

全国第二届塑料光纤、聚合物光子器件
研究、生产和应用会议

论文集

河北 秦皇岛 北戴河

二〇〇六年 八月

全国第二届塑料光纤、聚合物光子器件
研究、生产和应用会议

论文集

主 办：中国光学学会 纤维光学与集成光学专业委员会

承 办：燕山大学

协 办：大连理工大学

前言

去年8月召开了全国第一届塑料光纤研究、生产和应用会议。在过去的一年中，我国颁发了“国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020年）”和“中共中央国务院关于实施科技规划纲要增强自主创新能力的决定（2006年1月26日）”。《决定》指出：“科技进步和创新愈益成为增强国家综合实力的主要途径和方式，科学技术作为核心竞争力愈益成为国家间竞争的焦点。”；要组织实施《规划纲要》，增强自主创新能力，努力建设创新型国家；“建设创新型国家，核心就是把增加自主创新能力作为发展科学技术的战略基点，走出中国特色自主创新道路，推动科学技术的跨越式发展；大力推进理论创新、制度创新、科技创新，不断巩固和发展中国特色社会主义伟大事业。”；“新时期我国科学技术发展的指导方针是：自主创新、重点跨越、支撑发展、引领未来。”；“增强自主创新能力，关键是强化企业在技术创新中的主体地位，建立以企业为主体、市场为导向、产学研相结合的技术创新体系。”

《决定》和《规划纲要》为我们指明了发展目标、方向和道路。一个发达国家和新兴工业化国家产业技术能力的形成往往要经过技术引进、消化吸收、系统集成才发展到自主开发。一个年轻企业或一个年轻人，往往也要经过类似的进程，但决不能满足现状、停止不前，而应尽量缩短时间、完成这个进程。把自己的研究或自己的企业，做成像温家宝总理一次在视察安徽芜湖奇瑞汽车公司时说的：“……要大力自主创新，做到人无我有，人有我优。做到高人一等，勇争第一”。

过去的一年，我国的塑料光纤研究、生产和应用取得了新的进展。新型蜘蛛网状结构包层空芯塑料光纤深入研究证明，这种结构有可能全面解决塑料光纤损耗大的世界性难题，正进入具体实施和试生产；聚合物微结构光纤制作的关键技术和规模化制造技术，取得了突破；聚合物特种功能光纤、微结构光纤和器件，也有新的进展；企业生产的阶跃型聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）芯塑料光纤的损耗，已降到200dB/km左右，与国际同类产品接近。更为可喜的是，已经或正在建立以企业为主体、市场为导向、产学研相结合的技术创新体系，它必将在今后建设创新型国家中做出重要贡献。

与此同时，聚合物光子器件近年来在光损耗、折射率调控和热稳定性等关键特性方面有突破性进展，在高速电光调制（调制频率可超过150GHz）和大尺寸三维立体光子集成等方面颇具优势，加上聚合物基光子材料本身所具有优良的成膜特性和可加工性、高度的可剪裁性、以及优异的与衬底兼容性，使之在实现低成本、高性能光子器件中再度成为国际前沿的热点，并在新一代全光网络等领域展现出广阔的市场应用前景。因此，从本届会议开始，会议主题增补了聚合物光子器件的内容。

本次会议由中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会主办，燕山大学承办，大连理工大学协办，于2006年8月27日至8月30日在河北省秦皇岛市北戴河召开。会议共收到论文26篇，内容涵盖了塑料光纤结构、工艺技术、应用和生产，聚合物光子器件的设计、分析和研究，各种新型聚合物材料，以及光纤陀螺技术对光纤的要求和应用等。这种范围有限的专业会议，对密切研究、应用和生产的联系，了解各方面的进展是非常有益的。我们要继续把塑料光纤（以及聚合物光子器件）这篇文章做好做大，使我国真正成为塑料光纤（以及聚合物光子器件）研究、生产和应用的大国和强国。

本次会议由承办单位燕山大学和协办单位大连理工大学外，还得到北戴河燕山大厦为会议提供的服务和优惠。在此对支持会议的有关单位和个人深表感谢。

论文集中若有差错和不妥之处，欢迎批评指正。

于荣金

二〇〇六年八月

会议组织机构

大会主席 于荣金 燕山大学教授
副主席 刘德森 西南大学教授

学术委员会

主任 于荣金
副主任 明海 中国科学技术大学 教授
王巍 中国航天时代电子公司研究院 副院长
蹇锡高 大连理工大学 教授
苑立波 哈尔滨工程大学 教授
徐坚 中科院北京化学研究所 副所长
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 教授
孙小茵 东南大学 教授
王廷云 上海大学 教授
廖常俊 华南师范大学 教授
马春生 吉林大学 教授
张大明 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区 教授
江晓清 浙江大学 教授
章献民 浙江大学 教授
殷宗敏 上海交通大学 教授
江源 南京玻璃纤维研究设计院 高工
刘新厚 中科院北京理化技术研究所 研究员
王莉丽 中科院西安光机所 研究员
王学忠 中科院西安光机所 高工
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
陈正飞 上海昱品通信科技有限公司 总工程师
吴海生 上海华源光纤通讯有限公司 总经理
金小平 常州市金印福涛光电器材有限公司 总经理
徐兵 北京通元光谷科技有限公司 经理

