

基于缺陷光子晶体结构的 GaN 基发光二极管光提取效率的有关研究*

岳庆炆 孔凡敏 李康[†] 赵佳

(山东大学信息科学与工程学院, 济南 250100)

(2012 年 2 月 13 日收到; 2012 年 5 月 9 日收到修改稿)

现有的研究表明, 利用光子晶体可以有效提高发光二极管的光提取效率. 由于在制造时光子晶体中可能会存在缺陷和错位, 本文基于时域有限差分法对光子晶体中的缺陷和错位对发光二极管发光效率的影响进行了研究. 数值仿真结果表明, 光子晶体中少量缺陷或者微小错位并不会降低发光二极管的光提取效率, 其中某些缺陷反而能增强光子晶体发光二极管的光提取效率. 本文对其物理机理给出了详细的理论分析, 并设计了一种具有缺陷的光子晶体, 在未刻蚀到有源层(离有源层 20 nm)的情况下, 其光提取效率达到了完美光子晶体的 1.6 倍. 通过对这种缺陷光子晶体的空间频谱分析可知, 可以通过设计具有特殊空间频谱分布的光子晶体来提高发光二极管的发光效率, 这对设计高光提取效率的光子晶体结构和制造高效率的发光二极管有指导意义.

关键词: 发光二极管, 光子晶体, 光提取效率, 时域有限差分

PACS: 85.60.Jb, 78.66.Fd, 78.20.Bh, 42.70.Qs

1 引言

随着固态光源在平面显示、移动照明和光互联等商业领域的大量应用, 促进了对高亮度、高效率的发光器件的研究. 1993 年, 中村修二在日本日亚化学工业株式会社 (Nichia Corporation) 就职期间, 基于 GaN 开发了具有商业意义的高亮度蓝色发光二极管 (light emitting diode, LED), 从而使全彩色显示成为可能, 波长为 460 nm 附近的蓝色 GaN 基发光二极管结合荧光粉 (荧光粉对激发光源的波长有特殊要求, 一般在 460 nm) 可以产生白光. 由于 LED 具有稳定性高、寿命长、节能和环保等特点, 被广泛应用于室外平板显示液晶背光、交通信号灯和室内照明^[1]等领域.

由于 GaN 等半导体材料的折射率和空气的折射率存在很大差异, 光由器件的有源层发射到空气表面会产生强烈的反射现象 (当入射光角度大于全

反射角时甚至会发生全反射), 这样导致发光二极管有源层产生的光不能高效地传播到空气中去, 造成出光效率很低, 一般只有 3%—5%. 国内外的研究者提出了诸多提升 GaN 基蓝光 LED 光提取效率的方法, 如表面等离子激元^[2]、光子晶体^[3,4]和表面粗化^[5,6]等方法. 美国加州大学的研究者 David 等^[4]对光子晶体 LED 进行了详细的分析, 给出了光子晶体增强 LED 光提取效率 (light extraction efficiency, LEE) 的物理机理, 并在实验上证明了这种理论的正确性. 随后大量的研究表明, 利用光子晶体可以有效地提高 LED 的光提取效率^[7]. 表面粗化也能得到和光子晶体一样高的光提取效率, 但是由于粗化缺乏理论指导, 制造中的不可控性高, 对出射光的方向性控制不如光子晶体好, 因此光子晶体成为增强 LED 光提取效率的一个比较好的选择. 由于在制造过程中光子晶体中会存在缺陷和错位, 就会对 LED 的光提取效率存在一定的影响.

本文首先对实际的 LED 进行了简化, 建立

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2009CB930503, 2009CB930501) 和国家自然科学基金 (批准号: 61077043) 资助的课题.

[†] E-mail: kangli@sdu.edu.cn

了 GaN 基蓝光 LED 的法布里-珀罗微腔式模型, 在此基础上给出了光子晶体增强 LED 光提取效率的物理机理. 然后用时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD) 验证光子晶体对 LED 的光提取效率, 并对光子晶体中存在的不同缺陷进行了研究. 数值仿真结果表明, 光子晶体中有些缺陷可以增强 LED 的光提取效率, 对此我们给出了详细的理论分析. 我们设计了一种具有缺陷的光子晶体, 在未刻蚀到有源层的情况下, 其光提取效率达到了完美光子晶体的 1.6 倍. 对具有各种缺陷的光子晶体的空间频谱进行了分析, 通过分析可知光子晶体的倒格矢分布对光提取效率有很大影响.

2 微腔 LED 和光子晶体

LED 的光提取效率不高主要是由于半导体材料和周围介质的高折射率差引起的, 比如 GaN 基 LED 的折射率在蓝光光谱范围内为 2.5. 图 1 是一个 LED 芯片的示意图, 其分为三层, 上层为空气, 下层为衬底, 中间为半导体材料, 这三层材料构成了一个法布里-珀罗微腔. 根据 Snell 折射定律 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, 可以得到光从半导体材料射入空气中的全反射角为 $\theta_c = \arcsin(n_1/n_2)$ ($n_2 = 2.5$ 时, $\theta_c = 23.8^\circ$). 当入射角小于 θ_c 时, 有源层发出的光能从介质中逃逸出, 并形成光逃逸圆锥; 当入射角大于 θ_c 时, 有源层发出的光不能从介质中逃逸出, 由于 LED 的衬底层的折射率也小于半导体材料的折射率, 从而使光在介质中形成导波, 而不能逃逸到空气中区, 如图 1 所示.

