

文章编号: 0253-2239(2005)03-408-4

# 应用不对称一维光子晶体结构制备窄光谱 LED

王 浩 廖长俊 范广涵 刘颂豪

(华南师范大学信息光电子学院, 广州 510631)

**摘要:** 对周期性的 GaAlAs/AlAs 模块堆积组成的有缺陷的一维光子晶体的光波传输模式进行了理论与实验研究。由于堆积结构的周期性受到破坏,导致了光子晶体中模密度发生变化,光波的传播也发生了变化。对模密度和光的传播模式分别用流行的光子能态理论和光学传输矩阵进行了计算和模拟。计算发现采用不对称结构的一维光子晶体结构在实际应用中有更大的灵活性。用金属有机物化学汽相沉积方法实现一维光子晶体,并用于裁剪普通的发光二极管电致发光光谱,在 20 mA 的激发电流下,半峰全宽为 2.8 nm,单色性优于共振腔发光二极管。在较大的激发电流下,带边发射的增强现象也被观测到。

**关键词:** 光电子学; 一维光子晶体; 光子禁带; 裁剪; 模密度

中图分类号: O484.4 文献标识码: A

## The Fabrication of Narrow Spectrum LED by Employing Asymmetry One-Dimensional Photonic Crystal

Wang Hao Liao Changjun Fan Guanghan Liu Songhao

(School for Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510631)

**Abstract:** The transmission of light waves through a perturbed one-dimensional (1D) photonic band gap structures (PBGS) which was constructed by stacking a number of GaAlAs/AlAs unit cells, has been investigated. Because of the interruption to the stack periodicity of the unit cells, the electromagnetic density of modes (DOM) of the photonic crystals was changed, so that the transmission of the light waves changed. And the DOM and the transmission mode were calculated and simulated by the popular density calculation method and the characteristic matrix. It is found that the asymmetric structures are more profitable compared with symmetric structure in applications. The asymmetric 1D PBGS was realized by the MOCVD method. The full width at half maximum (FWHM) narrowed to 3.1 nm, inspired at 20 mA, which is better than RCLED. And the edge emission was also observed.

**Key words:** optoelectronics; one-dimensional photonic crystal; photonic band gap; tailing, density of modes

### 1 引 言

自从光子晶体的概念提出以来,相关的理论和实验都发展得十分迅速。而一维光子晶体由于制备相对简单,理论研究相对成熟,获得了很多研究成果<sup>[1~6]</sup>。

在光子晶体中通过掺杂引入缺陷态,那么在截止带中就形成一个可以导通的缺陷频率,与该缺陷频率共振的光脉冲就可以隧穿通过光子晶体<sup>[7,8]</sup>。这种效应可以用在光学滤波器上<sup>[7]</sup>,也可以用于光学延迟线的设计<sup>[8]</sup>。缺陷的色散可以导致群速度降低,也可以使群速度从极慢光速转变为超光速<sup>[9]</sup>。

也有学者研究了具有非线性缺陷的光子晶体的局域模问题<sup>[6]</sup>。除了在光子晶体周期性结构中通过插入中间层来获得缺陷态外,还有采用周期性改变的不对称结构来获得缺陷。后一种方法最近吸引了很多人的关注<sup>[7,10~12]</sup>。

我们通过理论计算和实验,研究不对称结构调制发光二极管(LED)的发光谱线宽度的问题。近年来国际上出现了用共振腔发光二极管(RCLED)或者平面型微腔发光二极管结构调整发光二极管发光谱线的研究<sup>[13~16]</sup>。由于共振腔发光二极管制备的工艺比法布里-珀罗腔结构的激光器和垂直腔面发

作者简介:王浩(1974~),内蒙古赤峰市人,光学博士。主要从事金属有机物化学汽相沉积方法制备Ⅲ-V族化合物半导体材料与器件的研究。E-mail: wh-mouse@163.com。

收稿日期:2004-02-19;收到修改稿日期:2004-07-07

射激光器 (VCSEL) 简单, 在某些领域, 比如记录存储, 光盘读取等领域有潜在的应用价值。共振腔发光二极管面临的问题之一是单色性问题。这里我们采用不对称一维光子晶体结构制备的发光二极管的光谱, 在 20 mA 下得到的结果比目前报道的采用其他方法调制发光二极管光谱得到的结果的单色性大大提高。

## 2 理论基础

根据从亥姆霍兹方程进行的推导<sup>[17,18]</sup>, 当光波在介质中传播时, 光子晶体的模密度 (DOM)  $\rho$  可以表示为

$$\rho(\omega) = \frac{1}{v} = \frac{dk}{d\omega} = \frac{1}{d} \frac{y'x - x'y}{x^2 + y^2}, \quad (1)$$

