

DAST 晶体属于单斜晶系,它的二阶非线性极化张量含有 10 个独立的非零张量元。当入射激光脉冲垂直照射到 z -切割(即(001))的晶体样品表面时,只有三个非零张量元对电磁辐射有贡献。在沿光束传播方向,电磁波呈横电磁波特性。它的两个电场分量垂直于入射光偏振方向的分量 E_s 和平行于入射光偏振方向的分量 E_p , 可以分别表示为

$$E_p(\theta) = A\{(3d_{11} + d_{12} + 2d_{26})\cos\theta + (d_{11} - d_{12} - 2d_{26})\cos(3\theta)\}, \quad (4)$$

$$E_s(\theta) = A'\{(3d_{12} + d_{11} - 2d_{26})\cos\theta - (d_{11} - d_{12} - 2d_{26})\cos(3\theta)\}, \quad (5)$$

这里 d_{11} , d_{12} 和 d_{26} 是 DAST 晶体的三个非线性极化张量元, θ 是晶体样品的旋转角度, A 和 A' 是两个决定于测量系统的常数。通过拟合图 2 所示的实验结果就可以得到这些张量元之间的比值。即 $d_{12} = -0.4d_{11}$, d_{26} 是一个很小的量, 大约只有 d_{12} 的 295 分之一。利用这种方法只要知道一个张量元, 就可以确定另外两个。

亚皮秒光整流效应是一个非常有效的实验手段, 可以用来研究许多非线性材料, 特别是一些低对称的有机和高分子化合物。利用这种方法, 仅需要很少几个样品就可以测定材料的所有非线性极化张量元间的比值。当然, 要精确测定某一张量元的值, 还需要利用标准样品比

较法和相应的数学运算。

3. 制造新型的快速电磁探针及其他应用

由前所述, 亚皮秒光整流效应可以产生超短亚毫米电磁波脉冲。这种电磁波的频率可以达到埃赫兹, 脉冲宽度可低于 200mps。这种超快电磁波可以用来研究材料的变化特性。若将电光晶体安装在一个光导纤维的终端, 辐射电磁波还可以作为微型的电磁探针。

此外, 利用亚皮秒光整流效应, 可以在所研究的非线性介质内部产生快速变化的强电场, 由此来研究非线性材料在强电场下的性质。这种方法无需偏置电极而具有很多优点。

总之, 亚皮秒光整流效应作为一种特殊的非线性光学现象, 具有相当的研究价值和应用领域, 它将在光电子技术和材料的研究开发中发挥重要的作用。

- [1] 张希成、金亚红, 物理, 22(1993), 136.
- [2] Y. R. Shen, The principle of nonlinear optics, Wiley, (1984).
- [3] M. Bass et al., Phys. Rev. Lett., 9(1962), 446.
- [4] X. F. Ma and X. -C. Zhang, J. Opt. Soc. Am. B, 10(1993), 1175.
- [5] X.-C. Zhang et al., Appl. Phys. Lett., 61(1992), 3080.
- [6] J. D. Jackson 著, 朱培豫译, 经典电动力学, 人民教育出版社, (1978).
- [7] Ch. Fattinger et al., Appl. Phys. Lett., 54(1989), 490.

ZnSe 蓝色半导体发光和激光器件的研究进展

范希武 吕有明

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

阐述了研制蓝色半导体发光和激光器件在光电子技术发展中的重要性。通过对 ZnSe 半导体发光和激光器件发展过程的评论, 说明了获得 P 型 ZnSe 所遇到的困难和解决的途径。介绍了近期在获得高导电 P 型 ZnSe 层方面的突破性进展, 从而实现了 ZnSe p-n 结蓝色半导体发光和激光器件。

关键词 ZnSe, 蓝色发光二极管, 蓝色半导体激光器

Abstract

The role of blue light emitting diodes (LEDs) and laser diodes (LDs) is beco-

ming increasingly important in optoelectronics. The difficulties and methods of obtaining p-type ZnSe are described by reviewing the development process of LEDs and LDs based on ZnSe. The recent breakthrough in obtaining highly conductive p-type ZnSe has lead to the realization of ZnSe p-n junction LEDs and LDs in the blue region of the spectrum.

