

文章编号:1004-4213(2010)11-1967-4

分布式布喇格反射镜的穿透深度计算*

余振芳,马凤英[†],苏建坡,陈明,池泉

(郑州大学 物理工程学院,郑州 450001)

摘 要:采用特征矩阵法分别计算奇、偶数层布喇格反射镜的反射相移,利用反射时延与反射相移的关系给出了其穿透深度的表达式.采用电子束热蒸发的方法制备了结构为 $[HL]^2H$ 的布喇格反射镜,并制作了有机微腔器件,测量和计算了其透射光谱、反射相移和穿透深度,得到了微腔的有效腔长,测量值与实验值吻合较好,验证了该穿透深度公式的正确性.

关键词:光学微腔;有效腔长;反射相移;反射时延;穿透深度

中图分类号:TN202;O431.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103911.1967

0 引言

反射镜在各种不同的光电元件上扮演着重要角色.尤其在光通信波段,由介质材料或半导体材料组成的分布式布喇格反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR)因具有波长选择性高、反射率容易控制、吸收损耗小的优点而常常被用于各种光电器件.其结构分为平面式和堆叠式,前者应用于 DBR 激光器,后者常用作垂直腔面发射器件的反射镜,如垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Lasers, VCSEL)^[1-3]、有机微腔发光二极管(Microcavity Organic Light-Emitting Diode, MOLED)^[4-6]、谐振腔发光二极管(Resonant Cavity Organic Light-Emitting Diodes, RCLED)^[7]、谐振腔增强型(Resonant Cavity Enhanced, RCE)光电探测器^[8-10]等.堆叠式结构是由光学厚度为四分之一波长的高低折射率材料交替沉积而成.

有机微腔发光二极管中常用的反射镜为 DBR 和金属膜.有效腔长的计算是设计高精度微腔器件的基础.微腔的谐振模式满足 Fabry-Perot(F-P)方程,腔内的谐振模式主要由腔的有效腔长决定.微腔的有效腔长主要由三部分构成,即:两端反射镜的穿透深度以及反射镜之间的有效光程.对于金属膜的穿透深度张勇等^[11]已经做了深入研究并给出了精确表达式.而对 DBR 的穿透深度,一般都采用线性近似式来估算^[12-13].

本文采用特征矩阵法来计算 DBR 多层膜的反射相移,进而得到反射光相对于入射光的反射时延,利用反射延迟与反射相移的关系,给出 DBR 穿透深度的精确表达式.本文的创新之处在于给出了 DBR 穿透深度的简单计算式,采用电子束热蒸发的方法制备了结构为 $[HL]^2H$ 的 DBR 作为反射镜,设计并制作了有机微腔器件,测量并计算了其透射光谱、反射相移以及穿透深度,模拟值与实验值吻合很好.

射相移,进而得到反射光相对于入射光的反射时延,利用反射延迟与反射相移的关系,给出 DBR 穿透深度的精确表达式.本文的创新之处在于给出了 DBR 穿透深度的简单计算式,采用电子束热蒸发的方法制备了结构为 $[HL]^2H$ 的 DBR 作为反射镜,设计并制作了有机微腔器件,测量并计算了其透射光谱、反射相移以及穿透深度,模拟值与实验值吻合很好.

1 理论分析

DBR 为多层薄膜系统,研究薄膜系统的光学特性,从理论观点上来说,就是研究平面电磁波通过各层介质的传播.因此,处理薄膜问题的最有效方法是解麦克斯韦方程.原则上只须引述麦克斯韦方程及应用适当的边界条件就可以直接确定膜系的反射和透射性能.实际上得到的最终方程十分复杂,在处理这类问题时,利用薄膜的特征矩阵表示光学系统的特性最为方便.

对于单层膜而言,当光垂直入射到薄膜表面时,在两个界面上应用 E 和 H 的切向分量在界面两侧连续条件,很容易得到单层膜的特征矩阵

$$M = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{i}{n} \sin \delta \\ i n \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\delta = (2\pi/\lambda)nd$ 为薄膜的位相厚度,它包含了薄膜的全部有用的参量, n 为薄膜材料的折射率, d 为薄膜厚度.

