

学校编号: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 19820060153181

UDC _____

厦 门 大 学
博 士 学 位 论 文

基于稀土氧化物纳米晶光学微腔的制备及特性研究：
极低阈值单模激光器的实现

**Fabrication and characterization of optical microcavities
functionalized by rare-earth oxide nanocrystals :
realization of a single-mode ultra low threshold laser**

林国平

指导教师姓名：蔡志平教授（厦门大学博导）

Jean Hare 教授(巴黎六大博导)

专 业 名 称：光 学

论文提交时间：2010 年 9 月

论文答辩时间：2010 年 9 月

学位授予日期：2010 年 12 月

答辩委员会主席：Pro. Claude DELALANDE

评 阅 人：_____

2010 年 9 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

A Dissertation Submitted for Doctor Degree of
Philosophy at Xiamen University

**Fabrication and characterization of optical microcavities
functionalized by rare-earth oxide nanocrystals :
realization of a single-mode ultra low threshold laser**

Lin Guoping

Supervisor: Prof. Cai Zhiping (Xiamen University)

Prof. Jean Hare (UPMC)

Department of Physics

Xiamen University

September 2010

厦门大学博硕士学位论文摘要库

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（ Optics and nano-objects group）课题（组）的研究成果，获得（ Optics and nano-objects group ）课题（组）经费或实验室的资助，在（Laboratoire Kastler Brossel）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）：

200 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）：

200 年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

熔融而成的二氧化硅微球及硅基微环腔支持具有极高品质因数和很小模式体积的光学回廊模式。因此在数十年来，它们得到人们的广泛关注，并已被用于腔量子电动力学、微型激光器和生物传感器等不同的研究领域。本博士论文着重将掺钕氧化钆 ($\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_2\text{O}_3$) 纳米晶材料用于二氧化硅微腔的表面活化，并实现极低阈值的微型激光器。在研究过程中，我们采用锥型光纤器件的消逝波进行光耦合，并开发了一种用于绘制回廊模式电磁场分布的新方法。该方法提供了用于识别并激发小模式体积回廊模的有效途径。

除此之外，我们还利用光学微腔的光热效应，设计了一种实时测量该微型激光器阈值的新技术，该技术实现了对光纤耦合型回廊模微腔激光器的快速优化及测量。

最后，我们采用波长位于 802 nm 的激光泵浦 40 μm 直径 $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_2\text{O}_3$ 纳米晶活性的光学微球腔，并实现了激光阈值低至 65 纳瓦的、波长 1088 nm 的单模激光输出。实验中我们所获得的最低激光阈值为 40 纳瓦，据我们所知这将是世界上任何稀土激光器的最低阈值记录。同时，这些微腔激光器在其发光波段的品质因数高达 10^8 ，这将有利于获得极窄线宽的激光输出。此外，我们还对硅基钕离子注入的二氧化硅环形微腔进行了研究，获得了 210 nW 阈值的 909 nm 单模激光输出。

关键词：回廊模，纳米晶，微腔，激光，钕，近场，光纤

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

Fused silica microspheres and on-chip silica microtoroids support ultra-high quality factor and small volume whispering-gallery-modes (WGMs). They have attracted great interest for several decades and have had various applications like cavity-QED, microlasers, and biosensing. This thesis focuses on the realization of ultra-low threshold microlaser based on $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_2\text{O}_3$ nanocrystals (NCs), which are embedded close to the cavity surface. In particular, we demonstrate a novel method for the mapping of the electromagnetic-field distribution of WGMs using the fiber taper coupler used for evanescent-wave coupling. This provides an efficient way to locate and selectively excite the small volume modes.

Moreover, we demonstrate a real time measurement technique of the laser characteristic, which uses thermal bistability of such microcavities, and enables quick and efficient optimization of the taper-cavity coupling conditions.

Finally, single mode lasing at 1088 nm is achieved from a 40 μm diameter microsphere with $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_2\text{O}_3$ NCs, optically pumped at 802 nm, with a threshold of 65 nW. The lowest measured threshold is 65 nW, which is believed to be the lowest threshold record for any rare earth lasers. The Q factor of these active cavities at emission wavelength is as high as 10^8 , favourable for ultra narrow linewidth spectrum. In addition, for an on-chip silica microtoroid made from Nd ion-implanted silica, we have achieved single-mode lasing at 909 nm and a threshold of 210 nW.

