

导应用实践,发展实践和创新.我国的等离子体工艺研究相对来说还比较分散和薄弱,应该在科技体制改革中,形成几个强有力的研究中心,应组织好基础研究和应用发展工作,使之既有明确分工和适当的管理模式,又有合作和互相联系.这样才能使我国的等离子体工艺研究提高到新的水平.

**致谢** 作者感谢对本项工作给予支持及提供研究情况和材料的同志们

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Wu C K ed. Proceedings of the 13th International Symposium on Plasma Chemistry, Aug. 18—22, 1997, Beijing: Peking U. Press, 1997
- [ 2 ] Gu B W, Wu C K. Acta Mechanica Sinica, 1991, 7(3): 199—208
- [ 3 ] Lin L, Wu C K. J. Thermal Science, 1995, 4(3): 174—179
- [ 4 ] Zhao W H *et al.* IEEE Trans. Plasma Science, 1997, 25(5): 828—832
- [ 5 ] 韩隆恒, 岳斌, 杨富荣. 空气动力学学报, 1997, 15(4): 444—451
- [ 6 ] Chen X. Plasma Chem. and Plasma Processing, 1996, 16(1) (Supplement): 71S—82S
- [ 7 ] Chen X. J. of Phys. D: App. Phys., 1997, 30(13): 1885—1892
- [ 8 ] Luo J, Guo W K. Proc. ISPC - 13, Beijing: Peking Univ. Press, 1997. 2010
- [ 9 ] 雷正兰, 刘万楹等. 化学通报, 1997, No. 9: 54—60
- [ 10 ] 任兆杏等. 自然杂志, 1996, 18(4): 201—208
- [ 11 ] Yan P X *et al.* J. Vac. Sci. & Technol., 1996, A14(1): 115—117
- [ 12 ] Gu B *et al.* Proc. ISPC - 13, Beijing: Peking Univ. Press, 1997. 1141—1146
- [ 13 ] Wu H M *et al.* IEEE Trans. Plasma Sci., 1997, 25(4): 776—785
- [ 14 ] Yao X Z, Jiang D Y. J. Appl. Phys., 1997, 81: 2119—2123
- [ 15 ] Li Y A *et al.* Chemical Physics Letters, 1995, 247: 253—256
- [ 16 ] Wang E G *et al.* Physica Scripta, 1997, T69: 108—114
- [ 17 ] 贾宇明, 郑昌琼等. 材料研究学报, 1996, 10(4): 415—418
- [ 18 ] 詹如娟等. 核聚变与等离子体物理, 1996, 16(3): 60—63
- [ 19 ] 钱露茜, 胡建芳等. 物理, 1997, 26(6): 376—379
- [ 20 ] Chen H Y *et al.* Proc. ISPC - 13, Beijing: Peking Univ. Press, 1997. 1342—1345
- [ 21 ] 周坤, 周瑞花, 曹伟民. 合成化学, 1995, 3(2): 154—159
- [ 22 ] Lei M K, Zhang Z L, Vacuum Sci. Technol., 1994, 66: 350—354
- [ 23 ] Zhang G Q *et al.* Proc. ISPC - 13, Beijing: Peking Univ. Press, 1997. 1933—1938
- [ 24 ] Xu Y L, Xu X J. Proc. ISPC - 13, Beijing: Peking Univ. Press, 1997. 725—730
- [ 25 ] 官为民等. 中国环境科学, 1997, 17(4): 369—372
- [ 26 ] Xia J F *et al.* Proc. ISPC - 13, Beijing: Peking Univ. Press, 1997. 1810—1815

## 光子晶体及其应用\*

万 钧 张 淳 王 灵 俊 资 剑

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室 上海 200433)

**摘 要** 光子晶体是 80 年代末提出的新概念和新材料. 文章简单回顾了光子晶体的历史, 重点阐述其主要特征以及可能的应用, 同时论述了研究光子晶体的几种理论方法.

**关键词** 光子晶体, 介电材料, 周期性结构, 光子禁带, 光子局域, 新器件, 麦克斯韦方程组

\* 国家自然科学基金资助项目

1998 - 11 - 05 收到初稿, 1999 - 01 - 18 修回

# PHOTONIC CRYSTALS AND THEIR APPLICATIONS

Wan Jun Zhang Chun Wang Lingjun Zi Jian

(Surface Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433)

**Abstract** A brief history is given of photonic crystals which are a type of new material proposed in the late 80 s. Their unique features, potential applications and some theoretical methods used to study them are discussed.

