

学校编码: 10384
学 号: 19820141152969

分类号_密级_
UDC_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

复合涡旋倍频效应的实验研究

Experimental detection of complex-vortex's second
harmonic generation

赵媛丽

指导教师姓名: 陈理想 教授
专 业 名 称: 光 学
论文提交日期: 2017 年 5 月 日
论文答辩时间: 2017 年 月 日
学位授予日期: 2017 年 月 日

答辩委员会主席:
评阅人:

2017 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈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其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月

摘 要

光学涡旋由于其独特的光场特征，可广泛应用于多个领域中，例如，成像系统，光信息处理，量子通信，生物显微操作等等。轨道角动量光由于其具有相位因子，因此是典型的涡旋光束，尤其是它作为光学镊子和在量子纠缠方面的应用可圈可点，因此，光学涡旋一直以来受到研究者的关注和重视，也让我们重新认识和思考光。轨道角动量作为光子的一个自由度，理论上可以是无限大，因此，构建高维希尔伯特空间，在传输中可以使光携带更多信息。光学涡旋在非线性的频率转换过程中也扮演着重要的角色，可以产生很多有趣的现象，也是近年来的研究热点。

本论文较为系统全面地研究了涡旋光束在非线性的光学晶体磷酸氧钛钾(KTP)中的倍频过程，具体包括纯的单个涡旋光束(LG光束)和复合涡旋光的倍频过程，分析了涡旋光束的拓扑荷数值在倍频过程中的变化情况。首先，从理论上对涡旋光束在倍频过程中的耦合波方程进行了推导，并对倍频光的强度分布和相位分布进行了相应的理论模拟。接着，我们从实验方面对理论进行了论证。实验过程中我们采用螺旋相位板分别使基模高斯光携带不同拓扑荷数值的涡旋，入射到非线性的倍频晶体KTP中，将产生的倍频光用 $\pi/2$ 柱透镜模式转换器转换成相应的HG模式，从而验证了LG光束倍频过程中涡旋拓扑荷数值实现了加倍。另外，还采用马赫曾德尔干涉仪制备了不同的复合涡旋光，将其入射到倍频晶体KTP中进行倍频过程后，同样使用模式转换器对产生的倍频光的涡旋拓扑荷数值进行了验证，从而证明了复合涡旋光中心涡旋和离轴涡旋的拓扑荷数值都变为原来的两倍，所得的实验结果与理论基本吻合。本文中，我们从理论和实验两方面验证了光学涡旋拓扑荷数值在倍频过程中实现了加倍。此工作对于近红外波段涡旋的探测以及微粒操控等方面具有一定的指导意义。

关键词：光学涡旋；倍频过程；LG光束；复合涡旋光；拓扑荷数。

Abstract

Optical Vortex, as a particular field phenomenon, has been widely used in various fields of imaging systems, optical information processing, communications, biological microscope operation and so on. A light beam carrying orbital angular momentum is a typical vortex-carried beam. They have attracted much attention because of their outstanding applications in quantum entanglement and optical tweezers. Optical vortex has taught us to think differently about light. Orbital angular momentum as important degree freedom of photon can be infinite in theory, so it can be used to create high-dimensional Hilbert space for transmit more information. Vortex beams play an important role in second order nonlinear frequency conversion, give rise to numerous fascinating phenomenon, and has become the highlights of research in recent years. In this work, we have studied the second harmonic generation of vortex beams, including a single LG beams and composite vortex beam in nonlinear optical crystal KTP and PPLN roundly. First, we have demonstrated topological charge conservation via theoretically studying the second harmonic generation of vortex beams and theoretical simulation results are obtained. The approach to the generation of a helically phased beam is to pass a plane wave beam through a spiral phase plate. Then the vortex beams are focused into the nonlinear optical crystal KTP to generate second harmonic light. A $\pi/2$ mode converter is used to transform between HG and LG modes, thereby, the topological charge conservation are demonstrated experimentally. In addition, the composite beams using two beams with different topological charge by Mach-Zehnder interferometer as fundamental pump light have been studied in the second harmonic generation process experimentally. We obtain the second harmonic light's vortex distribution, and demonstrate topological charge conservation via studying the second harmonic generation of composite vortex. In conclusion, we have proved the topological charge conservation of optical vortex in the second harmonic generation process theoretically and experimentally. It certainly does help in microscopic

particle operation, the detection of near-infrared vortex and so on.