Key words ZnSe, blue LEDs, blue LDs

当今社会已经进入了信息时代,光电子技术已经广泛应用于国防建设和国民经济等各个领域。半导体发光和激光器件作为光电子技术中重要的基本器件,已经并将继续发挥它们越来越重要的作用。

半导体发光二极管通常是指半导体结型(主要是指 p-n 结)器件通以正向电流时可发射出光来的器件;半导体激光器在原理上与发光二极管有相似之处,因其结构等的不同可产生受激发射。发光二极管和半导体激光器具有发射效率高、响应速度快、寿命长、可靠性好、体积小、易于调制和易于集成等特点,因而在数字、图象和全息等显示领域,在数字光逻辑、图象处理、光存储器等光信息领域以及在光纤通信、卫星通信、光雷达等光通信领域,都有着诱人的应用前景。

目前,从红色到绿色的发光二极管和在红色及近红外波段的半导体激光器,已经实用化并得到广泛的应用。但是蓝色发光二极管以及蓝色和绿色的半导体激光器还处在研制和开发阶段。对上述器件研制和开发的成功,将大大拓宽半导体发光和激光器件的应用范围。例如,可用发光二极管来制备全彩色的平板显示屏和显像屏,可用上述器件作水下通信的光源和高密度光存储器的光源等。

对蓝色半导体发光和激光器件的探索经历了相当长的时间,迄今尚未找到一种公认的理想材料。到目前为止,作为该类器件的候选材料,主要有 GaN, SiC 和 ZnSe 等,利用上转换和二次谐波原理也可以得到蓝色发光和激光器件。近年来发展起来的用有机材料制备蓝色发光二极管也颇受人们重视。在探索蓝色发射器件的过程中, GaN 和 SiC 都曾一度领先于

ZnSe。但从 1990 年美国人^[1-4]在研制 p 型 ZnSe 层获得突破性进展,并率先报道了 ZnSe 基材料的蓝绿色半导体激光器后,形势发生了很大的变化, ZnSe 基材料的蓝色发光和激光器件已成为探索蓝色发射器件候选材料中的热点。如果再考虑到集成光电子技术的需要,那么由于 ZnSe 和 GaAs 的晶格失配仅为 0.27%,从而使 ZnSe 有充分的理由在蓝色发射器件的众多候选材料中跃居首位。本文着重介绍 ZnSe 蓝色发光二极管和蓝色半导体激光器发展中遇到的问题,解决的途径以及最近的发展状况。

一、早期 ZnSe 注入式发光器件

ZnSe 属于直接带隙的 II-VI 族半导体,其室温带宽为 2.67 eV,具有较大的激子束缚能,激子发光可延续到室温,因此一向被认为是研制蓝色发光二极管的重要候选材料之一。在通常情况下, ZnSe 材料具有严重的自补偿效应,往往只能呈现 n 型导电,难于通过两性掺杂实现 p-n 结。因此 ZnSe 的自补偿效应曾经成为制作 ZnSe p-n 结器件的主要障碍。

所谓自补偿效应是指材料在制备过程中故意掺入一种导电类型的杂质时,在该材料内将有相反导电类型的非故意掺入的杂质或缺陷与之补偿。对于宽带 II-VI 族材料, Kroger 早在 50 年代就提出了这种自补偿机理,并认为缺陷自补偿起主导作用。到了 70 年代, Dean 根据他的实验结果,提出由于材料纯度不高,非故意掺入的杂质的自补偿可能起主导作用的新观点。根据前一种观点,研制 p 型 ZnSe 层是没有希望的。早期为实现 ZnSe 材料的注入式结

