

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 200324027

UDC \_\_\_\_\_

廈門大學

碩 士 学 位 论 文

纳米线光学微腔与正方形光学微腔

模式特性研究

Study on Mode Characteristics for Nanowire  
Optical Microcavity and Square Optical Microcavity

王苗庆

指导教师姓名: 蔡志平 教授

黄永箴 研究员

专业名称: 光学

论文提交日期: 2006 年 5 月

论文答辩时间: 2006 年 6 月

学位授予日期: 2006 年 6 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2006 年 6 月

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

---

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

- 1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

---

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 摘要

光学微腔，由于其独特的特点，正越来越受到人们的关注，它适合做很多光通讯领域的器件，如激光器、光学滤波器、光波分复用器、光开关、光调制器以及非线性频率转换器等。纳米线光学微腔以及正方形光学微腔有着其特殊光学性质，本论文对纳米线光学微腔以及正方形光学微腔进行了理论分析、数值模拟，并且实验制作了半导体正方形光学微腔并对其进行了光荧光测量和分析。其主要内容如下：

首先，本文详细介绍了光学微腔近几年的发展，研究背景以及光学微腔的应用。

其次，详细介绍了时域有限差分方法（FDTD），包括差分格式的推导、Mur吸收边界条件与完全金属匹配层 PML 条件的运用、激发源的选择以及数值稳定性等，由于时域有限差分得到的是时域的信息，为得到频域信息，必须把时域信号转化为频域，所以还介绍了一种基于 Baker 算法的 Padé 近似频谱分析方法。

另外，介绍了柱坐标下的时域有限差分以及 Mur 吸收边界条件，然后利用圆柱坐标下角量子数对称，把三维 FDTD 算法转换为二维的方法，模拟了不同尺寸下自由纳米线微腔以及带有衬底的纳米线微腔。记录纳米腔内某几点电场或磁场的时域信号，然后通过 Padé 近似把时域信号转换到频域，得到纳米腔的谱线，用洛伦兹对曲线进行拟和得到不同尺寸，不同结构纳米线微腔的模式频率以及品质因子  $Q$  值，最后，通过得到的  $Q$  值以及纳米线模式的群折射率，计算出纳米线不同端面的反射率。结果表明，在半径只有六分之一模式波长的纳米腔结构中， $HE_{11}$  模式的  $Q$  值比  $TE_{01}$  和  $TM_{01}$  的  $Q$  值大的多，但是， $TE_{01}$  模式的  $Q$  值随半径的增加而飞快的增大。当纳米腔半径为模式波长四分之一时， $TE_{01}$  模式  $Q$  值比  $HE_{11}$  和  $TM_{01}$  模式  $Q$  值大的多。假设整个纳米线都是增益媒体并且有很大的光限制因子，我们能够预期， $Q$  值只有几百或者更低的纳米腔，其域值增益与面发射的异质结激光器差不多。

最后，用二维 FDTD 方法，模拟了 2 微米的半导体正方形微腔，并且对腔内的模式进行了分析，以及跟 Marcatili 方法进行了比较，发现两种方法得到的模式频率非常接近。用感应耦合等离子（ICP）等干法刻蚀设备，制作了腔长

30~150 微米，材料为 InGaAsP/InP 的半导体正方形微腔，在室温连续波下，测量了其光荧光谱，并观察到一系列的共振峰。经过分析发现，这些峰是正方形微腔的 FP 模式而非基横模或类 WG 模式，分析了其原因并提出了改进实验方法、材料、测试和工艺等建议。

**关键词：**时域有限差分；纳米线；正方形微腔

厦门大学博硕士论文摘要库

## Abstract

Optical microcavities have attracted great attention due to their unique properties, and they are suitable for the fabrication of optical communication devices, such as lasers, optical filters, optical demultiplexers, optical switches, optical modulators and nonlinear optical frequency converters, etc. This dissertation mainly studies the mode properties of nanowire optical microcavity and square optical microcavity through theoretical analysis and numeric simulation because of their special optical properties. This part contains the following contents:

Firstly, we introduce the developments of the optical microcavities in these years, research background and the applications in detail.

