

和 Si 晶体的良好的晶格匹配特点,如图 6(b)所示,在 PSL 上用低温外延方法(如 MBE,LP-CVD)生长器件层,然后在器件层上用刻蚀和离子注入方法形成沟道,通过这些沟道对埋在外延层下的 PSL 进行氧化,最终制成 SOI 结构。用 PS 的 SOI 技术已制造出了电性能十分好的器件^[19]。此外 PS 还可用于 SOC (semiconductor on conductor)结构^[19],它是首先在器件岛下形成 PSL,然后通过把以 NiSO₄ 为基的电解液注入 PSL 层,或者把金或银直接蒸发到 PSL 上,或者用 CVD 方法把钨沉积到 PSL 上等方法^[19],使 PSL 金属化,成为 SOC 结构。

由于 PS 在结构、光学等方面的奇异特性,如多孔性、高孔隙率、强烈的近红外和可见区的荧光发射,预期 PS 在发展可见 Si 光源、Si 光电器件、太阳能电池等方面都能找到用武之地。特别是由于 PS 可以制成近红外和可见光源,使人们看到在廉价的 Si 片和成熟的 Si 工艺基础上可能制造出把光源和集成电(光)路结合在一个 Si 片上的光电子或光集成电路,从而在 1991 年掀起了一个世界性的 PS 热。最近,已用 PS 制成能电致发红、蓝光的器件^[20],它标志 PS 进一步跨入了技术应用的领域及 PS 所具有的美好前景。

- [1] A. Uhlir, *Bell Syst. Technol. J.*, **35** (1956),339.
- [2] D. R. Turner, *J. Electrochem. Soc.*, **105** (1955), 402.
- [3] L. T.Canham,*Appl. Phys. Lett.*, **57** (1990),1046.
- [4] X. G Zhang et al., *J. Electrochem. Soc.*, **136** (1989), 1561.
- [5] L. Lehmann and H. Foll, *J. Electrochem. Soc.*, **137** (1990), 653.
- [6] R. Herino et al.,*J.Electrochem. Soc.*, **134**(1987), 1994.
- [7] I. M. Youg, *Appl. Phys. Lett.*, **46** (1985), 1133.
- [8] P. C. Searson, *Appl. Phys. Lett.*,**59** (1991),832.
- [9] J. M. Gomez-Rodriguze et al., *Appl Surface Sci.*, **44** (1990), 185.
- [10] A.G.Cullis and L. T.Canham, *Nature*,**353**(1991), 335.
- [11] K. H. Jung et al.,Abstracts on MRS Symposium on Light Emission From Silicon, Published by Materials Research Society, (1991), 5.
- [12] A. Biesy et al., *Surface Science*,**254** (1991),195.
- [13] S. Gardelis et al., *Appl. Phys. Lett.*, **59** (1991), 2118.
- [14] Y. H. Xiu et al., Abstracts of MRS Symposium on Light Emission From Silicon, Published by Materials Research Society, (1991), 13.
- [15] S. R. Goodes et al., *Semicoand. Sci. Technol.*, **3** (1988). 483.
- [16] J. J. Yon et al., *J. Appl. Phys.*,**62** (1987) 1042.
- [17] C. Bomchil et al., *Applied surface science*, **41** (1989), 604.
- [18] V. Lehmann and U. Gosele,*Appl. Phys. Lett.* **58** (1991), 856.
- [19] S. S. Tsao, *Mat Res.Soc. Symp. Proc.*, **107** (1988), 429.
- [20] N. M. Kalkhoram and F. Namaraka, Abstracts of MRS Symposium on Light Emission From Silicon, Published by Materials Research Society, (1991), 15.

半导体激光器的新突破——蓝绿激光二极管

王 杰 王 迅

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室,上海 200433)

本文介绍最近国外在研制半导体可见光激光器方面的一项重大进展,即人们首次用 ZnSe 材料在蓝绿光波段(490nm)实现了激射,这是目前用半导体激光器可以获得的最短的激光波长。由于在 ZnSe 外延膜的生长和激光器的制备过程中仍存在问题,激光器的特性尚不理想,仅在 77K 下脉冲工作,但它终究已经开辟了通向制造实用器件的道路。本文概要介绍了制作这一激光器的困难、解决途径和现状。

Abstract

Recently, great progress in manufacturing visible light semiconductor lasers has been achieved. The first blue-green light laser diode fabricated from a wide-gap ZnSe/Zn CdSe single quantum well structure emitted coherent light at 490nm under a pulsed current at 77K. This is the shortest wavelength ever generated by semiconductor lasers. Although the performance of this diode is far from that needed for practical use due to the relatively poor qualities of ZnSe epitaxial film and the ohmic contact the realization of blue-green light semiconductor lasers is now well beyond just "promising".