Keywords: Whispering Gallery mode, nanocrystals, microcavity, laser, neodymium, near field, optical fiber

厦门大学博硕士学位论文摘要库

详细的中文摘要

在过去的二十年里，表面张力作用下形成的回廊模光学微腔引起了人们很大的兴趣。这种微腔主要分为微球和微环腔，其光学回廊模式具有着极高的品质因数（ Q 值在红外波段可达到 10^{10} ）和很小的模式体积（对于典型的 50 微米直径球腔，其值约为 $100 \lambda^3$ ）。因此，它们能够被应用于各种研究领域，例如腔量子电动力学、微型激光器、光通讯和生物传感器等领域。本博士论文的重点是将 $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_2\text{O}_3$ 纳米晶发光材料掺入微腔的表面，进而实现极低阈值的微型激光器。

首先，我们熔融拉制了微纳米光纤作为消逝波耦合器，并开发了一种用于探测回廊模式电磁场分布的新方法。这种方法可以用来有效地识别和选择性地激发小模式体积的回廊模。其次，我们展示了一种用于实时测量激光性能的新技术。这种技术利用了微腔内部的光热双稳态效应，可以用于快速并有效地优化熔锥光纤和微腔的耦合条件以实现最佳的激光器性能。最后，我们采用 802 nm 波段的激光器作为泵浦源，获得了 65 nW 阈值、基于 $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_2\text{O}_3$ 纳米晶的 1088 nm 波段单模微球腔激光器。实验中，我们获得的最低阈值为 40 nW。据我们所知，这是世界上所有光泵稀土激光器的最低阈值记录。该激光器在激光波段附近所测得的品质因数达到 10^8 以上，这将有利于实现极窄线宽的激光光谱输出。除此之外，我们还在一个硅基钕离子注入的玻璃微环腔上，获得了 210 nW 阈值 909 nm 波长的单模激光输出。

一、回廊模微腔的制备及其活性化处理

我们以单模光纤为原材料，采用双光束二氧化碳激光熔烧技术制备玻璃微球腔。获益于这种技术，我们能够容易地获得直径介于20微米到100微米之间且 Q 值达到 10^8 的球形光学腔体。而在硅基微环腔方面，二氧化碳激光也同样被用于熔融烧制高 Q 值玻璃腔体。我们采用的样品为坐落于硅基上、边缘悬空的二氧化硅微盘腔，它们由法国Grenoble的合作者提供。熔烧而成的微环腔质量主要依赖于微盘的大小、二氧化碳激光光斑大小和熔烧曝光时间等因素。

使用 $\text{Nd}^{3+}:\text{Gd}_2\text{O}_3$ 纳米晶的胶体把无源玻璃微球腔活性化为有源腔体的过程可以

分为以下两个步骤：室温下的纳米材料涂层和热处理。首先将熔融而成的玻璃微球浸入含纳米发光材料的胶体数秒钟。然后利用二氧化碳激光器对其进行适当的热处理，用于对纳米材料进行退火处理以及将其埋入腔体表面。进而，能够改善纳米发光材料与低阶高Q值回廊模的耦合。通常情况下，这种方法获得的活性微球腔体保持了其在泵浦光波段~ 805 nm 和发光波段~1080 nm的极高Q值特点，因而能够有效地降低激光器件的阈值。

二、采用熔锥光纤探测微腔内回廊模式电磁场分布

因为小模式体积回廊模的激发能够有利于实现极低阈值的微型激光器，所以我们开发了一种以熔锥光纤本身为探针探测回廊模式电磁场的极坐标方向分布的方法，用于寻找极坐标方向具有最小模式体积的基模。该方法利用耦合光纤的空间位置对其光纤与微球耦合效率的影响。当移动熔锥光纤时，其耦合效率将随之发生振动，而振动次数直接与回廊模模数相关，因此可以用于简单且快速地识别出极坐标方向上的回廊模基模。在该基模波长位置，其耦合效率的振动曲线只有一个波峰。

微球腔内的回廊模式（WGM）通常可以用光的偏振模式和3个模数 n, l, m 来标识。其中， n 为径向模数，而 l 和 m ($m \in [-l, l]$) 为两个典型的角模数，这两个角模数与于电磁场分布对应的球谐函数 $Y_{l,m}$ 相关。极坐标方向上的回廊模基模对应最大的方位角模数 $m = l$ ，因此在电磁场分布在该方向上只有一个波峰。值得一提的是不同方位角模数的回廊模对于理想的球体是简并的，而实验中获得的球体具有一定的椭圆率 e 。这个椭圆率破坏了球对称性，因此导致不同方位角模数回廊模谐振频率位置的偏移。这个偏移量与新定义的 q 模数 ($q=l-|m|$) 的关系为

$$\delta\nu_{l,m} \approx (1/3 - q/l) e \nu_{l,m} \quad (1)$$

由该式可以得出相同 n, l 但具有不同 q 模数的回廊模约呈等间距分布。其频率间距可以写成 $\Delta\nu = e \nu_{l,m} \approx e FSR$ 。其中 FSR 为腔体的自由光谱范围为 $FSR=c/2\pi na$ ， c 为真空中的光速； a 为微球腔的半径； n 为二氧化硅的折射率。由公式（1）我们还可以得出 $q=0$ 基模在扁球体 ($e > 0$) 里具有最大的频率即最短的波长。对于一个

