

第五届全国塑料光纤、聚合物光子学会议

# 会议论文集



主办单位：中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会  
承办单位：吉林大学

中国·长春  
2009年8月

第五届全国塑料光纤、聚合物光子学会议

# 论 文 集

中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会

主办

集成光电子学国家重点联合实验室

吉林大学电子科学与工程学院

联合承办

2009年8月17日-20日·长春

# 第五届全国塑料光纤、聚合物光子学会议组织机构

会议主席 于荣金 教授 燕山大学

会议共主席 刘德森 教授 西南大学

## 会议学术委员会

主任： 于荣金（燕山大学）  
副主任： 明海（中国科学技术大学）  
蹇锡高（大连理工大学）  
张在宣（中国计量学院）  
赵明山（大连理工大学）  
张大明（吉林大学）  
马春生（吉林大学）  
王莉丽（中科院西安光机所）  
杨建义（浙江大学）  
江晓清（浙江大学）  
吴文军（东莞市华鹰电子有限公司董事长）  
委员： 徐传骧（西安交通大学）  
孙小茜（东南大学）  
张其锦（中国科学技术大学）  
王廷云（上海大学）  
廖常俊（华南师范大学）  
章献民（浙江大学）  
殷宗敏（上海交通大学）  
张宁（北京石油化工学院）  
江源（南京玻璃纤维研究设计院）  
刘新厚（中科院理化技术研究所）  
王学忠（中科院西安光机所）  
陈明（深圳大圣光电技术有限公司董事长）  
储九荣（四川汇源光通信股份有限公司博士）  
缪立山（江苏华山光电有限公司总经理）  
陈正飞（上海昱品通信科技有限公司总工程师）

## 会议组织委员会

主任： 张大明（吉林大学电子科学与工程学院副院长教授）  
副主任： 张宝林（集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学  
实验区副主任教授）  
李炳新（燕山大学信息光子学院光电子系副主任）  
秘书长： 王菲（吉林大学电子科学与工程学院副教授）

## 目 录

|   |    |
|---|----|
| 我国塑料光纤的重要发展   |    |
| 于荣金-----  | 1  |
| 聚合物微结构光纤技术的新拓展  |    |
| 王丽莉 孔德鹏-----  | 5  |
| 聚合物异形孔径微透镜阵列研究  |    |
| 刘德森 蒋小平-----  | 9  |
| 聚合物光纤与金属微纳结构的传感器  |    |
| 明海 郑荣升 谢志国 林开群 鲁拥华 王沛-----  | 12 |
| 窄脉冲激光在 GI-POF 光纤中的特性测量  |    |
| 刘天夫 胡桂林-----  | 16 |
| Synthesis and Characterization Low Loss and Zero-birefringence Photosensitive Poly(arylene ether) |    |
| 李香丹 铁伟伟-----  | 20 |
| 频域迭代法求解平面光波导模式场   |    |
| 李炳新 刘岩 祖海娇-----   | 27 |
| 纳米金颗粒掺杂水溶胶/玻璃复合光波导初步探索  |    |
| 郝寅雷 郑伟伟 谷金辉 杨建义 李锡华 周强 江晓清 王明华-----   | 32 |
| 聚合物光纤用 LED 光源及应用  |    |
| 江源 黄旺 唐璐 马永红-----   | 37 |
| PEG 修饰单分散聚苯乙烯微球对牛血清蛋白的吸附  |    |
| 程绍玲 杨迎花-----  | 46 |
| 基于微环谐振腔结构的集成波导光延时线特性分析  |    |
| 韩秀友 赵明山 张佳宁 吴彭生 滕婕 王凌华 王锦艳 蹇锡高-----   | 50 |
| 氟代可交联聚芳醚光波导材料的合成及性能   |    |
| 李光辉 王锦艳 蹇锡高 王凌华 赵明山-----  | 58 |
| 微纳米压印聚合物波导微环谐振器研究   |    |
| 滕婕 韩秀友 王凌华 张洪波 王锦艳 蹇锡高 赵明山-----   | 64 |
| 基于填充聚合物的十字狭缝波导的偏振无关电光调制特性的分析  |    |
| 王皖君 周海峰 杨建义 王明华 江晓清-----  | 70 |
| 塑料光子晶体光纤的带隙研究   |    |
| 杨一 张宁-----  | 75 |
| 颜色可控的顶发射有机电致发光器件研究  |    |
| 侯建华 吴江 谢志元-----   | 81 |
| 多节电极定向耦合型电光开关的研究  |    |
| 郑红丽 孙小强 高磊 康彩萍 王菲 张大明-----  | 84 |
| 嵌入式共面电极聚合物 MMI 电光开关的优化  |    |
| 郑传涛 马春生 闫欣 陈宏起 王现银 张大明-----   | 88 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 波长无关性等周期 Mach-Zehnder 光滤波器的理论分析 |     |
| 郑传涛 马春生 闫欣 陈宏起 王现银 张大明          | 94  |
| 谐波检测在光纤气体传感器中的应用                |     |
| 叶玮琳 王一丁                         | 100 |
| 超长聚合物阵列波导延迟线器件研究                |     |
| 陈长鸣 衣云骥 王菲 闫云飞 孙小强 张大明          | 104 |
| 低功耗 2×2 聚合物热光开关的制备              |     |
| 高磊 孙小强 康彩萍 闫云飞 王菲 张大明           | 111 |
| 对称三层平板波导的等离子体表面模式分析             |     |
| 曹子谏 王希斌 靳琳 张大明                  | 115 |
| M-Z 型 DR1/PMMA 聚合物波导的制备         |     |
| 靳琳 曹子谏 王希斌 陈长鸣 张大明              | 120 |
| 聚合物微环谐振器电光开关阵列的开关特性             |     |
| 闫欣 马春生 陈宏起 郑传涛 王现银 张大明          | 124 |
| 铟镓共掺并联双环谐振器的放大特性                |     |
| 汪玉海 马春生 闫欣 张大明                  | 133 |
| 铟镓共掺串联双环谐振器的放大特性                |     |
| 汪玉海 马春生 闫欣 张大明                  | 139 |
| 基于 SU-8 材料的波导生化传感器              |     |
| 杨天夫 陈长鸣 王菲 张大明                  | 145 |
| 掺杂型有机/无机杂化材料的电晕极化技术研究           |     |
| 王希斌 曹子谏 王微 孙小强 王菲 张大明 衣茂斌       | 149 |
| 一种低功耗聚合物热光开关的研制                 |     |
| 王微 高磊 孙小强 王希斌 曹子谏 王菲 张大明        | 153 |
| 二阶非线性光学聚合物膜材料的制备与表征             |     |
| 王世伟 史作深 崔占臣 张大明                 | 157 |
| 准矩形有源光波导的设计与制备                  |     |
| 孙小强 高磊 孙杰 高伟男 康彩萍 郑红丽 王菲 张大明    | 159 |
| 聚合物波导光栅的设计                      |     |
| 商超 康彩萍 王菲 张大明                   | 162 |
| 含氟侧基聚酰亚胺光波导材料的合成                |     |
| 刘禹 张海博 张云鹤 关绍巍 姜振华              | 167 |
| 基于电光材料 DR1/SU-8 的电光开关的研究        |     |
| 李涛 陈长鸣 高磊 王菲 孙小强 张大明            | 170 |
| 极化聚合物加载条形光波导的制备研究               |     |
| 康彩萍 孙小强 高磊 郑红丽 陈长鸣 靳琳 王菲 张大明    | 175 |

