



国防科学技术大学

全国优秀博士学位论文丛书 [第四辑]

光子晶体应用理论研究

朱志宏 著

国防科技大学出版社

光子晶体应用理论研究

作 者 朱志宏

指导教师 季家镕 叶卫民

国防科技大学出版社
·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

光子晶体应用理论研究/朱志宏著. —长沙:国防科技大学出版社,2011.9
(国防科学技术大学全国优秀博士学位论文丛书.第四辑/王振国主编)

ISBN 978 - 7 - 81099 - 840 - 6

I. ①光… II. ①朱… III. ①光学晶体—研究 IV. ①O7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 008436 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)84572640 邮政编码:410073

<http://www.gkdcbs.com>

责任编辑:耿 筠 责任校对:王 嘉

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:10.5 字数:211 千

2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1 - 630 册

ISBN 978 - 7 - 81099 - 840 - 6

全套定价:300.00 元

序 言

当前,世界新军事变革迅猛发展,新一轮重大科技变革正在酝酿和发展,国防科技和武器装备的新突破即将来临,国家核心安全需求和维护国家战略利益对国防和军队现代化建设提出了新的更高要求。随着军队建设“三步走”发展战略第二步的实施,推进军队信息化建设,构建现代化的军事力量体系,迫切需求大批高素质新型军事人才。面对新的任务和挑战,军队学位与研究生教育的地位和作用比以往任何时候都突出。

国防科学技术大学肩负着为全军培养高级科学和工程技术人才与指挥人才,培训军队高级领导干部,从事先进武器装备和国防关键技术研究的重要任务。推进基础研究和前沿探索不断进步,提高自主创新能力和人才培养质量已经成为学校现阶段的核心任务。研究生朝气蓬勃,正处于创新思维能力最为活跃的黄金年龄,同时也是科研项目中的中坚力量,他们科研成果水平的高低在一定程度上代表着学校人才培养和科研的整体水平。全国优秀博士学位论文是我国博士研究生科研水平的集中反映,也是学校研究生教育水平、学术水平和创新能力的重要标志。近年来,在学校党委的正确领导下,全校同志的共同努力下,瞄准国防科技前沿,扎实推进教育教学改革,有力地促进了研究生尤其是博士研究生培养质量的提高。截至2010年,我校已获全国优秀博士学位论文和全国优秀博士学位论文提名论文共计30篇。

为加强高层次创造性人才的培养工作,提高研究生教育特别是博士生教育质量,鼓励创新精神,从2005年起,我们资助出版了我校全国优秀博士

学位论文和全国优秀博士学位论文提名论文。该系列丛书的出版系统总结了全国优秀博士学位论文的成功经验,对于培养更多、水平更高的高层次创造性人才,具有十分重要的启示作用。在此基础上,现将我校 2009 年度的 5 篇全国优秀博士学位论文和全国优秀博士学位论文提名论文汇集出版,供广大师生阅读和参考。

希望同志们以全国优秀博士学位论文作者为榜样,积极投身科研事业,推进基础研究和前沿探索,攀登世界科技高峰,努力追求学术卓越,出更多高水平学术成果,为国防和军队现代化建设作出更大的贡献。

国防科学技术大学研究生院

之松园

2011 年 5 月

2009 年国防科技大学 全国优秀博士学位论文及 全国优秀博士学位论文提名论文

全国优秀博士学位论文两篇：

航空宇航科学与技术学科，罗振兵博士的论文《合成射流/合成双射流机理及其在射流矢量控制和微泵中的应用研究》，导师夏智勳教授；

信息与通信工程学科，金添博士的论文《超宽带 SAR 浅埋目标成像与检测的理论和技术研究》，导师周智敏教授。

全国优秀博士学位论文提名论文三篇：

信息与通信工程学科，王剑博士的论文《量子密码协议理论研究》，导师沈荣骏教授；

计算机科学与技术学科，文梅博士的论文《流体系结构关键技术研究》，导师张春元教授；

光学工程学科，朱志宏博士的论文《光子晶体应用理论研究》，导师季家镕研究员。

摘 要

本书以光子晶体功能器件的理论设计为切入点进入光子晶体研究领域, 研究内容包括如下相关的四个方面:

(1) 仿真平台建立。光子晶体是一个复杂的多组元结构, 难以得到其能带结构及传输特性的解析解, 通常只能采用近似的处理方法或数值模拟。为了对光子晶体功能器件进行深入理论分析, 首先需要建立完整的光子晶体设计和仿真平台。对于实际的光子晶体三维数值模拟, FDTD 算法需要更大的存储容量和更长的计算时间, 为了解决此问题, 需要建立高性能并行计算平台。

(2) 功能器件原理结构设计。本课题主要从类比、优化改进、提出等三个途径开展光子晶体功能器件原理结构设计: 类比传统介质波导波分复用器设计光子晶体波分复用器; 优化 Y. H. Lee 研究小组提出的电激励光子晶体激光腔结构; 研究新的光子晶体波导腔原理和新型光子晶体光开关原理; 研究光子晶体环形腔的转动效应。

(3) 耦合技术研究。基于光子晶体的功能器件特征尺度为光波长, 比传统光学器件体积小得多。因此, 对于未来的集成光学系统来说, 光子晶体功能器件和传统光学器件之间的高效耦合是光子晶体器件应用的一个关键技术。

(4) 制备误差分析。在光子晶体功能器件的制备过程中, 由于工艺水平、实验设备等条件的限制, 制作出来的光子晶体结构并不能满足严格的空间周期性, 绝大多数情况下会与理想光子晶体有一定的随机误差。这种误差对光子晶体功能器件的性能有着怎样的影响也是本课题研究的内容。

围绕以上四个相关的内容, 本书研究得到的主要结果如下:

(1) 用 FDTD 和 VC++ 开发了能够仿真包含非线性、金属以及各种缺陷的二维光子晶体软件。软件具有良好的用户界面, 能够交互地、直观地、简洁地建立各种复杂结构的二维光子晶体模型。构建了用于高性能并行计算的微机机群环境, 用 MPI+

FORTRAN 设计了一个基于此机群环境的三维并行 FDTD 程序。光子晶体二维、三维完整仿真平台的建立为本书及以后的光子晶体理论研究打下了基础。该研究结果已正式发表(光学学报, 23(5), 522(2003); 光子学报, 35(6), 815(2006); 光子学报 33(6), 700(2004); 光通信技术, 27(12), 20(2003))。

(2) 类比传统介质波导分复用器分别提出了基于光子晶体定向耦合和多模干涉效应的两种粗波分复用器结构。这两种类型的光子晶体波分复用器都能高隔离度(约 20dB)宽带宽(约 20nm)地将不同波长的波分离开。该研究结果已正式发表(Physics Letter A, 372(14), 2534(2008); 光学学报, 23(10), 1237(2003); 光学技术, 30(4), 417(2004))。

(3) 提出了一种基于驻波不同位置处非线性效应不同的光控光原理, 并根据这个新的原理设计了一个包含三个非线性圆柱的直角波导和一个“T”型波导的二维光子晶体结构。这种光子晶体结构能够高速度(瞬时非线性效应)、低阈值、宽带宽(约 50nm)和高对比度(约 40dB)的实现不同频率或者同频率的光控光开关功能和光的与运算。该研究结果已正式发表(Optics Express, 14(5), 1783(2006))。

(4) 优化了 Y.H.Lee 研究小组提出的电激励光子晶体单缺陷激光腔结构, 将工作模式的 Q 值和 Purcell 因子分别提高 7 倍和 6.8 倍。该研究结果已正式发表(Journal of the Optical Society of America B, 24(1), 37(2007))。

(5) 提出了一种基于模式控制的光子晶体波导腔原理, 即用两个仅支持 0 阶模的单模窄波导来约束多模波导中的 1 阶模。

(6) 探讨性地将时域有限差分方法用于转动坐标系下光子晶体理论研究, 导出了转动坐标系下的差分方程和 PML 边界条件, 研究了光子晶体环形腔的转动特性。研究结果已正式发表(光学学报, 25(10), 1415(2005))。