组织委员会

主任 赵明山 大连理工大学 教授
副主任 王兴华 燕山大厦 总经理
秘书长 李炳新 燕山大学 副教授

目 录

| | |
|---|-------------------------------|
| 前言..... | I |
| 会议组织机构..... | II |
| 全面解决塑料光纤损耗大的世界性难题 | 于荣金 1 |
| 聚合物光纤与光子器件..... | 明海 谢志国 郑容升 林开群 阎杰 张永生 马辉 7 |
| 光纤陀螺技术发展及对光纤的要求(特邀报告) | 王巍 16 |
| 新型含二氮杂萘酮联苯结构聚合物光波导材料(特邀报告) | 蹇锡高 王锦艳 宋媛 17 |
| 微结构聚合物光纤规模化制造技术的研究现状..... | 王丽莉 21 |
| 聚合物微结构光纤制作的关键技术研究..... | 肖文辉 翟亚芳 王朝颖 张宝荣 李炳新 于荣金 30 |
| 微结构聚合物光纤制造系统开发..... | 张永强 王超然 姜洋 王志伟 曲涛 张颖 于荣金 33 |
| 大尺寸光子晶体聚合物光纤预制棒挤出技术的研究..... | 王丽莉 陈兴华 37 |
| 塑料光纤拉丝机加热炉温度的测量与控制..... | 陈雷 李炳新 于荣金 44 |
| 正在崛起的深圳大圣光电技术有限公司..... | 陈伟 49 |
| 两种新型光纤在光纤陀螺中的应用探讨..... | 丁东发 王巍 51 |
| 新型有机-无机杂化聚合物光波导材料的固化和光学特性 | 张洪波 李林科 滕婕 宋媛 王锦艳 赵明山 蹇锡高 56 |
| 含二氮杂萘酮联苯结构氟代聚芳醚新型光波导材料的合成及性能 | 宋媛 李林科 滕婕 王锦艳 张洪波 赵明山 蹇锡高 60 |
| 新型聚合物材料光损耗特性的研究..... | 滕婕 李林科 宋媛 张洪波 王锦艳 蹇锡高 赵明山 65 |
| 具有近红外发光功能的聚合物光学材料研究..... | 林权 赵登峰 张希真 王瑛瑜 刘琦 揣晓红 68 |
| 一种用于制作光波导放大器的有机稀土聚合物材料..... | 张丹 吴爱华 张希珍 张海明 张大明 73 |
| 聚合物串联多环谐振滤波器阵列的特性分析..... | 马春生 王现银 秦正坤 李德禄 徐元哲 闫欣 74 |
| 微环谐振波分复用器的优化设计..... | 王现银 马春生 秦正坤 闫欣 郑传涛 张大明 姜会林 77 |
| 基于聚合物热光效应的全内反射光开关研究..... | 杨建义 江晓清 郝寅雷 周强 王明华 85 |
| 一种聚合物/二氧化硅混合无热化阵列波导光栅的研究...李德禄 马春生 秦正坤 徐元哲 汪玉海 张海明 89 | |
| 光纤光栅光谱及色散特性的理论分析..... | 卓仲畅 苏雪梅 陈洪波 朱丹 93 |
| 基于有机/无机杂化材料的 M-Z 电光调制器的设计...孙杰 高伟男 侯阿临 王宇 刘冰 衣茂斌 张大明 99 | |
| 聚合物电光调制器的电极设计..... | 刘冰 高伟男 孙杰 朱桂华 田美强 张大明 103 |
| 聚合物 S 型波导弯曲损耗的研究..... | 高磊 王宇 张希珍 张丹 张大明 110 |
| 有机聚合物 Y 分支波导的设计..... | 王宇 高磊 张大明 张希珍 张丹 115 |
| 离子交换-离子注入光波导放大器的研究..... | 陈聪 张希珍 张大明 张丹 慕善坤 120 |

全面解决塑料光纤损耗大的世界性难题*

于荣金

(燕山大学信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 本文介绍了采用一种新型的 Bragg 光纤(蜘蛛网结构包层空芯光纤)解决塑料光纤损耗大的历程。蜘蛛网结构包层空芯光纤比现有文献报道的各种空芯光纤具有明显的优越性,能大幅度降低材料吸收的影响,从而能利用有损耗的塑料,实现从紫外到毫米波之间各种波长、各种性能(单模、圆偏振、低损耗等)的塑料光纤;与此同时,采用从原料到挤出以及连续拉纤工艺,可以实现低成本、大批量生产,实现从性能到成本全面解决塑料光纤损耗大的世界性老大难问题。

1 引言

大家都知道,塑料光纤的研发,已有约四十年的历史,与石英光纤大致相同。但其研发和应用状况远不如石英光纤,尤其在我国,投入和产出严重不足,与日本和美国等国家相比,差距甚大。然而塑料光纤有一个最大优势,是力学性能好,柔软、易弯曲,可以做成大芯径等;塑料光纤的一个致命弱点是损耗大,在可见光 650nm 处,PMMA 芯光纤损耗达 150—200dB/km,比石英在 1.55 μ m 波长的损耗要大三个数量级。为了解决塑料光纤损耗大的问题,日本用了几十年的时间,花费了大量的钱财,想解决这个问题。其中找到最有效的办法,是八十年代用氟化聚合物^[1]、九十年代用全氟化聚合物^[2]实现了损耗低于 20dB/km 的目标。然而,它们均因材料成本过高等原因,至今没有进入市场和大量应用。因此如何以低成本的方式有效解决塑料光纤损耗大的问题,是我们面临的一个世界性难题。

我们燕山大学的塑料光纤研究团队,从 1998 年起,在致力于塑料通信光纤元器件及其系统研究的过程中,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。在坚持八年努力之后,目前已取得了决定性的进展。下面就这些问题的研究过程做一个全面介绍。

2 光子晶体光纤的启示

从 1996 年第一次报道了光子晶体包层的石英光纤开始,我们就密切注意这一新生事物的发展,并安排我在长春物理所的一位博士生从事这方面的研究。1999 年 Science 报道了光在空气中传导的光子带隙光纤^[3],更引起了我们的重视。2000 年,在北京召开的第二届光子晶体研讨会上,提出了除采用石英外,可以用聚合物材料制作光子晶体光纤及其优点^[4],第二年(2001 年)见到了澳大利亚第一个有关微结构聚合物光纤的实验报道^[5]。

表面看来,似乎采用空芯光纤就可以解决塑料光纤损耗大的问题,事实并不是如此简单。以石英空芯光纤为例,Bath 大学采用石英材料,7 圈由气孔、空气填充分数大于 85%的包层,在 850nm 波长获得了损耗为 180dB/km 的空芯光子晶体光纤^[6];在长波段,石英空芯光子带隙光纤实验报道的最低损耗记录还是 1.7dB/km(实际最低达 1.2dB/km)^[7],似乎达到常规实芯石英光纤的损耗水平都很难。对塑料光纤来说,采用光子带隙包层的空芯结构,我们用多极法对其损耗做过分析。损耗确实可以比普通塑料光纤降低一个数量级(甚至一个数量级以上)^[8],但它不仅要求包层有大的空气填充分数和严格的周期排列,且包层数要达到 9,实现起来很困难。因此,我们对空芯光子带隙光纤在降低损耗方面的潜力有了一个全面清醒的认识。

*基金项目:国家自然科学基金资助项目(60577009, 60444003)

3 全面关注国际发展动向

有一种 Bragg 光纤，最初是在 1978 年提出的^[9]，但提出之后，并没有引起人们太多的注意。九十年代，空芯光子带隙光纤出现前后，人们又进一步展开了 Bragg 光纤的研究，先后提出了属于 Bragg 光纤的两种类型：如图 2 (a) 所示的具有很大包层折射率差的“全方位波导”光纤 (OmniGuide fibers)^[10]，以及如图 2 (b) 所示的环形结构包层的空芯光纤^[11]。

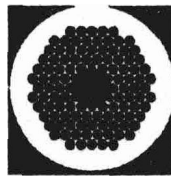
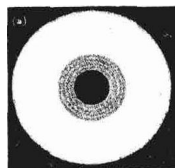
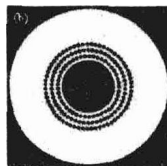