**Key words** photonic crystal, dielectric material, periodic structure, photonic band gap, photon localization, new devices, Maxwell's equations

对新材料的探索一直是人类的奋斗目标和进步手段,如本世纪对半导体材料的研制导致了一场轰轰烈烈的电子工业革命,我们的科技和生活水平有了一个突飞猛进的跨越,并藉此进入了以计算机和信息高速公路为标志的信息时代。

信息业的梦想之一,是由光子替代电子传递信息,这是因为光子有着电子所不具备的优势:速度快,彼此间不存在相互作用。一旦实现这点,信息的传输速度将快得无法想象。我们虽然已经朝这个方向迈出了可喜的一步——光纤的使用,但是信息的输入和输出光纤依靠的仍然是传统的电子器件,这大大限制了传输效率。最近光子晶体的出现可能改变这种状况。由光子晶体做成的器件可以如人所愿地控制光子的流动,就象半导体中的电子一样。光子晶体的研究不仅仅是光通信领域内的问题,它同时对其他相关产业都将产生巨大的影响。这就是为什么光子晶体越来越引起人们广泛关注的原因。

## 1 什么是光子晶体

1987年, Yablonovitch 和 John 分别在讨论周期性电介质结构对材料中光传播行为的影响时,各自独立地提出了“光子晶体”这一新概念<sup>[1,2]</sup>。我们知道,在半导体材料中由于周期势场作用,电子会形成能带结构,带与带之间有能隙(如价带与导带)。光子的情况其实也非常相似。如果将具有不同介电常数的介质材料在空间按一定的周期排列(如图1),由于存在周期性,在其中传播的光波的色散曲线将成带状结构,带与带之间有可能出现类似于半导体禁带的“光子禁带”(photonic band gap)。频率落在禁带中的光是被严格禁止传播的(如图2)。如果只在一个方向具有周期结构,光子禁带只可能出现在这个方向上。如果存在三维的周期结构,就有可能出现全方位的光子禁带,落在禁带中的光在任何方向都被禁止传播。我们将具有

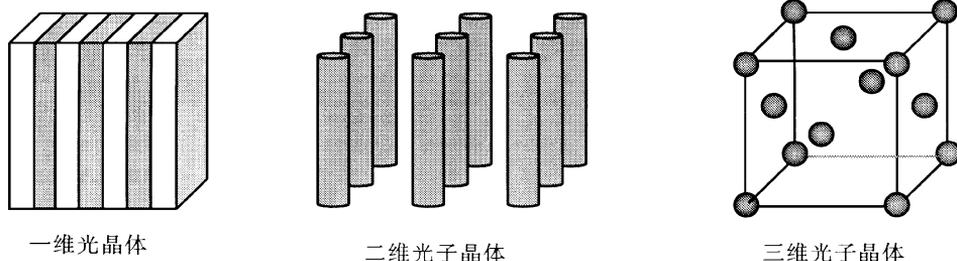


图1 光子晶体空间结构示意图

光子禁带的周期性电介质结构称为光子晶体 (photonic crystal). 绝大多数光子晶体都是人工设计制造出来的, 但是自然界也存在光子晶体的例子, 如蛋白石、蝴蝶翅膀等.