(7) 提出了用级联缓变波导解决传统介质波导和光子晶体波导之间耦合问题的新思路, 其中折射率缓变部分分别由波导两边的半径按线性方式逐渐增大的空气孔实现。结果表明, 在光子晶体禁带范围内, 耦合系数一般在 80% 以上, 最高可达 95%。研究结果已正式发表(光子学报, 37(8), 1517(2008))。

(8) 提出了用耦合腔准直光子晶体波导口出射光的方法, 其准直原理可以由测不准原理解释。结果表明, 这种方法能宽带宽(约 100nm)和小发散角(约 -10° 到 $+10^\circ$)地实

现光的输出准直。该研究结果已正式发表(*Applied Physics B*, 86(2), 327(2007))。

(9)讨论了光子晶体制作过程中圆柱半径和晶格常数随机误差对光子晶体微腔和波导性能的影响。并根据这种影响,讨论了随机误差对光子晶体功能器件的影响,定性地得到了优化 Y. H. Yee 小组微腔结构的方法和基于多模干涉效应波分复用器容错能力较强的结论。该研究结果已正式发表(*Applied Physics B*, 88(2), 231(2007); *光学学报*, 24(6), 847(2004))。

总之,本书在光子晶体应用理论研究方面从建立完整的仿真平台入手,重点对提出的新型光子晶体功能器件及相关耦合系统进行了结构设计和性能仿真,最后研究了实验制作中不可避免的制备误差对光子晶体带隙特性和光子晶体功能器件性能的影响。本书的研究成果,对于推动光子晶体的实际应用具有重要的理论指导意义。

本书研究工作由 973 项目“光子/声子晶体基础研究”资助,已于 2006 年通过结题验收。

关键词: 光子晶体;时域有限差分法;仿真平台;波分复用器;光控光开关;激光腔;耦合;随机误差

ABSTRACT

In this thesis, we focus on the theoretical research on photonic crystal applications and from this original intention we try to promote the applications of PC one step forward. Our research mainly includes the following four aspects:

(1) To develop the platform for the design and simulation of PCs. PCs are always constructed by complex multicomponent structure, which makes it difficult to obtain the photonic band structure or transmission property analytically. Therefore the study of PC is always based on proper approximation or by numerical simulation. In order to study the functional PCs devices thoroughly, we must develop a comprehensive numerical platform for the design and simulation. However, the computation of 3D PCs is very time consuming and requires huge computer memories, so we have to develop parallel computation with high performance.

(2) To design the functional PC devices. By the way of analogism, optimization and proposing new idea, we mainly concentrated on the following subjects: to design the PC wavelength demultiplexers (WDM) by analogy with the conventional waveguide WDM, to optimize the electric pumped PC laser cavity proposed by Dr. Y. H. Lee's group, to study the working principle of new type of PC waveguide cavity and PC switching and to analyze the new effects when rotating the PC ring cavity.

(3) To study the coupling technique between PC devices with conventional optical devices. The characteristic dimension of PC devices is comparative to the optical wavelength, which is much smaller than conventional optical devices. Therefore how to couple efficiently the PC devices with the traditional optical devices is one of the key technique in the integrated optics.

(4) To analyze the fabrication errors of PCs. Due to the limitation of current technological level and equipments precision, it is hard to fabricate PCs with perfect periodicity. In most cases people can only get the PCs with some random deviations from well-structured ones. How this disorder affects the performance of PC devices is also in the scope of this thesis.

The main results in this thesis are listed as follows.

(1) We developed a two-dimensional (2D) PC simulation software written in Visual C++ based on finite-difference time-domain (FDTD) method. This software which provides a modern

graphical user interface can conveniently build all kinds of complex PC structures including nonlinearity, metal, dot and line defects. With the high-performance cluster consisted by personal computers, we also developed a parallel three-dimensional (3D) FDTD code written in Message Passing Interface (MPI) and Fortran. The computation platform is the basis for the theoretical study on for 2D and 3D PCs. The results are published on 光学学报 23(5), 522 (2003), 光子学报 35(6), 815(2006), 光子学报 33(6), 700(2004) and 光通信技术 27 (12), 20(2003).