Key Words:optical vortex; second harmonic generation; LG beams; composite vortex beam; topological charge.

厦门大学博硕士学位论文摘要库

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 摘 要..... | I |
| Abstract..... | II |
| 目录..... | IV |
| Table of Content..... | VI |
| 第一章 绪论..... | 1 |
| 1.1 课题的研究背景及意义..... | 1 |
| 1.2 光学涡旋的发展及研究现状..... | 2 |
| 1.3 二阶非线性频率转换过程的发展及研究现状..... | 4 |
| 1.4 本文的主要研究内容及创新点..... | 6 |
| 1.4.1 本文的主要研究内容..... | 6 |
| 1.4.2 本文的创新点说明..... | 7 |
| 第二章 光学涡旋和非线性光学倍频过程的基本理论..... | 9 |
| 2.1 光学涡旋简介..... | 9 |
| 2.1.1 LG 光束..... | 9 |
| 2.1.2 光学涡旋的产生..... | 11 |
| 2.1.3 复合涡旋..... | 16 |
| 2.1.4 光学涡旋拓扑荷数的测量..... | 17 |
| 2.2 二阶非线性倍频过程频率转换简介..... | 20 |
| 2.2.1 非线性极化..... | 21 |
| 2.2.2 光波在非线形介质中的波动方程..... | 22 |
| 2.2.3 倍频过程三波耦合方程..... | 23 |
| 2.3 非线性光学晶体简介..... | 26 |
| 2.3.1 KTP 晶体简介..... | 27 |
| 2.4 小结..... | 28 |
| 第三章 光学涡旋的倍频..... | 29 |

| | |
|------------------------------|-----------|
| 3.1LG 光束的倍频 | 29 |
| 3.1.1 理论分析..... | 29 |
| 3.1.2 实验装置介绍..... | 30 |
| 3.1.3 理论模拟..... | 31 |
| 3.1.4 实验结果分析..... | 32 |
| 3.1.5 小结..... | 33 |
| 3.2 复合涡旋的倍频 | 33 |
| 3.2.1 理论分析..... | 33 |
| 3.2.2 实验装置图..... | 36 |
| 3.2.3 理论模拟和实验结果分析..... | 38 |
| 3.2.4 小结..... | 40 |
| 3.3 本章小结 | 41 |
| 第四章 总结与展望 | 43 |
| 4.1 总结..... | 43 |
| 4.2 展望..... | 44 |
| 参考文献 | 45 |
| 攻读硕士学位期间取得的科研成果 | 53 |
| 致谢 | 55 |