一、蓝绿半导体激光器的应用

半导体激光器是所有激光器中最小巧的, 它还具有结构简单、效率高、便于直接调制等优点, 所以在测距、光通信、信息处理和存贮等方面有重要用途. 第一个半导体激光器是 1962 年发明的. 1970 年双异质结激光器诞生, 实现了半导体激光器的室温连续运转. 而半导体量子阱激光器的出现, 又极大地提高了半导体激光器的性能, 如降低了激光器的阈值电流, 使阈值电流对温度的变化不敏感, 使激光器具有高的输出功率、高的调制带宽和窄的线宽等. 这一切使得半导体激光器的研究和应用又跃上一个新的台阶. 早在 1989 年召开的第五届激光科学大会上, 与会者展望未来 30 年激光技术的发展时, 认为半导体激光器将主宰未来^[1].

目前半导体激光器发展的重要趋势之一是研制可见光激光器(激光二极管). 可见光激光器在用作彩色显示器光源、光存贮的读出和写入、激光印刷、条码读出器以及固体激光器的泵浦源等方面有广泛的用途. 能够用于制作可见光激光器的材料必须是具有较大禁带宽度的直接能隙半导体. 在目前最主要的用来制作半导体激光器的 III-V 族化合物半导体中, 符合上述要求的材料不多, 虽然采用了三元和四元的双异质结或量子阱, 如 GaInP/AlGaInP 体系等, 其激射波长也只能降到 700nm 左右, 处于红光波段.

激光器的发射波长愈短, 用于光信息存贮的密度就愈大. 同时, 由于人眼对短波的响应

比长波更为灵敏, 因此对于用人眼作传感器的任何应用, 例如准直、勘测和显示等, 总是优先选用短波. 研制短波长(蓝绿光波段)半导体激光器的一个更重要目的是为了发展新一代高清晰度的三基色彩色显示器. 除此以外, 蓝绿激光器还有很强的军事应用价值. 由于蓝绿光容易在水下传播, 因而蓝绿激光可以用来加强潜艇之间的通信联系.

二、制备蓝绿半导体激光二极管所面临的问题

从半导体的能带特性来看, 制作蓝绿色激光器的最合适材料是 II-VI 族化合物半导体 ZnSe, 它具有直接能隙, 禁带宽度为 2.7eV, 对应的带间跃迁波长约为 440nm. 它的晶格常数是 0.567nm, 与 GaAs 的晶格常数相差只有 0.27%, 因此在 GaAs 衬底上, 采用分子束外延方法可以生长出具有器件质量的 ZnSe 薄膜. 但是, 在实际制作以 ZnSe 为有源区的激光器时, 遇到两个主要问题.

1. 掺杂问题

由于 ZnSe 掺杂物的互补偿效应, 给掺杂带来许多困难. n 型掺杂主要掺 Cl, 用 ZnCl₂ 作 ZnSe 外延膜的 n 型掺杂源, 最高掺杂浓度可达 $3 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$. 现在一般认为 ZnSe 的 n 型掺杂问题已经解决, 困难主要发生在 p 型掺杂上. 在仅可选择的几种元素中, 相对而言掺 Li 和 N 较为成功. 掺 Li 主要遇到两个问题: (1) 最高纯受主浓度仅为 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 在更高的 Li 浓度下, 会发生强烈的互补偿效应, 使

ZnSe 成为高阻材料。(2) 当温度高于 300°C 时, Li 在 ZnSe 中不稳定, 这就给制备器件带来许多不便。掺 N 主要用 N_2 和 NH_3 气体作源, 但 N_2 和 NH_3 在 ZnSe 上的粘附系数极小, 尽管用 N_2 或 NH_3 掺杂时, 气压已达 10^{-4} Torr, 但掺杂浓度仍不高, 一般仅为 10^{16} cm^{-3} 。虽然有些文献报道的 N 掺杂浓度达到 $10^{17}cm^{-3}$, 但掺杂晶体的其他电学性能很差。