图 1 空芯光子带隙光纤

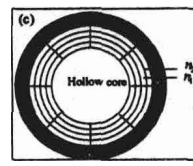
Fig.1 Hollow-core photonic bandgap optical fiber



(a) OmniGuide fiber



(b) Ring-structured fiber



(c) Cobweb-structured fiber

图 2 布拉格光纤

Fig.2 Bragg optical fiber

全方位反射镜制作的空芯光纤，它的反射效率极高，例如做成光纤后的损耗只有构成光纤材料损耗的 1/46000；且达到一定的泄漏损耗只需要几层；各模式之间泄漏损耗很不相同，产生一种模式过滤效应，可实现在大芯径下以单模方式工作。不过这种光纤包层是由两种折射率差较大的介质构成的。实际上，要找到两种材料的折射率差比较大，在热学和力学性能上以及制作工艺上具有相似性、兼容性和简单可行性是十分困难的。至今，这种结构在实验上只演示了两种组合，即 Te($n=4.6$)和聚合物 ($n=1.59$) 组合^[12]，以及 As_2Se_3 ($n\sim 2.8$) 与 PES ($n\sim 1.55$) 组合^[13]，工作波长在 $10.6\ \mu m$ 附近。环形结构包层空芯光纤虽然只用单一材料，但其低折射率层是由同一材料的许多小孔组成，其折射率介于该材料折射率与空气折射率 ($n=1$) 之间，因此构成的包层折射率差较小。

4 探索和创新

在掌握和分析国际上已有各种空芯光纤结构的基础上，我们全力想实现具有 OmniGuide fibers 优良性能而只需一种介质的结构，其中另一种介质用折射率最低的空气代替，但这样一来，结构就无法固定和保持。不要说 Bragg 光纤，就是一维 Bragg 光栅也从来没有用一种介质和空气交替组成过。理想、愿望和困难就这样摆着，整天思索，一时毫无解决办法。实际上，在这种最关键最困难的时刻，有两条路可走。比较容易的就是按照国外较好的结构、用略加改变的工艺、材料或结构参数，做一些工作，发表论文，这就是给别人补衣服；另一种就是横下一条心，决不后退或放弃，不达目的决不罢休。时间不忘有心人，过一段时间后，在我天天晨练的地方，看到了司空见惯的现象——蜘蛛网。突然像牛顿见到苹果落下一样，感悟到了可以像蜘蛛一样，用一种材料构成可抗御风雨袭击的结构。几天观察的结果，蜘蛛网有不同的排布，支撑条也不一样，但较大的蜘蛛网有 22—26 根。当然不能简单照搬，究竟应该采用什么样的支撑结构及其范围，使这种结构既有良好的光学性能、又有好的完全满足使用要求的力学性能，需进行数值模拟。经相当一段时间，采用时域有限

差分法 (FDTD) 和有限元法 (FEM), 对这种结构的光学和力学性能进行详细模拟之后, 确定了支撑结构的范围和布局, 申请了国家发明专利^[14]和发表了论文^[15]。这一过程, 用去了我们近两年的时间, 最终算是确立了一种创新的结构——如图 2 (c) 所示的蜘蛛网结构包层空芯光纤, 它同属于 Bragg 光纤, 从提出的时间表上, 可以说是 Bragg 光纤的第三种类型。

5 深入研究

接着, 我们用平面波展开法 (PWEM), 对蜘蛛网结构包层空芯光纤的一些重要参数及其变化规律作了分析, 为设计这类光纤提供了指导性依据, 并分析了制作这类光纤时参数的容限^[16]。

环形结构包层空芯光纤实验上已用石英^[17]和 PMMA^[18]分别作了演示, 并且当包层中的环数目为 3 时, 在大于 1120nm 的波长区域, 传输损耗低于材料 PMMA 的损耗, 特别是在 1390nm 处, 材料损耗为 420dB/m, 而光纤传输损耗仅为 40dB/m^[18]。为了考察蜘蛛网结构包层与环形结构包层在性能上的差异, 我们做了对比性计算。文献[19]报道了一种支持单偏振圆对称模的空芯环形结构 Bragg 光纤: 包层由环内两个孔中心的间距 $\Lambda_i = 0.403\mu\text{m}$ 、环间两个孔中心的间距 $\Lambda_e = 0.578\mu\text{m}$ 、孔直径 $d = 0.335\mu\text{m}$ 的孔环组成, 芯半径 $r_{co} = 2.89\mu\text{m}$, 假定基质材料是无损耗的, 折射率为 1.49。在 9 个环时, 最低损耗模 (TE₀₁ 模) 与第二个最低损耗模 (TE₀₂ 模) 之间束缚损耗差约 70 倍, TE₀₁ 模的束缚损耗约为 0.83dB/m, TE₀₂ 模的束缚损耗约为 57dB/m, 所以在长度 0.7m 与 24m 之间完全是单模的。我们则采用转移矩阵法 (TMM), 对蜘蛛网结构包层空芯光纤, 作了类似的计算。利用与上述文献[19]相同的材料 ($n_2 = 1.49$) 和芯半径 $r_{co} = 2.89\mu\text{m}$, 以及 $n_1 = 1$ 、 $d_2 = 0.25\mu\text{m}$ 、 $d_1 = 0.625\mu\text{m}$ 、 $\Lambda = d_1 + d_2 = 0.875\mu\text{m}$, 并且同样假定基质材料是无损耗的。计算结果表明 TE₀₁ 模的最低损耗波长在 0.79 μm 处, 当 N (包层中交替层的数目) = 6、5 和 4 时, TE₀₁ 模在 0.79 μm 处的束缚损耗分别为 8.953×10^{-4} dB/m、 1.911×10^{-2} dB/m 和 0.408dB/m; 而 TE₀₂ 模 (第二个最低损耗模) 在 0.79 μm 处的束缚损耗分别为 2.054dB/m、15.62dB/m 和 118.8dB/m。TE₀₂ 模损耗与 TE₀₁ 模损耗之比达到 2294 倍 (N=6)、817 倍 (N=5) 和 291 倍 (N=4)。按照文献[19]相同的计算方法, 在长度 19m 与 22.4km 之间 (N=6)、25m 与 1.05km 之间 (N=5) 和 33cm 与 49m 之间 (N=4) 完全是单模的。显然我们的结果, 无论是 TE₀₁ 模的损耗值、还是 TE₀₂ 模与 TE₀₁ 模损耗值之间差, 都要远远优于文献值。即使包层只用 4 层, TE₀₁ 模的束缚损耗要比文献[19]用 9 个环时还低一倍; 而包层用 6 层, 则 TE₀₁ 模的束缚损耗只有文献用 9 个环时的 1/927。