型发光,研究工作集中在利用金属-半导体(MS)结构和金属-绝缘体-半导体(MIS)结构来实现注入式结型发光二极管;也有人通过异质p-n结,例如P型ZnTe和n型ZnSe结来实现注入式发光。这些器件由于界面晶格严重失配,导致大量界面态存在,造成发光亮度和效率都很低。早期不少工作者在探索实现同质ZnSe p-n结的工作中,付出了巨大的努力,但都宣告失败。随着离子注入技术的发展,可以在非热平衡条件下,将ZnSe的P型杂质Li, N, P等用离子注入法掺入ZnSe晶体中,实现了P型ZnSe,获得了ZnSe p-n结发光二极管。但是由于高能离子注入造成晶体的严重损伤,得到的发光亮度和效率仍然很低。根据Dean的观点,如果我们将材料的纯度和完整性提高,而又能掺入高浓度P型杂质,获得高导电的P型ZnSe是有可能的。随着分子束外延(MBE)和有机金属气相外延(MOCVD)等近代单晶薄膜生长技术的发展,人们可以研制出高纯度和高完整性的单晶薄膜,还可在非热平衡条件下掺入P型杂质。这样从理论上和技术上为实现有效的ZnSe p-n结注入式发光和激光器件奠定了基础。

二、ZnSe 电导的控制

ZnSe 电导的控制包括两个方面的意义:其一是控制电导的类型即P型和n型;其二是控制电导的高低,即掺杂后的载流子浓度。虽然获得高电导的P型ZnSe是制备p-n结的关键,但获得高电导的n型ZnSe对于制备p-n结也是十分重要的。要控制ZnSe的电导,首先要获得高纯度和高完整性的本征ZnSe外延膜。利用已发展的MBE和MOCVD等新技术,利用较高纯度的原料,可以在较低温度下进行非热平衡生长和掺杂,使实现ZnSe电导的控制成为可能。

表1^[5]列出了制备n型和P型ZnSe的掺杂源及其掺杂效果。由表1可知,对ZnSe的n型掺杂的研究结果,主要是掺入Al, Ga取代Zn,和掺入Cl, Br, I取代Se。作为例子,如用MOCVD法,以C₂H₅I或n-C₄H₉I为源掺入I,可使载流子浓度在10¹⁵—10¹⁸ cm⁻³范围内可控,如用MBE法,以ZnCl₂为源掺入Cl,可使载流子浓度在10¹⁶—10¹⁹ cm⁻³范围内可调。由表1还可得到对ZnSe的P型掺杂的

表1 ZnSe 中掺入施主、受主杂质所使用的掺杂源及其掺杂结果

n 型				p 型				
施主杂质	离化能 (meV)	掺杂源	载流子浓度 (cm ⁻³)	受主杂质	离化能 (meV)	掺杂源	掺杂效果	
III	Al	25.6	(C ₂ H ₅) ₃ Al	I	Li	114	C ₂ H ₅ Li	束缚激子发射
	Ga	27.2	(C ₂ H ₅) ₃ Ga				t-C ₄ H ₉ Li	<1×10 ¹⁵ cm ⁻³
VII	In	28.2	Ga	V	N	80	Li	~10 ¹⁷ cm ⁻³
	Cl	27	I-C ₄ H ₉ Cl				124	C ₂ H ₅ Na
			HCl	10 ¹⁵ —10 ¹⁷	Na	~10 ¹⁵ cm ⁻³		
	Br	26.5	ZnCl ₂	110	P	85	NH ₃	<10 ¹⁴ cm ⁻³
			C ₂ H ₅ Br				10 ¹⁶ —10 ¹⁹	(CH ₃) ₂ N ₂ H ₂
	I	26	C ₂ H ₅ I	114	As	108, 114	N-N	10 ¹⁷ —10 ¹⁸ cm ⁻³
n-C ₄ H ₉ I			10 ¹⁵ —10 ¹⁹				PH ₃	深能级发射
F	28.8		I+V	Li+N	89.4	Zn ₃ P ₂	~10 ¹⁶ cm ⁻³	
						AsH ₃	深能级发射	
						Zn ₃ As ₂	~10 ¹⁷ cm ⁻³	
						Li ₃ N	<10 ¹⁸ cm ⁻³	
						(CH ₃) ₂ LiN	束缚激子发射	