# 我国塑料光纤的重要发展

于荣金\*\*

(燕山大学 信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

**摘要:** 塑料光纤是光纤领域中非常重要的一类, 克服塑料光纤在各光波段大的固有吸收损耗后, 可以构成柔软、易弯曲、大芯径、低损耗和低成本的各种光纤, 在信息和能量的传输中发挥新的重要作用。本文概述了我国二十多年来塑料光纤研发、生产和应用的重要进展, 指出了存在的不足和进一步努力的目标。

**关键词:** 塑料光纤 损耗 带宽 耐热性

## 0 引言

人们把常规通信光纤以外的光纤, 称为特种光纤。凡是由特种材料构成的、或具有特定功能的、或在特定波长使用的、或采用特殊内部结构的光纤, 都称为特种光纤, 如红外光纤、紫外光纤、多组分玻璃光纤、液芯光纤、空芯光纤、多芯光纤、光子晶体光纤、多包层光纤、特殊涂敷(包层)光纤、纳米光纤、细径(保偏)光纤、传能光纤、非线性光纤、保偏光纤、耐高温光纤、耐辐射光纤、有源光纤、光敏光纤、低水峰光纤、色散补偿光纤、弯曲不敏感光纤等。塑料光纤显然也列在特种光纤之中。

但是从材料和功能考虑, 在所有光纤中, 玻璃光纤和塑料光纤是最突出和最重要的两大类光纤。在近代光纤的发展中, 这两类光纤几乎是同时开始的。1966年高锟等提出石英玻璃光纤可以通过材料提纯之后, 把光纤的传输损耗大幅度降低, 1970年康宁公司就实现了损耗低达20dB/Km的光纤, 继而损耗就降至其理论极限, 在1550nm波段, 损耗低达0.2dB/Km; 在此同时, 1966年美国杜邦公司推出了名为“Crofon”的第一个塑料光纤(POF), 它是以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为纤芯的阶跃折射率(SI)型光纤, 当时的损耗为1100dB/Km, 与石英光纤大致相当, 后来研究和生产的这类塑料光纤损耗有所下降, 但它的理论损耗极限值在650nm波长处为100dB/Km, 实际产品的损耗达200~150dB/Km, 比石英光纤在1550nm波长处的损耗要大三个数量级, 根本无法与石英光纤相比, 因此塑料光纤主要用于装饰、照明、传光束、传象束、传感等非通信领域, 以及短距离、中小容量系统(如汽车、飞机、办公室、工业控制等网络)和大的电信系统与计算机之间互联等。实际上, 塑料光纤具有独特和优异的力学性能, 如可加工性和柔软性, 塑料的弹性极限高, 因而在几乎所有的各种光纤中, 都要在光纤芯—包层外面加一个塑料涂层, 才能保持它的柔软和可重复弯曲性。例如, 石英玻璃只有在很小直径(一般为125 $\mu\text{m}$ )才能保持光纤的柔软性, 石英玻璃固有的脆性需要对芯—包层结构加一个富有弹性的塑料涂层, 以保护它的表面, 并防止格里菲思裂纹扩展和顺向断裂。在石英光纤包层上加上一个塑料涂层(第3层), 已成为一根石英裸光纤的基本组成部分。由于在过去的塑料光纤发展中, 国际上始终没有找到完全解决塑料固有吸收损耗大的办法, 使其性能和应用上受到很大限制。人们一旦把塑料光纤损耗问题得到根本解决, 它就可以发挥出比玻璃光纤更加巨大的作用。

在国际上, 塑料光纤的研究重点一直放在降低其损耗上, 所用办法都是从提高材料纯度和改进材料入手, 经过四十多年的努力, 取得了一定进展。如PMMA芯塑料光纤通过材料提纯, 在650nm波长处损耗从原先的~1000dB/Km, 降为200~150dB/Km; 如果把MMA单体中过渡金属离子含量降至0.5PPb以下, 以及采用降低塑料光纤生产过程的温度等措施, 则可进一步把650nm波长处这种光纤的损耗降低到理论极限值——100dB/Km(称为Ultra-transmission SI-POF)。通过一系列分析已证明, 塑料光纤的损耗主要来自C-H键拉伸振动的本征吸收, 因此用氘替代C-H键中的氢, 做成全氘化PMMA(PMMA-d8)芯, 1982年实现在650~680nm波长损耗仅为20dB/Km的塑料光纤。90年

\*\* Email: [r.j.yu@163.com](mailto:r.j.yu@163.com) 电话: 0335-8061549.

代采用全氟化聚丁烯基乙烯基醚(商品名 CYTOP)芯的塑料光纤,因为分子中没有 C-H 键,本征吸收很低,损耗还可以低于 20dB/Km,低损耗传输波长也可扩展至 1.3 $\mu$ m。然而因材料成本过高等原因,至今没有进入市场和大量应用。

在带宽方面,过去阶跃折射率塑料光纤数值孔径比较大( $NA=0.5$ ),因此带宽只能达到 5MHz·Km;1995 年 Mitsubishi Rayon 公司采用小数值孔径( $NA=0.31$ ),使 PMMA 芯 SI-POF 的带宽提高到 210MHz·100m,这已符合 1997 年 5 月 ATM 论坛通过的 155Mb/s、50m 的 POF 通信标准;90 年代初 Y.Koike 等采用界面凝胶聚合技术,做成的变折射率(GI)PMMA 芯塑料光纤,带宽提高到 2.5GHz·100m(理论上可达 3GHz·100m),而后来采用 CYTOP 和具有较高折射率的全氟化掺杂剂为纤芯做成的 GI-POF,在 100m 时带宽已超过 10GHz( $\lambda \sim 1300\text{nm}$ )。CYTOP 的材料色散比石英还低,因而可以达到比石英光纤更高的带宽。

由于普通 PMMA 芯塑料光纤的使用温度低于 80 $^{\circ}\text{C}$ ,因此在一些特殊环境中使用,必须提高塑料光纤的耐热性。在耐热光纤方面,也进行过多方面的探索,如采用在普通 POF 上套塑或涂覆 1~2 层保护层(耐热聚烯烃、PVC 等),其使用最高温度范围就有所提高;选用玻璃化温度( $T_g$ )高的芯皮材料是另一类途径,研究得较多的芯材是聚碳酸酯(PC),它的  $T_g \sim 130^{\circ}\text{C}$ ,损耗略高于 PMMA,ARTON 树脂等也是耐热性较好的材料。将 MMA 同其它单体共聚改性或交联化也可提高耐热性,如 MMA-甲基丙烯酸降冰片酯共聚物、MMA-N-苯基马来酰亚胺共聚物、……,这些共聚物的耐热温度可达 120 $^{\circ}\text{C}$ 以上。这些耐热光纤由于其损耗往往大于或略大于 PMMA 芯光纤,因此其开发和应用受到一定限制。