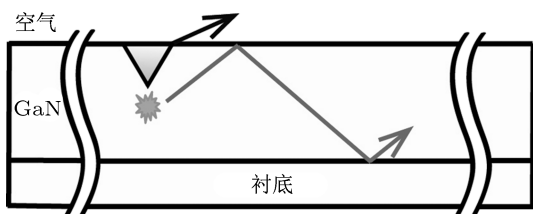


图 1 法布里-珀罗微腔 LED 结构示意图

设光在空气中传播的波矢为 k_0 , 在半导体介质材料中的波矢为 $\beta = n_2 k_0$, 波矢 β 可以写成 $\beta = \beta_m + \beta_\perp$, 且 $\beta_m = \beta_x + \beta_y$. 由波导理论可知, 当 $k_0 \leq \beta_m \leq n_2 k_0$ 时, 光便会在介质层形成导模, 如图 2 所示的两个实线圆圈之间的部分; 当 $\beta_m \leq k_0$ 时, 光在介质层中不能形成导模, 会变成辐射模, 从介质层中辐射到空气中, 如图 2 所示

的实线小圆圈内部的部分. 与光波导不同的是, 我们更关心的是辐射模, 因为只有辐射模才能使光从介质层中辐射出去. 要想提高 LED 的光提取效率, 就要使更多的导模转化为辐射模. 光子晶体是指具有光子带隙特性的人造周期性电介质结构, 设其周期为 a , 在一维情况下其电介质常数可以写成下面的形式:

$$\varepsilon = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \varepsilon_p e^{-ipG_0 x},$$

$$G_0 = \frac{2\pi}{a}. \quad (1)$$

由布洛赫理论^[8]可知, 光在光子晶体中传播时, 其波矢可以写成

$$\beta_k = \beta_m + pG_0. \quad (2)$$

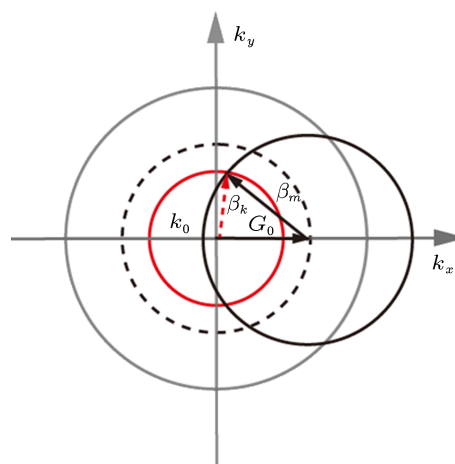


图 2 光子晶体内传播导模的波矢示意图

β_m 为光在均匀介质中传播时波矢的水平分量, 因此原先不能从介质层中衍射出去的导模, 由于光子晶体的作用会变为辐射模辐射到空气中去. 如图 2 所示, 水平波矢为 β_m (虚线圆圈) 的光不能从均匀介质中逃逸到空气中去, 当 $p = -1$ 时, 水平波矢 β_m 变为了 β_k , 且

$$\beta_k = \beta_m - G_0 < k_0. \quad (3)$$

β_k 在实线小圆圈内, 其便能从介质辐射到空气中去, 如图 2 所示. 光子晶体的刻蚀深度和晶格常数也会影响导模和辐射模之间的耦合作用.

3 数值仿真与分析

本文采用 FDTD 法对光子晶体 LED 进行仿真, 由于计算量比较大, 计算的时间比较长, 在仿真过

程中采用了图形处理器 (GPU) 对 FDTD 程序进行了加速. 在我们的仿真结构下, 计算步数为 15000 步, 用单个偶极子计算一次 CPU (Intel Core i7 2600K) 用时为 1528.95 min, GPU (2 个 Nvidia Tesla C2070) 用时为 119.93 min, 其加速比为 12.75. GaN 基蓝光 LED 中量子阱的载流子复合发光过程可以通过位于 xoy 平面的电偶极子来等效^[9]. 为了准确模拟 LED 有源层的发光, 需要在 xoy 平面 (即有源层所在的平面) 放置足够数目的电偶极子源, 最终统计所有偶极子源共同作用下的结果才能仿真真实的 GaN 基蓝光 LED 发光. 受限于现有的计算机硬件条件的限制, 放置太多的电偶极子源也是不可取的. 计算完美光子晶体 LED 光提取效率的具体步骤如下: 在有源层内一个 $200\text{ nm} \times 200\text{ nm}$ 范围内随机选取 10 个点 (不能放在空气孔的下面), 然后每一个点分别用 x 方向极化和 y 方向极化的电偶极子源计算两次 LED 的光提取效率, 最后把这 20 次的计算结果的平均值作为 LED 的光提取效率.

本文所采用的三维仿真模型大小为 $6\text{ }\mu\text{m} \times 6\text{ }\mu\text{m} \times 4\text{ }\mu\text{m}$, 如图 3 所示, 下面所有的仿真都采用这样大小的模型. 自下而上依次为厚度 1000 nm 的蓝宝石衬底, n-GaN, 有源层和 p-GaN. 其中有源层距离顶端出光面的距离为 200 nm , 整个 GaN 层厚度为 2000 nm , 表面光子晶体的刻蚀深度为 d , 蓝光的中心波长选为 460 nm . 在整个计算区域四周添加了完美匹配层 (perfectly matched layer, PML), 用来吸收外来波和避免非电磁反射^[10,11], 这就导致了仿真得到的 LED 光提取效率要比试验结果低. 我们对文献 [12] 中的实验结构进行了仿真, 仿真结果为 6.37% , 而文献中的实验结果达到了 24% . 本文的重点在于讨论光子晶体中的缺陷对 LED 的光提取效率的影响, 以及构造一种具有周期性缺陷的光子晶体来提高 LED 的光提取效率, 因此本文后面的计算都以完美光子晶体 LED 的计算结果作为参考.