式中  $\omega$  是频率,  $v$  是光子的群速度,  $d$  是介质的厚度,  $k$  是真空波矢,  $x, y$  是介质透射系数  $t$  的实部和虚部,  $t(\omega) = x + iy$ ,  $x', y'$  分别是  $x, y$  的微分。

当光波在多层介质传播时

$$\rho_N = \frac{dk_N}{d\omega} = \frac{1}{D} \frac{z'_N}{1 + z_N^2}, \quad (2)$$

其中  $z_N = y_N/x_N$ ,  $D = Nd$  是  $N$  个周期一维光子晶体的总长。

多层介质时,  $N$  层结构的透射系数  $t_N$ 、反射系数  $r_N$  的关系为

$$\frac{1}{t_N} = \frac{1}{t} \frac{\sin N\beta}{\sin \beta} - \frac{\sin(N-1)\beta}{\sin \beta},$$

$$\frac{r_N}{t_N} = \frac{r \sin N\beta}{t \sin \beta}.$$

其中  $\text{Re}\{1/t\} = \cos \beta$ ,  $\beta$  是布洛赫 (Bloch) 相位。且  $r_N^2 + t_N^2 = 1$ 。

也可以采用光学的传输矩阵理论来计算光子的晶体能带<sup>[19]</sup>。光线在介质中传播时, 其传播模式可以写为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \delta & i \sin \delta / \eta \\ i \eta \cos \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\delta = nkd$ ,  $\eta = n \cos \theta$  (TE 模),  $\eta = n / \cos \theta$  (TM 模),  $\theta$  为入射角。多层结构的传输矩阵为

$$\mathbf{M} = \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 \cdots \mathbf{T}_n, \quad (4)$$

下标对应于相应的层数。

透射率可以写为

$$T = \frac{4\eta_{n+1}\eta_0}{\eta_0 M_{11} + \eta_0 \eta_{n+1} + M_{21} + \eta_{n+1} M_{22}}, \quad (5)$$

其中  $\eta$  的下标  $0, n+1$  分别表示空气和衬底。  $M_{xy}$  表示矩阵  $\mathbf{M}$  中的元素。

## 3 计算模拟

一维光子晶体的单个周期是由高、低折射率的两层介质组成, 通常每层介质的光学厚度是  $\lambda_0/4$ ,  $\lambda_0$  是某一参考波长。高折射率层  $n_1$  的厚度为  $t_1$ , 低折射率层  $n_2$  的厚度为  $t_2$ 。因此:  $n_1 t_1 = n_2 t_2 = \lambda_0/4$ 。

我们设计了 GaAlAs/AlAs 材料的具有缺陷的一维光子晶体结构的光子晶体, 见图 1。这里分别采用两种光学厚度的光子晶体, 每种晶体的周期单位厚度分别为  $t_1, t_2$  和  $t_{10}, t_{20}$ , 每个周期单位各重复 15 次。两种晶体结构中间是 GaAlAs 缺陷, 其厚度为  $t_1 + t_{10}$ 。

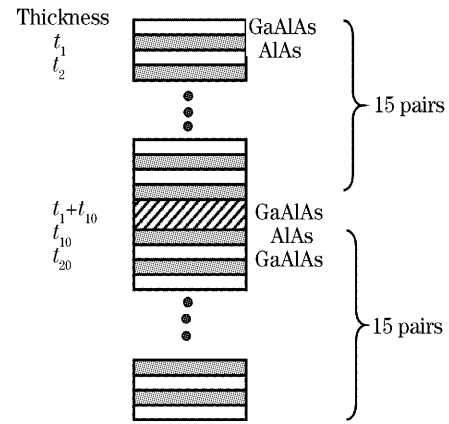


图 1 设计的一维光子晶体结构简图

( $t_1, t_2, t_{10}, t_{20}$  是所设计结构的厚度)

Fig. 1 The parameters and structure of designed photonic band gap structure (PBGs). (The  $t_1, t_2, t_{10}, t_{20}$  are the thickness of the structure layers)

分别选取了对称结构 ( $t_1 = t_{10}$ ), 不对称结构 ( $t_1 \neq t_{10}$ ) 进行计算, 条件分别为:  $t_1/t_{10} = t_2/t_{20} = 1.0, 1.023, 1.047$ ,  $\lambda_0 = 640 \text{ nm}$ 。根据模密度计算公式 (2) 拟合的结果在图 2 的上半部分, 根据传输矩阵 (5) 计算的结果在下半部分, 计算结果见表 1。从计算结果来看, 采用对称结构时, 能级缺陷的宽度 (FWHM) 以及能级位置都是固定的, 而采用不对称结构时, 半峰全宽以及能级位置都是可调的。