第二个方面, 我们计算了可见至近红外光 (0.65—1.55 μm) 塑料光纤的传输损耗。我们通过转移矩阵法计算了蜘蛛网包层结构空芯光纤的损耗。结构参数为芯半径 $r_{co} = 62.5\mu\text{m}$ 、 $d_2 = 0.25\mu\text{m}$ 、 $d_1 = 5\mu\text{m}$ 、N (包层中交替层的数目) = 3; $n_2 = 1.49$ (PMMA), 材料 PMMA 在波长 0.65、0.9、1.17、1.3、1.38 和 1.54 μm 处的吸收损耗^[20]分别约为 100dB/km、 3.0×10^4 dB/km、 3.4×10^5 dB/km、 2.5×10^4 dB/km、 4.2×10^5 dB/km 和 7.1×10^4 dB/km, 而 TE₀₁ 模在这些波长的传输损耗 (结构束缚损耗加上材料吸收损耗) 分别为 6.8×10^{-4} dB/km、 9.4×10^{-2} dB/km、2.1dB/km、0.23dB/km、4.8dB/km 和 1.23dB/km。扣除材料纯度问题、光纤结构的不均匀性以及支撑结构的影响等因素后, 很宽的波长范围均可作为信号波长, 用于以太无源光网络 (EPON) 和千兆以太无源光网络 (GEPON), 并可实现波分复用 (WDM)^[21]。

第三个方面, 我们计算了实现太赫兹 (THz) 频段塑料光纤的传输损耗。THz 波是指处于微波与远红外之间频率范围在 0.1~10THz (波长 3mm~30 μm) 的波段, 也是电磁波谱中留下需要开发的最后一个频段。这几年来, 在 THz 波的产生和探测方面取得了不少进展; 而在这个频段, 由于缺少真正透明的材料和低损耗结构的波导或光纤, 主要采用自由空间传播。2002 年 Han 等人^[22]、2004 年 Goto 等人^[23] 分别采用 HDPE 和聚四氟乙烯 (Teflon) 制作了实芯光子晶体塑料光纤。HDPE 制

作的光纤在 0.1~3THz 实验带宽内损耗小于 0.5cm^{-1} (相当于 $2.17\times 10^5\text{dB/km}$)，光纤长度仅为 2cm；Teflon 制作的光纤，损耗约 0.12cm^{-1} (相当于 $5.2\times 10^4\text{dB/km}$)。2004 年 Harrington 等人^[24]报道了用于 THz 宽带传输的内侧有 Cu 涂层的空芯聚碳酸酯波导，最好的结果是由 3mm 内径光纤在 $158.51\mu\text{m}$ 处获得的，损耗为 3.9dB/m (相当于 $3.9\times 10^3\text{dB/km}$)。今年 Chen 等人^[25]又报道采用亚波长直径 ($200\mu\text{m}$) 的塑料 (聚乙烯) 线作为 THz 波导，在靠近 0.3THz 频率范围内，衰减常数小于 0.01cm^{-1} (相当于 $4.343\times 10^3\text{dB/km}$)。因此在传输 THz 频段获得更低损耗的实用化光纤尚待进一步研发。

对传输 THz 波光纤我们也采用蜘蛛网包层结构空芯光纤，结构参数为： $r_{co} = 6\text{mm}$ 、 $d_2 = 75\mu\text{m}$ 、 $d_1 = 300\mu\text{m}$ 、 $n_2 = 1.52$ (HDPE)、 $n_1 = 1$ (空气) 和 $N=3$ 。按照文献[26]报道的 HDPE 吸收谱，在波长 200、240、270、450 和 $480\mu\text{m}$ 处的吸收损耗分别约为 $3.71\times 10^5\text{dB/km}$ 、 $2.81\times 10^5\text{dB/km}$ 、 $2.33\times 10^5\text{dB/km}$ 、 $9.5\times 10^4\text{dB/km}$ 和 $8.6\times 10^4\text{dB/km}$ ；而 TE_{01} 模在这些波长的传输损耗 (结构束缚损耗加上材料吸收损耗) 分别为 68.76dB/km 、 25.56dB/km 、 22.59dB/km 、 64.87dB/km 和 87.63dB/km 。这相当于 $200\mu\text{m}$ 至 $480\mu\text{m}$ 这个波段的传输损耗系数降到了 $2\times 10^{-4}\text{cm}^{-1}$ 以下，在 $270\mu\text{m}$ 波长处，传输损耗系数仅为 $5.2\times 10^{-5}\text{cm}^{-1}$ 。

由于 Bragg 光纤具有模式过滤效应^[9]，利用不同模式的泄漏损耗不同，这三种光纤都可实现单模 (TE_{01} 基模) 工作^[27]。

通过上述三种光纤的研究表明，蜘蛛网结构包层空芯光纤比现有文献报道的各种空芯光纤具有明显的优越性；用它可以大幅度降低塑料吸收损耗大的影响，实现从紫外至毫米波之间任意波长、各种特性 (低损耗、圆偏振、单模、大芯径等) 的实用化塑料光纤。

6 解决大批量连续生产工艺，降低光纤制作成本

只有好的光纤结构，能实现各种波长、各种特性的低传输损耗光纤还不够，必须有一套相应的大批量、高效生产工艺流程，才能提高产量、降低成本，成为价廉物美的市场产品。也只有这样，才是全面解决塑料光纤问题的完善方案。

过去的石英光纤，都是通过预制棒阶段，由预制棒最终拉成光纤的。光子晶体光纤也不例外，无论是通过毛细管堆积法、超声波钻孔法、还是其它方法，先做预制棒，再由预制棒拉成光纤，都可称为二步法。我们也曾采用一些办法 (如堆积法、预聚物浇铸法等)，先做预制棒，再拉成光纤。但深感费时费力，质量和重复性很难保证，只能做些原理性演示工作，不适合大批量生产。为此，我们早在 2003 年 3 月就申报了一项发明专利^[28]。这种从原料到挤出、连续拉丝工艺 (一步法)，非常适合塑料及一些低熔点玻璃等材料，它的合理性、高效率必将成为这些材料制作各种光子晶体光纤的最终生产工艺流程。

7 结论

以解决塑料光纤损耗大问题为主要目标的研究，经历了八个年头，而它变成产品和商品，或许还要一段时间。但是我们相信它一定能最终实现，这个实现不是几篇文章和几项专利，而是代表新中国培养起来的一批科技工作者，在各级有关部门的支持下，以自力更生、自主创新、艰苦奋斗和坚持不懈的精神，为世界展示出中国的未来。

参考文献

- [1] T. Kaino, K. Jinguji, and S. Nara Low loss poly(methylmethacrylate-d8) core optical fibers. Appl. Phys. Lett., 1983, 42(7):567-569.
- [2] Y. Koike Giga-island concept realized with high-speed GI plastic optical fiber. in: Proc. Second