Secondly, we introduce the Finite-Difference in Time-Domain method (FDTD) in detail, including the deduce of the difference format, the usage of the Mur and Perfect Matched Layer (PML) boundary absorbing conditions, the selection of the exciting source and numeric stability, etc. For the information from FDTD is in time domain, we must transfer it in frequency domain to obtain the frequency information. So we introduce an analysis method for frequency spectrum: Padé approximation based on Baker's algorithm.

What's more, we introduce the FDTD with Mur's absorbing boundary condition in the cylindrical coordinates. Then, we transform the three-dimensional (3-D) problem to two-dimensional (2-D) one based on the azimuthal symmetry of the nanowires to simulate the free-standing nanowire microcavity and nanowire microcavity with sapphire substrate at different size. Then the time variation of a selected field component in some points inside the nanowire microcavity is recorded as FDTD output, and the Padé approximation based on Baker's algorithm is used to calculate the field spectrum for obtaining the  $Q$ -factor and the modes frequencies by fitting the Lorentzian curve. At last, we calculate the mode reflectivities for different nanowire cavity from the mode  $Q$ -factor and the group refractive index. The results show that  $HE_{11}$  mode has much larger  $Q$ -factor than that of  $TE_{01}$  and  $TM_{01}$  modes as



the radius of the cavity is one sixth of the wavelength, but the Q-factor of  $TE_{01}$  mode increases quickly with the increase of the radius.  $TE_{01}$  mode can have much larger Q-factor than that of  $HE_{11}$  and  $TM_{01}$  mode for the nanowire cavity as the radius is about a quarter of the mode wavelength. Accounting that the whole nanowire is a gain medium and the confinement factor is very large for the nanowire cavity, we can expect that the nanowire cavity with Q-factor of several hundreds have the threshold gain comparable or even less than that of edge-emitting heterostructure lasers.

Last but not the least, the 2-Dimensional FDTD technique is used to simulate the semiconductor square optical microcavity with  $2\mu\text{m}$  side length, and we analyses the mode characteristics which is compared with the mode frequency obtained from the Marcatili method. The result shows that the mode frequency from these two methods is very close. Also, we used the Induced Coupled Plasma (ICP) etching equipment to fabricate the InGaAsP/InP square microcavities with side length from 30 to  $150\mu\text{m}$ . Distinct peaks are observed in the PL spectra of the fabricated Square microcavities measured at room temperature under continuous wave condition, which are verified to correspond to the FP modes of the square microcavities, not the fundamental transverse modes or WG-like modes. We analyses the reasons and bring out the suggestion of the experimental method, materials, test method and process, etc.

**Key words:** FDTD; Nanowire; Square microcavity;

## 目 录

<b>第一章</b>	<b>绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1	光学微腔对自发辐射的作用.....	2
1.2	光学微腔的分类.....	2
1.3	光学微腔的研究现状.....	3
1.3.1	微盘类微腔激光器.....	3
1.3.2	光子晶体类微腔激光器.....	8
1.3.3	正多边形微腔激光器.....	9
1.3.4	纳米线微腔激光器.....	10
1.4	本论文的主要内容.....	11
<b>第二章</b>	<b>时域有限差分方法</b> .....	<b>13</b>
2.1	时域有限差分方法的基本原理.....	13
2.1.1	麦克斯维方程.....	13
2.1.2	Yee 氏有限差分网格及方案.....	15
2.1.3	数值稳定性条件分析.....	17
2.1.4	激发源设置.....	18
2.2	FDTD 吸收边界条件分析.....	19
2.2.1	Mur 吸收边界条件作用机理.....	19
2.2.2	PML 吸收边界条件作用机理.....	21
2.3	基于 Baker 算法的 Padé 近似方法.....	27
2.4	本章小结.....	29
<b>第三章</b>	<b>纳米线光学微腔的模式特性研究</b> .....	<b>31</b>
3.1	引言.....	31
3.2	三维柱坐标下的时域有限差分.....	31
3.2.1	三维柱坐标下时域有限差分介绍.....	31
3.2.2	吸收边界条件.....	34
3.3	半导体纳米线光学微腔模式特性的理论研究.....	36