| | |
|--|-----------|
| Abstract..... | II |
| Table of Content..... | VI |
| Charppter 1 Introduction..... | 1 |
| 1.1 Research Background and Significance..... | 1 |
| 1.2 Development and Research Status of Optical Vortex..... | 2 |
| 1.3 Development and Research Status of The Second Order nonlinear conversion process..... | 4 |
| 1.4 Main Research Contents and Innovation..... | 6 |
| 1.4.1 Main Research Contents..... | 6 |
| 1.4.2 Innovation..... | 7 |
| Charppter 2 The Basic Theory of Optical Vortex and The Second Order Nonlinear Conversion Process..... | 9 |
| 2.1 The Introduction of Optical Vortex..... | 9 |
| 2.1.1 LG Beams..... | 9 |
| 2.1.2 The Generation of Optical Vortex..... | 16 |
| 2.1.3 Composite Optical Vortex..... | 11 |
| 2.1.4 The Measurement of Optical Vortex's topological Charge..... | 16 |
| 2.2 The Introduction of The Second Harmonic generation Process..... | 20 |
| 2.2.1 Nonlinear polarition..... | 21 |
| 2.2.2 The Wave Equation of Light Waves in Nonlinear Medium..... | 22 |
| 2.2.3 The Three Waves Coupling Equations of Second Harmonic generation Process..... | 23 |
| 2.3 The Introduction of Nonlinear Optical Crystal..... | 26 |
| 2.3.1 The Introduction of KTP Crystal..... | 27 |
| 2.4 Brief Summary..... | 28 |
| Charppter 3 The Second Harmonic generation of Optical Crystal..... | 29 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1 The Second Harmonic generation of LG Beams..... | 29 |
| 3.1.1 Theoretical Analysis..... | 29 |
| 3.1.2 The Introduction of Experimental Apparatus..... | 30 |
| 3.1.3 The Results Analysis of Theoretical Simulation..... | 31 |
| 3.1.4 The Results Analysis of Experimental..... | 32 |
| 3.1.5 Brief Summary..... | 33 |
| 3.2 The Second Harmonic generation of Composite Optical Vortex..... | 33 |
| 3.2.1 Theoretical Analysis..... | 33 |
| 3.2.2 Experimental Apparatus..... | 36 |
| 3.2.3 The Results Analysis of Theoretical Simulation and Experimental..... | 38 |
| 3.2.4 Brief Summary..... | 40 |
| 3.3 Summary..... | 41 |
| Charpter 4 Summary and Prospect..... | 43 |
| 4.1 Summary..... | 43 |
| 4.2 Prospect..... | 44 |
| References..... | 45 |
| Publication..... | 53 |
| Acknowledgement..... | 55 |

第一章 绪论

1.1 课题的研究背景及意义

我们习惯上将流体团的旋转运动称为涡旋，涡旋在自然界中是普遍存在的。生活中我们也经常可以看到这样的现象，比如大气中的龙卷风，划船时产生的漩涡，热带气旋等等。同样地，涡旋现象也存在于光学领域中。光波是电磁波，在物理学中，我们通过研究波动方程的解析解来研究波的传播，而奇点满足二维或三维空间波动方程的解，因此它是光波普遍存在的特征。在奇点处，波的最主要特征是相位具有不确定性并且此处的波强度振幅为零，在传播过程中，具有相位奇点的光波将会围绕光轴旋转而产生螺旋波前，这种现象与流体中的涡旋现象类似，所以将其称为“光学涡旋”^[1]。

光学涡旋与平面波的一个最大区别在于前者含有 $\exp(il\varphi)$ 的相位因子。其中， φ 是方位角， l 表示拓扑荷数。1992 年，Allen 等人证实了相位因子与角动量的关联性，即相位因子为 $\exp(il\varphi)$ 的光束携带 $l\hbar$ 的轨道角动量^[2]。拉盖尔-高斯光束(LG)由于其螺旋形结构而成为典型的携带轨道角动量的光^[2,3]。近年来，光学涡旋的独特性质受到了科研人员的青睐，它被广泛应用于光学成像^[4]、微粒操控^[5,6]、量子通信^[6,7]等领域。目前产生光学涡旋的方法主要有空间光调制器^[8]、螺旋相位板^[9]、计算全息法^[10]、干涉法^[11]、非线性光学过程^[12]等等。

涡旋光束在非线性介质中传播时会发生各种有趣的现象，光学涡旋的研究与非线性光学过程紧密关联，特别是倍频、和频在获得高阶涡旋光场方面有着非常重要的应用，因而近年来，人们从理论和实验上广泛研究了涡旋光场的非线性频率转换过程^[12-17]。目前该领域的工作大多集中在 LG 光束方面，而复合涡旋作为涡旋光束的线性叠加态，由于其结构^[18]的特殊性，使其在原子囚禁过程中可以更加精确地进行微调控和局部调控，展现了诸多诱人的发展前景，具有举足轻重的作用。

