文章编号: 0253-2239(2010)06-1800-04

含负折射率介质的新型微腔器件光学性能研究

闫玲玲¹ 张利伟¹ 蔡红新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 将负折射率介质引入到微腔有机电致发光器件(MOLED)中,利用传输矩阵法对这种器件的反射率大小、入射角度特性、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,与普通的均由正折射率介质构成的 MOLED 相比,新型微腔器件的入射角度特性和 EL 谱均优于普通微腔器件,并且发射谱受器件厚度的影响很小。因此这种微腔器件的厚度可以做的很薄,有利于薄膜器件的进一步优化。

关键词 发光器件;负折射率介质;EL谱;传输矩阵法;微腔有机电致发光器件

中图分类号 TN383.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103006.1800

Optical Properties of the New MOLED Containing Negative Refractive Index Dielectric Layer

Yan Lingling¹ Zhang Liwei¹ Cai Hongxin¹ Li Hongjian²

 ${\tiny \begin{pmatrix} ^{1} School \ of \ Physics \ and \ Chemistry \ , \ Henan \ Polytechnic \ University \ , \ Jiaozuo \ , \ Henan \ 454000 \ , \ China \)}^{\tiny 1} \\ {\tiny \begin{pmatrix} ^{2} \ College \ of \ Physics \ Science \ and \ Technology \ , \ Central \ South \ University \ , \ Changsha \ , \ Hunan \ 410083 \ , \ China \)}^{\tiny 1} \\ {\tiny \begin{pmatrix} ^{2} \ College \ of \ Physics \ Science \ and \ Technology \ , \ Central \ South \ University \ , \ Changsha \ , \ Hunan \ 410083 \ , \ China \)}^{\tiny 1} \\ {\tiny \begin{pmatrix} ^{2} \ College \ of \ Physics \ Science \ and \ Technology \ , \ Central \ South \ University \ , \ Changsha \ , \ Hunan \ 410083 \ , \ China \)}^{\tiny 1} \\ {\tiny \begin{pmatrix} ^{2} \ College \ of \ Physics \ Science \ and \ Technology \ , \ Central \ South \ University \ , \ Changsha \ , \ Hunan \ 410083 \ , \ China \)}^{\tiny 1} \\ {\tiny \begin{pmatrix} ^{2} \ College \ of \ Physics \ , \ China \)}^{\tiny 1} \\ {\tiny \begin{pmatrix} ^{2} \ College \ of \ Physics \ , \ China \ , \ Ch$

Abstract A new cavity structure containing negative refractive index dielectric layer is introduced into microcarity organic light-emitting devices (MOLED). Based on the transfer matrix method, the reflectance spectrum, the relation between the reflectance and incident angles and the dependence of electric luminescence (EL) spectra on cavity thickness were analyzed and discussed. The results show that the new MOLED have broader reflection band and better angular property than that of ordinary MOLED, compared to the same structure MOLED containing positive refractive index dielectric layer. The cavity thickness has little effect on the EL spectrum. So the thickness of the MOLED can be very thin. The new structure is beneficial for improving the properties of the MOLED.

Key words light-emitting device; negative refraction index dielectric layer; EL spectra; transfer matrix method; MOLED

1 引 言

微腔有机电致发光器件(MOLED)^[1~4]较有机电致发光器件(OLED)^[5~7]发光性能明显改善,如增强发光强度、窄化发光光谱和提高器件的发光效率等,因而受到人们的广泛关注。一般来说,腔模与原子跃迁的耦合效率随着电场强度的增强而增强,随着谐振腔体积的增大而减小^[8]。对基于驻波的普通谐振腔来说,由于受到半波极限的限制,腔的尺度不可能很小。另外腔模的电磁场呈正(余)弦分布,局域性也不可能很强,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,由两种单负折射率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,并且受结构和入射角度和偏振态的影响很小^[9]。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,可以实现对右手材料的相位补偿,从而构成一种新型的谐振腔^[10],且其谐振频率跟厚度无关,此谐振腔可以做的非常薄。本文就是将由正负折射率材料组成的新型谐振腔引入到 MOLED,依据薄膜理论研究其发光性能,并与普通 MOLED 的相应特性进行对比。

收稿日期: 2009-08-17; 收到修改稿日期: 2009-09-01

基金项目: 湖南省杰出青年科学基金(03JJY1008)、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)和河南理工大学青年基金(Q2008-49)资助课题。

