

# 超辐射发光二极管的结构特性及其应用

马东阁 石家纬

(吉林大学电子工程系, 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 长春, 130023)

**摘要:** 近几年来, 由于超辐射发光二极管在光纤陀螺和光时域反射仪等方面的重要应用, 已引起了人们的极大关注, 许多国家都在竞相研制和开发。本文综述了目前超辐射发光二极管的主要结构和特性及其应用前景。

**关键词:** 超辐射发光二极管 结构 特性 应用

## Structure features and application of superluminescent diodes

*Ma Dongge, Shi Jiawei*

(The Department of Electronics & Engineering of Jilin University, Jilin Univ.  
Division of Integrated Photo-electronics Union Lab.)

**Abstract:** In recent years, the superluminescent diodes (SLD) have been paid much attention to the applications in fiber optical gyroscope and optical time domain reflectometer. This paper describes the structure and main features of superluminescent diodes, outlines the important applications.

**Key words:** superluminescent diode structure feature application

可能在每个手术室都配备。二极管激光器走向市场的这一趋势正在变为现实, 这也应是我国激光医学发展的方向。

### 参 考 文 献

- 1 Wyman A. Laser Surg Med, 1992; (12): 506~509
- 2 Wider T M. Plast Reconstruct Surg, 1991; 88(6): 1018~1025
- 3 Bartel K E, Zediker M S. Photonics, 1993; June: 92~97
- 4 Vogel A. Laser Surg Med, 1992; (11): 331~340

作者简介: 阎吉祥, 男, 1946年12月出生。副教授, SPIE会员。现从事光电统计学、自适应光学、激光理论、技术和应用的研究与教学工作。

李家泽, 男, 1937年出生。副教授。主要从事激光技术、激光医疗及激光加工方面的科研与教学工作。

高春育, 男, 1967年出生。硕士。主要从事光电子学方面的科研和教学工作。

收稿日期: 1993-09-11

## 一、引言

超辐射发光二极管(SLD)是 70 年代初发展起来的一种半导体光电器件。近年来,由于它在光纤陀螺(FOG)和光时域反射仪(OTDR)等方面的重要应用,使 SLD 的研制和开发已成为人们相当感兴趣的研究课题。SLD 是光纤陀螺和光时域反射仪的理想光源,也是中短距离光通信的主要光源之一<sup>[1]</sup>。SLD 作为一种具有内增益的非相干光光源,它的光学特性介于半导体激光器(LD)和发光二极管(LED)之间,和半导体激光器相比,SLD 有短的相干长度,可以显著降低由光纤圈中的瑞利背向散射和非线性克尔效应等引起的噪声以及光纤传输中的模式分配噪声等;和一般发光二极管相比,SLD 输出功率高,耦合效率高,光束发散角小,提高了耦合入尾纤的功率和系统的信噪比,正是由于 SLD 的这些特有性能,使 SLD 具有广阔的应用前景。

自 1971 年 Kurbativ 等人<sup>[2]</sup>首次制备出半导体 SLD 以来,SLD 得到了惊人发展,特别是最近几年,围绕提高输出功率和耦合效率,增加光谱带宽,提高调制速率,降低相干长度和光谱调制深度等光学特性,许多结构 SLD 已

被研制出来,并报导了各自的特性。我们综观了所有报导,发现所有结构 SLD 都具有类似于半导体激光器的结构和工作原理,所不同的只是采用一些特殊手段抑制 F-P 振荡,消除光反馈。从已研究的结果表明,抑制激射振荡的方法有下面几种:(a)导入光吸收区;(b)降低介质膜引起的器件端面的反射率;(c)调整器件端面的反射角度。由此,我们把 SLD 的结构分为下面几种类型:1. 波导吸收区 SLD; 2. 减反射涂层 SLD; 3. 倾角条形 SLD; 4. 量子阱 SLD。

## 二、各型 SLD 结构与特性

### 1. 波导吸收区 SLD

(1)直波导吸收区 SLD 直波导吸收区 SLD 是 SLD 的主要结构之一,现已趋于成熟。器件采用半导体激光器结构,吸收区主要有两种形式:质子轰击形成的高阻隔离吸收区和常规光刻技术制作的非泵浦吸收区。

质子轰击吸收区 SLD 的结构如图 1 所示。它是 1982 年由美国的 C. S. Wang 等人<sup>[4]</sup>研制而成的,器件制作采用 LPE 生长 GaAs/GaAlAs 质子轰击条形结构,吸收区是质子