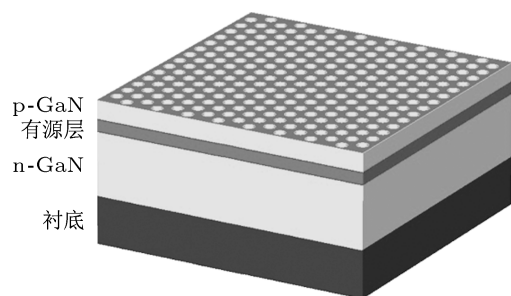


图 3 光子晶体 LED 三维示意图

本文所采用的光子晶体是具有三角晶格空气孔隙的光子晶体. 这是因为相比于方形晶格光子晶体, 三角晶格的光子晶体具有更好的特性^[13]. 光子晶体的晶格常数为 a , 空气孔隙的半径为 R , 其填充因子可以表示为

$$f = \frac{2\pi R^2}{\sqrt{3}a^2}. \quad (4)$$

光子晶体的各个参数, 如晶格常数、填充比和刻蚀深度等, 对 LED 的光提取效率的影响是复杂的. 为了便于分析各个参数对 LED 光提取效率的影响, 在仿真过程中我们采用固定其他参数, 对某单一参数进行扫描的方法. 在固定光子晶体晶格常数 $a = 200\text{ nm}$ 和刻蚀深度 $d = 150\text{ nm}$ 的情况下, 通过改变空气孔的半径来模拟填充因子对 LED 光提取效率的影响. 图 4 给出了光提取效率随填充比之间的变化关系. 当填充比在 0.4 左右时, 填充比对光提取效率的影响比较小, 这与文献 [14] 给出的结果相符合. 因此在光子晶体制造过程中, 孔半径的加工误差只要在一定范围内, 其对 LED 光提取效率的影响比较小.

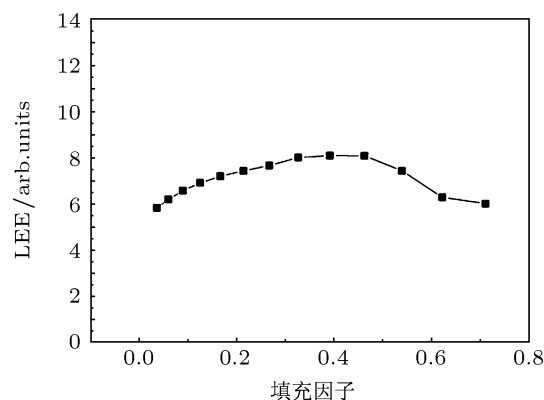


图 4 LED 光提取效率随填充因子的变化关系

本文采用的完美光子晶体的参数为 $R = 60\text{ nm}$, $a = 200\text{ nm}$, 填充因子 $f \approx 0.33$, 文献 [4] 在实验上已经证明了具有这种结构参数的光子晶体可以有效地提高微腔 LED 的光提取效率. 我们在 $6\text{ }\mu\text{m} \times 6\text{ }\mu\text{m}$ 的平面上随机造成了 10 个孔缺陷结构, 其中总的空气空数目为 1010 个, 其缺陷的位置是随机的, 图 5 是其中一部分的示意图. 图 6 是完美光子晶体 LED 和缺陷光子晶体 LED 的光提取效率随光子晶体刻蚀深度的变化关系, 圆点线为完美光子晶体的光提取效率随光子晶体深度变化的关系. 模拟结果显示光子晶体可以有效地提高 LED

的光提取效率,尤其是刻蚀深度在 100—250 nm 之间,光提取效率得到了迅速的提升. 当刻蚀深度小于 50 nm 时,光提取效率的变化比较小,由于刻蚀的深度比较浅,此时的光子晶体可看作微粒,由于粒子的散射导致光提取效率的微小增加;当刻蚀深度在 50—100 nm 之间,光提取效率的变化比较平缓是由于光子晶体的深度小于各个导模的耦合长度^[14],光子晶体与导模的作用比较弱;当刻蚀深度在 100—250 nm,光子晶体的刻蚀深度已经满足大多数导模的提取条件,因此其光提取效率在刻蚀深度为 250 nm 时^[12]达到了最大值. 当刻蚀深度大于 250 nm 时,LED 的光提取效率并没有继续增长,而出现了波动. 下面从 LED 的模式来分析出现波动的原因.