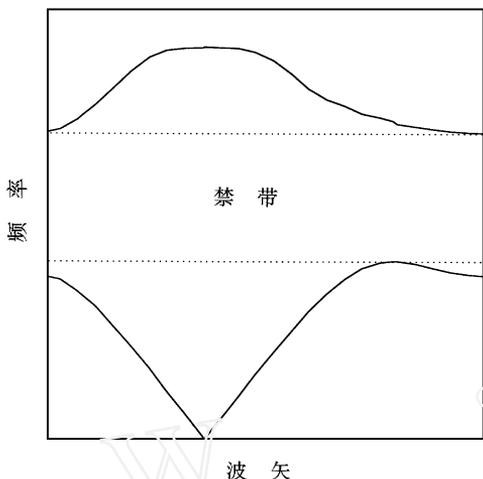


图2 光子禁带示意图

## 2 光子晶体的特征

光子晶体的最根本特征是具有光子禁带, 落在禁带中的光是被禁止传播的. Yablonovitch 指出<sup>[1]</sup>: 光子晶体可以抑制自发辐射. 我们知道, 自发辐射的几率与光子所在频率的态的数目成正比. 当原子被放在一个光子晶体里面, 而它自发辐射的光频率正好落在光子禁带中时, 由于该频率光子的态的数目为零, 因此自发辐射几率为零, 自发辐射也就被抑制. 反过来, 光子晶体也可以增强自发辐射, 只要增加该频率光子的态的数目便可实现. 如在光子晶体中加入杂质, 光子禁带中会出现品质因子非常高的杂质态, 具有很大的态密度, 这样便可以实现自发辐射的增强 (如图 3).

光子禁带的出现依赖于光子晶体的结构和介电常数的配比. 一般来说, 光子晶体中两种介质的介电常数比越大, 入射光将被散射得越强烈, 就越有可能出现光子禁带. 影响禁带的存在还有一个重要因素: 晶体的几何构形. 1990 年, 美国的何启明 (Ho)、陈子亭 (Chan) 和 Soukoulis

小组第一个成功地预言了在一种具有金刚石结构的三维光子晶体中存在完整的光子禁带, 禁带出现在第二条与第三条能带之间 (如图 4)<sup>[4]</sup>. Yablonovitch 于 1991 年在实验室中人工制造了第一块当时认为具有完整禁带的三维光子晶体. 在一块高介质材料的底板平面上分布着呈三角点阵的空气洞, 以偏离中心轴 (与底板垂直) 35.26 度的方向对每个空气洞钻眼 3 次, 这 3 次钻入方向彼此夹 120 度角 (如图 5). 从三维来看, 这是一种面心立方结构<sup>[5]</sup>. 但是后来的研究表明, 这种结构不存在绝对禁带. 天然的具有完整禁带的三维光子晶体在自然界非常少, 为了获取符合我们要求的光子晶体, 通过人工适当地改变一些晶体的对称结构应该是一种可行而且实际有效的方法.

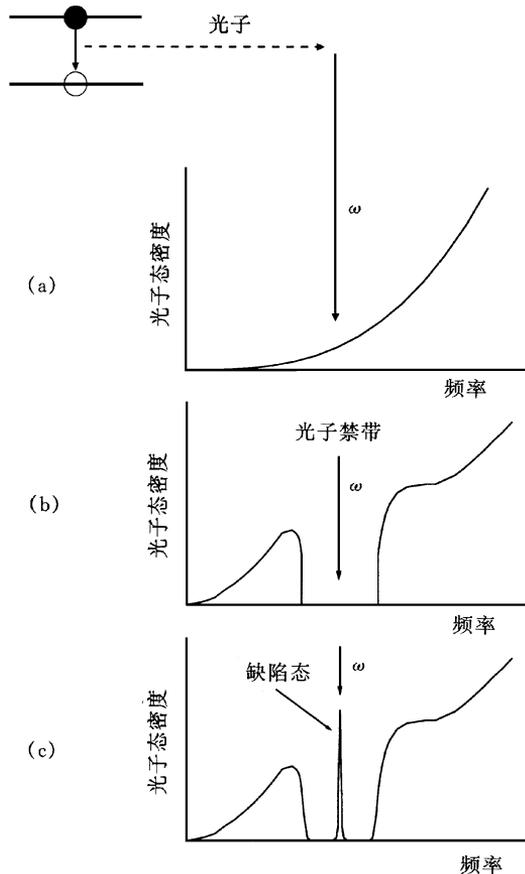


图3 光子禁带对原子自发辐射的影响<sup>[3]</sup>

- (a) 在自由空间; (b) 在光子晶体中 (自发辐射被抑制);
- (c) 在有缺陷的光子晶体中 (自发辐射被增强)

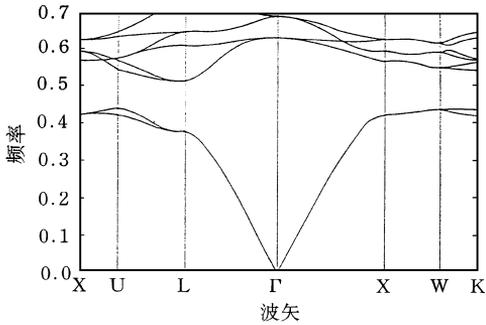


图4 三维金刚石结构光子晶体光子禁带的计算结果<sup>[4]</sup>  
[光子晶体由折射率为3.6的球形介质构成金刚石结构,分布在空气中,介质的填充比(所占空间体积的比)为0.34.]

