

利用光子晶体提高 InP 基 LED 出光效率*

杜 伟[†] 许兴胜 孙增辉 鲁 琳 高俊华 赵致民 王春霞 陈弘达

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083)

摘要: 应用 FDTD 方法计算了二维无限大光子晶体的能带结构, 并制备出了 InP 基二维平板结构的光子晶体器件. 在制备过程中尝试了仅用 PMMA 做掩模以及 PMMA 和 SiO₂ 做掩模两种方法. 结果表明, 不使用 SiO₂ 做掩模的情况下, 由于 PMMA 胶选择性较差, 在刻蚀过程中难以保证图形的准确转移. 而增加 SiO₂ 掩模后, 获得了图形质量良好的光子晶体结构. 成功实现了利用光子晶体结构增强 LED 的出光效率, 与未制作光子晶体结构的 LED 相比, 光子晶体结构 LED 的出光效率可在原来基础上提高 1 倍以上. 并且随着晶格常数的增加, 出光效率进一步提高.

关键词: 光子晶体; 电子束曝光; 反应离子束刻蚀; LED 出光效率

PACC: 4270Q

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)05-0921-05

1 引言

半导体发光二极管(LED)在显示、照明和通信等领域有着广泛的应用前景. 但在通常的发光器件中由于内全反射产生的传输模而导致出光效率受到很大的限制, 近年来提出了很多改善 LED 出光效率的方法, 如表面粗糙化、谐振腔法等, 采用这些方法都观察到了不同程度的出光效率的提高.

由于光子晶体中存在类似于半导体中的电子禁带的光子禁带, 因此有望成为新一代的光半导体, 近年来成为人们的研究热点^[1]. 由于光子晶体中光子禁带的存在, 使得某些特定频率的光子不能通过, 这种特性可以用来实现多种具有优异特性的光电子器件, 如光子晶体激光器、光子晶体大角度弯曲波导^[2]等. 最近 Fan 等人从理论上计算出可以利用光子晶体提高 LED 的出光效率.

本文主要研究利用光子晶体的带隙结构提高 LED 的出光效率. 利用时域有限差分法从理论上分析了晶格常数的改变对禁带位置变化的影响以及相应的对 LED 出光效率的影响, 利用半导体工艺的方法制备出了光子晶体结构, 从实验上验证了光子晶体提高 LED 出光效率的效果.

2 光子晶体结构的理论分析和实验制作

2.1 能带结构分析

FDTD 方法主要用来计算时域上电磁波在光

子晶体内部的传播和散射, 通过分析同一时刻不同位置的电磁场分布情况, 以及不同时刻同一位置的电磁场分布情况, 实现了分析光子晶体内部电磁场传播过程的目的. 利用 FDTD 方法不仅能够分析光子晶体的能带结构, 更可以获得同一时刻不同位置或者不同时刻同一位置电磁场分布情况^[3]. 我们利用二维 FDTD 方法获得了光子晶体的能带结构, 同时也分析了改变晶格常数时光子晶体能带位置的变化情况. 图 1 所示为 $a = 600\text{nm}$, $r/a = 0.3$ 时的二维无限大光子晶体 TE 模的光子晶体能带结构图, 从图中可以发现归一化频率范围为 $0.21 \sim 0.28$ 的光子禁带, 在此频率范围内光子态密度为零. 计算还发现在 TM 偏振模式的能带结构中没有出现禁带.

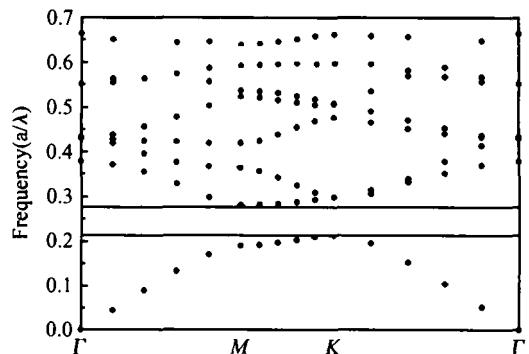


图 1 二维无限大光子晶体中 TE 模的光子能带结构图

Fig. 1 2D infinite photonic crystal band structure (TE mode)

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2003AA311020)和国家自然科学基金(批准号: 60345008, 60377011)资助项目

[†] 通信作者. Email: duwei@semi.ac.cn

2005-08-22 收到, 2005-10-11 定稿

2.2 光子晶体的微加工

半导体材料上光子晶体结构的制作有多种方法,但与半导体工艺相容的加工工艺在实现光电集成上具有优势.由于微加工技术的提高,使得像光子晶体这样微细结构的器件制作越来越精确.目前有多种加工光子晶体的方法,我们主要采用了利用电子束曝光(electron beam lithography, EBL)生成图形,利用反应离子束刻蚀(RIE)转移图形的方法.