对于结构为 $G[HL]^N$ 的 DBR 而言, G 为衬底,折射率为 n_G ; H 和 L 分别代表光学厚度为 $\lambda/4$ 的高低折射率材料; N 为周期数,假定入射介质折射率为 n_0 ,此时多层膜和衬底片组合的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} \cos \delta_H & \frac{i}{n_H} \sin \delta_H \\ i n_H \sin \delta_H & \cos \delta_H \end{bmatrix} \end{cases}.$$

* 国家自然科学基金(60907046)、河南省教育厅自然科学研究基金(2009A140008)、河南省青年骨干教师计划和郑州大学研究生科学研究基金资助

[†] Tel:0371-67782051

Email:mafyz@zhu.edu.cn

收稿日期:2010-04-30

修回日期:2010-06-28

$$\left[\begin{array}{cc} \cos \delta_L & \frac{i}{n_L} \sin \delta_L \\ i n_L \sin \delta_L & \cos \delta_L \end{array} \right]^N \begin{bmatrix} 1 \\ n_G \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于结构为 $G[\text{HL}]^N\text{H}$ 的 DBR 而言, 多层膜和衬底组合的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \cos \delta_H & \frac{i}{n_H} \sin \delta_H \\ i n_H \sin \delta_H & \cos \delta_H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_L & \frac{i}{n_L} \sin \delta_L \\ i n_L \sin \delta_L & \cos \delta_L \end{bmatrix} \right\}^N \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ n_G \end{bmatrix} \quad (3)$$

膜系的反射率为

$$R = \left(\frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right) \left(\frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right)^* \quad (4)$$

反射相移为

$$\varphi = \arctan \left[\frac{i n_0 (CB^* - BC^*)}{(n_0^2 BB^* - CC^*)} \right] \quad (5)$$

1.1 DBR 的穿透深度

对于结构为 $G[\text{HL}]^N$ 的 DBR, 由于 $\delta_j = (2\pi/\lambda)n_j d_j$, 且 $n_j d_j = \lambda_0/4$, λ_0 为 DBR 的中心波长. DBR 中心波长处的相位厚度为 $\pi/2$, 而中心频率附近波长处的相位厚度 $\delta = \frac{\pi\lambda_0}{2\lambda}$, 可表示为 $\delta = \frac{\pi}{2} - \sigma$, 其中 $\sigma = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda} \right)$, 在中心波长附近对 $\sin\delta$ 和 $\cos\delta$ 作泰勒展开并忽略高次项, 得到

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos\delta_H & \frac{i}{n_H} \sin\delta_H \\ i n_H \sin\delta_H & \cos\delta_H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\delta_L & \frac{i}{n_L} \sin\delta_L \\ i n_L \sin\delta_L & \cos\delta_L \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} p & i s \sigma \\ i t \sigma & q \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} p &= (-n_L/n_H), s = (1/n_H + 1/n_L) \\ t &= (n_H + n_L), q = (-n_H/n_L) \end{aligned} \quad (7)$$

N 周期薄膜的特征矩阵

$$M_N = \begin{bmatrix} p^N & i s_N \sigma \\ i t_N \sigma & q^N \end{bmatrix} \quad (8)$$

且

$$s_N = s \frac{1 - q^{2N}}{q^{N-1} - q^{N+1}}, t_N = t \frac{1 - q^{2N}}{q^{N-1} - q^{N+1}} \quad (9)$$

与衬底片组合的特征矩阵

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = M_N \begin{bmatrix} 1 \\ n_G \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(10)代入式(5), 可得该膜系结构的反射相移为

$$\varphi = \text{atan} \left\{ 2n_0 \sigma \left\{ \left[1 - \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2N} \right] \left[\frac{n_L}{n_H} \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^N n_G^2 - \left(\frac{n_L}{n_H} \right)^N n_L^2 \right] \right\} / \left\{ (n_H - n_L) \left[\left(\frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} n_0^2 - n_G^2 \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2N} \right] \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{N-1} \right\} \right\} \quad (11)$$