研究结果,主要是掺入 Li, Na 取代 Zn, 和掺入 N, P, As 取代 Se 也可以利用 I 和 V 族元素共掺杂. 对于 I 族元素,例如 Li, 其离子半径较小,易于掺入,但它既可以取代 Zn 成为受主,也可以填隙成为施主,这就是杂质的自补偿,以致难以得到高的载流子浓度. 解决的办法是使 Li 固定位置,例如使 Li 和 N 联合掺入等办法. 掺 N 较为有效,但早期掺 N 往往用 N_2 气或 NH_3 气作源, N 以分子形式存在,而 N_2 分子在 ZnSe 中的粘附系数很低,不易进入 ZnSe 内,得到的载流子浓度仅为 $10^{16}cm^{-3}$. 最近 Park 等人^[1]和 Chkawa 等人^[2]分别报道了用射频等离子体源进行掺氮的新方法. 将氮分子分解为氮原子,而氮原子在 ZnSe 中的粘附系数要比氮分子大得多,从而提高了掺氮的浓度,使 ZnSe 中纯受主浓度达到 $1 \times 10^{19}cm^{-3}$ 甚至 $10^{19}cm^{-3}$ 量级. 利用这一新技术已经实现了蓝绿色的 ZnSe 基量子阱(QW)结型激光器^[3,4],从最初的 77K 下脉冲工作到室温下连续工作. 详情将在第四节中介绍.

三、ZnSe p-n 结发光二极管

早期用离子注入法等途径制备的 ZnSe p-n 结发光二极管的效率很低,约为 0.001%. 通过替位掺杂实现的 ZnSe p-n 结发光二极管的效率可达到 0.01%. 近年来随着高电导 P 型 ZnSe 层的实现,并通过设计多层结构的发光二极管,可使室温效率提高到 0.1%.

目前制备 ZnSe p-n 结发光二极管遇到的主要困难就是 P 型 ZnSe 的欧姆接触问题, n 型 ZnSe 通常用 In 作欧姆电极,但到目前为止还没有找到一种与 P 型 ZnSe 有良好欧姆接触的电极材料. Haase 等人^[6]利用 p^+ 型 GaAs 作衬底,先外延生长 P 型 ZnSe:Li 层,再外延生长 n 型 ZnSe:Cl 层,最后蒸发 In 电极. 利用这种二极管结构避免了在 P 型 ZnSe 上制备欧姆电极的困难. 在该二极管上获得了室温下谱峰为 463nm 的蓝光. 这类二极管存在的问题是, GaAs 与 ZnSe 价带跃变大约为

1.3eV, 以及 GaAs-ZnSe 界面的失配位错产生高阻层,使该发光二极管正向电压超过 15V. Ren 等人^[7]设计了与此不同的二极管结构. 在 n 型 GaAs 衬底上先后分别外延生长 n 型 ZnSe:Cl 和 P 型 ZnSe:Li 层,再分别在 n 型 GaAs 和 P 型 ZnSe 上真空蒸发 Au-Ge 合金层和 Au 层. 在该二极管上获得了室温下谱峰为 471nm 的蓝光. 这类二极管存在的问题是, Au 与 p-ZnSe 的欧姆接触不好,产生大约 1V 的肖特基势垒,以及 GaAs-ZnSe 界面失配位错对正向电压的影响. Ohkawa 等人^[8]用 ZnSe 单晶作衬底,先后外延生长 n-ZnSe:Cl 和 p-ZnSe:N 层,最后真空蒸发 Pt 层. 在该二极管上得到室温下谱峰为 466 nm 的蓝光. 这类二极管,由于选择 ZnSe 作衬底,同质外延避免了异质外延时界面失配带来的影响,使二极管的正向电压达到 1V 左右. 但这类结构仍然没有解决 p-ZnSe 的欧姆接触问题.

