



国防科学技术大学

全国优秀博士学位论文丛书 [第三辑]

# 微波光子晶体及其应用研究

付云起 著

2

888

国防科技大学出版社

# 微波光子晶体及其应用研究

付云起 著

国防科技大学出版社

·长沙·

### 图书在版编目(CIP)数据

微波光子晶体及其应用研究/付云起著. —长沙:国防科技大学出版社,2009.4  
(国防科学技术大学全国优秀博士学位论文丛书.第3辑/曾淳主编)

ISBN 978 - 7 - 81099 - 605 - 1

I. 微… II. 付… III. 光学晶体—应用—微波天线—研究 IV. TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 022486 号

国防科技大学出版社出版发行  
电话:(0731)4572640 邮政编码:410073  
<http://www.gfkdcbs.com>  
责任编辑:耿 筠 责任校对:唐卫葳  
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:13 字数:262 千  
2009年4月第1版第1次印刷 印数:1-1000册

ISBN 978 - 7 - 81099 - 605 - 1

全套定价:300.00 元

国防科学技术大学  
全国优秀博士学位论文丛书  
第3辑

---

主 编 曾 淳

副主编 王维平 王雪松 张春元 张航宇 周珞晶

---

# 序 言

积淀孕育创新，智慧创造价值。

寒窗苦读，拼搏奋斗的积淀凝聚成一本本厚积薄发的论文。博士学位论文是博士生学术水平、科研能力、创造性成果的集中体现，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。全国博士学位论文水平反映了我国高层次创新型人才培养的质量。作为国家 21 世纪教育振兴行动计划的重要内容，教育部每年评选 100 篇左右的全国优秀博士学位论文。该举措已成为提高研究生培养质量、鼓励创新、促进高层次创造性人才脱颖而出的重要措施。

自 1999 年教育部开展全国优秀博士学位论文评选以来，我校积极参加评选工作，同时参加湖南省和军队优秀博士、硕士学位论文的评选，并以此为契机，在我校研究生中大力倡导科学严谨的学风和勇攀高峰的精神，营造鼓励人才积极创新、支持人才实现创新的浓厚氛围，为学生的禀赋和潜能的充分开发创造一种宽松的环境；采取切实可行的措施，加强学科建设；通过深化研究生学位论文评阅制度改革，完善学位论文抽检制度，实施研究生创新工程，加强研究生导师队伍建设，建立激励机制，鼓励优秀人才脱颖而出等措施，不断完善质量保证体系和监督机制，全面提高研究生培养质量。迄今为止，我校已有 11 篇学位论文获全国优秀博士学位论文，另有 9 篇博士学位论文被评为全国优秀博士学位论文提名论

文。

睿智颖悟，优秀博士学位论文展现给我们的不仅仅是丰硕的科研成果，更是巨大的精神财富。全国优秀博士学位论文是我国优秀博士学位论文中的杰出代表，全国优秀博士学位论文作者是具有创造能力和竞争能力的高层次创造性人才，是支撑国家崛起的骨干创新力量。认真总结全国优秀博士学位论文的成功经验，对于进一步提高博士生教育的整体水平，培养数量更多、水平更高的高层次创造性人才，具有十分重要的启示作用。2005年3月，我们汇集出版了我校2004年及之前获得的10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；2007年4月，我们又汇集出版了我校2005—2006年获得的4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。在此基础上，现将我校2007—2008年获得的6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。此举旨在为广大在学博士生及其导师树立高水平博士学位论文的范本和学习榜样，也期望进一步推动我校研究生教育改革的深入发展，以培养高层次创新性人才为目标，认真总结创新性人才的培养经验和方法，深入探讨博士生教育改革的思路 and 措施。

当今世界，科学技术日新月异，科技创新已经成为社会生产力解放和发展的重要标志。科学技术的迅猛发展正在引发一场广泛而深刻的军事变革，信息化战争时代已经来临。在新的历史条件下，面对世界新军事变革的严峻挑战，面对推进中国特色军事变革和军事斗争准备的紧迫需求，军队研究生教育的地位和作用比以往任何时候都更加突出。