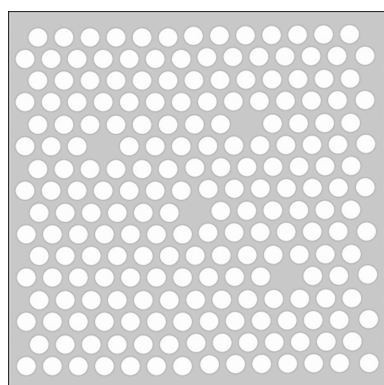


图 5 带有少量缺陷的光子晶体示意图

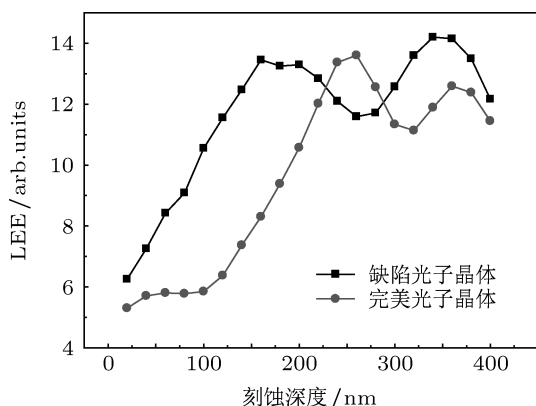


图 6 完美光子晶体和缺陷光子晶体 LED 随着光子晶体刻蚀深度的变化关系

图 7 是光子晶体 LED 的垂直方向上的模式分布示意图,光子晶体层的折射率用其平均折射率 n_{PhC} 来代替, $n_{\text{PhC}} \approx 2.1$, 其平均介电常数

$$\epsilon_{\text{PhC}} = F + (1 - F)\epsilon_{\text{GaN}}. \quad (5)$$

图 7 中模式 I, II 是导模, 模式 III 为辐射模. $\beta_m > n_{\text{PhC}}k_0$ 的导模(如模式 I)的衍射系数(即与光子晶体的耦合作用)随着刻蚀深度逐渐增长; $\beta_m < n_{\text{PhC}}k_0$ 的导模(如模式 II)的衍射系数(即与光子晶体的耦合作用)具有波动性^[13], 这也就是当刻蚀深度大于 250 nm 后,光提取效率出现波动的原因. 因此,光子晶体刻蚀到一定深度后,继续增加刻蚀深度,并不能增加 LED 的光提取效率,反而会影响 LED 的机械性能.

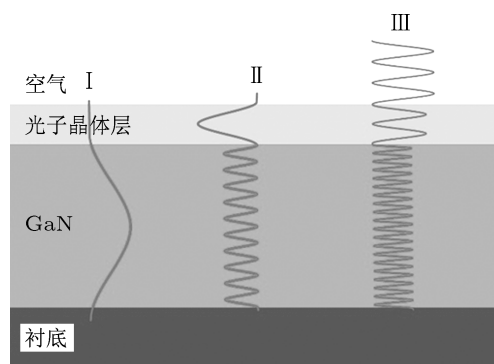


图 7 光子晶体 LED 的垂直方向上的模式分布示意图

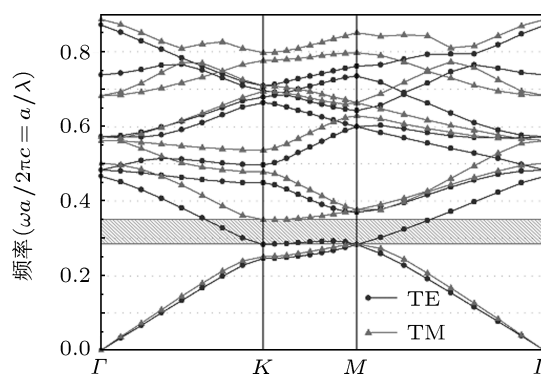


图 8 光子晶体的禁带结构

图 6 中的方块点线为位于光子晶体缺陷中的发光点的光提取效率随刻蚀深度变化的关系. 与完美光子晶体不同的是,当刻蚀深度小于 50 nm 时,缺陷中的光提取效率就直线上升,此时光子晶体对导模的辐射作用还比较弱,而由于光子禁带的作用,使光子重新分布,沿竖直方向出射,从而增加了 LED 的光提取效率^[15,16]. 从图 8 光子晶体的禁带结构可以看出,光子晶体禁带出现在 $0.28 \leq a/\lambda \leq 0.35$, 即 $1.63k_0 \leq \beta_m \leq 2.0k_0$. 从禁带结构看,光子晶体的禁带比较窄,而且只有 TM 模式下才存在禁带,因此只靠光子晶体的禁带来提高 LED 的光提取效率并不理想. 当刻蚀深度大

于 100 nm 时, 光子晶体开始起作用, 在禁带外的导模由于光子晶体的作用而辐射到空气中去, LED 的光提取效率继续增长, 一直到刻蚀深度为 160 nm 时, 达到了极值, 继续增加刻蚀深度光提取效率出现了波动.

同样也可以从几何光学的角度来分析, 只要发光点的出射角小于 θ_c , 在竖直逃逸光锥范围内, 光经过少数几次折射和反射后都能逃逸到空气中, 如图 9 中的黑线所示. 由于光子晶体的作用, 光可以通过切向的光逃逸圆锥逃逸到空气中, 如图 9 中的红线所示. 从图 9 中可以看出, 当刻蚀深度比较浅的时候, 位于缺陷中的发光点 B 发出的光比位于光子晶体中的点 A 发出的光逃逸到空气中的概率要大, 也就是当刻蚀深度比较浅时缺陷内的光提取效率比光子晶体的提取效率高的原因. 随着刻蚀深度逐渐增加, 光逃逸到空气中的概率达到最大. 如果

继续增加刻蚀深度, 到达有源层以下, 光在空气孔中多次反射, 才能到达 LED 的上表面, 在反射的过程中又有部分光折射到 GaN 层中去, 这就造成在达到一定刻蚀深度后光提取效率不再继续增加. 同一束光在不同刻蚀深度的情况下到达 LED 的上表面所需要的反射次数不同, 逃逸到 LED 上表面的能量也不同, 就会造成光提取效率的波动.