- Asia-Pacific Polymer Fibre Optics Workshop, Hong Kong, China, January 3-4, 2003.
- [3] R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight, et al. Single-mode Photonic band gap guidance of light in air. *Science*, 1999, **285**:1537-1539.
- [4] 于荣金, 光子晶体的研究发展与我们关心的问题. 第二届光子晶体研讨会, 2000年12月15-16日, 北京, 中国科学院物理研究所.
- [5] M. A. Van Eijkelenborg, M. C. J. Large, A. Argyros, et al. Microstructured polymer optical fibre. *Opt. Express*, 2001, **9**(7): 319-327.
- [6] G. Bouwmans, F. Luan, J. C. Knight, et al. Properties of a hollow-core photonic bandgap fiber at 850nm wavelength. *Opt. Express*, 2003, **11**(14): 1613-1620.
- [7] P. J. Roberts, F. Couny, H. Sabert, et al. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres. *Opt. Express*, 2004, **13**(1): 236-244.
- [8] T. S. Guan, M. Y. Chen, Z. L. Zhang, and R. J. Yu Numerical simulation and analysis of losses in air-core plastic photonic bandgap fibers. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6): 313-315.
- [9] P. Yeh, A. Yariv, and E. Marom Theory of Bragg fiber. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(9): 1196-1201.
- [10] S. G. Johnson, M. Ibanescu, M. Skorobogatiy, et al. Low-loss asymptotically single-mode propagation in large-core OmniGuide fibers. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 748-779.
- [11] A. Argyros, I. M. Bassett, and M. A. van Eijkelenborg Ring structures in microstructured polymer optical fibres. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 813-820.
- [12] Y. Yink, D. J. Ripin, S. Fan, et al. Guiding optical light in air using an all-dielectric structure. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(11): 2039-2041.
- [13] B. Temelkuran, S. D. Hart, G. Benoit, et al. Wavelength-scalable hollow optical fibres with large photonic bandgaps for CO₂ laser transmission. *Nature*, 2002, **420**: 650-653.
- [14] 于荣金, 陈明阳, 蛛网状空芯光纤, 中国发明专利, 申请号 CN200510060031.7
- [15] M.-y. Chen, R.-j. Yu, Z.-g. Tian, and X.-z. Bai Optical and mechanical properties of hollow-core fibers with cobweb cladding structure. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 63-65.
- [16] Huo. L., Yu R.-j., Zhang B., Chen M.-y., and Li B.-x. Design guideline of hollow-core fibres with cobweb cladding structure. *Chin. Phys. Lett.*, 2006, **23**(8): 2121-2124.
- [17] G. Vienne, Y. Xu, C. Jakobsen, et al. Ultra-large bandwidth hollow-core guiding in all-silica Bragg fibers with nano-supports. *Opt. Express*, 2004, **12**(15): 3500-3508.
- [18] A. Argyros, M. A. van Eijkelenborg, M. C. J. Large, and I. M. Bassett Hollow-core microstructured polymer optical fiber. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(2): 172-174.
- [19] A. Argyros, N. Issa, I. Bassett, et al. Microstructured optical fiber for single-polarization air guidance. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 20-22.
- [20] T. Kaino, M. Fujiki, and K. Jinguji Preparation of plastic optical fibers. *Rev. Elec. Commun. Lab.*, 1984, **32**(3): 478-488.
- [21] R. J. Yu, B. Zhang, M. Y. Chen, et al. A new solution of reducing polymer optical fiber losses. *Opt. Commun.*, 2006 (即将发表)
- [22] H. Han, H. Park, M. Cho, et al. Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(15): 2634-2636.
- [23] M. Goto, A. Quema, H. Takahashi, et al. Teflon photonic crystal fiber as terahertz wave-guide. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(2B): L317-L319.

- [24] J. A. Harrington, R. George, P. Pedersen, et al. Hollow polycarbonate waveguides with inner Cu coatings for delivery of terahertz radiation. *Opt. Express*, 2004, **12**(21): 5263-5268.
- [25] L.-J. Chen, H.-W. Chen, T.-F. Kao, et al. Low-loss subwavelength plastic fiber for terahertz waveguiding. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(3): 308-310.
- [26] G. W. Chantry, J. W. Fleming, P. M. Smith, et al. Far infrared and millimetre-wave absorption spectra of some low-loss polymers. *Chem. Phys. Lett.*, 1971, **10**(4): 473-477.
- [27] C. M. de Sterke, and I. M. Bassett, Differential losses in Bragg fibers. *J. Appl. Phys.*, 1994, **76**(2): 680-688.
- [28] 于荣金, 塑料(聚合物)光子晶体光纤的连续制造方法, 中国发明专利, 申请号 CN03108794.9

聚合物光纤与光子器件

明海 谢志国 郑容升 林开群 阎杰 张永生 马辉
(中国科学技术大学物理系, 安徽 合肥 230026)

摘要 聚合物光子学是高分子材料和光子学相结合形成的一门新兴的交叉学科, 已成为光子学的研究热点. 本文综述了聚合物材料及其在光子学中的应用. 结合我们的工作对聚合物光波导器件、聚合物光纤器件、聚合物高密度存储等内容作简要的介绍.

关键词 聚合物材料、聚合物光波导、聚合物光纤、光存储、光子技术

一、引言

聚合物光子学研究涉及聚合物科学、光子学、信息科学和制造科学与技术等学科, 基于聚合物材料的光子学器件的新设计、新功能和器件将成为信息社会中新概念和高技术的一个重要源头.

光子器件大体上划分为有源与无源器件两大类, 光学材料涉及半导体、晶体、玻璃、有机高分子、纳米量子约束材料、液晶等等. 内容十分丰富. 随着材料科学的发展, 有机聚合物材料的日趋成熟, 聚合物光子学日益为人们所重视.

二、聚合物光波导器件

光波导是光子器件集成重要组成部分, 在传输、信号调制、放大等方面有广泛应用. 传统的光集成(OIC)和光电集成(OEIC)主要是做在铌酸锂(LiNbO₃)和硅基半导体材料上的. 近年来, 人们开始关注有机聚合物光波导材料的开发研究. 与传统的无机光波导材料相比, 有机聚合物光波导材料具有较高的电光耦合系数、较低的介电常数、带宽高、响应时间短, 热损耗小优点. 有机聚合物光波导材料比硅基无机光波导加工工艺简单经济, 无须高温加热, 可通过甩膜、光刻等工艺便可制出复杂的光电集成器件, 而且器件轻巧、机械性能好.

1、光开关

由于聚合物的高热光系数和低热传导率, 聚合物波导开关的功耗比硅光开关低两个数量级, 可以高密度集成在一块芯片上^[1].

