

新型 MOLEDs 的光学性能

闫玲玲¹, 蔡红新¹, 赵晓霞¹, 张利伟¹, 李宏建²

(1. 河南理工大学 物理化学学院, 河南 焦作 454000; 2. 中南大学 物理科学与技术学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 将负折射率介质层(NRIDL)引入到微腔机电致发光器件(MOLEDs)中, 设计了新型的微腔器件。利用传输矩阵法对此器件的反射率大小、器件厚度对发射峰的影响以及电致发光(EL)光谱性质进行了分析和讨论。结果表明: 与普通微腔器件相比, 新型微腔器件的谱线宽度显著窄化, 峰值强度明显增强, 并且受腔体长度的影响较小。这些结果为进一步提高微腔器件的发光色纯度、薄化器件厚度提供了新方法。

关键词: 负折射率介质层; EL谱; 传输矩阵法; MOLEDs

中图分类号: TN383.1

PACS: 78.60.Fi

PACC: 7860F

文献标识码: A

1 引 言

MOLEDs 较 OLEDs 发光性能明显改善, 如增强发光强度、窄化发光光谱、提高器件的发光效率等, 受到人们的广泛关注^[1~7]。一般来说, 腔模与原子跃迁的耦合效率随着电场的增强而增强, 随着谐振腔体积的增大而减小^[8]。也就是说, 随着有效腔长的减小, 发射峰的半高宽会减小, 器件的发光方向性就会改善^[9]。但是, 对基于驻波的普通谐振腔来说, 由于受到半波极限的限制, 腔的尺度不会很小。另外, 腔模的电磁场呈正(余)弦分布, 局域性也不会很强, 所以在普通微腔中微腔结构对发射谱线的影响十分严重。然而, 由两种单负材料组成的隧穿共振模不同于一般的谐振腔的腔模, 它不受半波极限的限制, 并且受结构、入射角度和偏振态的影响很小^[10]。因此, 利用负折射率材料中能量与相位传播方向相反的特性, 可以实现对正折射率材料的相位补偿, 从而构成一种新型的谐振腔^[11], 且谐振频率跟其厚度无关, 此谐振腔可以做得非常薄。本文就是将负折射率介质引入到 MOLEDs 中, 依据薄膜理论研究此新型器件的发光性能, 并与普通 MOLEDs 相应特性作了比较。

2 理论模型

本文设计的新型 MOLEDs 结构为 Ag/NRIDL/

Alq₃/Ag/Glass。Alq₃ 作为电子传输层和发光层。器件的反射率和透射率都采用传输矩阵法来研究。其中, 负折射率材料的传输矩阵 T_L 和正折射率材料不同。如果设 NRIDL 的折射率为 n_L , 厚度为 d_L , 则其传输矩阵如下^[12,13]:

$$T_L = \begin{bmatrix} \cos\delta_L & \frac{i}{\eta_L} \sin\delta_L \\ i\eta_L \sin\delta_L & \cos\delta_L \end{bmatrix},$$

$$\delta_L = \frac{2\pi}{\lambda} n_L d_L \cos\theta_L, \quad \theta_L < 0, \quad (1)$$

$$\eta_L = \begin{cases} \sqrt{\frac{\varepsilon_L}{\mu_L} \cos(\theta_L)} & (\text{TE}) \\ \sqrt{\frac{\varepsilon_L}{\mu_L} \frac{1}{\cos(\theta_L)}} & (\text{TM}) \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $\theta_L, \varepsilon_L, \mu_L, n_L = -\sqrt{\varepsilon_L \mu_L}$ 都是负的, 分别代表负折射率介质的入射角、介电常数、磁导率和折射率。

理论上, MOLED 的光谱 $E_c(\lambda)$ 可通过对应的 OLED 光谱 $E_0(\lambda)$ 得到^[14]:

$$|E_c(\lambda)|^2 = \frac{(1 - R_2) \sum_j \left[1 + R_1 + 2\sqrt{R_1} \cos\left(\frac{4\pi x}{\lambda}\right) \right]}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi L/\lambda)} |E_0(\lambda)|^2, \quad (3)$$