频率单位为  $c/a$ ,  $a$  是晶格常数,  $c$  是真空光速

光子晶体的另一个主要特征是光子局域。John 于 1987 年提出<sup>[2]</sup>:在一种经过精心设计的无序介电材料组成的超晶格(相当于现在所称的光子晶体)中,光子呈现出很强的 Anderson 局域。如果在光子晶体中引入某种程度的缺陷,和缺陷态频率吻合的光子有可能被局域在缺陷位置,一旦其偏离缺陷处光就将迅速衰减。当光子晶体理想无缺陷时,根据其边界条件的周期性要求,不存在光的衰减模式。但是,一旦晶体原有的对称性被破坏,在光子晶体的禁

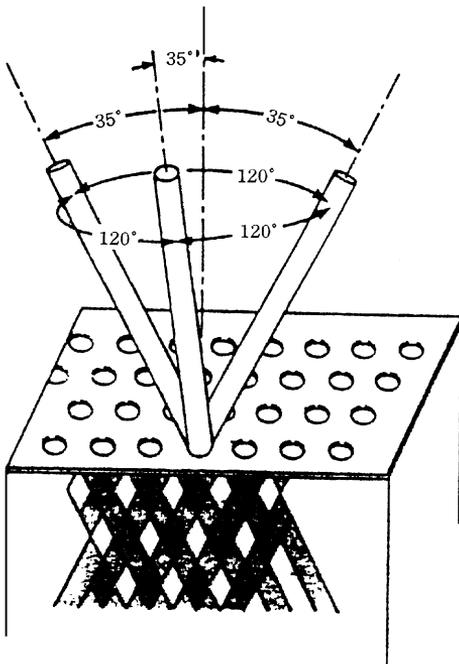


图5 Yablonovitch 制作的三维光子晶体<sup>[5]</sup>

带中央就可能出现频宽极窄的缺陷态 [如图 3(c)]。

光子晶体有点缺陷和线缺陷。在垂直于线缺陷的平面上,光被局域在线缺陷位置,只能沿线缺陷方向传播。点缺陷仿佛是被全反射墙完全包裹起来。利用点缺陷可以将光“俘获”在某一个特定的位置,光就无法从任何一个方向向外传播,这相当于微腔。

表 1 给出了光子晶体和半导体特性的比较。从表中不难看出:光子晶体与半导体在构成的物理思想上有惊人的相似之处,我们可以将半导体的研究方法移植到光子晶体中。当然必须注意的是:光子是玻色子,而电子是费米子。

表 1 光子晶体和半导体特性的比较

|      | 光子晶体   | 半导体  |
|------|--|--|
| 结构   | 不同介电常数介质的周期分布  | 周期性势场  |
| 研究对象 | 电磁波(光)在晶体中的传播<br>玻色子   | 电子的输运行为<br>费米子   |
| 本征方程 | $\left[ \nabla \cdot \left( \frac{1}{\epsilon(x)} \nabla \right) \right] H(x) = \frac{\omega^2}{c^2} H(x)$ | $\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(x) \right] \psi(x) = E \psi(x)$ |
| 本征矢  | 电场强度、磁场强度:矢量   | 波函数:标量   |
| 特征   | 光子禁带<br>在缺陷处的局域模式<br>表面态   | 电子禁带<br>缺陷态<br>表面态   |
| 尺度   | 电磁波(光)波长   | 原子尺寸   |

### 3 光子晶体的应用

通过上述对光子晶体重要特征的阐述,不难发现:光子晶体的应用范围应该是非常广泛的。利用光子晶体具有光子禁带这一基本性质,可以将其用作光子晶体全反射镜和损耗极低的三维光子晶体天线<sup>[6]</sup>;利用光子禁带对原子自发辐射的抑制作用,可以降低因自发跃迁而导致复合的几率,设计制作出无阈值激光器<sup>[7]</sup>和光子晶体激光二极管<sup>[8]</sup>;通过在光子晶体中引入缺陷,使得光子禁带中产生频率极窄的缺陷态,可以制造高性能的光子晶体光过滤器、单频率光全反射镜和光子晶体光波导;如果引入的是点缺陷,则可以制作成高品质因子的