国防科技大学承担着为国家和军队信息化建设、研究开发国防高科技和先进武器装备、培养军队高级工程技术和指挥人才的历史使命，是

我军实现新军事变革和军队信息化建设的高层次人才培养和科学研究重要基地。提高人才培养的质量已成为我们现阶段亟须关注的问题之一。我们要在培养大批各类专业和指挥人才的同时，努力为优秀创新人才的脱颖而出创造条件。尤其要下功夫造就一批真正能站在世界科学技术前沿的学术带头人和尖子人才，以应对世界新军事变革的严峻挑战，为推进中国特色军事变革做出新的更大贡献。

国防科学技术大学研究生院

曾源

2008年12月于长沙

# 2007—2008 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

2007 年一篇全国优秀博士学位论文：

计算机科学与技术学科,祝恩博士的论文《低质量指纹图像的特征与识别技术的研究》,导师殷建平教授。

2007 年一篇全国优秀博士学位论文提名论文：

电子科学与技术学科,付云起博士的论文《微波光子晶体及其应用研究》,导师袁乃昌教授。

2008 年三篇全国优秀博士学位论文：

机械工程学科,王刚博士的论文《声子晶体局域共振带隙机理及减振特性研究》,导师温熙森教授；

控制科学与工程学科,武元新博士的论文《对偶四元数导航算法与非线性高斯滤波研究》,导师胡德文教授；

计算机科学与技术学科,李东升博士的论文《基于对等模式的资源定位技术研究》,导师卢锡城教授。

2008 年一篇全国优秀博士学位论文提名论文：

电子科学与技术学科,袁成卫博士的论文《新型高功率微波共轴模式转换器及模式转换天线研究》,导师钟辉煌教授。



分类号 TN011

UDC \_\_\_\_\_

学号 0049001

密级 \_\_\_\_\_

## 工学博士学位论文

# 微波光子晶体及其应用研究

博士生姓名：付云起

学科专业：电子科学与技术

研究方向：微波光子晶体

指导教师：袁乃昌教授

国防科学技术大学研究生院

二〇〇四年九月

# **Electromagnetic Characteristics of Microwave Photonic Crystals and Applications**

**Candidate: Fu Yun-qi**  
**Supervisor: Prof. Yuan Nai-chang**

A Dissertation  
Submitted in Partial Satisfaction of the Requirements for the Degree of  
Doctor of Philosophy  
in Electronic Science and Technology  
College of Electronic Science and Engineering  
National University of Defense Technology  
Changsha, Hunan, P. R. China  
September, 2004

# 摘 要

光子晶体是具有频率带隙的周期介电材料,自 20 世纪 80 年代末提出概念以来,受到了广泛关注,并且在微波频段得到了迅速发展。本文通过理论分析和实验相结合,深入研究了微波光子晶体的带隙机理及其基本特性,并在此基础上,对微波光子晶体的应用进行了有意义的探索。

首先研究了一维微波光子晶体传输线。将光子晶体填充到矩形金属波导中,可以获得带阻特性,当光子晶体具有缺陷时,在阻带中出现谐振模式。重点内容是光子晶体微带线,研究了底板蚀刻结构的光子晶体微带线,并提出级联结构来拓展带隙宽度;引入分形结构实现双带隙或多带隙;提出导带蚀刻的光子晶体微带线以解决封装问题;提出一种新型的光子晶体共面波导结构,使光子晶体微带线更适合于 MMIC 集成。

微带结构上的微波光子晶体被广泛关注,此处光子晶体的周期性是二维的。对于微带结构上微波光子晶体的分析,建立了全三维理论模型,利用 Floquet 原理提取一个周期单元进行计算。数值仿真采用周期格林函数与矩量法相结合,利用谱域导抗法得到微带结构的并矢格林函数,求解出光子晶体的能带结构。利用所建立的仿真工具,对多种微波光子晶体的带隙特性进行了计算。一部分是介质型的微波光子晶体,在分析模型中将介质层的厚度及接地板一并考虑,同时引入等效位移电流来模拟空气洞或介质块,比简化二维模型的结果更准确。另一部分是金属-电介质型的平面微波光子晶体,周期单元考虑了多种几何结构,包括十字振子、Jerusalem 振子、方形贴片、各种环结构等,同时还研究了具有介质覆盖层时光子晶体带隙的变化。