作者简介: 闫玲玲(1982—),女,硕士,讲师,主要从事 MOLEDs 发光性能方面的研究。E-mail: yll@hpu.edu.cn

2 理论模型

本文设计的 MOLED 结构为 DBR/Alq₃/TPD/ITO/DBR/Glass。其中 DBR(分布式布拉格反射镜)是由正负折射率材料组成,即新型微腔。ITO (氧化铟锡)是透明导电膜,作为空穴注入电极,折射率 $n_{\text{ITO}}=1.95$; TPD 作为空穴传输层;Alq₃ 作为电子传输层和发光层。DBR 以及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 $^{[11\sim 13]}$ 的传输矩阵 T_1 和正折射率材料不同,为

$$T_{L} = \begin{bmatrix} \cos \delta_{L} & \frac{i}{\eta_{L}} \sin \delta_{L} \\ i\eta_{L} \sin \delta_{L} & \cos \delta_{L} \end{bmatrix},$$

$$\delta_{L} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{L} d_{L} \cos \theta_{L}, \theta_{L} < 0$$
 (1)

$$\eta_{L} = \begin{cases}
\sqrt{\frac{\varepsilon_{L}}{\mu_{L}}\cos\theta_{L}} & (TE) \\
\sqrt{\frac{\varepsilon_{L}}{\mu_{L}}} & \frac{1}{\cos\theta_{L}} & (TM)
\end{cases} ,$$
(2)

式中 θ_L , ϵ_L , μ_L , $n_L = -\sqrt{\epsilon_L \mu_L}$ 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 EL 谱 $E_c(\lambda)$ 可通过对应 OLED 的光谱 $E_0(\lambda)$ 得到 $^{[14]}$

$$\frac{(1-R_{\rm d})\left[1+R_{\rm d}+2(R_{\rm d})^{1/2}\cos\left(\frac{4\pi x}{\lambda}\right)\right]}{1+R_{\rm d}R_{\rm d}+2(R_{\rm d}R_{\rm d})^{1/2}\cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right)}|E_{\rm 0}(\lambda)|^{2},$$
(3)

式中 λ 为发光波长,x为发光层到上反射镜的有效距离, R_a 为 DBR 的反射率;L为有效腔长。 $E_o(\lambda)$ 为原始光谱(自由空间的光谱)的分布,计算过程中取为 1。

3 结果与讨论

在微腔器件中,上下反射镜的选择非常关键,直接影响到微腔的选频性能。对基于驻波实现谐振的普通谐振腔来说,由于受到半波极限的限制,腔的尺度以及电磁场特性都受到限制。普通微腔反射镜一般采用分布式布拉格反射镜(DBR)或金属镜,由于金属镜的反射率普遍不高(≤96%),因此多采用DBR结构。鉴于普通微腔的不足,对其进行改进,将反射镜 DBR 中低折射率介质改为负折射率材料,研究其反射率以及角度依赖性,并与普通 DBR 进行比较,结果如图 1 和图 2 所示。图中所给出的都是TE 波的情况。

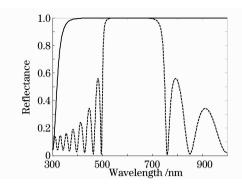


图 1 普通 DBR(实线)与正负折射率介质组成的 DBR(虚线)反射光谱曲线

Fig. 1 Reflection spectra of DBR (solid line) and the DBR (dotted line) composed of positive and negative refractive index materials

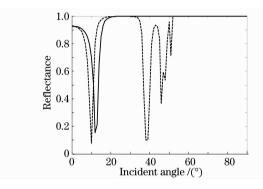


图 2 普通 DBR(实线)与正负折射率介质组成的 DBR(虚线)的反射率角度特性曲线

Fig. 2 Relation between the reflectance and incident angles of DBR (solid line) and the DBR (dotted line) composed of positive and negative refractive index materials

由图 1 可知,正负折射率介质交替的 DBR 具有很宽的反射带宽。相比之下,普通 DBR 的有效反射带宽非常有限^[15]。另外,根据图 2 的结果,普通 DBR 的峰值反射率随着入射角度的增大而急剧降低,在 10°和 40°入射角时几乎降到最低^[15]。而由负折射率介质层加入的 DBR 只是在 10°~15°范围内变化明显,其它角度时变化很小。依据薄膜理论,由正负折射率介质组成的 DBR 在斜入射时,对于 TE 波,几乎所有的入射光波都在反射带肉,所以其反射角度依赖性很小,角度反射带宽明显宽于相应的普通 DBR,易于实现全角度反射。