物理

光子晶体谐振腔<sup>[9-11]</sup>;而二维光子晶体对入射电场方向不同的 TE, TM 偏振模式的光具有不同的带隙结构,又可以据此设计二维光子晶体偏振片,只要这两种偏振模式的禁带完全错开就可以获得单一模式的出射光,这种偏振光具有很高的偏振度和透射率.当然,综合利用光子晶体的各种性能,还可以有其他更广泛的应用,如:光开关、光放大器、光聚焦器等等.另外,如果用金属、半导体与低介电常数材料组成光子晶体以及无序光子晶体,则都会因为其特殊结构而产生一些特殊性质,从而能够制造出一些新型光学器件.总而言之,由于光子晶体的特点决定了其优越的性能,因此它极有可能取代大多数传统的光学产品,其前景和即将对经济、对社会发展产生的影响是不可限量的.

## 4 光子晶体的理论研究

早期研究光子晶体的能带时,采用的是标量波动方程,发现具有面心立方结构的光子晶体具有光子禁带.但是光波是矢量波,满足的是麦克斯韦方程组.解麦克斯韦方程组得到的结论是:面心立方结构的光子晶体没有光子禁带.这些年来,光子晶体的理论研究也取得了令人瞩目的进展.下面列举几种用得比较广泛的基本计算方法.

### 4.1 平面波方法<sup>[4]</sup>

这是在光子晶体能带研究中用得比较早和用得最多的一种方法.主要是将电磁场以平面波的形式展开,何启明等人在预言光子禁带的存在的文章中便是用的这种方法.电磁场在倒格矢空间以平面波叠加的形式展开,可以将麦克斯韦方程组化成一个本征方程,求解本征值得到传播的光子的本征频率.但是,这种方法有明显的缺点:计算量与平面波的波数有很大关系,几乎正比于所用波数的立方,因此会受到较严格的约束,对某些情况显得无能为力.如当光子晶体结构复杂或处理有缺陷的体系时,需要大量平面波,可能因为计算能力的限制而不能计算或者难以准确计算.如果介电常数不是

恒值而是随频率变化,就没有一个确定的本征方程形式,而且有可能在展开中出现发散,导致根本无法求解.

### 4.2 转移矩阵方法<sup>[12]</sup>

由磁场在实空间格点位置展开,将麦克斯韦方程组化成转移矩阵形式,同样变成本征值求解问题.转移矩阵表示一层(面)格点的场强与紧邻的另一层(面)格点场强的关系,它假设在构成的空间中在同一个格点层(面)上有相同的态和相同的频率,这样可以利用麦克斯韦方程组将场从一个位置外推到整个晶体空间.这种方法对介电常数随频率变化的金属系统特别有效,由于转移矩阵小,矩阵元少,计算量较前者大大降低,只与实空间格点数的平方成正比,精确度也非常好.而且还可以计算反射系数及透射系数.

### 4.3 差分或有限差分法<sup>[13]</sup>

将一个单位原胞划分成许多网状小格,列出网上每个结点的有限差分方程,利用布里渊区边界的周期条件,同样将麦克斯韦方程组化成矩阵形式的特征方程,这个矩阵是准对角化的,其中只有为数不多的一些非零矩阵元,明显地减少了计算量,节省了计算机内存.但是,有限差分法没有考虑晶格格点的形状,遇到具有特殊形状格点的光子晶体时,要求得精确解就比较困难.

### 4.4 N阶(Order-N)法<sup>[14]</sup>

这是引自电子能带理论的紧束缚近似中的一种方法,是由 Yee 在 1966 年提出的时域有限差分法(FDTD)发展来的<sup>[15]</sup>.基本思想是:我们从定义的初始时间的一组场强出发,根据布里渊区的边界条件,利用麦克斯韦方程组可以求得场强随时间的变化,从而最终解得系统的能带结构.具体作法:通过傅里叶变换先将麦克斯韦方程组变换到倒空间,用差分形式约简方程组,然后再作傅里叶变换,又将其变换回到实空间,得到一组被简化了的时间域的有限差分方程,这样,原方程可以通过一系列在空间和时间上都离散的格点之间的关系来描述,计算量大大降低,只与组成系统的独立分量的数目  $N$  成

正比.但是在处理Anderson局域和光子禁带中的缺陷态等问题时,计算量剧增,这种情况下用转移矩阵方法比较方便.