收稿日期: 2009-10-20; 修订日期: 2009-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(10904032); 中国博士后科学基金(2004035083); 湖南省自然科学基金(05JJ20034); 河南理工大学博士基金(B2009-88); 河南理工大学青年基金(Q2008-49)资助项目

作者简介: 闫玲玲(1982-), 女, 河南济源人, 主要从事 MOLEDs 发光性能的研究。

E-mail: yll@hpu.edu.cn

式中, R_1 和 R_2 分别为上下反射镜的反射率; L 是微腔器件的有效腔长; x 是发光偶极子到上发射镜的有效距离。 $|E_0(\lambda)|^2$ 为原始(自由空间)的光谱强度, 计算过程中取为 1。

3 结果与讨论

为研究新型 MOLEDs 的光学性能, 我们首先讨论它的反射及透射特性。图 1 给出了新型 MOLEDs 的透射谱和反射谱, 并与普通 MOLEDs 进行比较。计算中采用的参数为: $d_{Ag} = 35$ nm, $d_{Alq_3} = 120$ nm, $d_{NRID} = 10$ nm, NRIDL 的折射率 n_L 分别取 $-1, -3, -5, -6$ 。由图 1(a) 可知, 随着 n_L 的减小, 发射峰的半峰全宽(FWHM)明显窄化, 峰位蓝移。由谐振条件知, 与普通 MOLEDs 相比, 所有峰位都会蓝移, 结果与事实相符。由图 1(b) 可知, 透射率先增大后减小。在 $n_L = -3$ 时, 透射率出现最大值。因为 Alq_3 的最大发射峰在 530 nm 处, 所以在 $n_L = -3, -5$ 或者 -6 都可能出现最大值。但是, 随着 n_L 的减小, NRIDL 的吸收性不断增加^[15], 湮灭作用加剧, 所以发射峰的最大值应在 $n_L = -3$ 时出现。依据光学谐振腔中谐振波长公式 $2L = n\lambda$, 只有波长满足此式才能得

到增强, 并以谐振波的形式输出。根据我们所设计的模型, 带入所有参数, 计算得在 $n_L = -3$ 时, $\lambda = 545$ nm 出现透射峰最大值。

图 2 给出了器件的透射谱随 NRIDL 厚度的变化关系。由图可知, 随着 NRIDL 厚度的增加, 腔长减小, 谐振波长减小, 故透射峰蓝移。虽然 $Alq_3/NRIDL$ 的界面位置也不断靠近波峰位置, 理论上讲峰值应不断增大, 但是随着 NRIDL 厚度的增加, 吸收作用不断加剧, 导致湮灭作用增强, 所以整体来看 NRIDL 的引入并没有增加透射谱的强度, 只是改变了腔长, 调节了谐振波长。计算中我们选择的 NRIDL 折射率为 -3 。

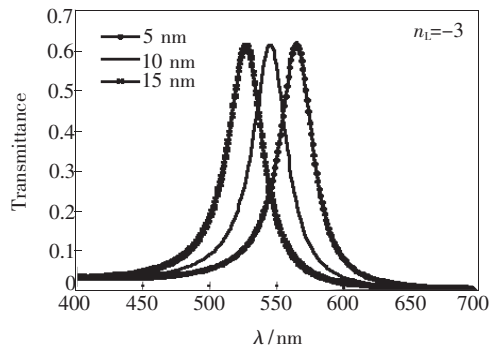


图 2 器件的透射率随 NRIDL 厚度的变化关系

Fig. 2 Transmittance of the new MOLEDs versus different thickness of NRIDL

图 3 给出了归一化 EL 谱相对强度随介质层折射率的变化关系。图中所有的谱线都是在可见光范围内的。当 $n_L < -3$ 时, 随着腔长的变化, 谐振波长随之改变, 发射谱已超出可见光范围。我们关心的是在可见光范围的, 所以这些谱线没有在图中给出。当折射率为正时, 归一化 EL