对于上述几种发光二极管,尽管考虑问题的出发点不同,结构各异,但器件性能顾此失彼,并不理想. 美国布朗-普渡大学研究组^[4],在此基础上综合考虑了一些因素的影响,设计了几组以 p-ZnSe/ZnCdSs/n-ZnSeQW 为核心的 PIN 多层结构发光二极管. 图 1 给出了用 MBE 法制备的 PIN 发光二极管的两种典型的结构. 该二极管有以下特点: 第一,选择 p-GaAs 作衬底,避免了 p-ZnSe 欧姆电极的困难; 第二,考虑高温处理 GaAs 衬底时在表面产生富 Ga 的影响,在外延生长 ZnSSe 前先生长一层 GaAs 层,避免了 Ga_2Se_3 阻挡层的形成; 第三,选用 ZnCdSe/ZnSe 量子阱作限制层,提高了激子的束缚能,如对 $Zn_{0.76}Cd_{0.24}Se/ZnSe$ 量子阱,可将激子束缚能提高到 ~ 40 meV, 以利于室温下获得谱线锐、吸收强和效率高的激子发射; 第四, ZnSSe 或 InGaAs 层的引入,减少了 ZnSe-GaAs 界面失配带来的影响,通过适当选择组分,可以达到界面完全匹配,从而可以获得较高质量的 PEN 结构.

图 2 为图 1(a) 结构的二极管在低温和室温下的电致发光光谱. 室温下的蓝绿光的起因

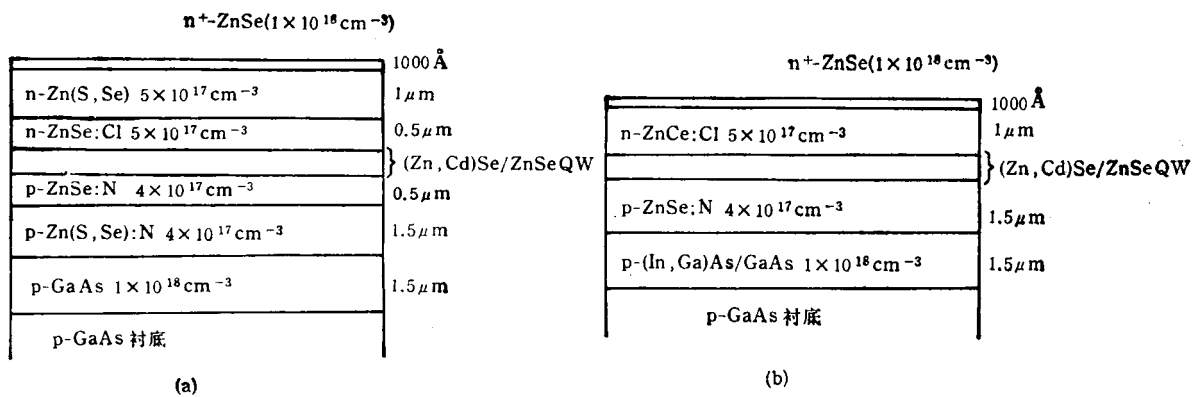


图1 两种 p-ZnSe/ZnCdSe/n-ZnSe QW 发光二极管结构示意图

归结为量子阱中的激子发射。图2中的插图表示在77K和300K下二极管的伏安特性曲线。这类发光二极管可在室温和正向电压约3V时得到蓝绿光。这类包括量子阱的发光二极管，由于量子阱的特点，可提高激子束缚能，可改变带隙的宽度等，它已成为目前可获得最高亮度和效率的蓝绿色发光二极管。