表 1 根据图 2 结构拟合的结果

Table 1 The simulated results of samples showed in Fig. 2

Sample	Thickness		Position of defect	FWHM
	$t_1 (t_{10})$	$t_2 (t_{20})$		
1(symmetry)	1.0	1.0	$\omega_0$	1.0
2(asymmetry)	1.0	1.023	$1.012\omega_0$	1.088
3(asymmetry)	1.0	1.047	$1.025\omega_0$	1.264

由此我们采用不对称的有缺陷的 GaAlAs/AlAs 材料的具有缺陷的一维光子晶体结构, 光学厚度分别为  $640 \text{ nm} (n_1 t_1)$  和  $655 \text{ nm} (n_1 t_{10})$ , 则此时的裁剪位置在  $647 \text{ nm}$ , 半峰全宽为  $3.15 \text{ nm}$ 。

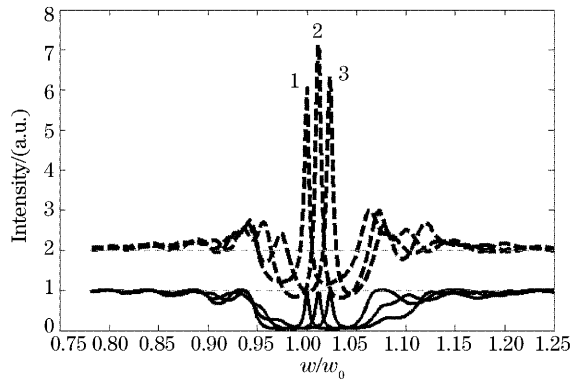


图2 根据图1计算的一维光子晶体的模密度以及透射谱。虚线是光子晶体的模密度图谱,实线是透射谱。1,2,3是不同的样品

Fig. 2 The DOM and transmission of the one-dimensional photonic band gap structure of Fig. 1 ( $\lambda_0 = 640$  nm). The dashed line is the DOM of the one-dimensional PBGS. Solid line is the transmission of one-dimensional PBGS, 1,2,3 are the different samples

设计应用此种结构来裁剪 GaAlInP 材料的 p-i-n 结构的发光二极管电致发光光谱(EL)。具体的结构是先在 GaAs 衬底上生长双异质结发光二极管,然后再把设计的一维光子晶体生长在上面,最后再覆盖一层 GaP,此窄光谱发光二极管结构设计见图3。

Gap(Mg)0.02 $\mu\text{m}$
1D PGBS(Mg)(Fig.1)
GaAl <sub>0.8</sub> InP(Mg)0.56 $\mu\text{m}$
GaInP:0.39 $\mu\text{m}$
GaAl <sub>0.8</sub> InP(Si)0.56 $\mu\text{m}$
Substrate:GaAs(Si)

图3 覆盖了光子晶体的双异质结构窄光谱发光二极管样品的具体结构

Fig. 3 The detailed structure of the OH narrow spectrum LED sample covered by one-dimensional-photonic band gap

## 4 实验与结果

实验在 Turbo-Disk 金属有机化学汽相沉积(MOCVD)系统上进行。生长过程中反应室的具体运行参量见文献[20]。采用(100)偏向(111)15°的 GaAs 衬底,在 AsH<sub>3</sub> 氛围先加热到 675 °C 以除去表面的氧化层,然后在 650 °C 下用 Ga(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 与 AsH<sub>3</sub> 为原料,以 1.7  $\mu\text{m}/\text{h}$  生长 10 min GaAs(Si)

缓冲层,再切换成 Ga(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>3</sub>、Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>、In(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 与 PH<sub>3</sub> 来生长 Al<sub>0.49</sub>InP(Si)/Ga<sub>0.49</sub>InP/Al<sub>0.49</sub>InP(Mg)结构的双异质结发光二极管,生长速度约 1.7  $\mu\text{m}/\text{h}$ ,生长时间分别为 20 min,15 min,20 min。最后生长 0.2  $\mu\text{m}$  的 GaP(Mg)来覆盖。掺杂源分别用 SiH<sub>4</sub> 和 Mg(CP)<sub>2</sub>。n 型掺杂浓度为  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,p 型为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