对于制作半导体激光器来说, 无论是同质结、异质结、双异质结或量子阱激光器, 掺杂浓度直接关系到激光器的阈值电流大小。掺杂浓度越低, 阈值电流越高。在 $10^{17}cm^{-3}$ 以下的掺杂浓度对于制作激光器来说是相当困难的。

2. p 型 ZnSe 的欧姆接触问题

在半导体激光器中, 注入 p-n 结的电流密度是比较大的。对于同质结激光器, 室温下的阈值电流密度可高达 $5 \times 10^4 A/cm^2$, 异质结激光器也达 $2000 A/cm^2$, 而且阈值电流密度同温度 $T(K)$ 之间为指数关系, 如果激光器电极有较大的接触电阻, 高电流密度所引起的温升对激光器的性能将带来致命的影响。

n 型 ZnSe 的欧姆电极可以用 In。但到目前为止, 还没有找到一种合适的材料作 P 型 ZnSe 的电极。为了解决这个困难, 采用过多种不同的器件结构。一种是在 p^+ 的 GaAs 衬底上先后生长掺 Li 的 P 型 ZnSe 和掺 Cl 的 n 型 ZnSe, 然后分别在 n-ZnSe 和 p^+ -GaAs 上制作欧姆电极^[2], 从而避开了在 P 型 ZnSe 上做电极的困难。但这种结构器件的伏安特性正向压降高达 15V。这主要是由于 GaAs/ZnSe 界面处存在高阻层和界面处价带不连续的缘故。在这种结构上, 仅做出发光二极管, 而没有产生受激发射。

Ren 等人^[3]采用了另外一种结构, 用 n 型 GaAs 做衬底, 先生长掺 Cl 的 n 型 ZnSe, 再生长掺 Li 的 P 型 ZnSe, 用 AuGe 合金做 n-GaAs 的欧姆接触, Au 做 p-ZnSe 的欧姆接触。这样 n-GaAs 与 n-ZnSe 之间的界面不存在高阻层, 但伏安特性的正向压降仍有 2.5V, 这主要是因为 Au 同 p-ZnSe 接触, 仍有 1V

左右的肖脱基势垒。

上述障碍使得长期以来 ZnSe 只能用来制作发光二极管或者在光泵或电子束泵作用下发射激光。

三、第一只 (Zn,Cd)Se/ZnSe 单量子阱蓝绿半导体激光二极管的结构及性能简介

最近, 美国 3M 公司以 Depuydt 为首的研究组取得了突破性的进展^[4], 他们成功地制作了能发射波长为 490nm 的 ZnSe/CdZnSe 量子阱激光器。这是目前半导体激光器所能达到的最短波长, 虽然它还只能在 77K 以脉冲方式工作, 但它终究是在制造半导体蓝绿色激光器方面的一大突破, 因而在国际半导体激光器研究领域引起轰动, 可以认为是半导体激光器发展道路上的一个新的里程碑。

Depuydt 等人的成功, 一方面在于他们基本上解决了 ZnSe 的 P 型掺杂问题。为了有效地进行 N 掺杂, 他们发展了一种射频等离子体源, 使 N_2 分子分解成 N 原子, 由于 N 原子在 ZnSe 上的粘附系数比 N_2 分子大得多, 所以他们可以达到的 P 型掺杂浓度高达 $1 \times 10^{18}cm^{-3}$, 已可满足制作激光器的要求。另一方面在于他们采取了比较有效的结构设计。图 1 是这种量子阱激光器的剖面结构 (见文献^[4])。它的核心部分是一个由 n-ZnSe/ $Cd_{0.2}Zn_{0.8}Se$ /p-ZnSe 组成的单量子阱。光发射区是势阱区 CdZnSe, 势垒区 ZnSe 作为光波导层, 两边再用 $ZnS_{0.07}Se_{0.93}$ 作为包层 (cladding layer)。衬底是 n 型 GaAs, 上面外延一层 n-GaAs 缓冲层。这一缓冲层的表面是富 As 的 $C(4 \times 4)$ 再构。在这一再构表面上外延 n^+ -ZnSe, 可以实现层状生长, 只要厚度不超过 150nm (该激光器为 100 nm), 不论是在界面还是在 ZnSe 薄膜中, 位错和缺陷密度都很低。如果没有这一缓冲层而直接在 GaAs 衬底上生长 ZnSe, 则衬底表面的高温 (580°C) 清洁处理会导致富 Ga, 在富 Ga 的 GaAs 上外延 ZnSe 是三维生长, 界面处的 Ga_2Se_3 成为明显的阻挡层。因而这一缓冲层比