在光子晶体的研究中,一种 Mushroom 结构的光子晶体因为同时具有频率带隙和相内反射特性而成为研究热点,文中着重对这种微波光子晶体进行了研究。利用周期矩量法计算了其带隙特性,利用 FDTD 法计算了其反射相位。建立了等效媒质模型,将结构参数与电路集总元件联系起来,并且对此等效媒质模型进行了深入研究和改进,提高了设计的精度,实现了光子晶体的快速设计。在此基础上,提出了几种新型的高阻表面光子晶体结构,它们的优点是结构更加紧凑,非常适合于实际应用。

微波光子晶体的应用前景非常诱人,本文也在此方面作了一定的研究。研究了光子晶体在微带天线中的应用。以同轴馈电微带天线为例,研究了光子晶体对天线性能的影响,得到了设计光子晶体微带天线的基本原则和规律。实际设计了光子晶体口径耦合微带天线和光子晶体卫星导航接收天线。将光子晶体应用于波导口径天线的设计,包括波导开口天线和波导介质加载天线,天线的性能得到了较大的改善。

还研究了光子晶体在天线阵列中的应用。首先利用光子晶体设计微带二元天线阵,有效抑制了天线单元间的耦合;另外研究了光子晶体应用于相控阵天线的设计,在理论上计算了偶极子和微带贴片天线阵列的空间扫描特性,发现光子晶体能够抑制天线阵的扫描盲点。

**关键词:**光子晶体;光子带隙;周期结构;矩量法;时域有限差分法;格林函数;波导;微带线;微带天线;相控阵天线

# ABSTRACT

Photonic crystals or photonic bandgap (PBG) structures are periodic metal-dielectric material with a frequency bandgap. PBG structures have been extensively studied since the concept came into being in the end of 1980's. The research work of PBG structures in microwave region progresses rapidly because of the advantage in fabrication and measurement. The research work presented in this dissertation covers both the numerical and experimental understanding of PBG materials and their applications.

First one-dimensional PBG microwave transmission line is studied. PBG material is filled into the rectangular metal waveguide and a stop band is obtained. When defect is introduced, a resonant mode appears in the stop band. Major work is on microstrip line. The defected ground structure (DGS) has been studied and a broad stop band is realized using cascade technology. Fractal structure is introduced into DGS for the aim of dual-stopband or multi-stopband characteristics. A novel structure with defected stripline is proposed to overcome the problem in encapsulation. A novel PBG coplanar waveguide is proposed for MMIC intention.

PBG structures based on microstrip substrate are mostly noticed, and here the periodicity of PBG structure is in two directions. When considering PBG structure on microstrip substrate, full 3-D analytical model is build and the infinite periodic structure is reduced to one single cell by applying Floquet theorem. The numerical simulations are performed using periodic Green's functions plus method of moments (MoM) and the dyadic Green's functions are obtained by using spectral domain immittance approach. A nontrivial solution of algebraic equations requires the matrix determinant to be zero, which results in a characteristic equation. Then the bandgap structure can be solved from the roots of this equation. The bandgap characteristics of several kinds of PBG structures are calculated using this numerical tool. One is dielectric type of PBG structure, the substrate thickness and the ground plane are included in the full 3-dimensional analytical model and the air hole or dielectric block is replaced with equivalent displacement current. The results are much more accurate compared to that using simplified 2-dimension model. Another is metal-dielectric planar PBG structure, periodic elements with various geometry shape are studied, including cross dipole, Jerusalem dipole, square patch, various ring

structures. In addition, PBG structure with a dielectric core layer is studied, too.

A mushroom type of PBG structure has attracted much attention because of its in-phase reflection and surface - wave bandgap. In this dissertation, this PBG structure is comprehensively studied. The bandgap structure is calculated using periodic method of moment, and the plane wave reflection phase is calculated using FDTD. An effective medium model is set up and establishes a relation between structure parameters and the lumped elements. Improvement is made to this model and the accuracy is increased. Based on this model, several novel PBG structures are proposed to obtain more compact size, which will be more fit for practical applications.