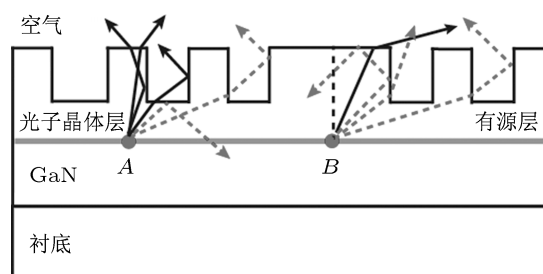


图 9 LED 有源层发出的光出射到空气面的几何示意图

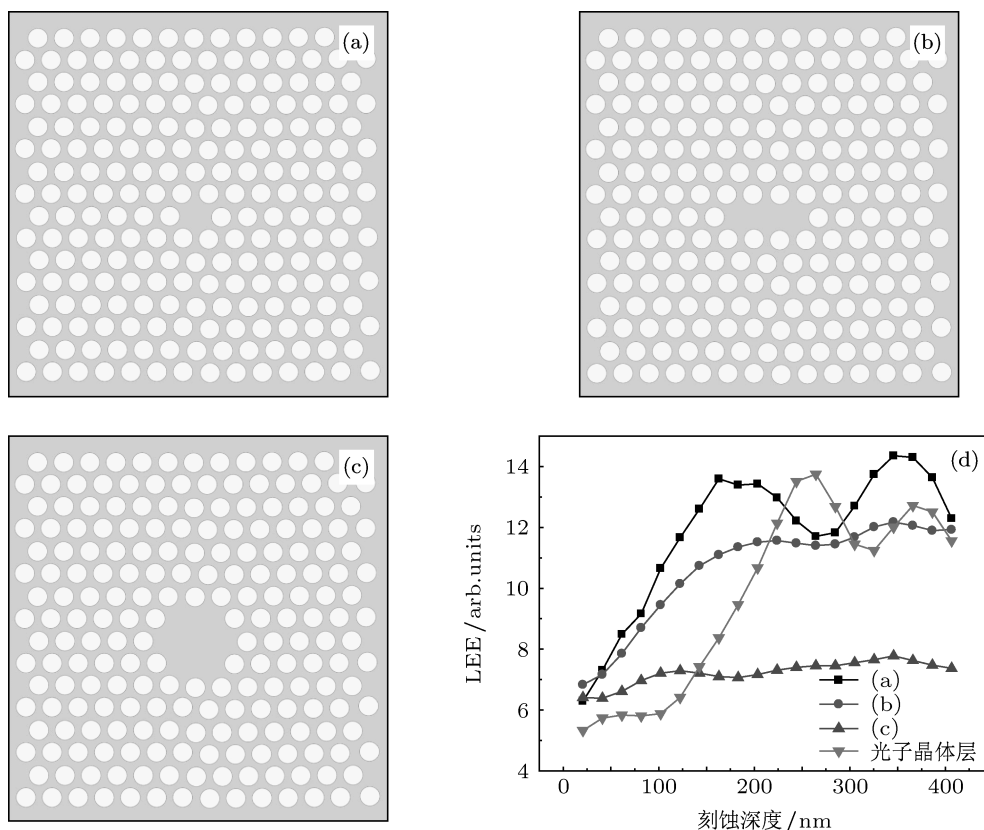


图 10 (a), (b), (c) 光子晶体中三种不同缺陷的示意图; (d) 发光点分别位于这三种缺陷内光提取效率随刻蚀深度的变化关系

实际生产中一般刻蚀到有源层一定深度后, 不会继续刻蚀, 因为继续刻蚀并不能继续提高 LED 的光提取效率. 无论是完美光子晶体还是缺陷光子

晶体, 只要刻蚀到 LED 的有源层, 就会减小 LED 有源层的面积. 光子晶体中的点缺陷会使光子晶体在不破坏有源层的情况下就得到一个很高的提取效

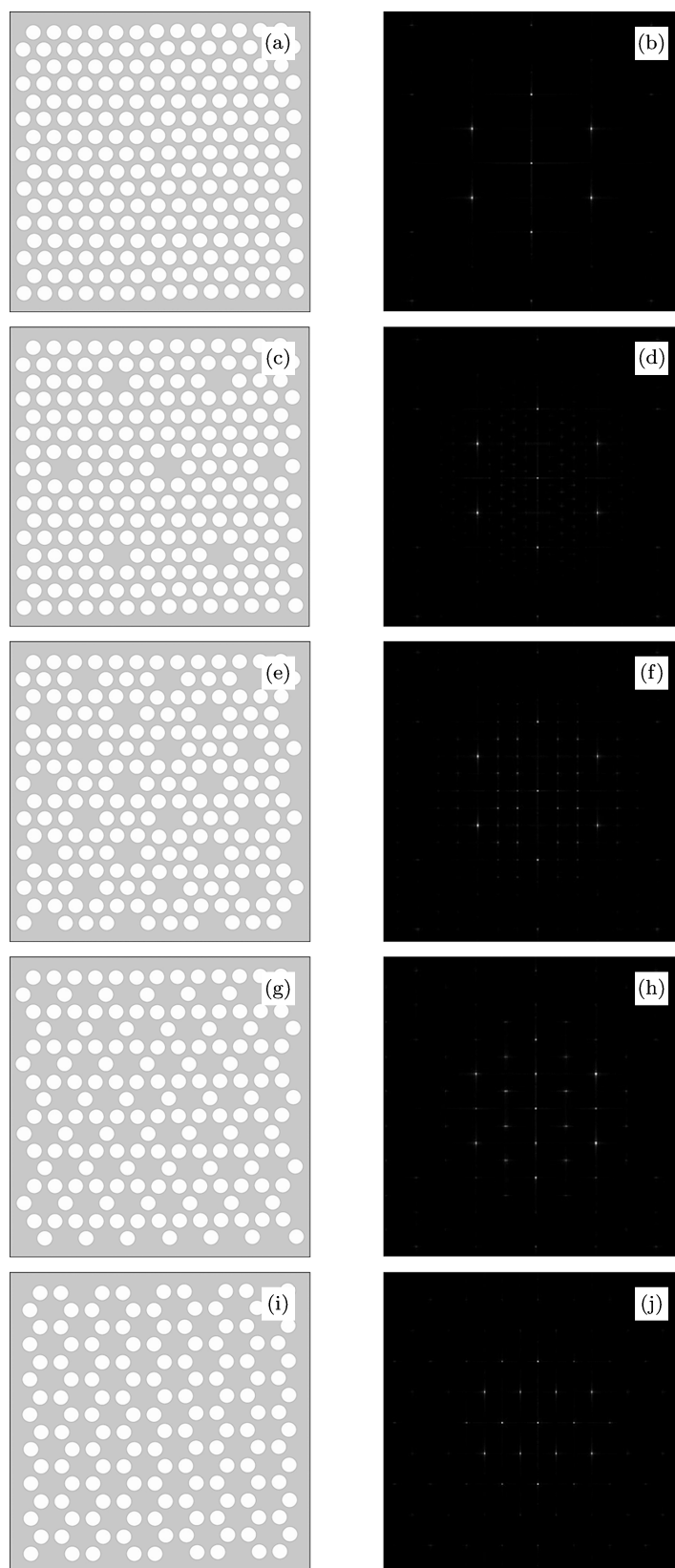


图 11 (a) 完美光子晶体的示意图; (c), (e), (g), (i) 为四种缺陷光子晶体; (b), (d), (f), (h), (j) 是 (a), (c), (e), (g), (i) 的傅里叶变换, 即空间频谱

率. 在刻蚀深度为 180 nm 时, 位于光子晶体缺陷内发光点的光提取效率是位于完美光子晶体内发光点的 1.58 倍, 因此可以在光子晶体引入合理的缺陷来提高 LED 的发光效率.

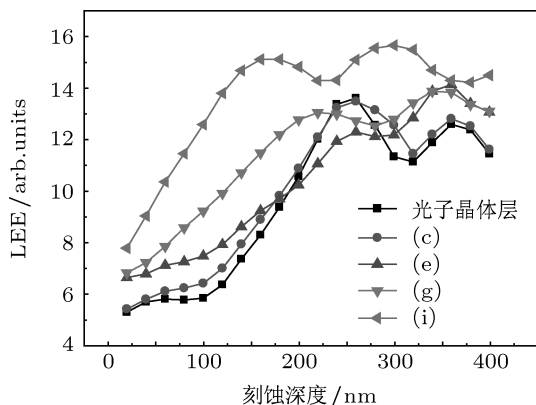