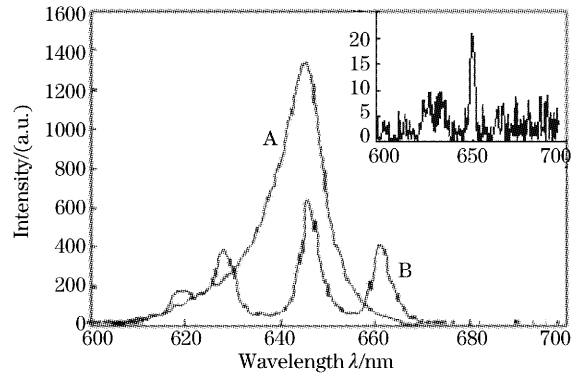


图4 图3结构的电致发光光谱与普通的 p-i-n 结构的比较(120 mA)。右上角的图谱为 20 mA 激发。A:普通的 p-i-n 结构(FWHM:12.0 nm),B:图3的结构(缺陷的 FWHM:4.5 nm)

Fig. 4 The EL results of the one-dimensional PBGS and the common p-i-n structure (120 mA). Right top is inspired under 20 mA. A: common p-i-n structure (FWHM:12.0 nm),B: structure of Fig. 3 (FWHM at the defect,4.5 nm)

进行电致发光光谱测试时,在样品表面压上金属钨,面积约 1 mm<sup>2</sup>,以提高电极与样品的接触效果和增加电流扩展。测试结果见图4。用 20 mA 的激发电流,发光二极管的半峰全宽仅为 2.8 nm,见图4右上角,与理论计算结果很接近。近来报道了半峰全宽为 4.9 nm(20 mA)的结果<sup>[14]</sup>。我们所设计的结构在 20 mA 下的结果比目前报道的结果单色性大大提高,这种单色性很好的结构有其应用前景。

## 5 讨 论

从测试结果看,在 120 mA 激发电流下,未加光子晶体的双异质结发光二极管的电致发光光谱的峰位在 643 nm,半峰全宽是 12.0 nm。加了光子晶体的具体结构后,电致发光光谱谱出现了三个峰值,强度最强的峰位在 647 nm,此时半峰全宽被剪裁到 4.5 nm。在 662 nm 和 630 nm 出现的发光峰,与未加光子晶体结构的电致发光光谱相比,强度有所增强。我们认为这是由于一维光子晶体的带边发射增强效

应引起的<sup>[21]</sup>。尤其是662 nm处的峰值增强了5.7倍。这种带边发射增强的现象已经被 Yablonovitch 预言<sup>[22]</sup>,并被用来降低激光器的阈值电流<sup>[8,23]</sup>。这种增强是由于带边处的模密度  $\rho$  高,群速度  $v$  低而引起的。这种增强可以通过公式来预测<sup>[21]</sup>,

$$I = \frac{P_{\text{PBG}}}{P_{\text{ref}}} = \frac{\rho_{\text{PBG}}}{\rho_{\text{ref}}} \left| \frac{a_{\text{PBG}}}{a_{\text{ref}}} \right|^2.$$

式中  $P$  是发光功率,  $\rho$  是模密度,  $a$  是样品结构的常模波函数,下标 PBG 和 ref 分别指的是光子晶体和参考样品。我们的发射增强结果与文献报道的类似结构的结果还是很接近的<sup>[24]</sup>。

另外值得说明的是,由于光子晶体的引入,导致对出射光的吸收增加,与普通的发光二极管相比,此种结构发射的光强有所降低。我们制备此种结构的发光二极管所需的工作电压较高,这是由于一维光子晶体结构的电学性能没有进行优化所致。有必要通过今后的工作来优化光子晶体结构的光学、电学性能,以降低对光的吸收和工作电压。

## 6 结 论

根据光子晶体的模密度和传输矩阵理论计算了不同结构参量的带有缺陷的一维光子晶体结构,从对称和不对称结构的计算结果发现采用不对称结构有相对的优势。采用金属有机化学汽相沉积方法制备了具有一维光子晶体结构的窄光谱发光二极管,其发光峰位和半峰全宽都根据设计被裁剪了,带边发射增强的现象也被观察到。在某些条件下,如在20 mA电流激发下,光子晶体结构可以用来实现发光器件的单色性,为发光器件开拓潜在的新用途。