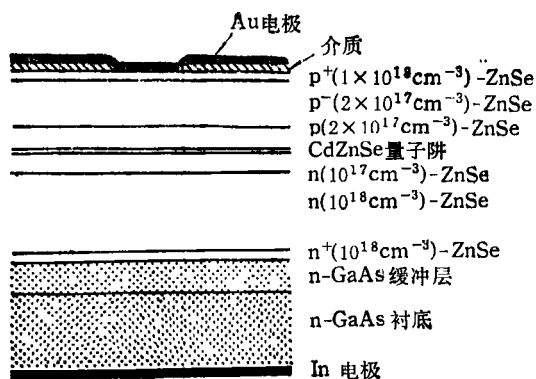


图1 n-ZnSe/Cd_{0.2}Zn_{0.8}Se/p-ZnSe 单量子阱激光二极管剖面图

较好地解决了 n-ZnSe 同 n-GaAs 的接触问题。

在缓冲层上生长 ZnSe, 当厚度超过 150nm 时, 由 0.27% 的晶格失配所引起的应变将释放, 使得 ZnSe 薄膜包括界面产生大量位错与缺陷, 这些位错会随着薄膜的生长而延伸。而 ZnSe 层在激光器中既作为势垒区, 又起光的限制作用, 因而它必须有足够的厚度。为了解决这一问题, 在外延生长 0.1 μm n⁺-ZnSe 后, 再生长掺杂浓度为 10¹⁸cm⁻³ n 型 ZnS_{0.07}Se_{0.93}, 因为 ZnS_{0.07}Se_{0.93} 同 GaAs 晶格匹配, 其厚度可达 2.5 μm。在其上外延厚度为 1 μm 掺杂浓度为 10¹⁷cm⁻³ 的 n-ZnSe 作为量子阱势垒区的一侧。另一侧势垒区是掺杂浓度为 2 × 10¹⁷cm⁻³ 的 P 型 ZnSe, 厚度也是 1 μm, 中间的势阱是未掺杂 CdZnSe, 厚度为 10nm。在量子阱的上面再相继生长 1.5 μm 的 p-ZnS_{0.07}Se_{0.93} (2 × 10¹⁷cm⁻³) 和 0.1 μm 的 p⁺-ZnSe (1 × 10¹⁸cm⁻³)。电极引出分别用 In(GaAs衬底)和 Au(p⁺-ZnSe层)。在这样的结构中, 加入了 ZnSSe 层, 可以使 ZnSe 光波导层至少是部分弛豫的, 产生的位错局限在 ZnSSe/ZnSe 界面处, 保证单量子阱具有很好的质量。

激光二极管用解理的方法在两个侧面形成腔面, 腔长约 1000 μm。器件用银浆焊在陶瓷片上, P 型区朝上。二极管的光输出功率随电流的变化 (L-I 特性) 如图 2 所示 (参见文献

[4]), 这是在 77K 脉冲工作状态测量的。阈值电流为 74mA, 对应的阈值电流密度为 320A/cm²。测得的微分量子效率大于每个光出射小面 20%, 每个光出射小面的脉冲输出功率大于 100mW。相干光具有很强的横向电场 (TE) 偏振。

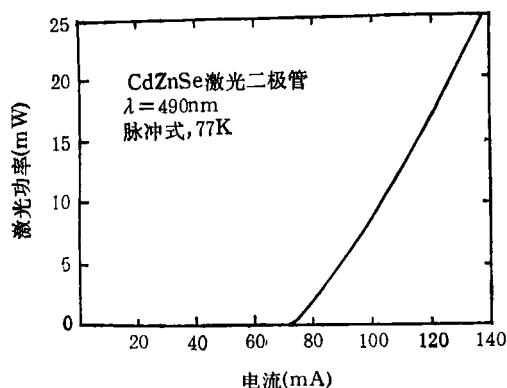


图2 蓝绿激光二极管 L-I 特性曲线

图 3 是激光二极管的光谱特性(详见文献 [4])。在低于阈值电流时, 自发辐射的光谱半高宽(FWHM) 约为 3nm。电流超过阈值时, 发射的光谱由很多纵模组成, 峰间隔为 0.03nm, 中心波长为 490nm。当工作温度升高, 在 200 K 还可观察到激光发射。在室温下, 二极管发光的波长为 502nm, 但不是激光。由于 Au 同 p-ZnSe 接触处存在高的势垒, 发热问题在这个器件中是一个严重问题。而伏-安特性显示在阈值处的工作电压为 20V。