首先尝试了仅采用 PMMA 胶做掩模,以直接将图形由胶转移到 InP 材料上的方法制作光子晶体结构.利用 EBL 定义光子晶体图形.为了增大刻蚀工艺中掩模版与材料的选择性,显影后在高温环境

中烘烤晶片 2h 以上,以使 PMMA 掩模更加坚硬.利用 RIE 系统直接刻蚀 InP 材料.刻蚀中采用 $CH_4 + H_2 + Ar$ 混合气体,刻蚀完成后的图形如图 2 所示.由图可见,由于 PMMA 掩模版的选择性较差,导致刻蚀之后的图形已经变形.按照理论设计和 EBL 定义的图形是在材料上形成空气孔的结构,刻蚀后的结果为锥形的材料柱,说明刻蚀过程中的侧蚀较为严重,使相邻的孔互相连通,形成了锥形的柱状结构.即使如此,该工艺下刻蚀得到的图形的均匀性仍然保持良好,由此也说明了通过优化工艺,提高掩模的选择性,能够得到需要的图形.

图 3 所示为在以上工艺基础上增加 SiO_2 做掩模,利用半导体微加工工艺制作光子晶体的典型步骤.

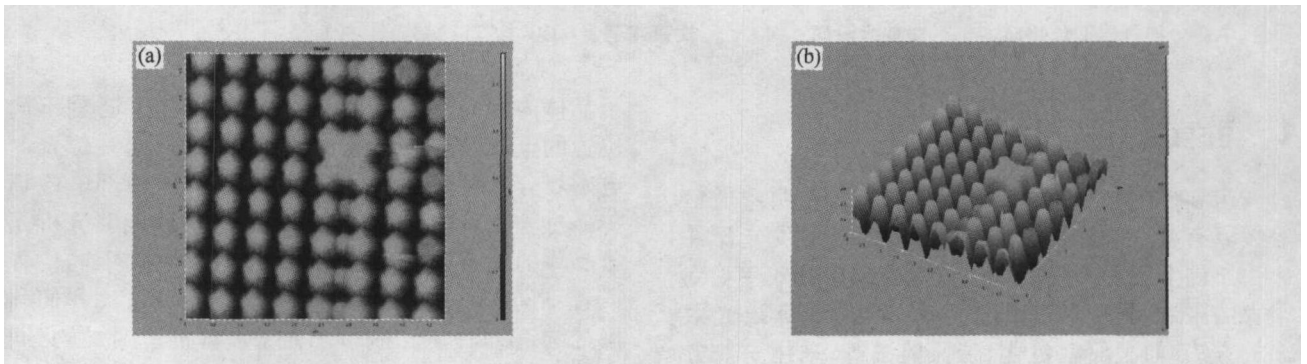


图 2 仅用 PMMA 做掩模,利用 RIE 直接刻蚀 InP 后的 AFM 照片 (a) RIE 直接刻蚀 InP 后 AFM 观察到的二维图;(b) RIE 直接刻蚀 InP 后 AFM 观察到的三维图

Fig. 2 AFM image of only use PMMA as mask (a) 2D AFM image of result after RIE;(b) 3D AFM image of result after RIE