在国际上,塑料光纤生产企业主要集中在日本和美国,尤其是日本。日本生产塑料光纤的主要企业有三菱 Rayon 公司、旭化成公司、东丽(Toray)公司等,美国生产塑料光纤的主要企业有波士顿公司、佛罗里达 Nanoptics Inc.等。其中占全世界一半以上的 PMMA 塑料光纤,来自日本三菱 Rayon 公司。

## 1 我国塑料光纤技术和应用的研究

我国塑料光纤研究是从上世纪 80 年代在中国科学院西安光机所开始的。全国的研究工作主要围绕降低塑料光纤的传输损耗、提高塑料光纤的可工作温度、制作 GI-POF 方法、以及 POF 的各种应用。

在聚苯乙烯(PS)芯 POF 方面,南京玻璃纤维研究设计院在 20 世纪 80~90 年代发展了多种 PS 芯 POF 的生产工艺、设备和制品,并将这种光纤广泛应用于各种工艺品和装饰装潢等方面。在 1986 年北京玻璃研究所鉴定了涂覆法拉制 PS 芯 POF 工艺的同一年,南京玻璃纤维研究设计院鉴定了 N-型 PS 芯 POF,后来又鉴定了多芯机头(四芯、八芯、十八芯以及三十六芯)拉制的 PS 芯 POF 工艺、设备及制品,以及 12 芯共挤法拉制 PS 芯 POF 工艺;1988 年中国科学院上海有机化学研究所报导了在实验室中研制出的 R-1 型纯 PS 芯 POF,在 632nm 处的损耗为 300dB/Km,研制的 R-2 型 St-MMA 共聚物芯 POF 在 632nm 处损耗为 600 dB/Km;1997 年上海交通大学采用紫外光固化工艺制备的 PS 芯 PMMA 皮在 632.8nm 处损耗为 182dB/Km。

在 PMMA 芯 POF 方面,1985 年北京玻璃研究所鉴定了 PMMA 芯 POF,光纤直径为 0.3~1.0mm,每米光透过率大于 50%;1986 年中国科学院西安光机所报导了采用丙烯酸酯共聚物芯的 POF,在波长 632.8nm 处的损耗小于 200dB/Km,抗拉强度不小于 500Kg/cm<sup>2</sup>,弯曲半径不大于 10mm。最近几年,西安光机所又开展了 PMMA 各种微结构光纤制备技术和应用的研究;1990 年,天津纺织工学院研制出了 PMMA 芯氟树脂皮塑料光纤,在 590nm 波长处的最小损耗为 192dB/Km;1997 年,上海交通大学提出以含氟自由基引发聚合 MMA 制作低损耗 POF 的方法。为提高 PMMA 芯 POF 的带宽,国内也开展了 GI-POF 的研究,1997 年武汉邮电科学研究院在国内首次报导了采用界面凝胶法、以溴苯(BB)为高折射率掺杂剂的 PMMA 芯梯度折射率光纤预制棒;其后,中国科学院感光化学研究所、中国科学院理化技术研究所、中国科学院化学所和中国科学技术大学等从不同角度对 GI-POF 进行了研究。

在耐热 POF 方面,国内的研究工作较少。1995 年中国科学院上海有机化学研究所报导了以 CR-39

均聚物或 CR-39-MMA 共聚物为芯材、聚四氟乙烯为皮材的 POF，耐温达 100℃。

中国科学技术大学开展了功能聚合物光纤的研究，如掺稀土离子  $\text{Nd}^{3+}$ 、 $\text{Eu}^{3+}$ 、 $\text{Sm}^{3+}$  和若丹明、偶氮的聚合物光纤，用于光纤激光器、放大器和双折射光栅器件等，并进行了聚合物光纤在家庭网络、音响跳线、振动传感和军事系统等应用研究。

燕山大学近十多年来，研究了国际上塑料光纤放大器存在的热漂白现象，采用双包层结构及其增益特性，有效地解决了热漂白现象；研究了多模 SI-POF 的传输带宽以及与数值孔径的关系，并对 GI-POF 色散和带宽进行综合分析。进行了塑料光纤耦合器、连接器、微结构塑料光纤切割机等研究；对塑料光纤拉丝塔分区加热系统和控制系统进行了设计和研究；进行了塑料光纤通信链路的实验研究等。与此同时，始终把解决塑料光纤损耗大这个世界性老大难问题，作为主攻目标。在充分研究现有各种光子晶体光纤和塑料光纤的基础上，摆脱国际上从提高材料纯度、材料改性或采用新材料出发的路线，另辟蹊径，从创新光纤结构的思路出发，提出了一种具有自主知识产权的蜘蛛网包层空芯布拉格塑料光纤结构。因为靠全内反射的实芯光纤，其传输损耗一般都大于（至少等于）构成光纤芯区材料的吸收损耗，无法从根本上解决塑料光纤的损耗；而采用空芯光纤，光在空气中传输，就可避免塑料在各波长固有的、很大的材料吸收损耗；但采用空芯结构，包层又无现成而有效进行横向束缚的结构方案，只有自主创新。经过多年反复研究，终于取得了突破。已从理论和数值模拟结果中证明这是大幅度降低塑料光纤损耗的一种有效途径，可以把构成光纤材料的吸收损耗压缩至约  $10^4 \sim 10^6$  分之一，因而从根本上解决了塑料光纤损耗大的问题。如果充分利用塑料光纤便宜、柔软、易弯曲等优点，就可以实现从可见光至太赫兹波（ $0.4 \mu\text{m} \sim 1000 \mu\text{m}$ ）所有波段信息和能量的低损耗传输。例如用于 FTTH 和各种接入网的可见光至近红外区（ $0.65 \mu\text{m} \sim 1.55 \mu\text{m}$ ）多波长传输光纤，传输太赫兹波段的光纤，保持圆偏振态光纤，传送太阳全光谱的光纤，用于激光医学等的中红外光纤等。

这几年我国利用 PMMA 通信用 POF，已建成了许多塑料光纤网络系统，如总参 63 研究所与江苏华山光电有限公司、深圳大圣光电技术有限公司与深圳中技源专利城公司、西安飞讯光电有限公司等都先后建立了各种塑料光纤网络系统，但系统所用的光纤大部分还是进口的。

随着塑料光纤及其应用的发展，我国信息产业部在 2006 年发布了通信用塑料光纤行业标准（YD/T 1447-2006），本标准负责起草的单位是四川汇源光通信股份有限公司。该标准规定了具有塑料芯和塑料包层，折射率分布为突变型、多阶型或渐变型的通信用塑料光纤的产品分类、要求、试验方法、检验规则、标志、使用说明和包装、运输、贮存的要求。本标准规定的塑料光纤可用于短距离通信、电话及数据处理设备，也可用于车、船和航空器内的传输网。