T-O 开关: 聚合物 T-O 开关的工作原理基于波导材料折射率对温度的依赖. 马赫-曾德(Mach-Zehnder)或称方向耦合开关属于干涉型开关, 在低功率工作条件下串扰小, 但对波长变化敏感, 需要精确控制开关功率和环境温度. 数字光开关(DOS)的体积大, 但是对波长变化不敏感, 因此无需精确控制开关功率和温度.

E-O 调制器和开关: 聚合物材料的优点在于带宽较宽, 介电常数和折射率较低, 且相对来说没有频率依赖性, 保证了它们的带宽在 350GHz 量级. 用聚合物制造的器件带宽可达 113GHz^[2]. 最近人们发现聚合物还有易于加工, 易于和不同材料集成的优点. 人们已经成功的把 E-O 器件和 VLSI 半导体线路, 无源光纤线路集成为一体.

2、可调滤波器与可变光衰减器

聚合物波导中通过光化学方法制得布拉格光栅滤波器. 加热器调控的聚合物布拉格光栅(PBGS), dn/dT 能够达到 $-3.1 \times 10^{14} / ^\circ\text{C}$ (是玻璃的 30 倍), 可变率可达 $-0.36\text{nm} / ^\circ\text{C}$.

光衰减器可以用于高密度波分复用(DWDM)系统, 用来控制光放大器的增益, 均衡 DWDM 系统分插点的信道功率. 在这方面, 聚合物 T-O 可变衰减器(VOA)具有相当的潜力, VOA 根据开关原理制成, 包括干涉仪, 模式转换或模式限制器. 结合不对称分支薄膜波导, 人们研制成功了一种低功耗热光 VOA. 该器件的电功率损耗小于 25mW (工作于 1550nm 时), 比传统聚合物器件小了 50%^[3].

3、放大器

放大器用来补偿分束器，复用器，开关和其他器件的损耗。用稀土元素铒或钕作为激活元素，通过光泵浦使稀土离子达到粒子数反转之后，信号光的通过引起离子受激跃迁发光，产生放大效应。聚合物能够获得比无机玻璃更高的掺杂浓度，而且可以通过分子水平的掺杂更好的控制局部环境，还可以进行能量传输离子 (Yb^{3+} for Er^{3+}) 的选择共掺杂。



(a) 单模

(b) 多模

图 1 掺铈聚合物光波导 m 线测量结果

图 1 为我们光子技术研究所研究的掺铈聚合物光波导 m 线的测量结果，表明已经研制出单模和多模掺铈聚合物光波导（折射率为 1.58；厚度分别为 0.263 μ m 和 1.48 μ m），这对研制新型的掺铈聚合物波导放大器和激光器具有潜在的应用。

4、阵列波导光栅 (AWG) 多路调节 / 反调器 (Arrayed Waveguide Grating Multi-/Demultiplexer)

AWG 是一种构思巧妙的元件，可用于高效多波长调制和反调制。一个典型的 M*N AWG 如图 2 所示，分为输入区，平板区，相位延迟区和输出区。聚合物 AWG 波导的好处是无温度依赖特性（衬底热膨胀系数和波导热光系数相抵销），这样就能摆脱无机器件所需的累赘昂贵的控温系统^[4]。这种方法不仅仅适于 AWG，同样适用于基于光路差原理的其他波导滤波器，例如方向耦合器，Fabry-Perot 谐振器，DFB 和 DBR 滤波器，March-Zehnder 干涉滤波器，环状谐振器，栅状耦合器等。

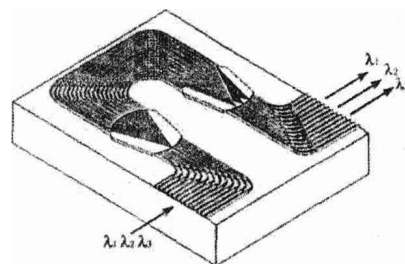


图 2. 阵列波导光栅多路调节/反调节器

5、垂直集成和 3D 集成器件

三维(3D)集成光学器件由垂直堆叠的水平 2D 集成层组成，层与层之间由垂直波导连接。图 3 为垂直偏振分束器，把偏振光垂直分束并引入两层重叠的 2D 集成光路，随机偏振的光由垂直偏振分束器分束后引入两个垂直叠放的信号处理通道（对等，且互为正交偏振态）分别进行处理，就可解决光的多偏振态对器件的影响^[5]。中国科学技术大学光子技术研究所研究了一系列的偶氮侧链聚合物液晶薄膜的光致双折射现象^[6]，并研究了双折射波导。

图 4 为偶氮液晶双折射波导耦合 m 线，材料的折射率 633nm 处为 1.676 左右。经过光致取向后测得显著的光致双折射 ($\Delta n \sim 0.02$) 这种双折射波导可用于集成光学中的偏振器和偏振分离器。

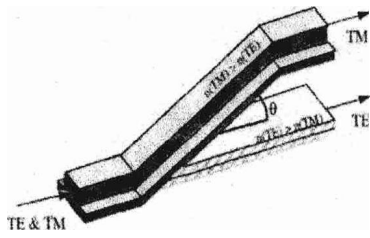


图3 聚合物垂直偏振分束器

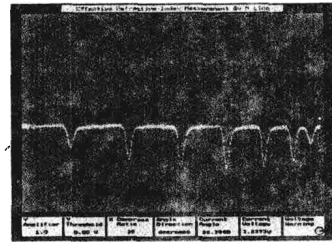


图4 偶氮液晶双折射波导耦合 m 线

6、聚合物光子晶体器件

光子带隙使光子晶体具有极大的色散性能,是普通晶体的500倍,传统光栅的50倍,在光波分复用(DWM)方向有着广泛的应用前景^[7]。结合光子带隙材料和聚合物波导技术,可以在波导中做出光子晶体超棱镜。形成直角弯曲而不泄漏光信号,从而使现有光学器件的小型化成为可能。

我们进行了光子晶体滤波器的设计与模拟计算,在二维光子晶体波导中设置缺陷构成滤波器。设计了多种滤波器构成方法,模拟计算了相应的透射谱。目前我们正在研究级联光子晶体滤波器、光子晶体分束器(图5)、光子晶体耦合器、光子晶体干涉器、可调光子晶体滤波器、光子晶体开关等无源光子晶体器件。

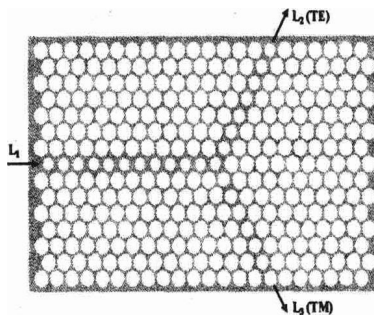


图5 光子晶体偏振分束器

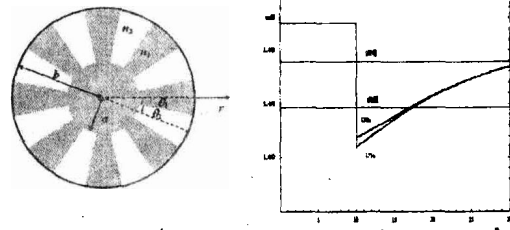


图6 瓣状有源聚合物光子晶体光纤

同时,与香港城市大学联合设计包层折射率瓣状分布的有源聚合物光子晶体光纤,如图6所示。瓣型包层聚合物光纤在10um~30um纤芯尺寸范围内,只有LP0m模可以传输,并实现了高带宽的梯度有效折射率分布。