本文围绕光学涡旋和二阶非线性频率转换过程的一些基本概念和研究进展，对复合涡旋光的倍频过程做了重点研究，并对理论模拟结果和实验结果进行了

详细的分析说明。

1.2 光学涡旋的发展及研究现状

20 世纪 70 年代开始,人们就对光学涡旋的特征展开了深入的研究。Nye 和 Berry^[19]将波前位错引入到波理论中,研究了相位位错在光传播中的影响;并且对位错的数学理论和结构进行了详细分析。此后光波场中的位错便受到了研究者的重视和广泛研究。

1979 年, Vaughan^[20]等人通过激光器输出的环形模式的激光束并采用干涉法研究了干涉图样的相位分布,验证了螺旋相位波前的存在。

1983 年, Baranova^[21]等人预测并验证了在散斑场中可以产生波前位错。随后,他们还研究了不同光场参数条件下波前位错的特征^[22]。

1989 年,“光学涡旋”被 Couillet^[1]等人首次提出。他们发现,具有较大菲涅尔数的激光腔中存在一种新的状态,当激光腔中的电压低于阈值电压时,腔内电场视为小的波动场,高于阈值电压时,电场强度零点能稳定存在,围绕奇点传播一周时相位变化 2π ,形成螺旋波前,它类似于超流体涡旋的状态,因此称之为“光学涡旋”。另外, Couillet 等人还运用 Maxwell-Bloch 理论进行了数值模拟,验证了电场的相位奇异点是此公式的解。至此,人们对光学涡旋有了新的认识。

随着对光学涡旋更为深入的了解,光学涡旋的独特特征吸引了许多研究者的关注,并且对于其在不同领域的研究也层出不穷。

涡旋存在于多种多样的物理系统中,不仅在超导体、超流体中发现, Swartzlander^[23]等人在 Kerr 非线性介质中发现了光学涡旋孤子,随后不久, Vilenkin^[24]等人还发现在宇宙带中也有涡旋的存在。1991 年, Arecchi^[25]等人在以光折变晶体作为增益介质的环形腔中观察到了光学涡旋。1992 年, Bazhenov^[10]等人采用计算机合成的光栅进行衍射,实验上获得了不同拓扑荷数的光学涡旋。

同年, Allen^[2]等人的研究工作使得光学涡旋的研究有了突破性的进展,并对于之后的科研工作具有很重要的指导意义。他们证明了 Laguerre-Gaussian(LG)光束由于具有相位因子 $\exp(-il\phi)$, l 表示拓扑荷数,沿 z 轴传播时形成螺旋形的

相位波前，并且光强横截面是中空的，LG 光束作为典型的涡旋光束，在近轴近似条件下是角动量的本征态，因此携带 $l\hbar$ (\hbar 是普朗克常量) 的轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, 简称 OAM)。同时，在此工作中 Allen 等人对 LG 模式的轨道角动量以及轨道角动量的探测给出了详细的说明。1994 年，Barnett 和 Allen^[26] 研究证明了在非近轴近似条件下，LG 光束仍具有 $l\hbar$ 轨道角动量。

对光学涡旋的产生及应用的研究，不论是在基础物理领域还是应用物理领域都具有非常重要的影响。

1990 年，Tamm^[27] 等人利用两块不同的圆柱透镜组成的 MC 横向模式转换器将低阶的拉盖尔-高斯光束 (LG) 转换成相应的厄密特-高斯光束 (HG)。不久，Beijersbergen^[28] 等人通过调节由两块相同的柱透镜组成的模式转换器不仅实现了任意阶 HG 光束向相应 LG 光束的转换，而且实现了 LG 光束旋向的变化。

1992 年，Heckenberg 和他的合作者^[29] 采用计算全息法制备了低阶涡旋光束，但是效率比较低，并且这些全息图不适用于高功率的激光器，高阶的涡旋光束具有很多有趣的特征，其主要应用大多依赖于高强度的光场，因此制备高阶的涡旋就变的尤为重要，直到 1994 年，He^[30] 等人使用有限的装置产生了高效率的计算全息图，获得了高阶涡旋光束，并首次利用高阶轨道角动量的涡旋光束成功捕获了微小粒子。之后，Simpson^[31] 将光学涡旋对微小粒子的转动操作称之为“光学扳手”。1996 年，Turnbull^[32] 等人采用螺旋相位板制备了 LG 光束。