(2) We designed two kinds of PC WDMs based on directional coupling and multimode interference effect through the way of analogizing with conventional waveguide. The two types of PC WDMs can both isolate wavelength effectively with about 20dB and with bandwidth of about 20nm. The results were published on Physics Letter A 372(14), 2534(2008), 光学学报 23 (10), 1237(2003) and 光学技术 30(4), 417(2004).

(3) We schemed a rectangle waveguide combined by three cylindrical rods with nonlinearity and a T-type waveguide based on 2D PC. These are proposed by the new light-by-light principle resulting from that the nonlinear optical effect differs for different positions of standing waves. We show that such PC waveguides can complete all-optical AND gate operation and all optical switch which has high speed, low threshold, wide bandwidth (of about 50nm) and high contrast between the OFF and ON state of about 40 dB. The results were published on Optics Express, 14(5), 1783(2006).

(4) We optimized the electrically driven single-cell photonic crystal laser cavity demonstrated by Dr. Y. H. Lee's research group. The Q factor and Purcell factor of modified cavity are enhanced by 7 and 6.8 times larger than the original one, respectively. The result was published on Journal of the Optical Society of America B, 24(1), 37(2007).

(5) We proposed a new principle for PC waveguide cavity based on mode control. In this new waveguide cavity, a single-mode narrow waveguide which operating only in the 0th order mode is enabled to confine 1st order mode in the multimode waveguide.

(6) We made tentative research on rotation effect in ring-shaped PC cavity and developed the FDTD method for simulating the PCs in the non-inertial frame. The result was published on 光学学报 25(10), 1415(2005).

(7) We put forward a new approach for high efficient coupling between the PC waveguide and the conventional dielectric waveguides. It is achieved by introducing a cascade tapered waveguide, in which the tapered refraction index is formed by increasing radii of air holes step by step. The study show that the coupling efficiency is usually larger than 80% within the bandgap

and highest coupling efficiency reaching 95%. The result was published on 光子学报 37(8), 1517(2008).

(8) We proposed a novel PC configuration consisting of coupled cavities to collimate the output from the PC surface and to obtain beaming of the light and enhanced transmission. This can be explained by uncertainty principle. We showed that such a configuration can demonstrate beaming of the light in a wide bandwidth of about 100nm and with narrow divergent angle within -10° to $+10^\circ$ roughly. The result was published on Applied Physics B 86(2), 327(2007).

(9) We studied and discussed how the random errors, including radius errors and position errors arising during fabrication affect the fundamental properties of PC cavity and the performance of PC functional devices. We optimized the microcavity proposed by Y. H. Lee group qualitatively. We found that the WDM based on multimode interference has better performance on the fault tolerance. The results were published on Applied Physics B 88(2), 231(2007) and 光学学报 24(6), 847(2004).

In conclusion, the thesis are focused on the theoretical research on applications of photonic crystals. We start with developing the computation platform for design and simulation. The thesis is emphasized on proposing and simulating the properties of the new PC functional devices and the involved coupling system. In addition we study the inevitably random error arising during fabrication and how it affects the bandgap of PC and the performance of the functional devices. The results obtained in this thesis are of great importance to develop new PC devices and promote the applications of PC devices in the near future.

This thesis is supported by the National key project of basic research "Basic research on photonic and photonic crystal" (973). This program was completed in 2006.