三、聚合物光纤器件

1、功能聚合物光纤与器件

1) 功能聚合物光纤特性的研究 根据聚合物特点我们研究用于有源和无源聚合物光纤器件的特种功能光纤。在有源聚合物光纤方面,我们先后研制了用于聚合物光纤激光器和放大器的Nd³⁺,Eu³⁺,Sm³⁺等稀土离子掺杂的聚合物光纤和若丹明染料掺杂聚合物光纤。

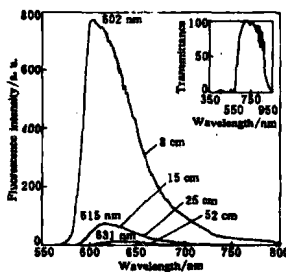


图7 (a) 掺若丹明染料荧光谱

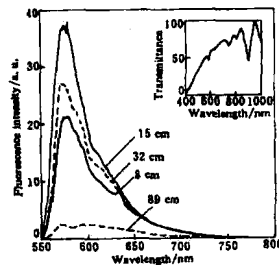


图7 (b) 掺Nd³⁺聚合物光纤荧光谱

图 7 (a) 为不同长度掺若丹明染料的荧光谱, (b) 为不同长度掺 Nd^{3+} 聚合物光纤的荧光谱。掺染料的光纤与稀土掺杂聚合物光纤相比优点是发射截面比掺稀土离子的聚合物光纤大。缺点是染料掺杂的聚合物相对来说稳定性差。

掺杂聚合物光纤与石英掺杂光纤相比, 物理特性有所差别。比如聚合物基质比 SiO_2 基质使光谱线宽展得更宽, 对于聚合物光纤激光的调谐更为有利; 但随着掺杂浓度得增加, 如图 8 所示, 团簇效应比 SiO_2 基质光纤中更为明显。

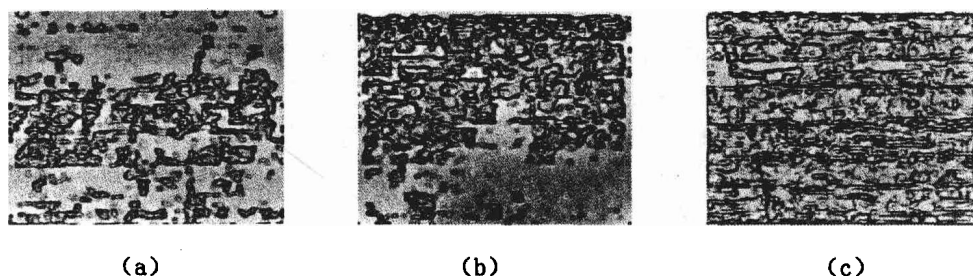
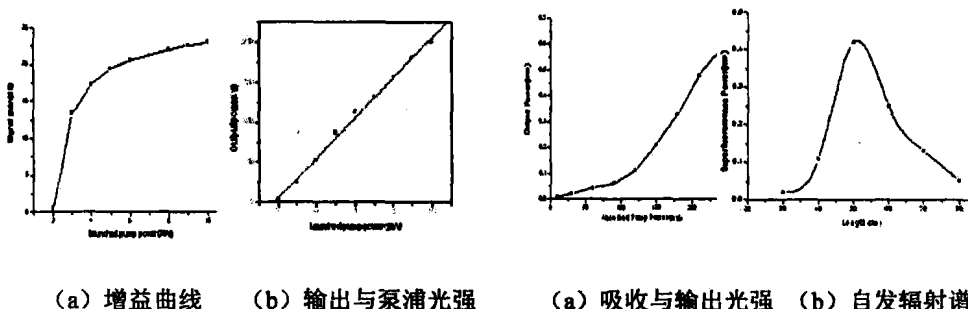


图 8 不同掺 Nd 浓度的聚合物光纤样品的近场光学扫描显微图像

2) 聚合物光纤放大器

我们进行了聚合物光纤放大器的研制, 采用长 0.6m, 芯径 0.4mm, 掺若丹明 B (5ppm 的浓度) 聚合物光纤为工作物质, 以 532nm 脉冲 (脉宽 10ns) 激光为泵浦源, 在 620nm 波长获得 23dB 增益^{[8][9]}, 图 9 为若丹明 B 掺杂的阶跃聚合物光纤(a)信号增益曲线(b)输出光强与泵浦光强关系。另外, 我们选择合适的配体和稀土离子制备络合物以改善聚合物的相容性, 将稀土螯合物作为增益介质掺入纤芯区, 研制出掺 Nd 和 Eu 的聚合物光纤, 并获得放大的自发辐射^[14,15,16], 图 10 为掺 Eu 聚合物光纤 613nm 放大自发辐射, (a)为吸收光强与输出强度关系(b)为放大的自发辐射谱,为研制比染料掺杂光纤稳定性好的聚合物光纤放大器奠定了基础。



(a) 增益曲线 (b) 输出与泵浦光强 (a) 吸收与输出光强 (b) 自发辐射谱

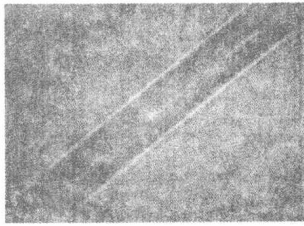
图 9 若丹明 B 掺杂聚合物光纤增益放大 图 10 掺 Eu 聚合物光纤放大自发辐射

与掺 Er^{3+} 石英光纤放大器相比, 掺杂聚合物光纤放大器具有更高的功率放大功能、更宽的带宽和更高的能量转换效率, 聚合物光纤放大器可望弥补 POF 损耗大的缺点, 使聚合物光纤局域网具有更强的适应性。

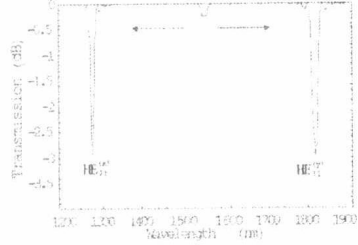
3) 聚合物光纤光栅

澳大利亚新南威尔士大学 P.L.Chu 等人在光敏的单模聚合物光纤上研制了宽调谐的布拉格光纤光栅, 这种光栅的可调谐范围可望达到 100nm, 在密集波分复用系统中具有重要应用前景。中国科技大学在研究液晶聚合物的非线性的基础上, 也研制出新型偶氮液晶聚合物光纤并分别刻写了多模和单模的长周期聚合物光纤光栅^[8]。