光学涡旋由于具有螺旋相位结构还被应用在实现螺旋相衬成像和边缘增强方面。2005 年，Severin^[33] 等人将螺旋相位元素应用于显微成像中，在傅里叶平面的衍射光场中得到了具有相位因子 $\exp(i\varphi)$ 的相位全息图，并且实现了振幅型物体和相位型物体的各向同性的边缘增强效应。2015 年，王继康^[34] 等人实现了分数阶涡旋结构的纯相位型物体的螺旋相衬成像，并研究了其边缘增强的形成过程。

由于 LG 模式可以构成一组完备的正交基矢，理论上可以构成无限维希尔伯特空间，因此，在量子信息领域，高维的轨道角动量光作为信息载体可以存储大量的信息，现阶段这是一个非常重要的研究热点。自从 2001 年起，OAM 态的量子力学研究迅猛发展。2002 年，Stephen^[35] 等人将高维的量子比特编码到

自旋系统和谐振子当中，对于量子计算具有非常重要的优势。同年，Vahid^[36]等人利用高维量子系统不仅可以提高信息容量，而且提高了有噪声时的量子密钥安全性。2012年，Robert^[6]等人通过干涉仪将偏振纠缠转移给光子 OAM，获得了量子数高达 $l=\pm 300$ 的高阶 OAM 纠缠态，并且实验上证明了在遥感技术中，高阶 OAM 纠缠态可以提高角分辨率的灵敏度。2014年，张武虹^[37]等人基于高阶涡旋光束对“路径实验”和“量子擦除实验”进行了演示，此工作对于实现宏观纠缠起到关键性的作用。

光学涡旋由于其独特的光场特征，具有广阔的应用前景和研究意义，备受研究者的重视和青睐，短短二十几年的实验研究及探索，光学涡旋的应用就已涉及到方方面面。

1.3 二阶非线性频率转换过程的发展及研究现状

我们都知道，在激光出现以前，由于光的强度较弱，光与物质相互作用是线性的，所以人们对于常见的光学现象(例如反射、折射等)的认知大多是线性光学现象。直到1960年，随着世界上第一台激光器的诞生，由于激光的光强很大，激光与物质相互作用产生的电极化强度和入射光强之间不再是简单的线性关系，而是含有二阶、三阶、…、高阶等非线性关系。与二阶、三阶、…等相对应的一些光学现象我们称为非线性光学效应，非线性光学效应的出现，使得人们对光学现象有了崭新的认识，激发了大家的研究兴趣。之后，非线性光学迅速发展，其基本理论及实践应用已经渗透到许多的领域，具有极高的科学研究价值。

1961年，Franken^[38]等人使用红宝石激光器，将波长为694.3nm的强激光入射到石英晶体中，从而成功获得了347.2nm的紫外光，首次在实验上实现了光波的非线性频率转换，揭示了倍频效应的实质，为非线性光学的研究奠定了基础。

1962年，Armstrong^[39]等人将非线性极化率引入麦克斯韦方程组进行讨论，推导出了光在非线性晶体中的相互作用方程，并提出了满足相位匹配可以提高非线性频率转换效率。由于当时的技术受限，无法制备出满足相位匹配的晶体，

因此相当长一段时间内，在实验上的研究滞缓，并没有什么实质性的进展。之后，Piltch^[40]等人也尝试将几片晶体材质薄片按自发极化方向交替变化的方式堆积起来以满足相位匹配从而实现频率转换，但是此方法不仅效率很低，而且实验不易重复。这期间经过不断的探索，直到1986年，Miyazawa^[41]等人在铌酸锂(LiNbO₃)铁电晶体中通过利用外加电场极化法实现了非线性极化率符号的周期性改变，从而建立了准相位匹配，此后，这一技术展现出的诱人前景使其成为研究热点。