## 2 我国塑料光纤的产业发展

如果从性能上把塑料光纤产品区分成低、中、高档，则 PS 芯 POF 属于低档产品，因为它主要用于制作光纤工艺品，如花卉、盆景、圣诞树、动物、光纤壁画、广告牌等，传输损耗在  $1000 \sim 2000 \text{dB/Km}$  就可以，原料不必精心提纯，技术含量较低。现在我国已能大规模生产这种 SI-POF，而国外这种产品已经很少。南京玻璃纤维研究设计院作为研究型生产企业，在 PS 芯 POF 开发性研究及其规模化生产技术推广方面起了重要作用，目前全国已有一批企业可生产这类光纤，主要生产企业除南京玻璃纤维研究设计院外，还有深圳大圣光电技术有限公司。

2003 年开始，四川汇源光通信股份有限公司研制和生产损耗较低的适合短距离通信应用的 PMMA 芯 SI-POF，后来 2006 年深圳大圣光电技术有限公司与中国科学院理化技术研究所合作也生产这种光纤。这两个公司已成为我国生产 PMMA 芯 SI-POF 的主要单位，传输损耗约  $\leq 200 \text{dB/Km}$ ，接近日本和美国的这类产品；各自的年生产量约 10 万公里，产品除满足国内需求外，还销往国外。从性能上这类光纤可属于塑料光纤中的中档产品，在《Photonics Spectra》Vol. 43 (3)一文中：引用 2008 年塑料光纤市场与技术评价，指出塑料光纤相对比较便宜以及技术的发展，已经完全摆脱了经济衰退的影响；标准的采用使 POF 能够和玻璃光纤竞争。这份报告还提到：中国、台湾、日本、美国、



加拿大、欧洲、朝鲜、澳大利亚和爱尔兰的一些新公司正在进入这个领域。此外，南京玻璃纤维研究设计院生产的 PMMA 芯 SI-POF，损耗约为  $>300\text{dB/Km}$ ，每年的产量接近万公里，主要用于传光束。国内还有几家企业进入 PMMA 光纤的研制并准备投入生产。目前四川汇源光通信股份有限公司为了提高光纤传输带宽，正在研究 GI-POF；还有一些企业准备生产新型高性能塑料光纤。

总之，我国塑料光纤产业，走过了从无到有、从低档向中档产品的发展历程，这是十分可喜的。低档产品中，国际上我国的产量占有很大的比例，用 PS 芯 SI-POF 做成的圣诞树大量出口国外；损耗较低 ( $\leq 200\text{dB/Km}$ ) 的适合短距离通信应用的 PMMA 芯 SI-POF 也具有一定的规模，只要市场需要，进一步扩大产量不成问题。但应冷静看到，这类光纤只属于整个通信光纤中的低档产品，因为这类光纤的传输距离只有  $\sim 100\text{m}$ ，带宽  $< 210\text{MHz}$ ，传输损耗和带宽均不能满足大量而高性能系统的要求，如大量 FTTH 系统等。

中国的塑料光纤产业，如果总是跟着国外走，不能摆脱国际原有技术路线的束缚，走自主创新发展的道路，是不可能有大作为的，只能受制于人。我国的科研人员，经过 10 多年的艰苦努力，已把属于国际上新一代塑料光纤的科学基础奠定，如果企业有高瞻远瞩的决策领导人、有一定实力、有决心、讲诚信、走产学研相结合的技术创新体系，一定会在较短时间内使我国高性能塑料光纤产业获得领先于世界的地位。

### 3 结束语

我国塑料光纤的研发、生产和应用经历了二十多年的历程，从无到有、从小到大，完成了很有意义的发展过程，这是全体科研人员、企业和工人技术人员共同努力的结晶。总结过去，面向未来，为把塑料光纤的这篇文章做大做好，使我国尽快成为塑料光纤研究、生产、应用的大国和强国，在今后的道路上，科研人员要走自己的路、自主创新，淡泊名利、甘于寂寞、进入“安（心）、钻（研）、（入）迷”的精神境界，有坚持不懈、“板凳要坐十年冷”的良好学风，不断在塑料光纤前沿获得突破，攀登新的高峰。企业领导人要有远见卓识，要立足企业、胸怀祖国、放眼世界，树雄心、以诚信为本，高度重视产学研结合、优势互补、实现双赢，把企业尽快做大做强。现在我们各方面已有一定基础，缺的主要不是物质条件，而是需要摆脱传统和现存社会上的不良影响，树立人们生存和事业发展中的优良品质、思想、作风和先进的理念。无限风光在险峰，相信在不久的将来，依靠强强联合和产学研结合，在大家共同努力下，塑料光纤研究、生产和应用一定会有一个更大的发展，向生产高档塑料光纤全面进军，并逐渐形成新一代塑料光纤产业，站到国际的前沿。

### 参 考 文 献

- [1] 江源 邹宁宇编著，聚合物光纤，化学工业出版社，北京 2002
- [2] J. K. Walker, "The future of plastic optical fiber manufacture" The 14th International Conference on polymer optical fiber, Hong Kong, 2005
- [3] Hai Ming, Rongsheng Zheng, Yongsheng Zhang, Lixin Xu, Qijin Zhang "The study of polymer optical fiber in china" The 14th International Conference on polymer optical fiber, Hong Kong, 2005
- [4] 通信用塑料光纤，YD/T 1447-2006，中华人民共和国通信行业标准，2006
- [5] Yu Rongjin & Zhang Bing, "A new generation of plastic optical fibers and its functional exploiting" Science in China Series E: Technological Sciences Vol. 51, No. 12, pp. 2207-2217, 2008

# 聚合物微结构光纤技术的新拓展

王丽莉 孔德鹏

(中科院西安光学精密机械研究所 光纤与集成光学研究室, 西安, 710119)

**摘要:** 我们课题组运用自己独创的微结构光纤预制棒的制造方法, 进一步开发出, 高折射率聚合物光学材料填充的大尺寸二维光子晶体预制棒。将其直接拉伸后, 得到了相干性极好的数百像素的微结构聚合物传像光纤。将其 7 根原始预制棒切削、并熔后拉伸, 得到像素数在数千量级的传像微结构光纤, 及其面板和锥。如果将此复合预制棒先拉伸成直径在 2-3 厘米的细棒后, 再进行一次机械加工-并熔-拉伸程序, 就可得到数万像素的超高分辨率传像光纤、面板、及其锥。此新方法有望成为低成本、高质量传像光学元件及系统的关键技术支撑。特别是对降低各种医用内窥镜的价格, 实现内窥镜探头的专人专用或一次性使用, 提供技术支持。利用该技术也可以规模化制造 2 维或准三维“迈特”材料 (metamaterials), 具有广阔的市场前景。

**关键词:** 微结构聚合物传像光纤; 光纤面板; 光锥; 规模化制造

## 0 引言

传像束一般是将多根一定长度和一定直径的光导纤维有规则地排列起来, 光纤两端按一一对应的关系紧密排列集成束, 使每根光导纤维的输入和输出端的几何上一一对应, 每一根光导纤维传递一个像元, 从而起到传像作用。光纤面板和光锥的传像原理与传像束相同。光纤面板是指厚度小于横截面的板状光纤元件, 它是由大量熔合在一起的光纤组成的。光锥的直径在长度方向上发生连续的变化, 输入端和输出端的直径不同, 因此可以起到图像放大或缩小的作用。到目前为止, 这类光学元件主要是由玻璃材料制备, 因为制造工艺复杂, 价格十分昂贵。由于它在医学、工业、科研、军事等领域用途广泛, 属于特种光纤技术中的高端产品<sup>[1]</sup>, 价格一直居高不下。日本、美国有几家公司能够用聚合物材料制造了传像光纤, 但是关键技术一直保密。