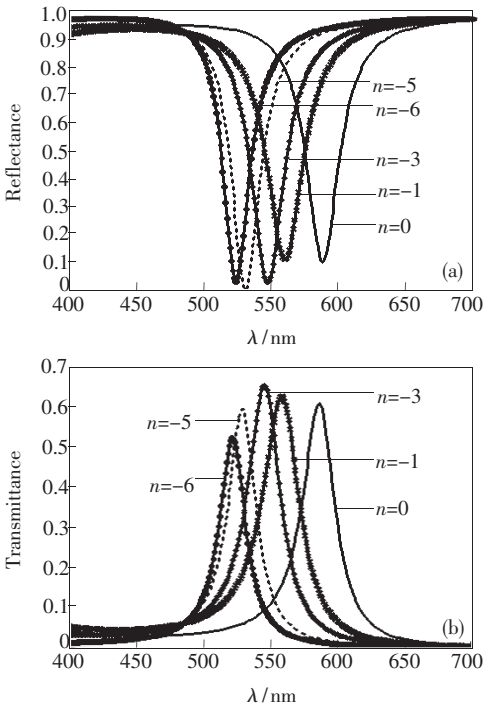


图 1 含 NRIDL 和不含 NRIDL 的 MOLEDs 的反射谱(a) 和透射谱(b)

Fig. 1 (a) Reflectance and (b) transmittance of the MOLEDs with NRIDL and without NRIDL

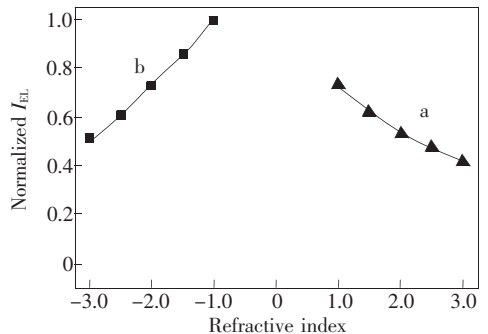


图 3 器件的归一化电致发光强度随折射率的变化关系, (a) 正折射率; (b) 负折射率。

Fig. 3 Normalized EL intensity of two kinds of MOLEDs versus different refractive index, (a) the refractive index positive; (b) the refractive index negative.

谱强度不断减弱;当折射率为负时,谱线增强。引入 NRID 层以后,激子猝灭效应减弱,所以峰值增加。我们也计算了普通 MOLEDs 器件,其峰值强度为 0.469 5。计算过程中,我们取最大值为 1。

4 结 论

将 NRIDL 引入到 MOLEDs 中设计了新型的

微腔器件,利用传输矩阵方法,通过匹配边界条件,详细地讨论了其光学性质及其归一化 EL 光谱,并与普通微腔器件的相应特性作以对比。结果发现:NRIDL 的厚度、折射率大小对器件反射率、折射率及归一化 EL 光谱都有很大的影响。这些结果为进一步提高微腔 OLEDs 的发光色纯度、薄化器件厚度、减少器件发光的角度依赖性提供了新方法。

参 考 文 献:

- [1] Dodabalapur A, Rothberg L J, Jordan R H, *et al.* Physics and applications of organic microcavity light emitting diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **80**(12):6954-6964.
- [2] Greenham N C, Friend R H, Donal D C Bradley, *et al.* Angular dependence of the emission from a conjugated polymer light-emitting diode: Implications for efficiency calculations [J]. *Adv. Mater.*, 1994, **6**(6):491-494.
- [3] Yan Lingling, Li Hongjian, Zhang Jianhua, *et al.* Electroluminescence spectra in microcavity organic light-emitting devices [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2007, **28**(2):173-178 (in Chinese).
- [4] Zhang Chunyu, Liu Xingyan, Ma Fengyin, *et al.* Organic microcavity green color light emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2006, **26**(1):114-118 (in Chinese).
- [5] Xiong Zhiyong, Li Hongjian, Wang Junxi, *et al.* Optical characteristics of flexible microcavity organic light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, **30**(3):337-343 (in Chinese).
- [6] Xie Zeyong, Yuan Yongbo, Chen Shuming, *et al.* Study on metal microcavity OLEDs with improved efficiency [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2008, **29**(1):43-46 (in Chinese).
- [7] Chen Shufen, Li Xue, Liu Shiyon. Blue, top emissive organic light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Laser* (中国激光), 2008, **35**(12):2005-2010 (in Chinese).
- [8] Hobson P A, Barnes W L, Lidzey D G, *et al.* Strong exciton-photon coupling in a low-Q all-metal mirror microcavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(19):3519-3521.
- [9] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Sov. Phys. Usp.*, 1968, **10**(4):509-514.
- [10] Jiang H T, Chen H, Zhu S Y. Rabi splitting with excitons in effective (near) zero-index media [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(14):1980-1982.
- [11] Engheta N. An idea for thin subwavelength cavity resonators using metamaterials with negative permittivity and permeability [J]. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2002, **1**(1):10-13.
- [12] Deng K F. Switching characteristic of Bragg micro-cavity constructing with positive/ negative refractive index materials [J]. *SPIE*, 2005, **6021**:602144-1-6.
- [13] Yang Ligong, Huang Biqin, Ye Hui, *et al.* Analysis of phase and transfer properties of optical waves in negative refractive index medium layers [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2004, **24**(3):101-105 (in Chinese).
- [14] Djuris'ic' A B, Kwong C Y, Cheung C H, *et al.* Near-infrared emission from tris(8-hydroxyquinoline) aluminum based microcavity light emitting diodes [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2004, **399**(4-6):446-450.
- [15] Feng Yu, Wu Jian, Song Jianping. Negative refractive index material and its potential applications [J]. *Chin. J. Electron Devices* (电子器件), 2006, **29**(3):666-671 (in Chinese).

Optical Properties of the New MOLEDs

YAN Ling-ling¹, CAI Hong-xin¹, ZHAO Xiao-xia¹, ZHANG Li-wei¹, LI Hong-jian²

(1. School of Physics and Chemistry, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. College of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The negative refractive index dielectric (NRID) was introduced into the microcavity organic light-emitting device (MOLEDs). The new microcavity containing negative refractive index dielectric layer (NRIDL) was exhibited. Firstly, the transmission matrix model of the negative refractive index dielectric was presented. Based on the transfer matrix method, the reflectance spectrum, the dependence of EL spectra on cavity thickness were analyzed and discussed. The results showed that the line widths of the spectra of the new MOLED are narrower and all the peaks are enhanced, comparing to the electroluminescence spectra of non-NRIDL device. And then, the luminescence characteristics and EL spectra of the microcavity OLEDs are theoretically studied. The cavity thickness has few effect on the EL spectrum. All the results show that it is a new way to enhance device efficiency, color purity and thinned the thickness of the MOLEDs.

Key words: negative refraction index dielectric layer; EL spectra; transfer matrix method; MOLEDs

CLC number: TN383.1 **PACS:** 78.60.Fi **PACC:** 7860F **Document code:** A

Received date: 2009-10-20

《发光学报》网上在线投稿通知

由于学报发展的需要,《发光学报》网站已经建成开通,欢迎广大作者浏览我们的网页并提出宝贵意见,共同建好这个为广大作者和读者进行交流以及展示作者相关科研成果的平台。《发光学报》网页上建有网上在线投稿平台,从2006年开始,我们主要接收网上在线投稿,欢迎大家使用。如有问题,请与我们联系:

E-mail: fgxbt@126.com, Tel: (0431)86176862, 84613407

《发光学报》网址: <http://www.fgxb.org>

《发光学报》编辑部