虽然这一激光二极管的指标同目前的量子阱激光器相比还有很大差距, 但在进一步提高 ZnSe 的材料质量和从根本上解决 p-ZnSe 的欧姆电极后, 有可能使这一蓝绿激光二极管的性能得到改进, 最终实现室温下的连续工作。

继 3M 公司之后, 美国布朗大学和普渡大学的科学家们于 1991 年 9 月在日本举行的第五届国际 II-VI 族化合物会议上宣布他们也成功地制成蓝绿激光二极管。可以毫无疑问地说, 3M 公司的这一突破, 使得 ZnSe 及有关材料在制作蓝绿激光器方面已经远远超过了“有希望的”阶段了。只要进一步的发展, 使得

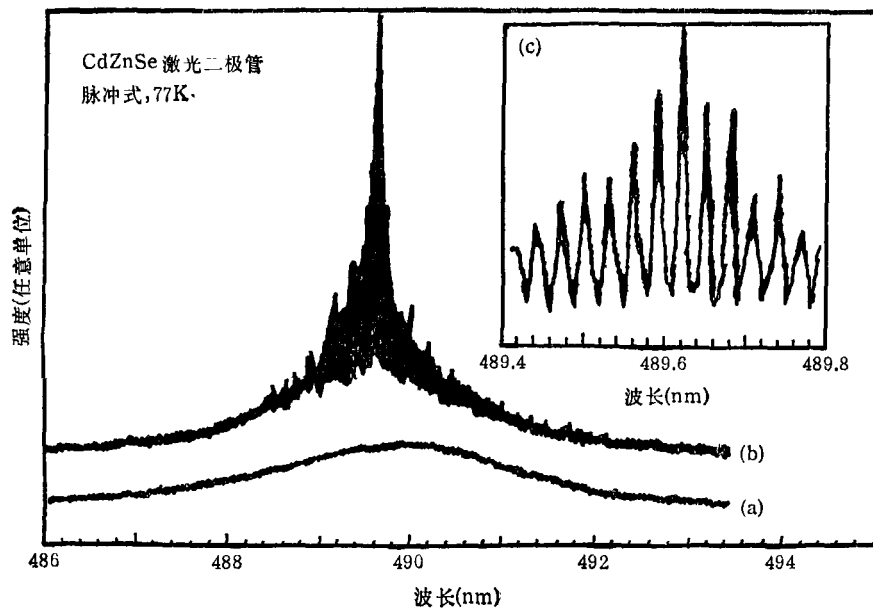


图3 蓝绿激光二极管光谱特性曲线 (a) 注入电流小于阈值电流; (b) 注入电流大于阈值电流; (c) 近峰值扩展曲线

激光器能够实现连续而不是脉冲工作, 则离开实用化的阶段将不会太远。普渡大学的微电子教授 Gunshor 认为, 如果这种激光器能在一年内发展成为一种实用化器件, 并在高技术电子学和商用电子产品中出现, 将不是十分意外的事情。

目前, 人们正以极大的热情关注着今后这一领域的进一步发展。

- [1] G. T. Forrest, *Laser Focus World*, 26-1(1990), 17.
- [2] M. A. Haase et al., *J. Appl. Phys.*, 67-1 (1990), 448.
- [3] J. Ren et al., *Appl. Phys. Lett.*, 57-18 (1990), 1909.
- [4] M. A. Haase et al., *Appl. Phys. Lett.*, 59-13(1991), 1272.

自由电子激光及其新近发展

杜祥琬 丁武

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

本文指出, 70年代中期出现的自由电子激光是一种完全新型的相干光源。它的一些特点是其他相干光源不可比拟的。正是由于这些特点, 人们从微波到软X射线的广阔谱区内已经开始和正在设计它的应用。本文在简述了自由电子激光的原理之后, 着重介绍了自由电子激光发展中的新思想, 正是这些和以后出现的新的思想, 使它日趋成熟、完善和富有生命力。