微结构光纤新技术的出现为光纤传像技术的更新与升级, 开辟了新的途径。2003 年有报道指出<sup>[3]</sup>, 没有缺陷的完整二维光子晶体光纤在一定条件下, 也可以以两种方式传递图像, 一是靠空气孔包围的小菱形以全反射机理传像<sup>[3]</sup>; 另一种是图像在空气孔内部以抗传导的机理传递。但是我们研究发现<sup>[4]</sup>: 空气孔道无论是作包层还是做芯, 它的分辨率有限; 还因为空气孔道容易污染、光纤不能弯曲, 传像效果很有限。为了改善微结构光纤的传像性能, 我们课题组提出了用高折射率材料填充微结构光纤孔洞阵列, 得到聚合物传像光纤的新方法; 首先我们贯彻了在空阵列中灌入高折射率液体的方法得到了单丝直径在 20 微米的 5 百多液芯阵列的传像光纤<sup>[5]</sup>。但是因为封装问题, 该液芯光纤的实际应用性仍然受到限制。

为把微结构光纤技术应用于制造高性能的传像光纤元件, 我们在世界上, 首次提出用新型光学聚合物材料 TOPASCOC 来填充微结构光线预制棒的孔道阵列, 并通过机械加工, 热熔稠化, 实现超高分辨率、上万像素的集成型微结构传像光纤及其面板、光锥的规模化制造。作为原理验证, 本研究采用商用的聚乙烯光纤填充 2 维光子晶体光纤预制棒, 然后利用预制棒的稠和技术制造超高分辨率微结构传像光纤、及其面板、锥。

## 1 聚合物传像光纤、光纤面板及光锥的制造

### 1.1 聚合物传像光纤预制棒设计

在本原理验证试验中, 我们采用商用聚苯乙烯 (折射率 1.59) 光纤填充聚甲基丙烯酸甲酯微结构光纤预制棒的方法, 制造传像光纤预制棒。图 1 为全固体传像光纤预制棒的端面设计图。该预制棒直径设计为 70mm, 长度为 200mm, PS 芯直径为 1.49mm, 两芯中心间距为 1.9mm, 625 个 TOPAS

芯呈四方排列，631个TOPAS芯呈六方排列，低折射率的PMMA包围在PS芯周围，从而形成全反射界面。

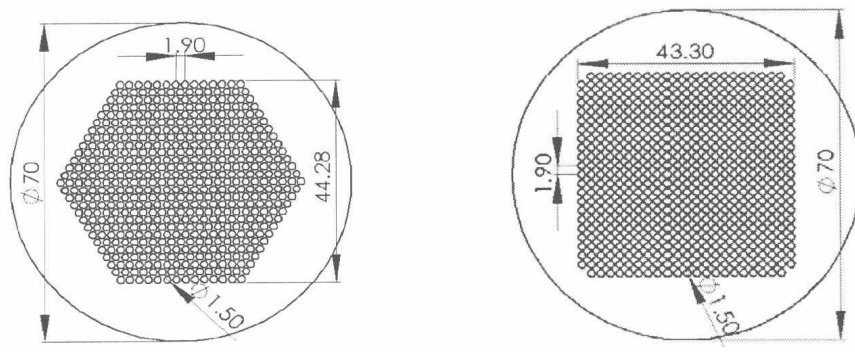


图1 微结构聚合物光纤预制棒结构端面示意图

### 1.2 聚合物传像光纤预制棒及其光纤的制造

聚合物传像光纤预制棒的制造分为两步<sup>[5-9]</sup>，首先利用单螺杆挤出机将高纯度PMMA颗粒料熔融塑化后挤入自行设计的模具中，冷却成型后脱模，形成具有625个空气孔四方阵列预制棒，或631个孔洞六方阵列预制棒。把与预制棒长度相同的1.49毫米的PS光纤穿插入预制棒中的所有孔洞后，在130℃下真空加热24h，自然冷却后就形成传像光纤预制棒，如图1(a)所示。在200度拉伸后就得到631像素六方结构与625像素四方结构的两种微结构传像光纤。图1(b)为聚合物传像光纤的横截面局部放大照片，PS芯阵列结构在拉伸后仍然排列整齐，直径粗细分布均匀。

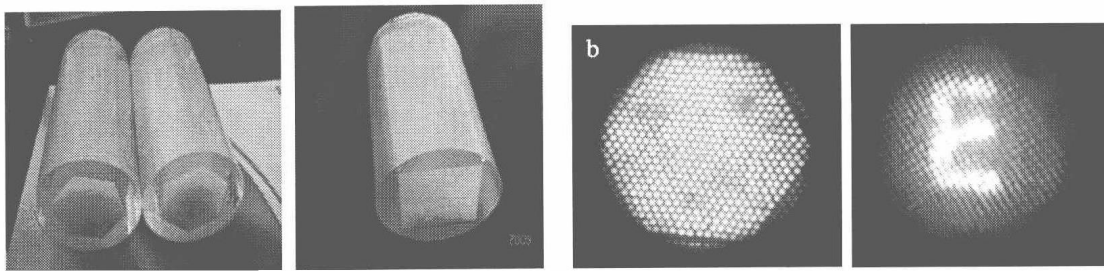


图1 (a) 四方、六方排列传像光纤预制棒; (b) 四方、六方排列传像光纤 (直径300μm)

### 1.3 稠和型聚合物传像光纤、光纤面板及光锥的制造方法探索

由单根微结构聚合物传像光纤预制棒直接拉丝而成的光纤像素数目有限，难以满足传像器件的要求。为提高分辨率及像素数，我们采取将PS/PMMA预制棒机械加工、熔并的方法得到具有631×7像素、直径16厘米的稠和预制棒。将其在200摄氏度拉丝，得到了的传像光纤、光纤面板，以及两端直径连续变化的光锥样品(图3所示)。

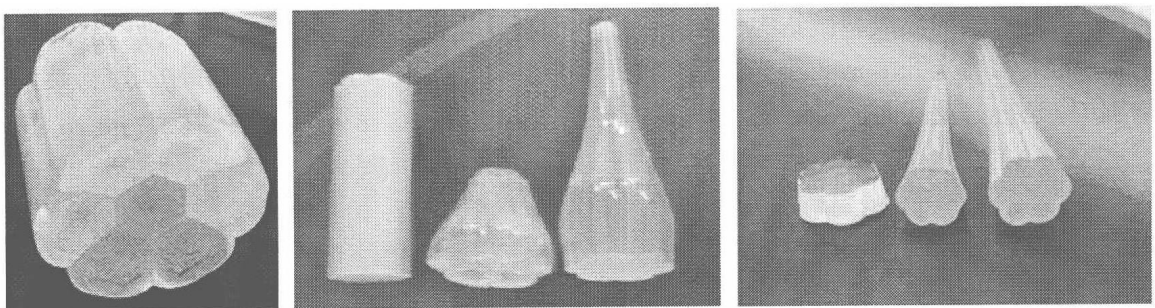


图2 (左) 稠和传像光纤预制棒 (16 厘米直径); (b) 光纤面板、光锥照片

## 2 聚合物传像光纤的数值孔径

光纤传递光线并不能把所有入射于它端面上的光线都进行传递，而是受着一定条件限制，只有当入射在光纤端面上的光线的入射角小于一定角度 $\phi$ 时，光线才能在光纤中经过多次全反射后从一端传到另一端。根据光纤数值孔径计算公式：