66微米的玻璃微球腔，典型的 FSR 为1000 GHz。

§ 2.1 实验系统结构

实验系统结构如图2.1所示。图中，S为微球腔、T为熔锥光纤、G为角度调整架、

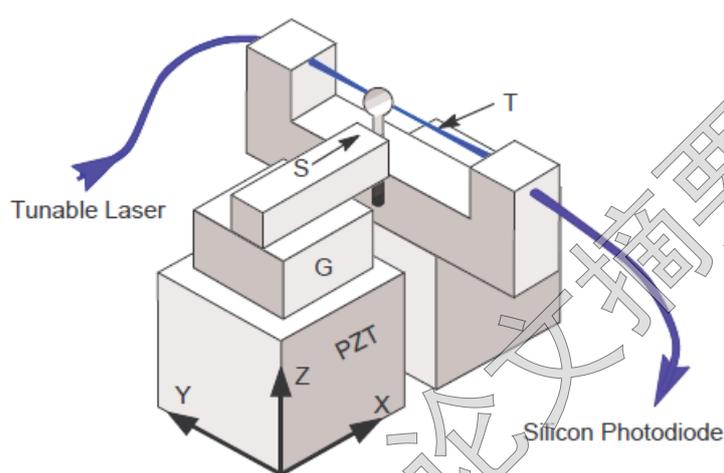


图 2.1 熔锥耦合形微球腔系统结构示意图

PZT为电控纳米调整架。实验中的熔锥光纤是利用火焰法熔融拉制单模光纤而成的，其典型的通光率在90%以上，而最好的通光率则达到99.5%。本部分实验的激光器为外腔可调谐半导体激光器（NF TLB6300， $\lambda \sim 775 \text{ nm}$ ）。此激光经由熔锥光纤一段输入，另一端的输出信号则由光电探测模块（PD）进行检测。激光频率在一定波长范围内以一定重复频率进行扫描，探测到的通光谱中的吸收峰对应于相应的回廊模式激发。微球腔与熔锥光纤的耦合角度和耦合间距分别由角度调整架G和纳米调整架PZT控制。

§ 2.2 实验结果与讨论

2.2.1 微球腔中回廊模式电磁场分布的探测

图2.2所示为典型的熔锥耦合型微球系统的通光谱。该球腔直径为68微米。其横坐标为探测用激光的相对频率，而左右两个纵坐标分边代表归一化的通光率和

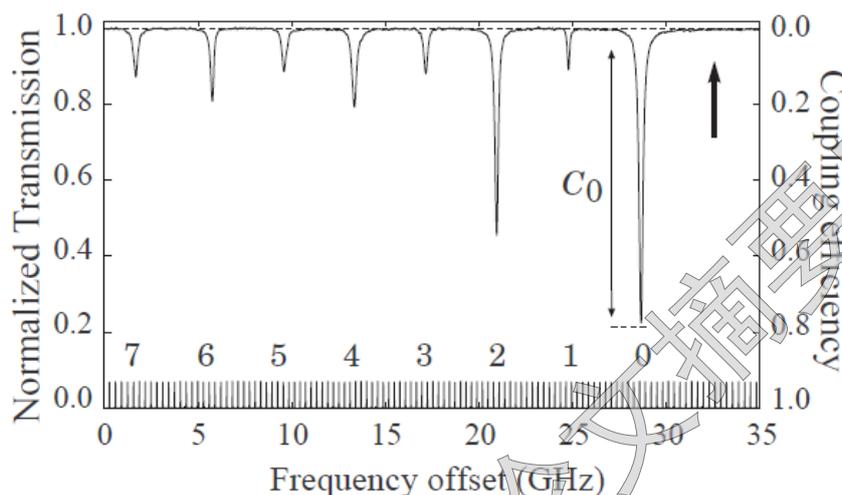


图 2.2 典型的熔锥耦合型微球系统的通光谱。

回廊模耦合率。图中底部的谱线为FP干涉腔提供的频谱，用于作为激光扫描频谱范围的参考标记。从图中，我们可以看到一系列等间距分布的回廊模吸收峰，这些峰代表着具有相同 n, l 和不同 q 模数被激发的回廊模。这与我们之前从公式(1)所得的结论一致。因此，该微球的椭圆率 e 可以从图中的吸收峰间距得出来，其值约为0.4%。如图中所示，黑色粗箭头则标志出这系列等间距吸收峰的尽头，而回廊模的基模 ($q=0$) 则出现在短波长即高频率的位置 C_0 。从而各个回廊模吸收峰的模数 q 也可被相应地识别出来。

回廊模的基模 ($q=0$) 还可以通过改变熔锥光纤位置并观察其耦合效率的波动来识别。图2.3的数据来自一个直径56微米、椭圆率约1.2%的微球腔。如图2.3 (a) 左边的插图所示，我们沿着Z方向移动熔锥光纤与微球的相对位置。并记录不同位置下所激发出的回廊模通光谱。图2.3 (a) 是我们根据各个通光谱线与其光纤相应位置所作的三维图。从图中可以看出，不同 q 模数的回廊模的耦合率波动会有 $q+1$ 个波峰。实验中，该熔锥光纤起到类似近场探针的作用，因而能够探测到回廊模电磁场在极坐标上的分布规律。如图2.3 (b) 所示，实验中得到回廊模电磁场分布数据与理论计算基本匹配。因而这个方法能够用于快速地对小模式体积 $q=0$ 的回廊模基模进行识别与激发。

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.

厦门大学博硕士学位论文摘要库