相同的分析方法可以得到结构为 $G[\text{HL}]^N\text{H}$ 的反射相移表达式为

$$\varphi = \text{atan} \left\{ \frac{\left(\frac{n_L}{n_H} \right)^{2N-1} \left[1 - \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2N} \right] n_G^2 - n_G^2 n_H (n_L - n_H)}{(n_L - n_H) \left[n_0^2 \left(\frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} n_G^2 - \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2N} n_L^4 \right]} 2n_0 \sigma + \frac{(n_L^2 - n_H^2) n_H^3 \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^N - n_H^3 (n_L - n_H)}{(n_L - n_H) \left[n_0^2 \left(\frac{n_L}{n_H} \right)^{2N} n_G^2 - \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2N} n_L^4 \right]} 2n_0 \sigma \right\} \quad (12)$$

而反射时延(群延迟时间)定义为反射光相对于入射光的时间延迟, 可表示为

$$\tau = -(\partial\varphi/\partial\omega) \quad (13)$$

式中 ω 为电场振动角频率. 因此相位穿透深度为

$$\begin{aligned} Z &= \frac{1}{2} v \tau = \frac{v}{2} \left(-\frac{\partial\varphi}{\partial\omega} \right) = \frac{v}{2} \left[-\frac{\partial\varphi}{\partial\lambda} \frac{\partial\lambda}{\partial(2\pi f)} \right] = \\ &= \frac{v}{4\pi f^2} \frac{\partial\varphi}{\partial\lambda} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{\partial\varphi}{\partial\lambda} \end{aligned} \quad (14)$$

2 实验

制作了结构为 Glass/DBR/ITO/NPB/Alq: Rubrene/MgAg 的有机微腔器件, DBR 的中心波长为 550 nm, 介质材料分别为 Ta_2O_5 (中心波长处的折射率 2.1) 和 SiO_2 (中心波长折射率 1.46), 厚度分别为 65 nm 和 94 nm. 它的结构为 $[\text{HL}]^2\text{H}$, 其中 H、L 分别代表高低折射率材料. ITO、NPB、Alq: Rubrene 的厚度和在中心波长处的折射率分别为 124 nm、60 nm、60 nm 以及 2.0、1.84 和 1.74, MgAg 厚度为 150 nm.

DBR 和 ITO 均是采用电子束蒸发的方法获得. NPB, Mg: Ag 和 Alq: Rubrene 是由真空热蒸发的方法获得. 膜厚由 ZMK-III 膜厚监控仪进行监测. 电源为 DF1730SB5A 直流稳压电源. 发光光谱采用 HITACH F-4500 荧光光谱仪测得, 透射光谱由 UV-VIS-NIR UV-3101PC 分光光度计测得.

3 结果与讨论

图 1 为 DBR 的透射光谱. 由图可以看出, 中心波长处的反射率约为 73%. 图 2 为入射介质为 ITO (折射率 2.0) 时由式(12)、(14)计算得到的 DBR 的反射相移和穿透深度. 在 DBR 的高反射区, 反射相移随波长的增加而增大. 而穿透深度在中心波长处的值最小, 偏离中心波长处的穿透深度相对增大, 中心波长处的穿透深度约为 327 nm. 图 3 为采用参考文献[11]计算得到的厚度为 150 nm 的 MgAg 的穿透深度. 图 4 为分别由文献[12]和式(14)得出的 DBR 穿透深度, 结合文献[11]和腔内材料厚度计算得到的有效腔长. 为了便于观察, 同时给出了 $y =$