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{公式 1}$$

式中  $n_1$  和  $n_2$  分别为光纤芯和包层的折射率。本实验中所采用的 PS 和 PMMA 的折射率分别为 1.59 和 1.49，由此可以计算出该传像光纤的数值孔径为 0.55。

## 3 聚合物传像光纤、光纤面板及光锥的传像效果

为评价 PS/PMMA 微结构传像光纤、光纤面板及光锥的传像效果，采用光学显微镜和目测的方法观察它们所传递的图像。图 4~6 是 3829 像素传像光纤、光纤面板和光锥的传像效果照片。其中，图 4 (a) 是最小刻度为  $10\mu\text{m}$  的微型刻度尺显微照片，图 4 (b) 是聚合物传像光纤传递的刻度尺图像，光纤直径约为  $250\mu\text{m}$ ，单纤维直径约为  $3\mu\text{m}$ 。从光纤端面可以明显区分最小刻度。图中六边形的网格是二次预制棒机械切除后熔并的界面，由于切割不到位，在传递微小图像时界面较明显。图 5 是直径为 8mm，厚度 2mm，单丝直径  $80\mu\text{m}$  的聚合物光纤面板，可以清晰的将字母“ABCDEF”的像呈到光纤面板表面。图 6 是放大/缩小倍数为 2 的光锥，高度 20mm，图中的字母“E”将放大/缩小后呈到光锥表面。同样由于熔并界面的存在，对放大后的图像有影响，可以观察到网格的存在。

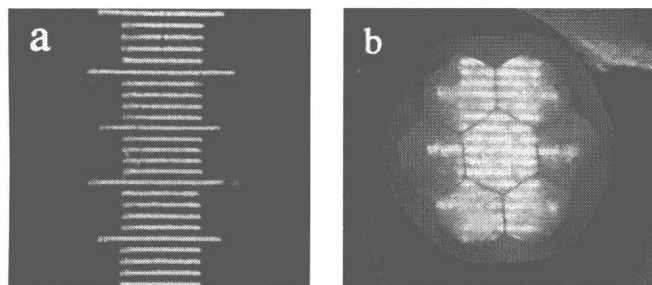


图 3 (a) 刻度尺显微照片，刻度尺最小刻度  $10\mu\text{m}$  (b) 聚合物传像光纤传像照片，光纤直径  $250\mu\text{m}$ ，单丝直径  $3\mu\text{m}$

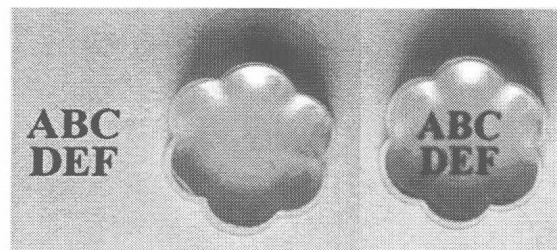


图 4 聚合物光纤面板传像照片，直径 8mm，厚度 2mm，单丝直径  $80\mu\text{m}$ ；

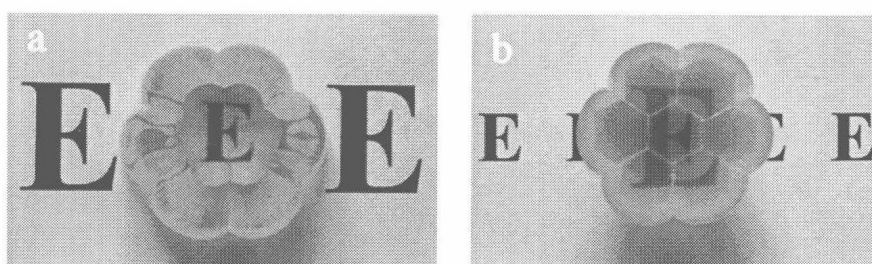


图 5 光锥缩小/放大图像照片，大端直径 24mm，小端直径 12mm，高度 20mm

## 4 总结

我们利用自己发明的微结构光纤预制棒制造技术,成功的制造出超高分辨率微结构聚合物传像光纤。通过在 PMMA 微结构光纤预制棒中穿插高折射率的光学聚合物(如, PS 光纤或其它新型高折射率光学聚合物)、并熔、拉伸步骤,创造出集成型传像光纤束、光纤面板和光锥。此新技术可以解决单丝排列不整齐,丝径不均匀,工艺难控制等问题,形成的传像光纤柔软、质轻,弯曲直径达到 1 厘米,像素直径达 3 微米。这只是将微结构光纤规模化制造技术应用于传像光纤及其面板、光锥制造的初步研究结果。我们将使用新型光学聚合物材料 TOPASCOC 为芯材,制造低成本、高性能的新一代传像光纤束、光纤面板和光锥。我们也正在探索用金属锡或合金与氧化物、光学聚合物制备“迈特”材料 (metamaterials)、光纤复合材料。

## 参 考 文 献

- [1] Gmitro A F, Aziz D. Confocal microscopy through a fiber-optic imaging bundle[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(8): 565~567.
- [4] Jian Wang, Xinghua Yang L W. Fabrication and experimental observation of monolithic multi-air-core fiber array for image transmission[J]. *OPTICS EXPRESS*, 2008, 16(11): 7703~7708.
- [5] Lili Wang and Jian Wang, " Polymer-based Microstructured Fiber towards Imaging Application " paper, JTUA23, 2008 OSA / CLEO/QELS;
- [6] Jian Wang, Xinghua Yang and Lili Wang, "A liquid-filled microstructured polymer fiber as monolithic liquid-core fibers array" *Applied Optics* , Vol. 48, No. 5 (2009) 881-885
- [7] 王丽莉 康利军 陈兴华 杨兴华 “微结构光纤传像束”发明专利申请号: 200710018133.1, 申请日 2007年6月26日;公开号: 101334501A, 公开日: 2008.12.24
- [8] 王丽莉、孔德鹏、汪舰、杨兴华、郭昭龙 “微结构液芯光纤”发明专利申请号: 200810018206.1, 申请日2008年5月14日
- [9] 王丽莉 孔德鹏 汪舰 杨兴华 “微结构光纤面板及其在成像中的应用”发明专利申请号: 200810017410.1, 申请日2008年1月25日

# 聚合物异形孔径微透镜阵列研究

刘德森 蒋小平  
(西南大学物理学院)