将由正负折射率介质组成的 DBR 作为反射镜构成的新型微腔结构引入到 MOLED 后,器件的光强分布发生变化,如图 3 所示。从图中可知,由新型微腔构成的 MOLED 的光强峰值强度较普通 MOLED 明显提高,谱线窄化显著。对于普通

MOLED,不同角度入射时,峰值强度不同,这主要是由反射率对角度的依赖关系所引起的:当光线斜入射时,反射率变大,微腔效应增强,从而输出光线获得的增益增大,其峰值强度自然也就增大了。对于新型 MOLED,虽然反射镜 DBR 的角度依赖性减弱,但是器件本身的反射率依然有角度依赖性。当入射角大于 15°时,反射率迅速减小,峰值强度也随之下降。因此这种新型微腔结构在器件的反射率角度依赖性方面并没有太大的改进。

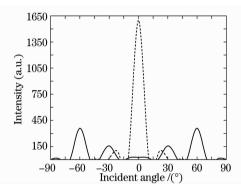


图 3 普通 MOLED(实线)与含有负折射介质的 新型 MOLED(虚线)的 EL 谱随入射角的变化曲线

Fig. 3 Relation between the EL spectra and incident angles of the common MOLED (solid line) and the new kind of MOLED (dotted line) containing negative refractive index dielectric layer

由微腔性质知:当腔长减小时,总的模式密度迅速增大,并大大超过自由空间下的模式密度。而模式密度增加的直接结果是光学微腔内工作物质的自发发射速率大大提高,因为自发发射速率与其寿命成倒数关系,所以可以观察到发射寿命缩短,微腔效

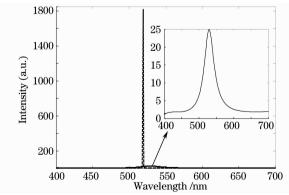


图 4 普通 MOLED(实线)与含有负折射介质的 新型 MOLED(虚线)的 EL 谱随微腔体积的变化曲线

Fig. 4 Relation between the EL spectra and cavity thickness of the common MOLED (solind line) and the new kind of MOLED (dotted line) containing negative refractive index dielectric layer

应减弱等现象。图 4 给出两种器件的 EL 谱随腔体厚度的变化关系,插图为普通 MOLED 器件的 EL 谱。由前知,随着腔长减小,EL 谱强度应减小。图中两种器件,除负折射率介质外,其它参数完全相同。新型 MOLED 的腔长较普通 MOLED 减小了很多,但是其 EL 谱强度不但没有降低,反而明显增强。可见,新型微腔的谐振频率不受腔长影响,与其厚度无关。这些特性是由光波在负折射率介质层中的特殊相位性质所引起的[10]。

4 结 论

将负折射率介质引入到 DBR 中设计了新型 MOLED,利用传输矩阵法对器件光学性质进行了分析和讨论,并与普通的均由正折射率介质构成的 MOLED 性质做了对比。结果表明,器件的入射角度特性和 EL 谱强度均优于普通微腔器件,有利于薄膜器件的进一步优化。器件的这些特性都是由光波在负折射率介质层中的特殊相位性质所引起的。