3.3.1	纳米线光学微腔的计算模型.....	36
3.3.2	纳米线光学微腔的数值结果.....	37
3.4	<b>本章小结.....</b>	<b>43</b>
<b>第四章</b>	<b>正方形光学微腔的模式特性研究.....</b>	<b>45</b>
4.1	正方形光学微腔模式特性的理论研究.....	45
4.2	半导体正方形微腔的实验制作.....	50
4.2.1	刻蚀简要介绍.....	51
4.2.2	正方形微腔制作的材料结构.....	51
4.2.3	正方形微腔制备的工艺流程.....	52
4.3	正方形微腔的光荧光测量以及分析结果.....	55
4.2.1	测试系统介绍.....	55
4.2.2	测量结果.....	56
4.4	分析和讨论.....	60
4.5	本章小结.....	61
<b>第五章</b>	<b>总结.....</b>	<b>62</b>
	<b>参考文献:.....</b>	<b>63</b>

## Contents

<b>Chapter 1 General Review.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Optical Microcavity Effect on the Spontaneous Emission.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Optical Microcavity Sort.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Optical Microcavity Research in Situ.....</b>	<b>3</b>
1.3.1 Microdisk Microlasers.....	3
1.3.2 Photonic Crystal Microlasers.....	8
1.3.3 Polygonal Microlasers.....	9
1.3.4 Nanowire Microlasers.....	10
<b>1.4 Main Contents of the Paper.....</b>	<b>11</b>
<b>Chapter 2 Finite-Difference in Time-Domain (FDTD) Method.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Principle of the FDTD method.....</b>	<b>13</b>
2.1.1 Maxwell Equation.....	13
2.1.2 Yee's Finite-Difference Grid and Scheme.....	15
2.1.3 Numeric Stable Condion.....	17
2.1.4 Exciting Source Setting.....	18
<b>2.2 FDTD Absorbing Boundary Condition Analysis.....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Mur Absorbing Boundary Condition Principle.....	19
2.2.2 PML Absorbing Boundary Condition Principle.....	21
<b>2.3 Padé Approximation based on Baker's Algorithm.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4 Chapter Summary.....</b>	<b>29</b>
<b>Chapter 3 Study on Modes Characteristics for Nanowire Optical</b>	
<b>Microcavity.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 FDTD in 3-D Cylindrical Coordinates.....</b>	<b>31</b>
3.2.1 Introduction of the 3-D FDTD.....	31
3.2.2 Absorbing Boundary Condition.....	34

<b>3.3</b>	<b>Study on Modes Characteristics for Nanowire Optical Microcavity..</b>	<b>36</b>
3.3.1	Numeric Models of the Nanowire Optical Microcavity.....	36
3.3.2	Numeric Results of the Nanowire Optical Microcavity.....	37
<b>3.4</b>	<b>Chapter Summary.....</b>	<b>43</b>
<b>Chapter 4 Study on Modes Characteristics of Square Optical</b>		
	<b>Microcavity.....</b>	<b>45</b>
<b>4.1</b>	<b>Theoretically Study on Modes Characteristics for Square Optical</b>	
	<b>Microcavity.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>Fabrication of Semiconductor Square Microcavity.....</b>	<b>50</b>
4.2.1	Brief Introduction to Etching Process.....	51
4.2.2	Material Structure of Square Microcavity.....	51
4.2.3	Process for Fabrication of Square Microcavity.....	52
<b>4.3</b>	<b>PL Spectra Test and Results for Square Microcavity.....</b>	<b>55</b>
4.3.1	Introduction to the Test System.....	55
4.3.2	Test Results.....	56
<b>4.4</b>	<b>Analysis and Discussion.....</b>	<b>60</b>
<b>4.5</b>	<b>Chapter Summary.....</b>	<b>61</b>
<b>Chapter 5 Summary.....</b>		<b>62</b>
<b>References: .....</b>		<b>63</b>