Key Words: photonic crystal (PC); finite-difference time-domain (FDTD); simulation platform; wavelength demultiplexer (WDM); light-by-light switching; laser cavity; coupling; random error

目 录

摘 要	(I)
-----	-------

第一章 绪 论

1.1 光子晶体理论研究概况	(1)
1.2 本书的选题背景、意义	(5)
1.3 本书的框架和主要内容	(6)

第二章 光子晶体时域有限差分方法及本书相关算法

2.1 光子晶体 FDTD 方法简介	(8)
2.1.1 麦克斯韦方程组	(8)
2.1.2 FDTD 方法求解	(9)
2.2 本书相关算法	(12)
2.2.1 非线性光子晶体的计算	(12)
2.2.2 金属光子晶体的计算	(14)
2.2.3 网格点上有效电磁参量的计算	(15)
2.2.4 离散傅立叶变换	(16)
2.2.5 透过率的计算	(17)
2.2.6 光子晶体能带结构的计算	(17)

2.2.7 微腔共振频率、本征模式、 Q 值、有效模体积和 Purcell 因子的 计算	(18)
2.2.8 时谐场振幅和相位的计算	(19)
2.2.9 时谐场功率的计算	(20)
2.2.10 近远场变换	(21)
2.3 本章小结	(22)

第三章 光子晶体仿真平台建立

3.1 FDTD 算法对计算机的性能要求	(23)
3.2 二维光子晶体仿真软件设计	(24)
3.2.1 软件设计思想	(24)
3.2.2 软件具体实现	(26)
3.3 光子晶体三维并行仿真平台建立	(27)
3.3.1 并行计算方案选择	(27)
3.3.2 PC 机群系统构建	(28)
3.3.3 FDTD 并行算法设计思想	(28)
3.3.4 FDTD 并行算法的具体实现	(31)
3.3.5 三维并行仿真平台性能测试	(31)
3.4 本章小结	(37)

第四章 光子晶体波分复用器

4.1 引言	(39)
4.2 基于光子晶体定向耦合的波分复用器	(41)
4.2.1 基于光子晶体定向耦合的波分复用器原理	(41)

4.2.2 结构与性能仿真	(43)
4.3 基于光子晶体多模干涉效应的波分复用器	(50)
4.3.1 基于光子晶体多模干涉效应的波分复用原理	(50)
4.3.2 数值结果与分析	(51)
4.4 本章小结	(55)

第五章 光子晶体光控光开关

5.1 引言	(56)
5.2 驻波光子晶体光控光开关	(59)
5.2.1 驻波光控光物理思想及原理	(59)
5.2.2 光子晶体光控光开关结构	(60)
5.2.3 数值模拟	(61)
5.3 本章小结	(65)

第六章 光子晶体激光腔

6.1 引言	(66)
6.2 优化 Yee 小组电激励光子晶体单缺陷微腔腔结构	(70)
6.2.1 本征模式及分析	(70)
6.2.2 优化物理思想	(73)
6.2.3 优化电激励微腔结构	(74)
6.3 基于模式控制的光子晶体波导腔	(77)
6.4 本章小结	(80)

第七章 光子晶体环形腔转动效应

- 7.1 非惯性坐标系下光子晶体 FDTD 方法 (81)
- 7.2 光子晶体环形腔转动特性研究 (83)
- 7.3 问题及探讨 (87)
- 7.4 本章小结 (87)

第八章 光子晶体功能器件耦合技术研究

- 8.1 引言 (88)
- 8.2 级联缓变光子晶体波导结构和传统介质波导的耦合 (90)
 - 8.2.1 级联缓变波导结构和耦合原理 (90)
 - 8.2.2 数值模拟与结果分析 (92)
- 8.3 耦合腔实现光的准直输出 (95)
 - 8.3.1 用耦合腔实现光准直输出的物理思想及原理 (95)
 - 8.3.2 数值模拟与结果分析 (98)
- 8.4 本章小结 (103)

第九章 制备误差对光子晶体功能器件性能的影响

- 9.1 引言 (104)
- 9.2 结果与分析 (105)
 - 9.2.1 计算方法 (105)
 - 9.2.2 随机误差对光子晶体带隙特性的影响 (106)
 - 9.2.3 随机误差对光子晶体微腔和波导特性的影响 (109)
 - 9.2.4 随机误差对光子晶体功能器件性能的影响 (115)

9.3 本章小结	(118)
第十章 总结与展望	
10.1 研究结论	(120)
10.2 展望	(122)
致 谢	(123)
读博期间以第一作者发表或撰写的学术论文	(125)
参考文献	(127)
后 记	(139)