Table Comparison of semiconductor light emitting device<sup>[3]</sup>

	LD	LED	SLD
output power	high	low	high
coupling efficiency in fibre	high	low	high
coherence length	long		short
temperature characteristics	difference	ok	difference
response speed	high	low	lower
feedback noise	long	little	little
reliability	low	high	lifetime reckoning $1.6 \times 10^6$ h

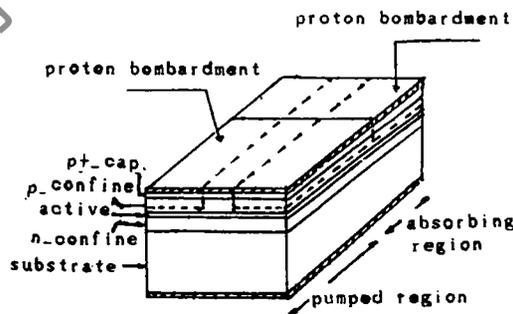


Fig. 1 Structure of SLD with proton bombardment absorbing region

轰击吸收区,同时在器件输出端面蒸镀  $\text{SiO}_2$  减反射涂层。最后,该器件在 200mA 注入电流下输出功率大于 7mW,并且具有小于 10% 的光谱调制深度,光谱半宽 15~20nm,输出光的光束发散角 ( $30^\circ \times 50^\circ$ ) 比 LED 的小得多,高于 1mW 的光功率被耦合进  $5\mu\text{m}$  芯径的单模光纤。由于这个光源的相干长度大约为  $50\mu\text{m}$ ,所以,低频相干瑞利背向散射噪声被减小至低于探测水平。

N. K. Kwong 等人<sup>[5]</sup>研制的  $1.3\mu\text{m}$  InGaAsP/InP 直波导吸收区 SLD,是以二次 LPE 生长 InGaAsP/InP 掩埋新月激光器结构为基础,用光刻技术在器件后端面引入一个非泵浦吸收区,同时在前端面蒸镀一层减反射涂层,有效地抑制了激射振荡,结构如图 2 所示。典型的器件尺寸:泵浦区长  $L_p = 730\mu\text{m}$ ,非泵浦吸收区长  $L_a = 300\mu\text{m}$ ,间隔  $d = 250\mu\text{m}$ ,有源层厚和宽分别为  $0.2\mu\text{m}$  和  $2\mu\text{m}$ 。该器件,在 175mA 注入电流下,实现了 10mW 的输出功率,谱宽 28nm,光谱调制深度小于 15%,相干长度近似  $60\mu\text{m}$ ,且实现了 570MHz 的高速调制。因为采用了新月结构,电流限制好,提高了与单模光纤的耦合效率,此器件与单模光纤的耦合效率为 40%。

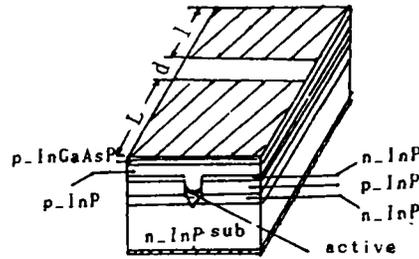


Fig. 2 Structure of SLD with  $1.3\mu\text{m}$  straight waveguide absorbing region

1.  $5\mu\text{m}$  InGaAsP/InP,该结构直波导吸收区 SLD 也由 N. R. Chen 等人<sup>[6]</sup>在 1990 年实现。输出功率 5mW,谱宽 50~60nm,光谱调制深度小于 5%。

(2) 弯曲波导吸收区 SLD 有效地抑制激射振荡是制备高功率 SLD 的关键。直波导吸收区 SLD 由于吸收区制作工艺简单而倍受青睐。然而,这种结构 SLD 吸收区长,并且在高激励条件下,吸收区很容易失去抑制激射振荡作用而产生光激励。如果吸收区短,实现超辐射的工作电流范围又不会很大。另外,直波导吸收区 SLD 的总腔长很长,要实现很高的功率输出,必须注入很大的工作电流,这在实际中会由于热效应而降低了器件的发光效率和使用寿命。1989 年,日本 NTT 光电子实验室的 H. Nagai 等人<sup>[7]</sup>报道了一种新型吸收区波导结构  $1.3\mu\text{m}$  SLD——弯曲波导吸收区 SLD,器件结构如图 3 所示。该器件的特点是采用了隐埋弯曲形吸收波导结构,吸收波导同解理面成倾角相交,交角大于全反射的临界角。同时,光在弯曲波导中传输时又不断被辐射掉。因此,即使在很高的激励条件和较短的吸收区条件下也能有效地抑制激射振荡,提高了 SLD 的工作电流范围。器件制作采用二次 LPE InGaAsP/InP DC-PBH 结构,典型尺寸为:泵浦区长  $L_p = 400\mu\text{m}$ ,吸收区长  $L_a = 200\mu\text{m}$ ,有源区宽度和厚度分别为  $2\mu\text{m}$  和  $0.15\mu\text{m}$ ,前端面蒸镀由  $\text{SiO}_2$  和  $\text{TiO}_2$  组成的多层膜系作为减反射涂层,在  $1.3\mu\text{m}$  波长处的反射率为 0.2%。器件在 200mA 注入电流下,输出功率大于 11.5mW,光谱半宽近似 40nm,相干长度  $30\mu\text{m}$ ,光谱调制深度小于 6%,在单模光纤中的耦合功率为 1mW。