**摘要:** 采用光刻热熔工艺制作了半球形和异形树脂微凸透镜阵列, 并对其主要光学性能进行了研究。结果表明, 半球形和异形树脂微凸透镜阵列制作工艺简单、成本低、像质好, 有广阔应用前景。

## 0 前言

微透镜阵列是一种重要的基础元件, 在光信息领域有广泛的应用。以前制作的微透镜及阵列, 其单元透镜都是圆柱形或半球形, 填充系数(有效传光面积与总受光面积之比)不大, 其理论极限值对正方形排列而言为 78.5%, 对六角形排列而言为 90.7%。总有一些信息被泄漏, 造成传输信息的丢失和失真。为了解决微透镜阵列填充系数低这一难题, 在生物复眼的启示下, 我们在过去工作基础上, 采用光学微加工和热熔工艺, 制作出半球形、方形、六角形聚合物凸透镜阵列, 对其主要光学特性进行了实验研究, 得到了可喜的结果, 本文就是在这些研究工作基础上写出的工作报导。

## 1 光学设计

采用光刻热熔工艺制作的微透镜阵列, 就是在玻璃基片上形成的排列整齐的树脂微凸透镜阵列, 如图 1 所示。

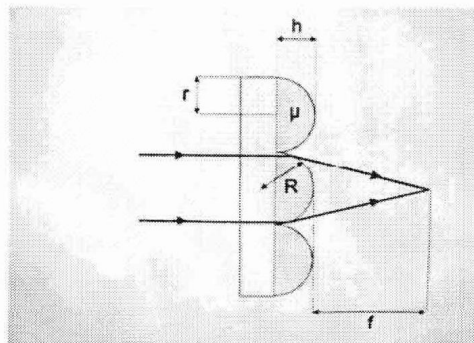


图 1 采用光刻热熔工艺制作的树脂微凸透镜阵列结构示意图 (r—微凸透镜半径,  $\mu$ —树脂折射率, h—微凸透镜高度, R—微凸透镜的曲率半径, f—微凸透镜焦距)

折射率为  $\mu$  的树脂经光刻和热处理形成的微凸透镜的焦距可以写成:

$$f = \frac{R}{\mu - 1}$$

如果我们假定, 形成的微凸透镜是高为 h 的半球形, 很容易得到:

$$h = R - (R^2 - r^2)^{1/2}$$

在热处理前, 光刻后圆柱状树脂的体积是:  $T \pi r^2$ , 这里, T 为制作高为 h 的微凸透镜所需的圆柱体高度。在热处理后, 微凸透镜的体积是:  $\frac{\pi h}{6} (3r^2 + h^2)$ , 显然, 热处理前后树脂的体积应当相等, 由此可以得到热处理前树脂圆柱体的高度是:

$$T = \frac{h}{6} \left[ 3 + \frac{h^2}{r^2} \right]$$

T 也就是树脂层的厚度。例如。我们要制作半径为 0.05mm，高为 0.04mm 的微凸透镜阵列，树脂层的厚度应为 0.0244mm。

## 2 制作工艺

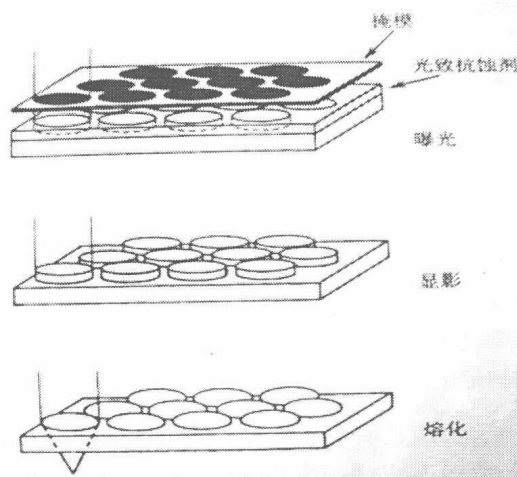


图 5.5 用熔化光致抗蚀剂小柱体的方法产生微凸

图 2 光刻热熔工艺制作树脂微凸透镜阵列工艺流程图

在玻璃基片上通过匀胶工艺沉积厚度为 T 的树脂，再通过已制作好的母板在紫外光照射下进行光刻，经过显影后在玻璃基片上形成圆柱状树脂阵列，最后通过热处理过程，在表面张力作用下，圆状体变成半球形，成为树脂微凸透镜阵列。

## 3 树脂微凸透镜阵列的主要光学特性

1、采用成像法研究了树脂微凸透镜的成像特性。图 3 为圆形孔径、六角形孔径和正方形孔径树脂微凸透镜成像照片，透镜半径是 250 μm，中心距 300 μm。

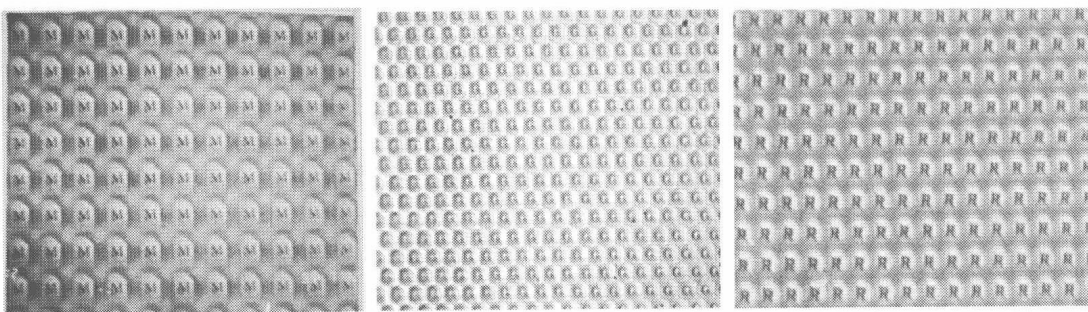


图 3：圆形和异形孔径树脂微凸透镜阵列的成像照片。

左：圆形孔径。透镜半径：250 μm，中心距：300 μm，基片尺寸：35×35mm  
 中：六角形孔径。透镜半径：250 μm，中心距：350 μm，基片尺寸：25×25mm  
 右：正方形孔径。透镜半径：250 μm，中心距：μm，基片尺寸：25×25mm