参考文献

- 1 A. Dodabalapur, L. J. Rothberg, R. H. Jordan et al.. Physics and applications of organic microcavity light emitting diodes[J]. J. Appl. Phys., 1996, 80(12): 6954~6964
- 2 N. C. Greenham, R. H. Friend, D. C. Donal et al.. Angular dependence of the emission from a conjugated polymer lightemitting diode; implications for efficiency calculations [J]. Adv. Mater., 1994, 6(6): 491~494
- 3 L. Yan, H. Li, J. Zhang et al.. Electroluminescence spectra in microcavity organic light-emitting devices[J]. Chin. J. Lumin., 2007, 28(2): 173~178
- 4 Zhang Chunyu, Liu Xingyan, Ma Fengyin *et al.*. Organic microcavity green color light emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 111~115
- 张春玉, 刘星元, 马凤英 等. 有机微腔绿色发光二极管[J]. 光学学报, 2006, 26(1): $111\sim115$
- 5 Ma Fengying, Jin Changqing, Qin Li et al.. Double mode emitting from a novel organic microcavity diode[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(1): 75~78
 - 马凤英,金长清,秦 莉等. 一种新型有机电致微腔结构的双模发射[J]. 光学学报, 2004, **24**(1): $75\sim78$
- 6 Xie Zeyong, Yuan Yongbo, Chen Shuming *et al.*. Study on metal microcavity OLEDs with improved efficiency [J]. *Chin. J. Lumin*, 2008, **29**(1); 43~46
 - 谢泽锋, 袁永波, 陈树明 等. 高效率金属微腔 OLEDs 性能[J]. 发光学报, 2008, **29**(1): 43~46
- 7 Chen Shufen, Li Xue, Liu Shiyon. Blue' top emissive organic light-emitting diodes [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35** (12): 2005~2010
- 陈淑芬,李 雪,刘式墉. 蓝光波段顶发射有机发光二极管[J]. 中国激光,2008,35(12):2005~2010
- 8 P. A. Hobson, W. L. Barnes, D. G. Lidzey *et al.*. Strong exciton-photon coupling in a low-Q all-metal mirror microcavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(19); 3519~3521
- 9 H. T. Jiang, H. Chen, S. Y. Zhu. Rabi splitting with excitons in effective (near) zero-index media [J]. Opt. Lett., 2007,

32(14): 1980~1982

- 10 N. Engheta. 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
- 11 M. Jiang, X. Shen, X. Chen et al.. Optical transmission properties of Bragg microcavity containing left handed materials [C]. SPIE, 2005, 6021: 60214A-1
- 12 K. F. Deng. Swithching characteristic of bragg micro-cavity constructing with positive/negative refractive index materials[C]. 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*, 2004, **24**(3): 388~392 杨立功,黄弼勤,叶 辉等. 负折射率介质层中光波的相位和传输特性研究[I]. 光学学报, 2004, **24**(3): 388~392
- 14 A. B. Djuris ic', C. Y. Kwong, C. H. Cheung 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 Yang Ligong, Gu Peifu, Huang Biqin. Optical properties of a Bragg mirror containing dielectric layers with negative refractive index[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 200~203 杨立功,顾培夫,黄弼勤. 含有负折射率介质层的布喇格镜的光学特性研究[J]. 光子学报,2004, **33**(2): 200~203

2010年度"大珩杯"中国光学期刊优秀论文奖评选

为了提高中国光学期刊的学术水平和质量,吸引和催生优秀稿件,鼓励和培育优秀作者,促进中国光学科技事业发展,在中国杰出的战略科学家、中国近代光学与光学工程的奠基人与组织领导者、中国光学学会的创始人王大珩先生的支持下,中国光学学会决定组织学会主办的 10 种期刊并邀请中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)所有人网期刊参加 2010 年度"大珩杯"中国光学期刊优秀论文奖评选活动。

从发表在《光学学报》、《中国激光》等共计 39 种期刊(包括增刊)2007,2008,2009 年的学术论文中评选出优秀论文 40 篇(简讯、消息、综述类论文和上一届已经获奖的论文不再参评)。

评选程序及日程

- 1) 论文作者 2010 年 5 月 30 日前提交申请材料(论文被引的材料和论文所在项目或课题获奖的证明);
- 2)6月10日前各编辑部组织汇总各项统计信息,经评选推荐交中国光学学会,同时提交推荐评选成员 名单;
 - 3)6月15日学会公布经遴选组成的评选委员会名单,并开始以网络通信方式组织网络投票评审;
- 4)7月15日前评选结束,确定初步评选结果,并在中国光学学会网站(www.cncos.org.cn)以及中国光学期刊网站(www.opticsjournal.net)上公示名单;公示期2周,接受异议投诉。如无论文抄袭、剽窃等学术不端行为等举报或投诉,论文获奖生效。
- 5) 8月10日在中国光学学会网站、中国光学期刊网和各相关期刊及网站上公布获奖名单。8月下旬在 天津举办的中国光学学会2010年学术年会上,举行颁奖仪式。

联系方式

网址:中国光学学会 http://www.cncos.org

中国光学期刊网 http://www.opticsjournal.net/Daheng.htm

联系人:段家喜,庞 立

电 话: 021-69918426 010-82616604