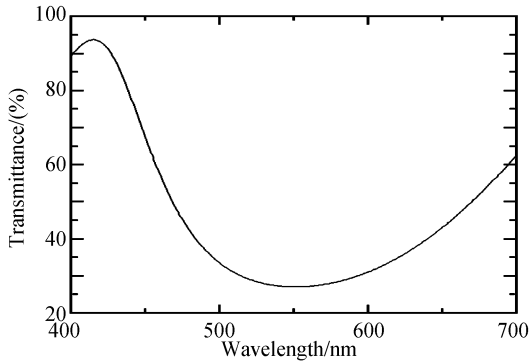


图 1 DBR 的透射光谱
Fig. 1 Transmittance spectrum of DBR

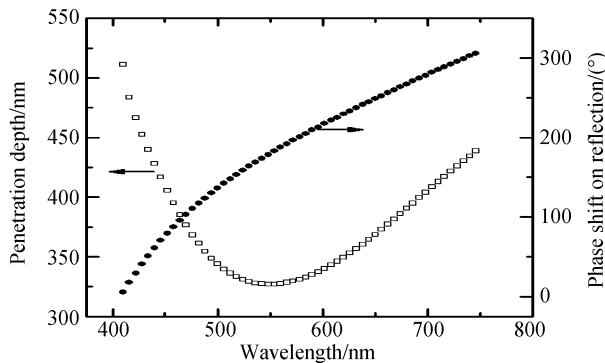


图 2 DBR 的反射相移和穿透深度
Fig. 2 Penetration depth and phase shift on reflection of DBR

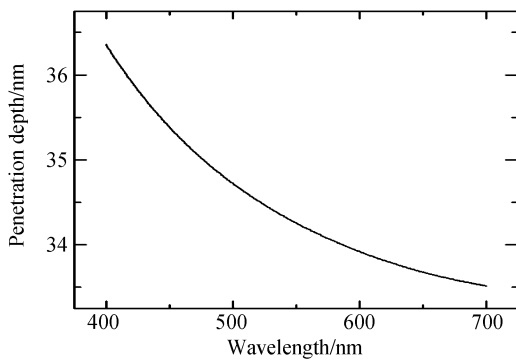


图 3 MgAg 的穿透深度
Fig. 3 Penetration depth of MgAg

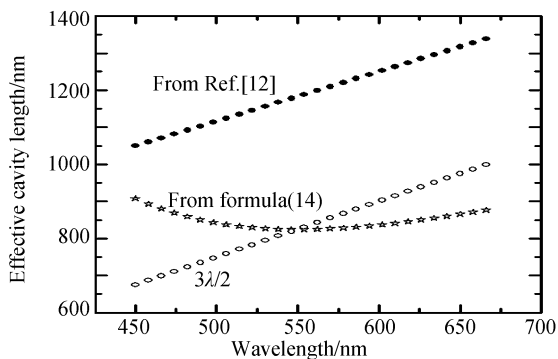


图 4 微腔器件的有效腔长
Fig. 4 Effective cavity length of MOLED

$3\lambda/2$ 的曲线,由式(14)计算得到的有效腔长曲线和 $y=3\lambda/2$ 两者交点位于 550 nm,与微腔器件的电致发光光谱峰值(图 5)恰好吻合,对应的模式级次为 3. 而由文献[12]得到有效腔长与 $y=m\lambda/2$ 偏差很

大,因此用该公式来计算有效腔长,会带来较大的误差.

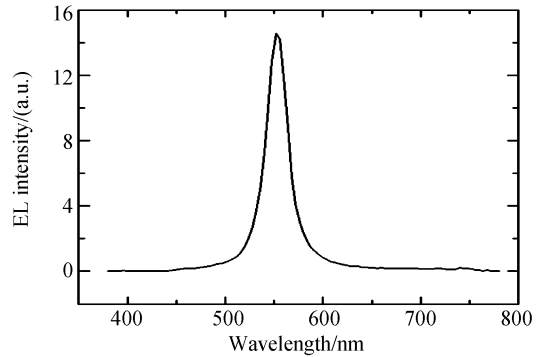


图 5 微腔器件的 EL 谱
Fig. 5 EL spectrum of MOLED

图 5 为在 8V 电压下测得的微腔器件电致发光光谱.由图可知,微腔器件的谐振峰位于 552 nm,与设计的结果(550 nm)非常接近,实验值与计算值吻合得很好,造成 2 nm 的偏差主要是计算有效腔长时未考虑有机材料和 ITO 的折射率色散问题.因此,对于不同的 DBR 结构,可以采用传输矩阵的方法得出其反射相移后,直接利用式(14)来计算 DBR 的穿透深度,从而可以很方便地设计高精度微腔结构.

4 结论

本文采用传输矩阵法分析了 DBR 的反射相移,并利用反射相移和群延迟时间之间的关系,给出了 DBR 的穿透深度准确表达式.并将之应用于有机微腔发光二极管的设计,实验值与计算值吻合很好.