图 12 四种缺陷光子晶体 LED 光提取效率随刻蚀深度的变化关系

图 10(a), (b), (c) 分别是三种不同的缺陷结构, 在 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ 光子晶体中只存在一个这样的缺陷结构, 图 10(d) 为发光点分别位于这三种缺陷内

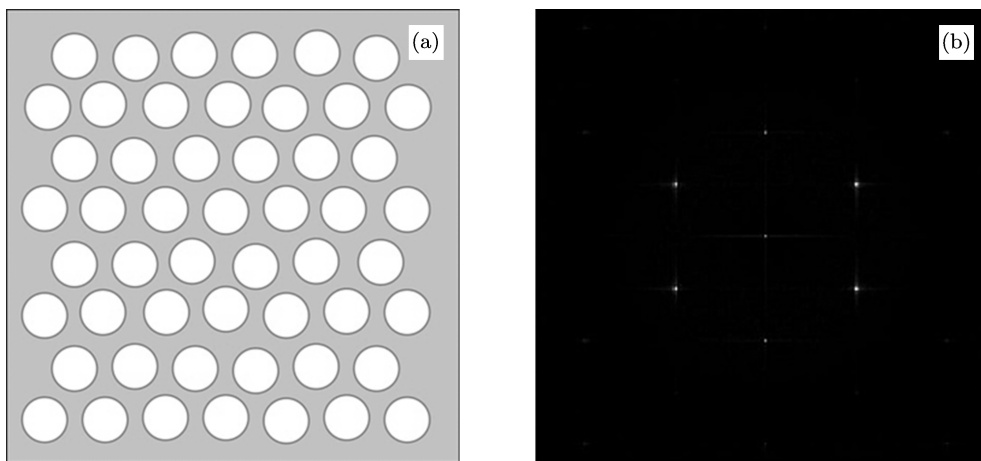


图 13 (a) 是具有 10% 的错位的光子晶体, 其晶格间距在 180—220 nm 之间, (b) 是 (a) 的空间频谱图

图 11(a) 是一个 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ 大小的完美光子晶体示意图, 图 11(c), (e), (g), (i) 分别是 4 种 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ 具有周期性缺陷结构的光子晶体示意图. 图 11(b), (d), (f), (h), (j) 是图 11(a), (c), (e), (g), (i) 所示光子晶体介电常数的傅里叶变换 (即空间频谱), 其中一级亮点对应着其主倒格矢 \mathbf{G}_0 , 各级亮点的强度表示其对应的倒格矢对光的衍射强度^[13,16]. 在三角晶格光子晶体中, 导模主要是由于倒格矢 \mathbf{G}_0 的作用, 其波矢 β_k 变成

