]。这个效应在吸收和发射(比如激光发射)过程或输运过程(比如隧道效应)中均已观察到。

量子阱双异质结激光器的研究开始于 1974 年^[15],至今量子阱工艺已在半导体器件的制造中占有极重要的地位。

实际上在量子阱中,电子和空穴只有两个自由度,即只能在激活层平面内作二维运动,其动能为 $E = ((\hbar/2\pi)^2/2m)(k_x^2 + k_y^2)$,其中 m 为载流子的等效质量, k_x 和 k_y 为波数在 x, y 方向的分量。这种在量子阱中的电子和空穴可以看作二维费米气体(Two-Dimensional Fermi Gas)。

夹在宽禁带中的窄禁带激活层(量子阱)形成载流子的一维势阱,势阱宽就是量子阱的厚度($50\sim 70\text{ \AA}$),势阱深就是异质结两边导带底和价带顶的能量差。可以用常规的量子力学方法计算这一维势阱的能级。所以量子阱激光器的发射波长与双异质结稍有差异。激活层厚度减小,单色性提高,中心波长缩短。

进一步的研究表明,电子和空穴在复合(发光)之前可以形成激子态(Excitons)—电子和空穴在一定距离形成的一个新的物态,该物态有一定寿命,有自己的发射光谱。由于量子阱的宽度大大小于激子被吸收的长度(大约 $1\mu\text{m}$),激子寿命在量子阱中比较长,于是粒子数反转密度提高,阈值电流就明显减小^[13]。

从图 1-2 还可看出,量子阱两旁的 GaAlAs 是折射率从大向两旁逐渐变小的渐变折射率区(GRIN),同时 GaAlAs 界面形成异质结。异质结