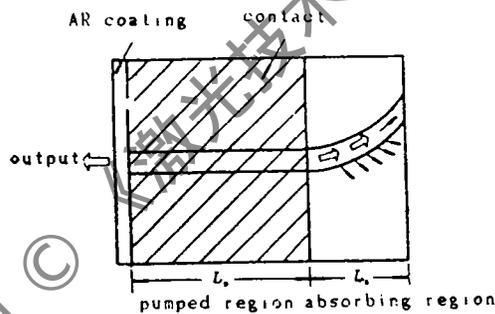


Fig. 3 Profile of SLD with  $1.3\mu\text{m}$  bent waveguide absorbing region

(3) 锥形波导吸收区 SLD 波导吸收区 SLD 还有一种较理想的结构,即用束传播方法设计的锥形波导吸收区 SLD,结构如图 4 所示<sup>[8]</sup>。这种结构的非泵浦吸收区采用了锥形吸收波

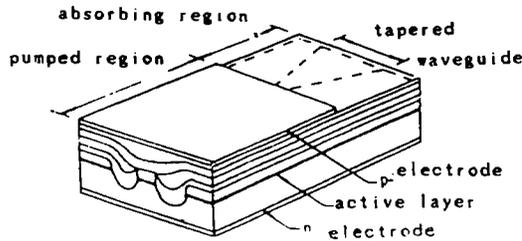


Fig. 4 Structure of SLD with 1.3μm tapered waveguide absorbing region

区后,使重新耦合入有源区的后端面反射光仅占 5%左右。器件结构参数为:泵浦区  $L_p = 400\mu\text{m}$ ,吸收区  $L_a = 200\mu\text{m}$ ,锥角  $6.5^\circ$ ,  $W_t = 45\mu\text{m}$ ,有源区宽度和厚度分别为  $1.5\mu\text{m}$  和  $0.15\mu\text{m}$ ,这时锥形吸收区的等效反射率为  $7 \times 10^{-7}$ 。在 200mA 工作电流下,输出功率高达 13.5mW,后端面输出功率约为前端的 1/10,谱半宽 35nm。

(4)减反射窗口吸收区 SLD 1991 年,日本光电子实验室的 K. Tateoka 等人<sup>[9]</sup>报道了一种新型吸收区波导结构 SLD,即减反射窗口吸收区 SLD,图 5 为该器件结构示意图。该结构用腐蚀法将非泵浦区中的有源层全部去除,然后再生长窗形材料,使非泵浦区同时又是增透窗口,加之在前后端面均镀以减反射涂层,从而成功地抑制了激射振荡。该器件输出功率高达 50mW,谱半宽 15nm,这是目前实现的短波长 SLD 输出功率最大的一种结构。

这种结构 SLD 有两个最大优点:首先可获得较小光束发散角和稳定基横模光输出;另外,由于窗口区是宽带隙材料制成的,对发射光来说,窗口区是透明的。因此,在窗口区内不会由于光吸收而引起温度升高,提高了输出功率。

2. 减反射涂层 SLD

在半导体激光器的端面上蒸镀减反射涂层也可以实现高性能 SLD。如图 6 所示的一种结构,它是由贝尔实验室的 I. P. Kaminow 等人<sup>[10]</sup>制造的。采用脊波导激光器结构,在其前端蒸镀一层  $\text{Si}_3\text{N}_4$  减反射涂层,后端面镀一高反射金膜,得到了谱半宽为 30nm 的  $1.3\mu\text{m}$  SLD,室温连续输出功率 1.6mW(110mA,  $20^\circ\text{C}$ ),单模光纤耦合效率 30%,调制速率 350MHz。10mW 输出功率短波长 SLD 也有报导<sup>[11]</sup>。采用双沟激光器结构,涂层材料为  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,实现了 25% 的光谱调制深度和  $45\mu\text{m}$  相干长度的良好性能。