参考文献

- [1] KAO C C, LU T C, HUANG H W, *et al.* The lasing characteristics of GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser with AlN-GaN and Ta₂O₅-SiO₂ distributed Bragg reflectors[J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2006, **18**(7): 877-879.
- [2] KAO C C, PENG Y C, YAO H H, *et al.* Fabrication and performance of blue GaN-based vertical-cavity surface emitting laser employing AlN/GaN and Ta₂O₅/SiO₂ distributed Bragg reflector[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **87**(8): 081105-081107.
- [3] SARMIENTO T, BAE H P, O'SULLIVAN T D, *et al.* GaAs-based 1.53 μm GaInNAsSb vertical cavity surface emitting lasers[J]. *Electron Lett*, 2009, **45**(19): 978-979.
- [4] PENG H J, WONG M, KWOK H S. Design and characterization of organic light emitting diodes with microcavity structure [J]. *Symposium Digest of Technical Paper*, 2003, **34**(1): 516-519.
- [5] MA Feng-ying, SU Jian-po, CHENG Dong-ming, *et al.* High efficiency high brightness red emission microcavity organic light-emitting diode[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1397-1399.
- [6] MA Feng-ying, ZHANG Chun-yu, LIU Xing-yuan, *et al.* Red emission from microcavity organic light-emitting diode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 835-837.

- 马凤英,张春玉,刘星元,等.有机微腔红光发射器件[J].光子学报,2004,**33**(7):835-837.
- [7] LEE Ching-ting, YU Li-zhen, LIU Hsin-you. Optical performance improvement mechanism of multimode-emitted white resonant cavity organic light-emitting diodes[J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2010, **22**(5):272-274.
- [8] EMSLEY M K, DOSUNMU O, UNLU M S. High-speed resonant-cavity-enhanced silicon photodetectors on reflecting silicon-on-insulator substrates[J]. *IEEE Photon Tech Lett*, 2002, **14**(4):519-521.
- [9] HAN Q, YANG X H, NIU Z C, *et al.* 1.55 μm GaInNAs resonant-cavity-enhanced photodetector grown on GaAs[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, **87**(11):111105-111107.
- [10] CASALINO M, SIRLETO L, MORETTI L, *et al.* Silicon resonant cavity enhanced photodetector based on the internal photoemission effect at 1.55 μm : Fabrication and characterization[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(25):251104-251106.
- [11] ZHANG Yong, SU Jian-po, GUO Mao-tian, *et al.* Phase shift and penetration depth of metal mirror in microcavity structure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6):1358-1362. 张勇, 苏建坡, 郭茂田, 等. 微腔器件中金属反射镜反射相移与穿透深度研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(6):1358-1362.
- [12] ZHANG Hong-mei, DAI Yan-feng, YOU Han, *et al.* Color tunable high efficiency microcavity organic light-emitting diodes[J]. *Opt Quant Electron*, 2007, **39**(15):1319-1327.
- [13] CHEN Hai-xing, WANG Jian-pu, SHEN Wei-dong, *et al.* Design of tunable wavelength microcavity organic electroluminescent diode with liquid crystal [J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, **1**(9):550-552.
- [14] TOKITO S, TSUTSUI T, TAGA Y. Microcavity organic light-emitting diodes for strongly directed pure red, green, and blue emissions[J]. *J Appl Phys*, 1999, **86**(5):2407-2411.

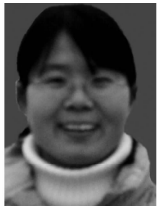
Penetration Depth Calculation of Quarter-wave Dielectric Mirrors

YU Zhen-fang, MA Feng-ying, SU Jian-po, CHEN Ming, CHI Quan

(School of Physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The analytical expressions for the phase shift on reflection of Distributed Bragg Reflectors (DBRs) with odd and even numbers were derived based on the transfer-matrix method. The expression for the penetration depth of DBR as a function of phase shift was given according to the relationship between the phase shift and the reflection delay. The DBR with the structure of $[\text{HL}]^2\text{H}$ was fabricated by electron beam evaporation and the transmittance spectrum, and phase shift and penetration depth were measured or simulated. The microcavity organic light emitting diode (MOLED) was fabricated using the designed DBR. The measured effective cavity length of the MOLED fit well with the calculated one.

Key words: Optical microcavity; Effective cavity length; phase shift; Reflection delay; Penetration depth



YU Zhen-fang was born in 1984. Now she is pursuing the M. S. degree at Zheng Zhou University in opto-electronic devices and material.



MA Feng-ying was born in 1975. She received the Ph. D. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics & Physics, Chinese Academy of Sciences in 2005. Now she works at Zhengzhou University engaged in the research of opto-electronic devices and material.