光提取效率随刻蚀深度的变化关系. 仿真结果表明, 光子晶体缺陷的大小会影响 LED 的光提取效率. 在刻蚀深度小于 150 nm 时, 缺陷的光提取效率都要高于光子晶体的效率, 随着刻蚀深度的增加, 缺陷 (c) 的光提取效率保持一个平稳的趋势, 而缺陷 (a) 和缺陷 (b) 的光提取效率保持一个增长的趋势, 并且都高于光子晶体的光提取效率, 直至到有源层的位置. 当刻蚀深度到达 250 nm 时, 缺陷的光提取效率都要小于光子晶体的光提取效率. 缺陷 (c) 对 LED 的光提取效率不高, 是由于位于缺陷 (c) 的发光点发出的光要多次反射才能与光子晶体作用, 而我们在仿真结构的四周使用了 PML, 有些光还没有与光子晶体作用就被 PML 吸收了, 从而降低了位于缺陷 (c) 的发光点发出的光与光子晶体的作用. 总体来说, 在刻蚀深度为 180 nm 时, 缺陷 (c) 会减小 LED 光提取效率, 缺陷 (a) 和缺陷 (b) 会增加 LED 光提取效率. 因此, 可以在光子晶体中构造图 10(a) 所示的缺陷来增加光子晶体对 LED 的光提取效率.

了 $\beta_m - G_0 < k_0$, 从而能辐射到空气中去, 而其他高阶倒格矢 $\mathbf{G} = \sqrt{3}\mathbf{G}_0, 2\mathbf{G}_0$ 等的衍射作用比较弱^[13], 倒格矢 \mathbf{G}_0 的分布和大小对 LED 的光提取效率有很大的影响^[16]. 图 12 为图 11(c), (e), (g), (i) 三种缺陷光子晶体 LED 光提取效率随刻蚀深度的变化关系. 图 11(c) 所示的缺陷光子晶体和完美光子晶体的光提取效率相近. 由于其缺陷很少, 其空间频谱图 11(d) 和完美光子晶体的空间频谱图 11(b) 相似, 主要的倒格矢 \mathbf{G}_0 相一致. 图 11(e)

所示的缺陷光子晶体, 在刻蚀深度小于 200 nm 时, 其光提取效率比完美光子晶体的光提取效率要高; 当刻蚀深度在 250 nm 时, 其光提取效率达到了极值, 但比完美光子晶体的光提取效率低. 图 11(f) 是图 11(e) 所示的缺陷光子晶体的空间频谱, 其频谱产生了很多的次级大, 而与主倒格矢 G_0 相距较远, 这些次级大倒格矢在总倒格矢中的比例增加, 而对光提取效率的作用很弱, 因此导致了其光提取效率的减小. 图 11(g) 和 (i) 所示的两种光子晶体在刻蚀深度小于 200 nm 时, 其光提取效率要高于完美光子晶体的光提取效率. 在刻蚀深度为 180 nm 时, 其光提取效率分别达到了完美光子晶体的 1.4 倍和 1.6 倍, 这对于 LED 的制造是有实际应用价值的. 图 11(h) 和 (j) 分别是图 11(g) 和 (i) 所示的缺陷光子晶体的空间频谱图. 图 11(h) 和 (j) 也产生了次级大, 与图 11(e) 相比较, 这些次级大与主倒格矢 G_0 的距离很近, 其对光提取效率的贡献很大, 因此其光提取效率的最大值要与完美光子晶体的光提取效率相近, 而在未刻蚀到有源层的情况下提取效率分别达到了完美光子晶体的 1.4 倍和 1.6 倍, 并且具有这种空间频谱分布的光子晶体 LED 的出光方向性要高于三角晶格光子晶体^[17]. 因此可以

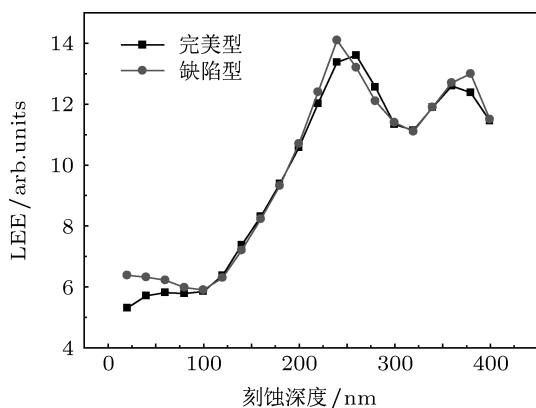


图 14 具有 10% 的错位的光子晶体其光提取效率随深度的变化

通过分析光子晶体的空间频谱分布来分析光子晶体对 LED 光提取效率的影响, 也可以设计具有特殊空间频谱分布的复杂结构的光子晶体来提高 LED 的光提取效率. 这对设计高光提取效率的光子晶体结构和制造高效率的 LED 有着指导意义.

图 13(a) 是具有 10% 的错位的光子晶体, 其晶格间距在 180—220 nm 之间, 图 13(b) 是其空间频谱图, 与完美光子晶体的频谱相似. 图 14 是其光提取效率随深度的变化关系, 仿真结果表明其与完美光子晶体的光提取效率基本一致. 因此加工中的微小错位并不会降低 LED 的光提取效率.