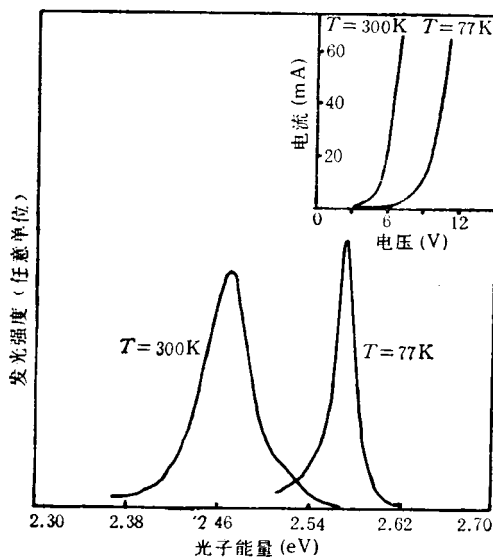


图2 ZnCdSe/ZnSe 量子阱发光二极管在77K和300K下的电致发光光谱和伏安特性

四、ZnSe 蓝绿色激光器的突破

研制 ZnSe 半导体激光器遇到的困难与研物理

制 ZnSe 半导体发光二极管大体相似，即获得低阻的 p-ZnSe 层以及 p-ZnSe 的欧姆接触，不过对前者的要求更高，例如通常认为只有在载流子浓度高于 10^{19}cm^{-3} 时才能满足产生激光的最低要求。因此，早期有关 ZnSe 及其量子阱受激发射的研究受掺杂浓度的限制，都是利用光和电子束泵浦的受激发射，这类非结型器件通常只能在低温和脉冲下工作，而且阈值也高。研究工作着重于弄清受激发射的机理，以及条件对受激发射的影响等。

自从 Park 等人^[1]和 Ohkawa 等人^[2]报道了利用 N 等离子体源制备高导电 p-ZnSe 的掺杂技术后，基本上解决了制备 ZnSe 结型激光器所要求的高载流子浓度问题。在此基础上，美国 3M 公司 Haase 等人^[3]首次在 ZnCdSe/ZnSe 量子阱结构上实现了蓝绿色半导体激光器。获得了在 77K 下以脉冲方式工作的波长为 490nm 的激光。这一成就于 1991 年在日本召开的第五届国际 II-VI 族化合物学术会议上报道时，引起了与会者轰动，并一致认为这是半导体激光器发展史上的重要里程碑。Haase 等人的成就除了采用 N 等离子体掺杂实现低阻 p-ZnSe 层外，他们的创造性还在于采用了较为合理的结构。

图3的插图表示第一台 n-ZnSe/Cd_{0.2}Zn_{0.8}Se/p-ZnSe 单量子阱激光器结构示意图。由图可知，该激光器的核心是一个由 n-ZnSe/Cd_{0.2}Zn_{0.8}Se/p-ZnSe 组成的单量子阱。光发射

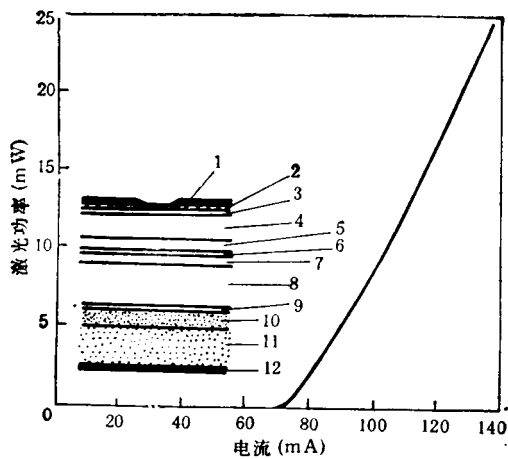
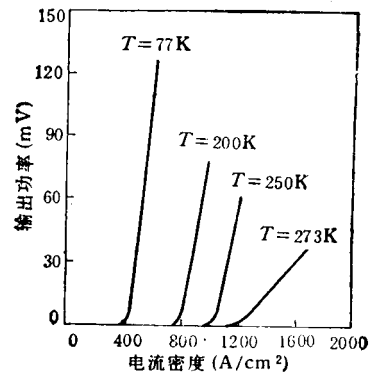