## 2、异形孔径树脂微凸透镜阵列的出射光斑照片

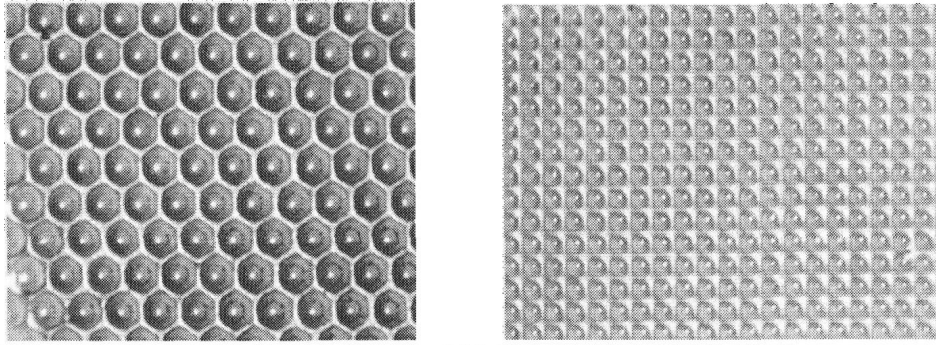


图4：六角孔径（左）和方形孔径（右）树脂微凸透镜阵列出射光斑照片

## 3、异形孔径树脂微凸透镜阵列的外貌照片

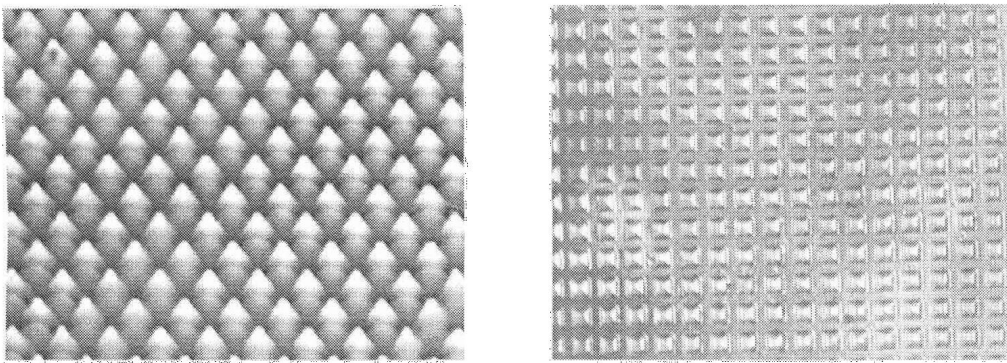


图4：六角孔径（左）和方形孔径（右）树脂微凸透镜阵列的外貌照片

## 4、测试数据

我们对样品的主要光学特性进行了测试.

- (1) 焦距：采用扫描近场光学显微镜和成像法测量，结果是： $f=0,362\text{mm}$ 。
- (2) 出射光斑：采用近场光学显微镜测量，结果是： $1.844\ \mu\text{m}$ 。
- (3) 畸变：采用方格成像法测量，结果是：22.5%。
- (4) 数值孔径：采用数值孔径仪测量，结果是： $\text{NA}=0.157$ 。
- (5) 成像分辨率：采用分辨率测量仪测量，结果是： $169\text{lp/mm}$

## 4 结语

我们采用光刻热熔工艺成功地制作出圆形、六角形和正方形孔径树脂微凸透镜阵列，对制作工艺进行了初步理论分析，得到了树脂微凸透镜阵列的成像照片、出射光斑照片和外貌照片，对其主要光学特性进行了研究，得到了一些实验数据。实验工作表明，我们制作的树脂微凸透镜阵列有很好的光学性能，这种制作方法工艺简单、透镜排列整齐、成像质量好、像质均匀。主要问题是树脂质软、表面易刻划、易被污染、耐温低，解决这些问题是今后的努力方向。



## 聚合物光纤与金属微纳结构的传感器

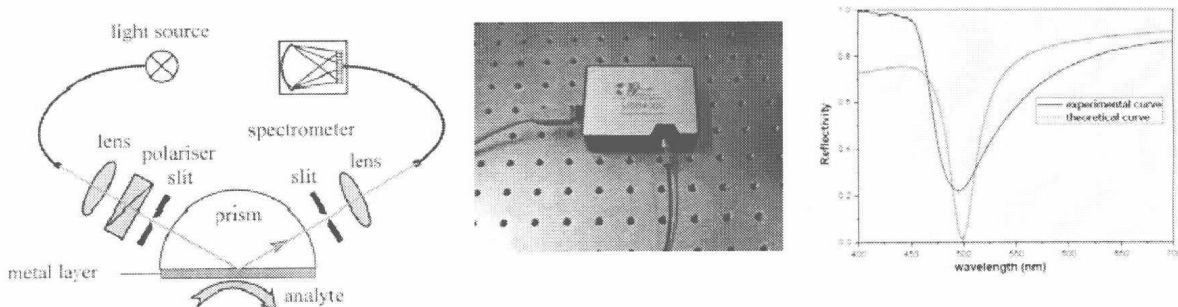
明海, 郑荣升, 谢志国, 林开群, 鲁拥华, 王沛

(中国科学技术大学物理系, 安徽合肥 230026)

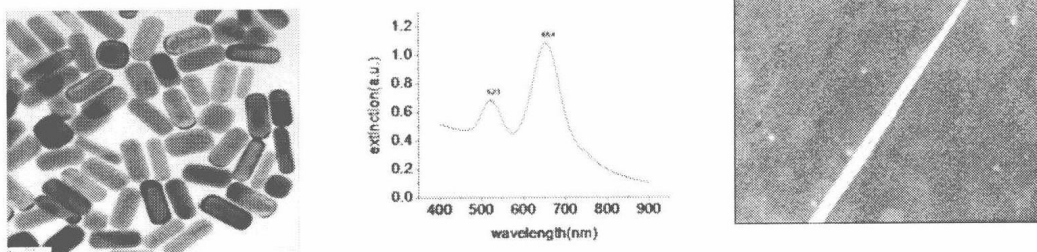
聚合物材料具有多样性, 容易修饰和掺杂; 与生物材料兼容, 用于活体传感安全性好; 材料的温度和力学敏感性高。聚合物光纤芯径大, 数值孔径(NA)大, 与光源和接收器件的耦合效率高, 端面处理简易、连接简便, 易对准, 系统成本低。抗断裂强度高和柔韧性好, 可应用于弯曲场合或粗糙环境进行传感。

金属微纳结构的表面等离子体共振传感器具有灵敏度高、免标记、非破坏性和实时检测等优点, 已被广泛应用于疾病控制、药物开发、环境监测、食品安全以及国土安全等领域。利用单个金属纳米粒子或纳米粒子阵列局域表面等离子体共振效应的探测传感技术, 可以有效提高SPR传感器的灵敏度、选择性、空间分辨率、可集成性。金属微纳结构与聚合物材料相结合成为探测传感领域研究和应用的一个重要方向。

本文分析了表面等离子体共振的基本原理, 提出了一种基于聚合物光纤的波长调制型 SPR 传感器。构建了角度调制型 SPR 传感系统, 并从理论和实验上分析了各部件参数选取对测量结果的影响。



提出并制备了基于金纳米棒的聚合物光纤 SERS 锥形探针, 利用 TERS 结构克服了聚合物光纤自身强的拉曼散射背景的影响, 在实验中得了 10<sup>9</sup> 量级的 R6G 分子的拉曼增强, 该结果对发展制作一次性光纤 SERS 探针有重要的意义。



研制了宽谱的光子晶体光纤 SERS 传感器。理论上提出了泄漏模机制在 SERS 的激励和信号的收集中发挥着重要作用。实验上开展了可见光 514.5nm 和近红外光 785nm 的 SERS 传感实验, 验证了宽谱的 SERS 特性。实验结果表明, 银纳米颗粒团簇体的表面等离子体共振强度, 实芯光子晶体光纤的 SERS 激励和收集效率, 对宽谱的实芯光子晶体光纤 SERS 特性有重要的影响。