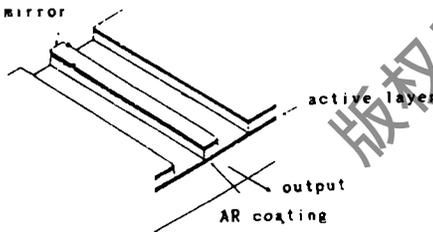


Fig. 6 Structure of antireflective coating SLD

3. 倾角条形 SLD

有效地降低端面反射率,不但可以实现高功率 SLD,也可以得到较低的光谱调制深度。G. A. Alphone 等人<sup>[12]</sup>研制的一种角度条形短波长 SLD 的结构如图 7 所示。该结构将条形有源区

导,其抑制机理为:假设光在有源区中传播的是基横模,从射线光学理论知道,由于锥形波导界面的偏折,光在吸收区内传播时,入射角将发生变化,可能有一部分波导模从低阶模转变为高阶模,甚至变成辐射模式,而这个转变在光波到达锥形区端面并被反回有源区波导界面传输时,更为明显。由于高阶模向单模波导的耦合系数很小,光将很难再进入有源区。这样,经锥形吸收

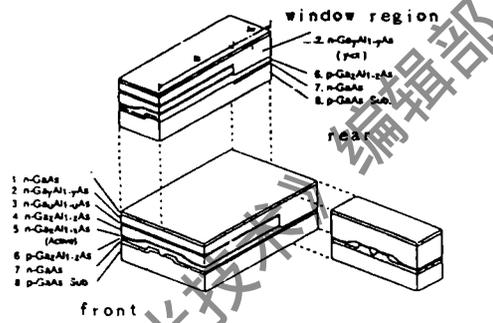


Fig. 5 Structure of SLD with antireflective window absorbing region

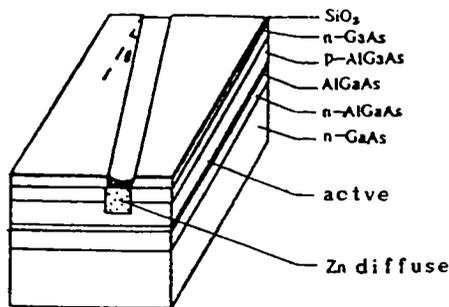


Fig. 7 Structure of angled stripe SLD

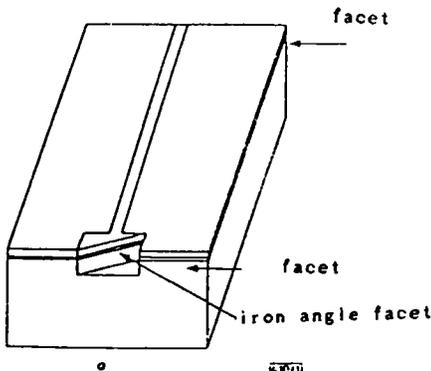


Fig. 8 Structure of inclined SLD

相对解理面倾斜  $\theta$  角,使耦合入窄条形有源区的反射功率减小到极小值。角  $\theta$  的选取,既要小于自发辐射在输出端面由菲涅耳定律确定的临界角  $\theta_c$ ,又要足以防止在平行端面之间的 F-P 模式振荡。对 GaAs/GaAlAs 材料,倾角  $\theta=5^\circ$ 。在腔长  $1000\mu\text{m}$ ,输出功率为  $28\text{mW}$  时,光谱调制深度仅为 5%,谱半宽  $8\text{nm}$ 。

1991年, C. F. Lin<sup>[13]</sup>报导了另一种倾角型结构 SLD,如图 8 所示。为了得到较光滑的腐蚀角斜面,他们采用了“化学辅助离子束腐蚀(CAIBE)”技术,最后得到了小于  $10^{-3}\%$  的端面反射率,即使不用任何减反射涂层或高反射膜,仍有 85% 的功率从腐蚀角端面被耦合出来,从而获得了  $10\text{mW}$  左右的输出功率,光谱调制深度只有 1%。

#### 4. 量子阱 SLD

由于量子阱结构中的增益光谱比体结构 DH 器件的要宽得多,其输出光谱可大大展宽,从而减小了相干长度,短的相干长度是光纤陀螺系统用光源所要求的。S. Kondo 等人<sup>[14]</sup>采用多量子阱结构的有源区,研制的  $1.5\mu\text{m}$  波长 SLD,光谱宽度大于  $100\text{nm}$ ,最大光谱宽度达  $170\text{nm}$ ,相干长度只有  $13\mu\text{m}$ 。多量子阱的有源区结构如图 9 所示。