## 参 考 文 献

- 1 Yoel Fink, Joshua N. Winn, Shanhui Fan *et al.*. A dielectric omnidirectional reflector[J]. *Science*, 1998, **282**(5394):1679~1681
- 2 Ouyang Zhengbiao, Zhu Jun, Li Jingzhen. Photonic bandgaps in photonic crystals with tapered periods at both ends[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 612~615 (in Chinese)  
欧阳征标,朱骏,李景镇. 两端有慢变结构的光子晶体的能带特性研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 612~615
- 3 Huang Biqin, Gu Peifu. Extension of one-dimensional photonic crystal's band gap[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1497~1501 (in Chinese)  
黄弼勤,顾培夫. 一维光子晶体禁带的展宽[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1497~1501
- 4 V. I. Kopp, B. Fan, H. K. M. Vithana. Low-threshold lasing at the edge of a photonic stop band in cholesteric liquid crystals [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21): 1707~1709
- 5 M. Scalora, M. J. Bloemer, A. S. Pethel *et al.*. Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures [J]. *J. Appl. Phys.*, 1998, **83**(5): 2377~2383
- 6 Jiang Haitao, Liu Nianhua. Localized mode of photonic crystal

- with a nonlinear defect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 385~388 (in Chinese)  
江海涛,刘念华. 具有非线性缺陷的光子晶体的局域模[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 385~388
- 7 Ouyang Zhengbiao, Li Jingzhen, Zhang Daozhong *et al.*. Investigations on multi-layer photonic-crystal optical-filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 79~84 (in Chinese)  
欧阳征标,李景镇,张道中等. 多层光子晶体滤波器研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 79~84
- 8 Zhu Shiyao, Liu Nianhua, Zheng Hang *et al.*. Time delay of light propagation through defect modes of one-dimensional photonic band-gap structures[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **174**(1~4):139~142
- 9 An Liping, Liu Nianhua. Ultraslow group velocity in photonic crystal with a dispersive defect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11):1287~1290 (in Chinese)  
安丽萍,刘念华. 光子晶体中缺陷的色散导致的群速度降低[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11):1287~1290
- 10 Cui Libin, Fan Wang, Jing Wang *et al.*. The rule for broadening of band-gaps in biperiodic photonic crystals [J]. *Phys. Lett. (A)*, 2004, **324**(5~6): 489~493
- 11 G. D'Aguzzo, M. Centini, M. Scalora *et al.*. Photonic band edge effects in finite structures and applications to  $x^{(2)}$  interactions[J]. *Phys. Rev. (E)*, 2001, **64**: 016609
- 12 Y. Dumeige, F. Raineri, A. Levenson *et al.*. Second-harmonic generation in one-dimensional photonic edge waveguides [J]. *Phys. Rev. (E)*, 2003, **68**: 066617
- 13 Nian-hua Liu, Shi-yao Zhu, Hong Chen *et al.*. Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect[J]. *Phys. Rev. (E)*, 2002, **65**: 046607
- 14 H. de Neve, J. Blondelle, P. van Daele *et al.*. Recycling of guided mode light emission in planar microcavity light emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(7): 799~801
- 15 Wirth R, Karnutsch C, Kugler S *et al.*. High-efficiency resonant-cavity LEDs emitting at 650 nm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5): 421~423
- 16 J. W. Gray, Y. S. Jalili, P. N. Stavrinou *et al.*. High-efficiency, low voltage resonant-cavity light-emitting diodes operating around 650 nm [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(20): 1730~1731
- 17 Jon M. Bendickson, Jonathan P. Dowling, Michael Scalora. Analytic expressions for the electromagnetic mode density in finite, one-dimensional, photonic band-gap structures[J]. *Phys. Rev. (E)*, 1996, **53**(4): 4107~4111
- 18 Jonathan P. Dowling, Michael Scalora, Mark J. Bloemer *et al.*. The photonic band edge laser: A new approach to gain enhancement[J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(4): 1896~1899
- 19 Max Born, Emil Wolf. *Principles of Optics* (5 th ed.) [M]. London: Pergamon Press, 1975
- 20 Wang Hao, Fan Guanghan, Liao Changjun. Study of dynamics for MOCVD growth [J]. *J. South China Normal University*, 2003, **100**(2): 54~58 (in Chinese)  
王浩,范广涵,廖常俊. MOCVD生长的动力学模式探讨[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2003, **100**(2): 54~58
- 21 Michael D. Tocci, Michael Scalora, Mark J. Bloemer *et al.*. Measurement of spontaneous-emission enhancement near the one-dimensional photonic band edge of semiconductor heterostructures [J]. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **53**(4): 2799~2803
- 22 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 23 W. Jhe, A. Anderson, E. A. Hinds *et al.*. Suppression of spontaneous decay at optical frequencies: Test of vacuum-field anisotropy in confined space [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(7): 666~670
- 24 H. Yokoyama, K. Nishi, T. Anan *et al.*. Enhanced spontaneous emission from GaAs quantum wells in monolithic microcavities [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(26): 2814~2816