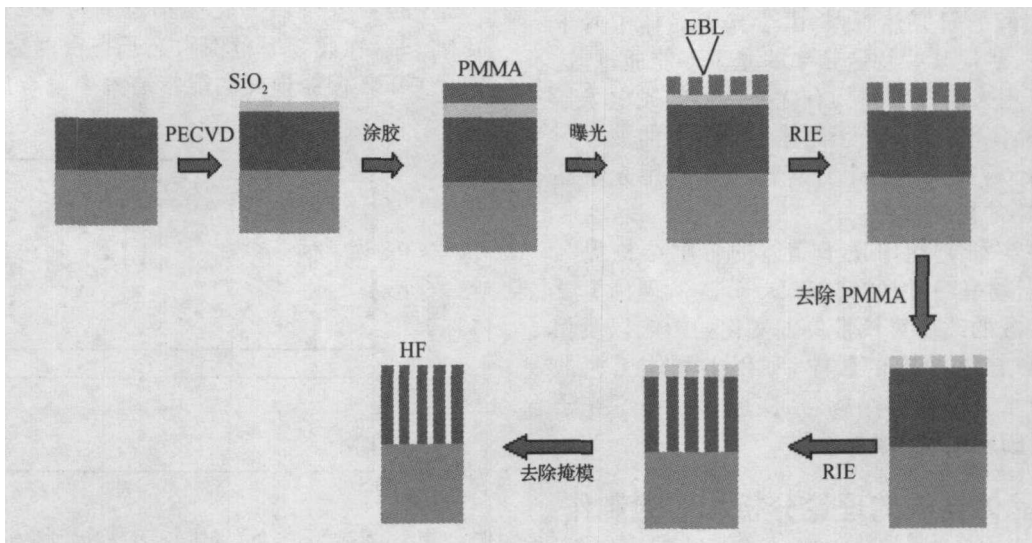


图 3 基于微加工工艺的光子晶体制作主要步骤

Fig. 3 Main processes of fabrication of photonic crystal

首先采用 PECVD 技术在材料上淀积 SiO_2 ,淀积温度 300 ,薄膜厚度 180nm;清洗后利用匀胶机在 SiO_2 上涂覆 200nm 厚的 PMMA 胶;然后利用电子束曝光技术在 PMMA 胶上定义图形;曝光后,将

芯片置入显影液中显影 10s;取出清洗,然后放入恒温烤箱中 150 烘烤坚膜 30min.利用反应离子刻蚀设备(RIE 型号:MPI-500)将图形由 PMMA 中转移入 SiO_2 ,刻蚀过程中采用 $CF_4 + O_2$ 混合气体,氧

气体积百分比为 5%。刻蚀前首先将反应室抽真空，然后充入混合气体，气体流量为 80sccm，保持气压 1.3332Pa，打开射频电源，射频功率设置为 150W，开始刻蚀过程。刻蚀后未去除 PMMA，利用原子力显微镜 (AFM) 观察到的图形示于图 4。图形转入 SiO₂ 层之后，即可利用 SiO₂ 层作为新的掩模版刻蚀 InP 层。

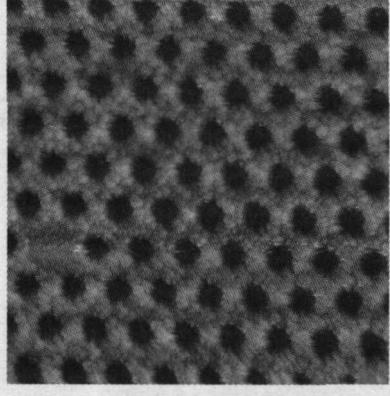


图 4 RIE 刻蚀 SiO₂ 后的正方晶格的光子晶体结构 AFM 照片
Fig. 4 AFM image of result after RIE by using PMMA and SiO₂ as mask

图形转移到 SiO₂ 中后，利用 RIE 系统直接刻蚀 InP 材料。刻蚀中采用 CH₄ + H₂ + Ar 混合气体。刻蚀完成后的图形如图 5 所示。由图可见，增加 SiO₂ 掩模后，利用 RIE 刻蚀，在合适的工艺参数下可以制作出良好的光子晶体图形。

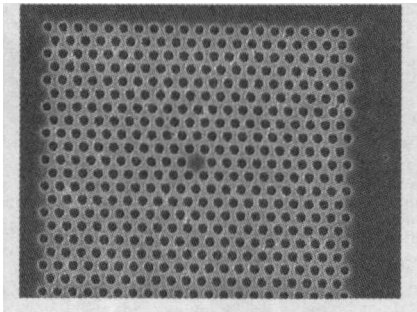


图 5 用 SiO₂ 做掩模利用 RIE 刻蚀 InP 后的光子晶体图形
Fig. 5 Photonic crystal image of result after RIE by using SiO₂ as mask

3 测试与分析

由于目前实现的光子晶体 LED 大部分为基于光致发光的结构，测试方法和手段也集中于如何实现 LED 的激光泵浦。由于光子晶体 LED 中的微腔结构面积只有几十平方微米，甚至几平方微米，因此如何获得小的泵浦光斑，并把光斑对准微腔区域而

不照射到其他区域 (防止非辐射复合产生的热量引起器件的大幅度升温而导致器件性能下降)，对光路的设计提出了很高的要求。在实验中采用的测试系统的基本结构如图 6 所示。利用该测试系统完成了光子晶体 LED 的 PL 谱测试。