图3 n-ZnSe/Cd_{0.7}Zn_{0.3}Se/p-ZnSe 单量子阱激光器 ($\lambda = 490\text{nm}$, 脉冲式, 77K) 输出功率随注入电流的关系曲线, 插图为该激光器的结构示意图

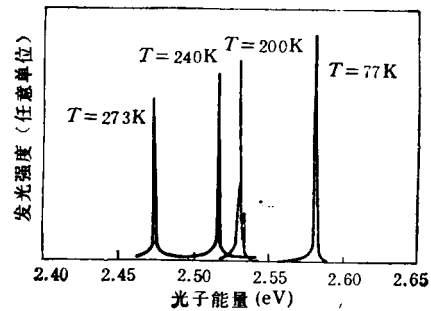
(1. Au 电极; 2. 介质; 3. p⁺-ZnSe; 4. p-ZnSSe; 5. p-ZnSe; 6. CdZnSe 量子阱; 7. n-ZnSe; 8. n-ZnSSe; 9. n⁺-ZnSe; 10. n-GaAs 缓冲层; 11. n-GaAs 衬底; 12. In 电极)

产生于 CdZnSe 势阱层, 两侧 ZnSe 势垒层作为光波导区, 与 GaAs 衬底较为匹配的 ZnS_{0.97}Se_{0.03} 包层分别覆盖两边。在 n-GaAs 衬底上, 先外延一层, 表面富 As 的 n-GaAs 缓冲层, 再外延 n⁺-ZnSe, 这一缓冲层有利于解决 n-ZnSe 和 n-GaAs 的接触问题。图 3 为该激光器的光输出功率随工作电流的变化。阈值电流为 74mA, 它相应的阈值电流密度为 320A/cm²。测量它的微分量子效率, 每个出光面大于 20%, 还测量了它的脉冲输出功率, 每个出光面超过 100mW。当激光器的注入电流超过阈值时, 发射光谱由很多纵模组成, 峰间距为 0.03nm, 中心波长为 490nm, 当工作温度高达 200K 时, 还能观测到激光。这类激光器存在的一个严重问题是样品发热以及阈值工作电压高达 20V, 其原因是没有解决好 p-ZnSe 的欧姆接触。

美国布朗-普渡大学联合研究组的科学家报道了^[4] 他们改进激光器结构获得室温下脉冲工作的蓝绿色激光。激光器结构如图 1 所示, 主要的改进是采用 p-GaAs 作衬底, 避免了 p-ZnSe 欧姆接触的困难。图 4(a) 表示



(a)



(b)

图4 ZnCdSe/ZnSe 量子阱激光器在不同温度下激光输出功率与注入电流密度的关系曲线 (a) 和受激发射光谱 (b)

ZnCdSe/ZnSe 单量子阱激光器在不同温度时激光输出功率随注入电流的变化。由该图可知, 在 77K 和 273K 时, 阈值电流分别为 160 mA 和 600mA, 对应的阈值电流密度分别为 400 A/cm² 和 1.5 kA/cm²。图 4(b) 表示该激光器在不同温度下的受激发射光谱。由该图可知, 在室温下可观测到受激发射。激光产生的机理归结为与 $n = 1$ 重空穴有关的激子发射。

宽带 II-VI 族半导体激光器的发展是当前半导体激光器研究中的热点, 目前日本和美国在这一领域是领先的, 英国和德国也正在追赶。根据 1992 年在日本召开的国际固态器件与材料会议^[9] 以及 1993 年在美国召开的第六届国际 II-VI 族化合物学术会议的消息表明, ZnSe 基蓝色和蓝绿色半导体激光器的性能有了明显的进展。p-ZnSe 的欧姆接触方面开展了较多的研究工作, 例如有人在金属与 p-ZnSe 间制备一个成分渐变的 p-Zn(Se, Te) 层, 从