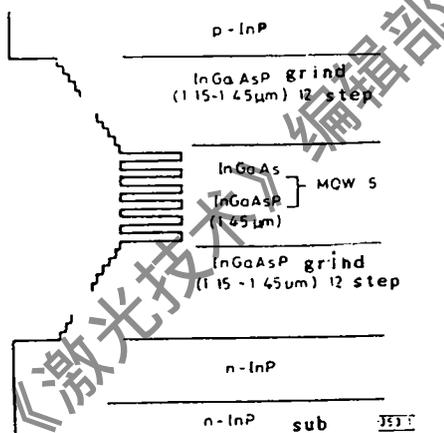


Fig. 9 Structure of fabricated MQW active region

### 三、应用

SLD 主要应用是在光纤陀螺系统上。由于 SLD 具有相干长度短,输出功率高,光束发散角小等优点,使 SLD 成为光纤陀螺的理想光源。SLD 也是光时域反射仪的理想光源。另外,它可以替代相当实用的注入型半导体激光器和发光二极管作为光纤通信光源,还可以实现与探测器的单片集成,用于光学存储读出。随着 SLD 性能的提高,SLD 在其它方面,如测量系统,视频光盘,打印机,光触发开关, Nd : YAG 激光器的光泵浦等也将得到广泛的应用。

### 四、结束语

自发现 SLD 在光纤陀螺等领域的应用前景以来,许多结构 SLD 已被研制出来,并达到了

相当高的实验水平,可望有更多的商品 SLD 提供市场。

对 SLD,为了满足应用的要求,须对 SLD 作深入的理论和实验研究,提出最佳结构,从增加有源区长度,提高外延层质量,尽量减小端面反射率等方面着手,由上述可知,在各种结构的 SLD 研究中,无不是从这几方面下功夫的。

然而,在 SLD 中,随注入电流增大,器件得到的受激增益也增大,谱宽逐渐变窄。因此,高功率和宽谱宽是一对矛盾因素,如何既能获得高的输出功率,又能使器件有较大的谱宽,这是 SLD 结构设计和工艺研究中必须首先解决的技术难题。

现在,SLD 正朝着高输出功率,低的发散角度和短的相干长度发展,激射抑制手段已多样化,器件结构已从简单的 DH 结构向隐埋异质结,量子阱和多发射器件阵列发展。在今后的发展中,随着光纤陀螺等应用领域对所用光源提出更高的要求,多量子阱(MQW)结构 SLD 将会以其优异的性能而飞速发展起来。

### 参 考 文 献

- 1 Takada K, Yokohama I, Chida K *et al.* Appl Opt, 1987;26:1603~1606
- 2 Kurbatov L N, Shakhidzhanov S S, Bystrova L V *et al.* Soviet Physics Semiconduct, 1971;4:1739~1744
- 3 易武秀译. 光纤通信技术, 1991;4:29~34
- 4 Wang C S, Cheng W H, Hwang C J. A P L, 1982;41(7):587~589
- 5 Kwong N S K, Bar-Chaim N. A P L, 1989;54(4):298~300
- 6 Chen T R, Zhuang Y H, Xu Y J *et al.* A P L, 1990;56(25):2502
- 7 Nagai H, Noguchi Y, Sudo S. A P L, 1989;54(18):1719~1721
- 8 Magari K, Hoguchi Y, Okamoto K. Electron Lett, 1990;25(18):1445~1446
- 9 Tattoka K, Naito H, Yuri M *et al.* IEEE J Q E, 1991;27(6):1568~1572
- 10 Kaminow I, Eisenstein G, Stulz L *et al.* IEEE J Q E, 1983;19(1):78
- 11 Morrison C B, Zinkiewicz L W, Niesen J *et al.* Electron Lett, 1985;21(19):840~841
- 12 Alphonse G A. IEEE J Q E, 1988;24(12):2454
- 13 Lin C F. Electron Lett, 1991;27(11):968
- 14 Kondo S, Yasaka H, Noguchi Y *et al.* Electron Lett, 1992;28(2):132~133

\* \* \*

作者简介:马东阁,男,1967年出生。博士。现主要从事半导体激光器和超辐射发光二极管的结构设计、制备和光学特性研究。

石家伟,男,1941出生。教授。现主要从事半导体光电器件的老化、噪声测试等研究工作。

收稿日期:1993-09-15 收到修改稿日期:1993-10-24

• 产品简讯 •

### 稳定的激光系统

Melles Griot 公司宣称其 05STP901 新型偏振稳频激光系统,具有优越的保证长期的频率稳定性。这种易于使用的转动键系统,可用于干涉仪、分光镜和显微观察。激光器非常稳定。

译自 L & O, 1994;13(5):38 於祖兰 译 巩马理 校