按照光路的顺序，光子晶体有源器件的激光泵浦和信号检测系统主要包含如下结构和部件：如图 6 所示，从一个激光器 (波长 532nm，功率 100mW) 出射的泵浦光束，被一个介质膜反射镜反射，进入下一个反射镜，在该反射镜，泵浦激光光束与从可见光源发射而来的可见光一起经过下一个部分反射镜后被显微物镜聚焦到光子晶体试样的表面。聚焦后的光斑最小可达 5μm × 5μm 左右。光子晶体试样中被泵浦光激发出来的荧光或者激光光束被显微物镜收集后成为平行光传输，经过多个反射镜后可以被收集进入光谱分析仪进行分析，光谱分析仪产生的信号经过锁相放大后进入微机进行信号处理，得出器件的发射光谱。为了将泵浦光源的聚焦光斑对准试样的微腔缺陷区域，采用了增加可见光束对器件进行照明，并利用可见光宽带反射镜将被试样表面反射出的可见光耦合到 CCD 观测系统中，从而观察试样的表面结构。

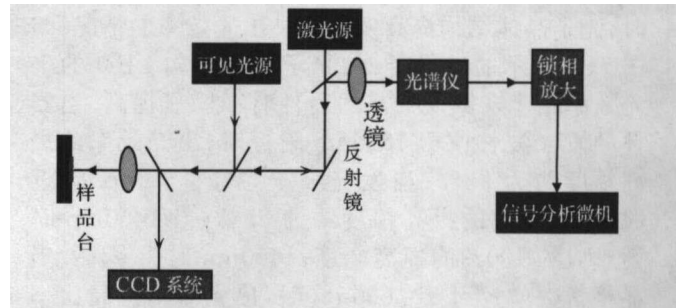


图 6 光子晶体激光器激光泵浦微区测试系统光路示意图
Fig. 6 Test system of photonic crystal laser by laser pump

图 7 所示分别为固定 $r/a = 0.3$ ，不同晶格常数 $a = 525, 550, 600\text{nm}$ 时光子晶体结构对 LED 出光效率的提高结果。图中的三条曲线分别对应在相同的激光泵浦测试条件下，泵浦光斑对准完整光子晶体区域和对准未做任何工艺区域 (即 InP/ InGaAsP 量子阱外延片) 的 PL 谱。从图中的测试结果可以发现，相同测试条件下，不同区域的出光功率不同，即出光效率不同。在波长 1400 ~ 1600nm 的范围内，含有光子晶体区域的出光功率明显高于未制作光子晶体结构的区域，可见光子晶体结构的引入可以明显提高发光器件的出光效率。由于光子晶体结构的光子带隙与光子频率有关，因此光子晶体结构对器件效率的提高也与器件的发光波长有关，不同波长下的发光效率提高不同。此现象可在图中发现，出光效

率提高最明显的区域为波长 1400 ~ 1600nm 附近, 波长越短, 出光效率的提高越明显. 例如在图 7(a) 中, 当波长位于 1600nm 附近时, 器件的出光效率提高为 10% 左右, 随着波长的减小, 出光效率随之增大, 当波长位于 1550nm 时出光效率的提高为 26%; 波长为 1450nm 时, 提高幅度为 90%; 当波长位于 1400nm 附近时, 出光效率的提高可达 60% 以上, 由此可见出光效率提高的峰值在波长为 1450nm 附

近. 根据理论分析, 光子晶体结构的引入除了能够引入光子禁带, 使部分频率的自发发射光被抑制, 提高器件的内部效率外, 当器件发光频率位于光子晶体禁带之上, 即辐射模区域时, 由于光子晶体的作用, 可在平板结构的发光器件中属于传输模的部分模式转化为光子晶体发光器件中的辐射模, 从而使更多的光模辐射到空气中, 此即光子晶体提高发光器件出光效率的基本原理^[4].

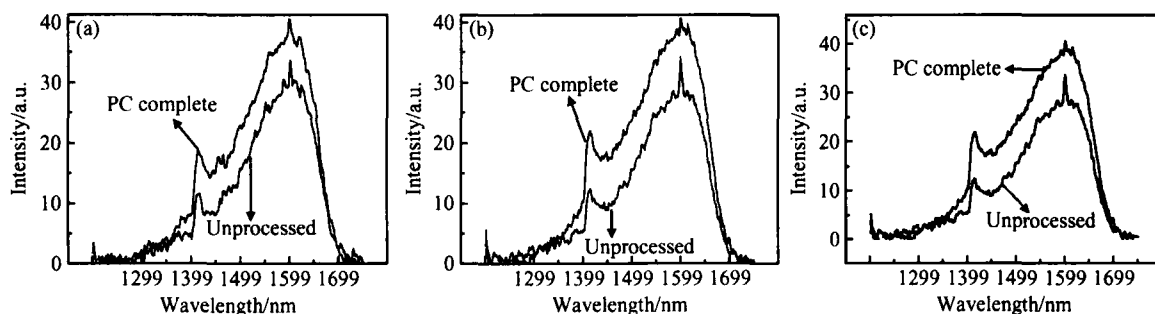


图 7 光子晶体结构参数对 LED 出光效率的提高效果图 ($n/a = 0.3$) (a) $a = 525\text{nm}$; (b) $a = 550\text{nm}$; (c) $a = 600\text{nm}$