## 第一章 绪论

光通讯与信息处理的飞快发展,对光电子器件提出了新的要求。这些要求包括小型化、高效率、高集成、低成本、快速响应等。微腔类光电子集成器件,正是基于此背景而提出来的,但其先决条件是制作这些器件的工艺水平有了大幅提高,如先进的外延生长以及超精细的加工技术。光学微腔,由于其独特的特点,正越来越受到人们的关注,它适合做很多光通讯领域的器件,如激光器、光学滤波器、光波分复用器、光开关、光调制器以及非线性频率转换器等。这些关键器件可以用在很多地方,而其实用化必将给光通讯与信息带来一个崭新的世界。半导体光学微腔类研究主要侧重两个方面:一、半导体微腔的模式分析以及器件制作工艺;二、对微腔物理本质的探索,即腔量子电动力学研究。很多发达国家的科研人员,如美国,日本,英国等,做了大量半导体光学微腔的研究,我们实验室侧重第一个方面,也做了大量的工作,取得了一定的成果。

### 1.1 光学微腔对自发辐射的作用

Purcell 在 1946 年首先在理论上预言了谐振腔对自发辐射有增强和抑制作用[1]。14 年后, Drexhage 从实验上证实了这一预言[2]。差不多又过了二十年, Goy[3]、Hulet[4]、Jhe[5]、heinzen[6]、Martini[7]等人又做了很多更深入的研究,其中包括观察到微波和光波波段谐振腔对受激原子自发辐射的增强和抑制作用。

提起自发辐射,很长一段时间,人们一直以为是物质所固有的性质。但是事实是,自发辐射并不如人们想象的那样,而是受激原子与真空中的电磁场耦合作用的结果。假设受激原子处在一个光学谐振腔内,而不是在真空中,那么其自发辐射的性质将发生很大的改变,其根本原因在于光学谐振腔的存在改变了光学模式的空间分布和频率分布。当受激原子的自发辐射的波长与光学谐振腔的谐振波长相吻合时,受激原子的自发辐射将会得到增强,其增强倍数就是 Purcell 因子;相反,当受激原子自发辐射的波长和光学谐振腔的谐振波长不一致时,受激原子的自发辐射将被抑制甚至消失。

根据文献[1]，增强因子即 Purcell 因子可以写为如下形式：

$$F = Q\lambda^3 / 8\pi V \quad (1-1)$$

上式中， $Q$ 代表模式的品质因子， $V$ 是有效的模式体积。式(1-1)表明，Einstein 自发辐射跃迁几率的增强因子  $F$ 与模式的品质因子  $Q$ 成正比，与腔的模式体积成反比。所以提高模式的品质因子或者减小模式体积都可以提高增强因子即 Purcell 因子。这时，不光只有自发辐射速率的提高，而且自发辐射的光子全部进入光学谐振腔的模式之中。因此，对于尺寸只有微米级，与光波长可比拟的微腔，或者尺寸只有纳米级，比光波长小的纳米腔来说，由于其非常小的模式体积，这将导致具有很高的自发辐射几率，其理想的自发辐射耦合因子将会趋于 1，因此，用光学微腔作为激光器时，可以实现极低阈值甚至无阈值的激光器。

## 1. 2 光学微腔的分类

光学微腔与纳米腔有很多的优点，他们的特点在于具有很小的模式体积和相当高的品质因子。我们用  $V$ 代表光学微腔的模式体积， $Q$ 代表模式的品质因子，那么光学微腔的 Purcell 因子正比于  $Q/V$ 将远远大于普通的光学谐振腔。光学微腔按一般分类，文献[8]分为三类：1、Fabry-Pérot (FP) 类型[9]；2、Whispering-Gallery (WG) 类型[10]；3、Photonic Crystal (PC) 光子晶体类型[11]。这三种类型分别如图 1.1 所示。