4 结论

本文首先对实际的 LED 进行了简化, 建立了 GaN 基蓝光 LED 的法布里-珀罗微腔式模型, 在此基础上给出了光子晶体增强 LED 光提取效率的物理机理. 并用时域有限差分法对光子晶体中存在的不同缺陷对 LED 光提取效率的影响进行了研究, 并在仿真过程中利用 GPU 进行了加速. 仿真结果表明, 光子晶体少量缺陷或者微小错位对 LED 的光提取效率产生的影响比较小. 其中有些缺陷能增强光子晶体对 LED 的光提取效率. 本文对其物理机理进行了详细的分析, 并利用这些缺陷设计了一种具有缺陷的光子晶体. 在未刻蚀到有源层的情况下 (离有源层 20 nm), 其光提取效率达到了完美光子晶体的 1.6 倍. 通过对具有各种缺陷的光子晶体空间频谱分析可知, 光子晶体的倒格矢分布对光提取效率有很大的影响, 因此可以通过分析光子晶体的空间频谱分布来分析光子晶体对 LED 光提取效率的影响, 也可以设计具有特殊空间频谱分布的复杂光子晶体来提高 LED 的光提取效率. 这对设计高光提取效率的光子晶体结构和制造高效率的发光二极管有指导意义.

- [1] Schubert E F, Kim J K 2005 *Science* **308** 1274
- [2] Yeh D M, Huang C F, Chen C Y, Lu Y C, Yang C C 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 171103
- [3] Chen Y X, Zheng W H, Chen W, Chen L H, Tang Y D, Shen G D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8083 (in Chinese) [陈依新, 郑婉华, 陈微, 陈良惠, 汤益丹, 沈光地 2010 物理学报 **59** 8083]
- [4] David A, Meier C, Sharma R, Diana F S, DenBaars S P, Hu E, Nakamura S, Weisbuch C 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 101107
- [5] Xing Y H, Han J, Deng J, Li J J, Xu C, Shen G D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1233 (in Chinese) [邢艳辉, 韩军, 邓军, 李建军, 徐晨, 沈光地 2010 物理学报 **59** 1233]
- [6] Li S Q, Wang L, Han Y J, Luo Y, Deng H Q, Qiu J S, Zhang J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 098107 (in Chinese) [李水清, 汪莱, 韩彦军, 罗毅, 邓和清, 丘建生, 张洁 2011 物理学报 **60** 098107]
- [7] Kim J Y, Kwon M K, Lee K S, Park S J, Kim S H, Lee K D 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 181109
- [8] Yariv A, Yeh P (Translated by Chen H M) 2009 *Photonics-Optical Electronics in Modern Communications* (Beijing: Publish-

- ing House of Electronics Industry) pp487–488 (in Chinese) [亚里夫, 耶赫 (陈鹤鸣译) 2009 光子学 —— 现代通信光电子学 (北京: 电子工业出版社) 第 487—488 页]
- [9] David A 2006 *Ph. D. Dissertation* (Santa Barbara: University of California)
- [10] Berenger J P 1994 *Comput. Phys.* **114** 185
- [11] Zhang B 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5677 (in Chinese) [张波 2005 物理学报 **54** 5677]
- [12] David A, Fujii T, Sharma R, McGroddy K, Nakamura S, DenBaars S P, Hu E L, Weisbuch C, Benisty H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 061124
- [13] Liu S B, Zhu C X, Yuan N C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2804 (in Chinese) [刘少斌, 朱传喜, 袁乃昌 2005 物理学报 **54** 2804]
- [14] Wiesmann C 2009 *Ph. D. Dissertation* (Regensburg: Regensburg Universität,)
- [15] Fujita M, Takahashi S, Tanaka Y, Asano T, Noda S 2005 *Science* **308** 1296
- [16] Rattier M, Benisty H, Stanley R P, Carlin J F, Houdré R, Oesterle U, Smith C J M, Weisbuch C, Krauss T F 2002 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **8** 238
- [17] David A, Fuji T, Matioli E, Sharma R, Nakamura S, DenBaars S P, Weisbuch C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 073510

Study on the light extraction efficiency of GaN-based light emitting diode by using the defects of the photonic crystals*

Yue Qing-Yang Kong Fan-Min Li Kang[†] Zhao Jia

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

(Received 13 February 2012; revised manuscript received 9 May 2012)

Abstract

Many studies have shown that the photonic crystals and surface nanostructures can improve the light extraction efficiency of light emitting diode (LED). The defects and disorders exist in photonic crystals inevitably as the manufacturing technology limitations, and so the light extraction efficiency of LED will be changed correspondingly. In this work we perform a simulation study on defects and disorder of photonic crystals by the finite-difference time-domain (FDTD) method, and we speed up the FDTD by GPU acceleration technology. Simulation results show that a small number of defects in photonic crystals LED do not reduce the LED light extraction efficiency. Instead, the light extraction efficiency of LED will be increased by adding some defects into the photonic crystals. We give a detailed analysis of its physical mechanism. We design a kind of photonic crystals with defects, and its light extraction efficiency achieves 1.6 times that of the perfect photonic crystals.

Keywords: light emitting diode, photonic crystals, light extraction efficiency, finite-difference time-domain

PACS: 85.60.Jb, 78.66.Fd, 78.20.Bh, 42.70.Qs

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2009CB930503, 2009CB930501) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61077043).

[†] E-mail: kangli@sdu.edu.cn