Fig. 7 Images of photonic crystal enhances extraction efficiency in LED ($n/a = 0.3$) (a) $a = 525\text{nm}$; (b) $a = 550\text{nm}$; (c) $a = 600\text{nm}$

图 7(b) 所示为晶格常数 $a = 550\text{nm}$, $n/a = 0.3$ 时, 光子晶体结构提高发光器件出光效率的情况. 与图 7(a) 所示的结果类似, 光子晶体结构 LED 的出光效率相对未做该工艺的器件有了明显提高. 当器件的发光波长位于 1600nm 附近时, 出光效率的提高幅度约为 33%; 当发光波长位于 1550nm 附近时, 出光效率的提高幅度约为 38%; 当 1450nm 时则对应约 100% 的提高幅度; 1400nm 时为 93%. 当晶格常数增大到 $a = 600\text{nm}$ 时, 出光效率提高比率继续增大, 如图(c) 所示. 这主要是由于光子晶体结构参数的改变所引起的. 根据光子晶体能带结构的特点, 当晶格常数增大时, 禁带位置发生红移, 移向更低的频率, 即长波长方向, 则有利于使实验中设计的 In-GaAsP 量子阱结构发光器件的发光波长处于能带中的泄漏模区域, 从而使更多的传输模转化为泄漏模, 提高出光效率^[5].

4 结论

利用 EBL 在 PMMA 胶上曝光可以生成良好的光子晶体结构图形. 在不作特殊的固化处理时, 若仅采用 PMMA 胶做掩模, 刻蚀中的侧蚀严重, 会破坏图形的完整性. 增加 SiO_2 掩模后, 利用 RIE 刻

蚀, 在合适的工艺参数下可以制作出良好的光子晶体图形. 光子晶体结构可以明显提高 LED 的出光效率, 而且出光效率的提高效果与光子晶体的晶格常数有关. 一定范围内, 随着晶格常数的增大, 出光效率的提高随之增大. 随着研究工作的不断深入, 光子晶体有望应用于高效率 LED 的制作中.

参考文献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous emission in solid state physics and electronics. *Phys Rev Lett*, 1987, 58:2059
- [2] Susumu N, Mitsuru Y, Masahiro I, et al. Polarization mode control of two dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design. *Science*, 2001, 293:1123
- [3] Ge Debiao. Finite difference time domain method in electromagnetic wave. Xi'an: Xidian University Press, 2002 (in Chinese) [葛德彪. 电磁波的时域有限差分法. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002]
- [4] Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, et al. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystal. *Phys Rev Lett*, 1997, 78(17):3294
- [5] Ryu H Y, Hwang J K, Lee Y J, et al. Enhancement of light extraction from two dimensional photonic crystal slab structures. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2002, 8(2):231

Enhancement of Light Extraction of LED by Photonic Crystal Structures^{*}

Du Wei[†], Xu Xingsheng, Sun Zenghui, Lu Lin, Gao Junhua, Zhao Zhimin,
Wang Chunxia, and Chen Hongda

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The band structure of a 2D infinite photonic crystal is calculated using the FDTD method. Slab photonic crystals with InP are fabricated. Two fabrication methods—one using only PMMA as mask and one using PMMA and SiO₂ as masks are used. The results show that the first method cannot yield an accurate pattern transfer, while the other method can. The extraction efficiency in an LED is enhanced successfully by use of the photonic crystal. The light extraction efficiency of the LED with the photonic crystal structure is twice as high as that of the unprocessed sample under the same testing conditions. Along with the increase of lattice constant, the extraction efficiency also increases.

Key words: photonic crystal; electron beam lithography; RIE; LED extraction efficiency

PACC: 4270Q

Article ID: 0253-4177(2006)05-0921-05

^{*}Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2003AA311020) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60345008, 60377011)

[†]Corresponding author. Email: duwei@semi.ac.cn

Received 22 August 2005, revised manuscript received 11 October 2005

©2006 Chinese Institute of Electronics