ZnSe 逐步过渡到 ZnTe, 而 ZnTe 中氮掺杂浓度可高达 10^{19}cm^{-3} , 有利于欧姆接触, 还有人用短周期 ZnTe/ZnSe 超晶格代替 Zn(Se, Te) 渐变层, 可使接触电阻降到 $2-9 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, 300 K 时正向阈值电压可为 2.5—3.5 V. 在量子阱结构上, 有人采用 ZnS/ZnSSe/ZnS 多量子阱结构和 ZnMgSSe/ZnSSe/ZnMgSSe/GaAs 多量子阱结构, 这样可使激光波长移向纯蓝, 甚至紫外区. 激光器已从 77K 下脉冲工作. 进展到 77K 下连续工作, 继而从室温下脉冲工作进展到室温下连续工作. 值得指出的是, 日本索尼公司最近已研制成功世界上第一个室温连续工作的 CdZnSe/ZnSeS:Mn 量子阱蓝绿色半导体激光器, 其波长为 520nm, 阈值电流为 45mA, 阈值电流密度为 1400A/cm^2 . 从而将 ZnSe 基蓝绿色半导体激光器的研究提高到一个新水平. 在迅猛发展的事实面前, 研制

ZnSe 基蓝色和蓝绿色半导体激光器已经不是“观望”阶段, 也不是“有希望”阶段, 而是争取早日达到“实用化”阶段. 围绕着蓝色半导体激光器的商品化, 一场新的激烈的国际竞争正在进行之中. 中国的半导体科技工作者也应投身于国际竞争的行列.

- [1] R. M. Park et al., *Appl. Phys. Lett.*, **57**(1990), 2127.
- [2] K. Ohkawa et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**(1991), 152.
- [3] M. A. Haase et al., *Appl. Phys. Lett.*, **59**(1991), 1272.
- [4] A. V. Nurmikko et al., *J. Lumin.*, **52**(1992), 89.
- [5] H. Kukimoto, *J. Cryst. Growth*, **101**(1990), 953.
- [6] M. A. Haase et al., *J. Appl. Phys.*, **167**(1990), 448.
- [7] J. Ren et al., *Appl. Phys. Lett.*, **57**(1990), 1901.
- [8] K. Ohkawa et al., *Jpn J. Appl. Phys.*, **30**(1991), 3873.
- [9] 王迅, 物理, **22**(1993), 187.

地震预报的物理学问题

吴 忠 良

(国家地震局地球物理研究所, 北京 100081)

近年来, 运用非线性物理学的概念和方法去理解地震现象的复杂性的研究取得引人瞩目的进展. 用临界现象理论来理解地震破裂的物理过程, 从自组织临界现象的角度对中长期时间尺度上的地震活动进行说明, 这都给地震预报研究以很大的启发, 并在实际地震预报算法的研究中得到应用. 地震预报目前仍是一个世界性的科学难题. 用物理学的概念和方法研究地震和地震预报问题, 可能是地震预报和减轻地震灾害研究中一个有希望的发展方向. 这篇综述的目的是在那些熟悉物理学的人和那些熟悉地震学的人之间架起一座桥梁.

关键词 非线性, 临界现象, SOC, 地震预报

Abstract

In recent year developments have been made in understanding the complexity of earthquake phenomena in the view of nonlinear dynamics. The study of the criticality of seismic rupture and the self-organized critical hypothesis of seismicity have provided the study of earthquake prediction with many useful clues which have, to some extent, been applied to the development of the algorithms of earthquake forecasting. At present, earthquake prediction is still one of the most difficult problems in seismology. It seems that using the theory and methods of nonlinear