引入缺陷的光子晶体在激光或光学回路中有广泛的应用,计算有单点缺陷、多点缺陷、线缺陷以至表面态的光子晶体能带可以用超元胞法进行平面波展开<sup>[9,16]</sup>;当混有多种缺陷时,可采用格林函数法<sup>[17,18]</sup>.

上述的理论计算方法只是在给定光子晶体的结构组成后才能定量定性地得出准确的结论.虽然我们知道有几个参数(如介电常数比、填充比、晶格结构等)对光子禁带有影响,但“到底是什么物理机制在光子禁带的形成中起了决定作用?”,也就是“怎样从物理上定性、定量或者半定量地分析和设计光子禁带?”尚没有明确的答案.例如,如果要得到一定频率范围的光子禁带,我们该找什么样的光子晶体结构组成呢?由于这方面的研究迄今不过十余年,所以还有大量的工作需要人们去做.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Yablonovitch E. Phys. Rev. Lett. ,1987,58:2059—2062
- [ 2 ] John S. Phys. Rev. Lett. ,1987,58:2486—2489
- [ 3 ] Joannopoulos J D, Villeneuve P R, Fan S. Solid State Commun. ,1997,102:165—173

- [ 4 ] Ho K M, Chan C T, Soukoulis C M. Phys. Rev. Lett. , 1990,65:3152—3155
- [ 5 ] Yablonovitch E, Gmitter T J, Leung K M. Phys. Rev. Lett. ,1991,67:2295—2298
- [ 6 ] Brown E R, McMahon O B. Appl. Phys. Lett. ,1996,68:1300—1302
- [ 7 ] Hirayama H, Hamano T, Aoyagi Y. RIKEN Super Computing Prog. Rep. ,1996,1:1
- [ 8 ] Hirayama H, Hamano T, Aoyagi Y. Appl. Phys. Lett. , 1996,69:791—793
- [ 9 ] Yablonovitch E, Gmitter T J, Meade R D. *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1991,67:3380—3383
- [10] Smith D R, Dalichaouch R, Kroll N *et al.* J. Opt. Soc. Am. B,1993,10:314—321
- [11] Lin S Y, Hietala V M, Lyo S K. Appl. Phys. Lett. ,1996,68:3233—3235
- [12] Pendry J B, Mackinnon A. Phys. Rev. Lett. ,1992,69:2772—2775
- [13] Yang H Y D. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , 1996,44:2688—2695
- [14] Chan C T, Yu Q L, Ho K M. Phys. Rev. B,1995,51:16635—16642
- [15] Yee K S. IEEE Trans. Antennas Propag. ,1966,14:302—307
- [16] Sigalas M, Soukoulis C M, Economou E N *et al.* Phys. Rev. B,1993,48:14121—14126
- [17] Leung K M. J. Opt. Soc. Am. B,1993,10:303—306
- [18] Maradudin A A, McGurn A R. J. Opt. Soc. Am. B,1993,10:307—313

## 无机材料的薄膜电致发光\*

赵丽娟<sup>1)</sup> 张光寅<sup>1)</sup>

(南开大学物理科学学院 光子学研究中心 天津 300071)

钟国柱

(中国科学院长春物理研究所 激发态物理开放研究实验室 长春 130021)

**摘 要** 平板显示技术是信息时代对终端显示的基本要求,薄膜电致发光显示器具有全固体化平板显示的特点,是一种全新的终端显示器件.文章扼要介绍了薄膜电致发光原理,综述了电致发光材料尤其是蓝色和白色发光材料的研究进展,指出了目前存在的问题和解决方案,最后简述了彩色薄膜电致发光显示器的最新研究结果.

**关键词** 薄膜电致发光,彩色化,平板显示器

\* 国家 863 计划资助项目

1998-10-12 收到初稿,1998-12-03 修回

1) 中国科学院长春物理研究所激发态物理开放研究实验室客座研究人员