The foreground of PBG structure is very attractive. The applications of PBG structures in microwave antennas are studied. One part is microstrip antenna. The effect of PBG structure to the characteristics of microstrip antenna is analyzed and the common rules are obtained in designing PBG microstrip antennas. Aperture coupled patch antenna and satellite receiving antenna are practically designed using PBG materials. Another part is waveguide aperture antennas, and their performance is improved using PBG materials.

PBG structure is also adopted in antenna array. First PBG structure is used in a two-element microstrip array antenna, and the coupling is decreased. PBG structure is also used in infinite phased arrays of printed dipoles and rectangular microstrip patches. Array structure is presented and scanning characteristics have been calculated. The results show that the scan blindness is eliminated.

**Key words:** photonic crystal; photonic bandgap; periodic structure; moment method; FDTD; Green's function; waveguide; microstrip line; microstrip antenna; phased array

# 目 录

摘 要.....	( i )
----------	-------

## 第一章 绪 论

1.1 光子晶体简介.....	( 1 )
1.1.1 光子晶体起源 .....	( 1 )
1.1.2 光子晶体基本特性 .....	( 2 )
1.2 光子晶体的物理基础 .....	( 3 )
1.2.1 光子晶体的周期性描述 .....	( 3 )
1.2.2 光子晶体中的 Maxwell 方程 .....	( 4 )
1.2.3 Bloch-Floquet 原理.....	( 4 )
1.2.4 能带结构 .....	( 5 )
1.3 微波频段的光子晶体 .....	( 6 )
1.3.1 微波光子晶体结构及应用 .....	( 6 )
1.3.2 微波光子晶体的分析方法 .....	( 10 )
1.4 本文的研究对象和方法 .....	( 10 )
1.5 本文的主要内容和章节安排.....	( 11 )

## 第二章 一维微波光子晶体传输线

2.1 引言 .....	( 14 )
2.2 光子晶体波导.....	( 14 )

2.2.1	一维和二维光子晶体波导	(15)
2.2.2	光子晶体波导中的缺陷	(17)
2.3	光子晶体微带线	(18)
2.3.1	DGS 光子晶体微带线	(19)
2.3.2	DGS 级联结构	(21)
2.3.3	分形 DGS 结构	(23)
2.3.4	导带蚀刻光子晶体微带线	(25)
2.3.5	光子晶体共面波导	(27)
2.3.6	光子晶体微带线的优化	(30)
2.4	小结	(33)

### 第三章 微带结构微波光子晶体

3.1	引言	(34)
3.2	微带结构微波光子晶体带隙分析	(34)
3.2.1	谱域格林函数	(35)
3.2.2	周期结构格林函数	(43)
3.2.3	伽略金法	(45)
3.2.4	电流展开函数	(46)
3.2.5	解的收敛性	(48)
3.2.6	本征根的求解	(49)
3.3	介质型微波光子晶体	(49)
3.3.1	介质型微波光子晶体理论模型	(50)
3.3.2	与二维模型比较	(54)
3.3.3	介质穿孔型微波光子晶体	(57)
3.3.4	介质块型光子晶体	(64)
3.3.5	介质谐振器型光子晶体	(69)



3.4 金属-电介质型微波光子晶体	(73)
3.4.1 周期格林函数	(73)
3.4.2 微带结构的表面波特性	(74)
3.4.3 金属-电介质微波光子晶体	(75)
3.4.4 光子晶体带隙特性测试	(79)
3.4.5 环周期单元的微波光子晶体	(80)
3.4.6 介质覆盖对光子晶体带隙的影响	(87)
3.5 小结	(95)

## 第四章 高阻表面型微波光子晶体

4.1 引言	(96)
4.2 Mushroom 光子晶体结构	(96)
4.3 周期矩量法计算带隙	(97)
4.3.1 附着模电流基函数	(97)
4.3.2 带隙计算结果	(101)
4.4 等效媒质模型	(106)
4.4.1 等效媒质模型	(106)
4.4.2 电容和电感	(107)
4.4.3 表面阻抗	(108)
4.4.4 反射相位	(109)
4.4.5 等效媒质模型的改进	(110)
4.5 反射相位的 FDTD 计算	(112)
4.6 新型高阻表面结构	(114)
4.6.1 交指型结构	(114)
4.6.2 十字型结构	(119)
4.7 小结	(121)