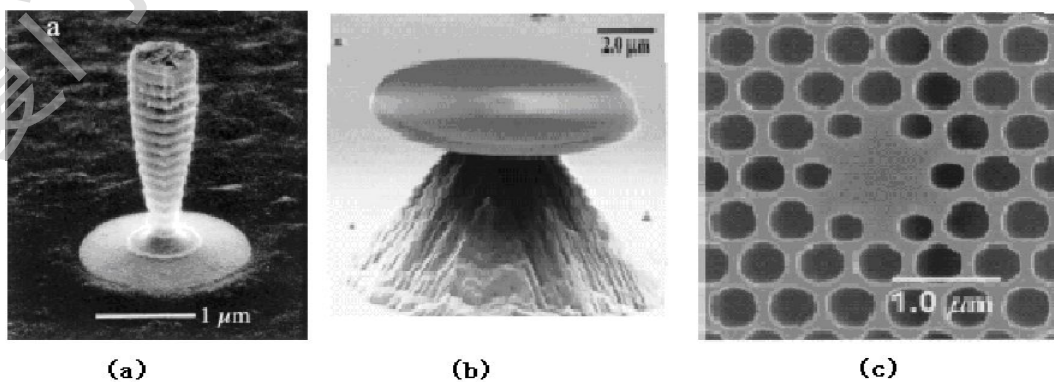


图 1.1 半导体微腔的三种结构图 (a) F—P 型 (b) W—G 型 (c) PC 型

下面，我们来分析一下，这三种结构的主要工作原理。FP 腔的结构往往是

有源区为多量子阱材料的短结构，上下为四分之一波长的分布布拉格反射堆 (DBR)，相当于反射镜，形成很高的反射率。这种结构的微腔，由于其工作腔长较短，单程增益小，如果要有很高的  $Q$  值，往往需要很高的反射率，这就要求上下要有很多对的 DBR 结构；WG 型结构的微腔，往往是有高折射率的有源区，周围是低折射率的限制层 (或者是空气) 组成的微小结构，通过内外的大折射率差，来形成全反射，经过多次反射后，把腔内模式限制在微腔内，形成所谓的回廊模 (Whispering-Gallery)，由于大部分能量被限制在腔内，一般可以形成很大的  $Q$  值，这种形式的结构最常见的就是微盘、微环、微球、微柱或者多边形微腔等；光子晶体类型的微腔，就是通过在光子晶体中，引入一定的缺陷来实现的。光子晶体是在 1987 年，由 Yablonovitch[12] 和 John[13] 分别提出来的，它的最大的优点就是更小的模式体积，以及更大的 Purcell 因子。文献[14]中，由 FDTD 计算表明，单模光子晶体缺陷激光器的自发发射因子可以大于 0.8，可以说光子晶体缺陷激光器是目前最接近自发发射因子为 1 的所谓“无阈值激光器”。

### 1. 3 光学微腔的研究现状

#### 1. 3. 1 微盘类微腔激光器

微腔一直是国内外研究的重点，而微盘类激光器也一直处于技术的尖端，主要朝两个方向发展，一是降低阈值，提高工作温度；二是如何实现微盘类激光器的定向输出。解决好这两个问题，也就是让微盘类激光器走向实用化迈出了巨大的一步。

我们知道，第一个回音壁模式的微盘激光器是由美国 AT&T 贝尔实验室的 McCall 等人，于 1992 年采用 InGaAs/InGaAsP/InP 半导体材料制成的[15]。在 0 °C 下，连续光泵浦实现了激射，可以说是微盘类激光器的里程碑。图 2 (a) 即为该小组利用 HCl 溶液对 InP 进行选择性的腐蚀而形成的微腔。微盘的直径尺寸为 3~10 微米，盘厚为 100 纳米。HCl 溶液腐蚀形成的 InP 柱子，其作用是是在源盘的周边形成较大的折射率差 (InGaAsP 与空气)，从而形成对光的强限制，而且可以避免让微盘中的模式耦合进入衬底从而减小模式的  $Q$  值，同时 InP 柱子也起到支撑其上面微盘的作用。同一年，也是该研究小组就报导了第一个室温脉冲



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库