随着不断深入的研究，准相位匹配在许多的非线性晶体材料中得以实现，例如磷酸氧钛钾(KTP)，LiNbO₃，钽酸锂(LiTaO₃)，铌酸钾(KNbO₃)等等。1997年，祝世宁^[42]等人基于周期性LiTaO₃晶体研究了准相位匹配条件下的三倍频过程，将波长为1570nm的红外光依次经过倍频、和频过程后获得了波长为523nm的绿光，转换效率达到23%。

经过几十年的发展，非线性光学基础理论已非常成熟，应用范围也十分广泛，例如光波的混频，和频，差频，参量放大与振荡，非线性激光光谱学，多光子效应等等。因此越来越受人们关注。

由于某些特殊波段的激光造价昂贵，例如近红外光、紫外光，因此近年来的研究中，很多工作是基于二阶非线性频率转换过程来获得这种特殊波段的光。

1997年，Miller^[43]等人制备出了周期为6.5 μm 的周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体，并采用Nd:YAG激光器，将波长为1064nm的近红外光经倍频过程后转换为波长为532nm的绿光，倍频过程中转换效率达到了42%。

1999年，Robert^[44]等人采用连续锁模皮秒脉冲激光器，将926.5nm的光泵浦到PPLN晶体中，获得了463nm的蓝光，转换效率高达59%。

2004年，Bruner^[45]等人使用了由电极化技术产生的掺有氧化镁(MgO)的周期性极化钽酸锂晶体(PP-Mg:SLT)，通过倍频过程获得了532nm的绿光，转换效率达到了35%，同等实验条件下，与使用PPKTP晶体相比具有较高的频率转换效率。并且，文章中提出由于Mg:SLT晶体具有较低的矫顽磁场和高的光损伤阈值使得它成为制备高功率可见光的优选材料。

2013年，Louchev^[46]和他的合作者从理论上分析了周期性极化钽酸锂晶体倍频过程中的光学击穿和结晶损伤，并通过实验进行了观察。实验机制也适用

于其他的非线性铁电晶体材料，在加速电子方面起到重要的作用。

随着空间光束的兴起和发展，研究者的工作不再拘泥于对高斯光束的非线性频率转换过程的研究，空间光束非线性频率转换过程的特性也吸引了很多的研究者关注。

1996年，Allen^[12]等人在双折射相位匹配条件下验证了单环涡旋光束(即 $p = 0$) 在倍频过程中满足轨道角动量守恒。之后，Courtial 和其合作者 Allen^[13] 等人研究了多环(即 $p > 0$) 涡旋光束的倍频过程，并且通过实验验证了倍频过程中轨道角动量仍是守恒的。

2013年陆延青课题组^[14]从理论上研究了 LG 光束在准相位匹配晶体中的频率转换过程，证实了该过程中轨道角动量守恒。2014年，Buono 等以偏振作为辅助参数研究了涡旋光的倍频过程，并获得了任意拓扑荷数的叠加^[15]。随后，周志远^[16]等人实验上研究了准相位匹配条件下 LG 光束的倍频过程，其通过探测轨道角动量为 $\pm l$ 的 LG 光束的叠加态来确定倍频光的轨道角动量数，验证了倍频过程涡旋光束轨道角动量守恒。

二阶非线性频率转换过程除了使激光波长转换外，在红外波段的涡旋光探测方面以及涡旋拓扑荷数的提高方面也有很重要的应用。另外，自发参量下转换也属于非线性频率转换过程，在量子信息领域光子通过自发参量下转换可以获得纠缠光源，这对于量子计算和通信有着非常重要的应用价值。

1.4 本文的主要研究内容及创新点

本文结合涡旋光束和非线性倍频过程进行讨论，分析了涡旋光束在非线性光学晶体 KTP 中的二阶非线性倍频过程中涡旋拓扑荷数值的变化情况，并通过相关的理论进行分析以及模拟，最后通过实验加以论证。

1.4.1 本文的主要研究内容

本论文的主要内容如下：

第一章 简要概述了光学涡旋独特的光学特征和其光学性质，并对光学涡旋和二阶非线性频率转换过程的研究背景、发展情况及研究现状做了详细介绍。

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 for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库