图 11 (a) 为单模双折射长周期光纤光栅, (b) 为双折射长周期光纤光栅的特征, 由于双折射导致的两个分离的偏振峰。这种长周期光栅有望用作在一些诸如偏振色散补偿、放大器的均衡增益器、模式转换器和参量传感器等聚合物光纤器件。



(a) 单模双折射长周期光纤光栅

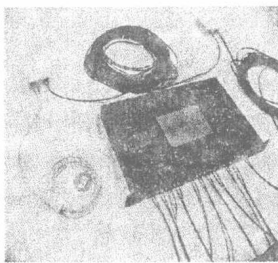


(b) 双折射导致的两个分离的偏振峰

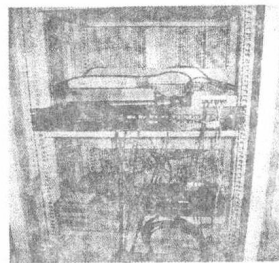
图 11 长周期聚合物光纤光栅

2、 聚合物光纤短距离信息传输

中国科学技术大学光子技术研究所围绕聚合物光纤在短距离通信中的应用研制了一整套的聚合物光纤网络器件，并在这些器件的基础上建立聚合物光纤局域网传输系统



(a) 传输链路系统

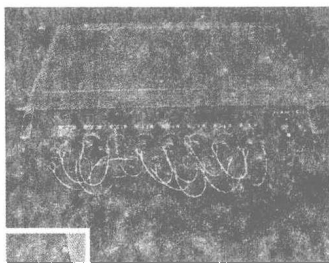


(b) 局域网示范工程

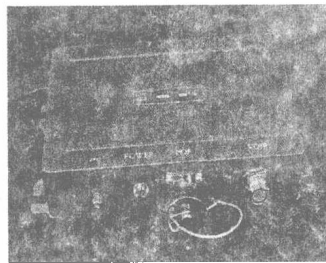
图 12 聚合物光纤局域网传输系统

如图 12 (a)，聚合物传输链路系统，主要包括：聚合物光纤光电转换器、聚合物光纤波长转换器和中继器、聚合物光纤交换机以及聚合物光纤网卡。图 12 (b) 为 聚合物光纤局域网示范系统。

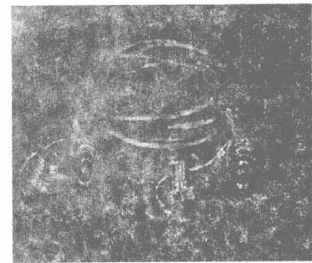
在军事信息化发展过程中，通信系统最为信息交换的神经枢纽，在短距离通信系统中，要求具有多节点交换，快速安装和修复、野战环境适应能力强，结合军用车载通信系统的特点，我们研制一套车载聚合物光纤传输系统。



(a) 光纤交换机



(b) 光电转换器



(c) 光电混合连接器

图 13 军用聚合物光纤传输器件

图 13 为军用车载聚合物光纤传输系统主要器件，(a) 为军用聚合物光纤交换机，按模块化、标准化、系列化的原则进行结构设计，符合野战综合通信二期、三期工程标准等标准规定 (b) 为军用聚合物光纤光电转换器，有良好的防水性等三防性能，使设备符合湿度条件等相应的国际军用标准要求，又能使产品有良好的电磁兼容性，使设备满足电磁兼容标准的要求。(c) 光电混装连接器，一种在连接器内即装光纤接触件又装电接触件的连接器，通过一次连接，可以同时接通系统所需要的光信号和电信号。

为了深入研究聚合物光纤在短距离通信中的应用，我们进行了聚合物光纤粗波分复用的研究。利用聚合物光纤在可见光的两个通信窗口，用不同波长的光在单根光纤中实现多路信号传输的实验，

这样即可以充分利用光纤的传输带宽。

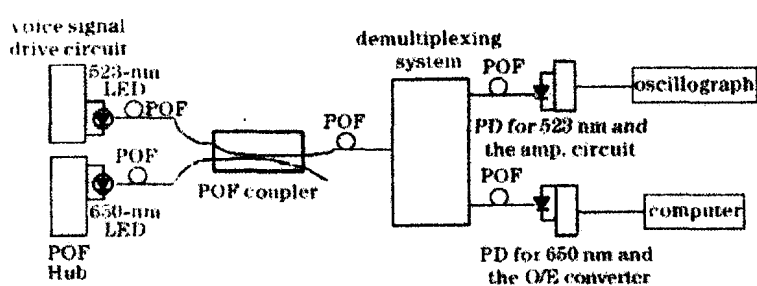


图 14 聚合物光纤双波长复用系统框图

图 14 为聚合物光纤双波长复用系统框图，两种不同波长光通过一个聚合物光纤耦合器复用到一根聚合物光纤进行传输，传到聚合物光纤末端时光被送入解复系统。成功的实现了语音信号（523nm LED）与 IP 信号（650nm LED）的复用。

目前，商用的聚合物光纤存在着损耗相对过高的缺点，使得传输距离有限。建立局域网，就会涉及到楼之间的线路连接问题。中国科学技术大学光子研究所在千兆岛概念基础上提出了一种可以与聚合物光纤通信系统兼容的自由空间光通信系统（图 15），使聚合物光纤的实际使用更加灵活。

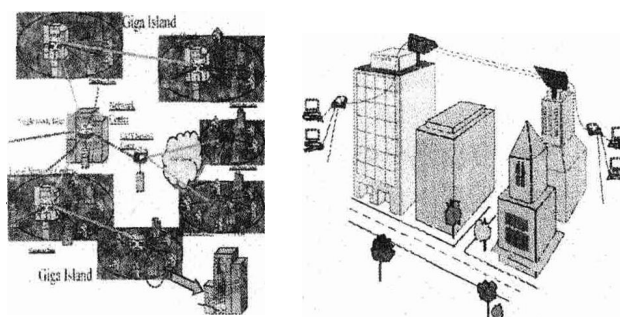


图 15 基于千兆岛基础上的自由空间光通信系统

3、聚合物光纤测试器件

在聚合物光纤研究方面，中国科技大学光子技术研究所研制了聚合光纤特征参数，谱损、折射率分布等参数系列测试仪器。

1) 聚合物光纤特征参数测量仪

聚合物光纤特征参数测量仪（如图 16），可以实现聚合物光纤芯、包层直径、不圆度、偏心率等光纤几何参数以及光纤截面的折射率的测量。芯径测量精度 $<4\%$ ，椭圆度测量精度 $<2\%$ ，偏心率测量精度 $<6\%$ ，折射率分布测量精度在 10^{-3} 以上。

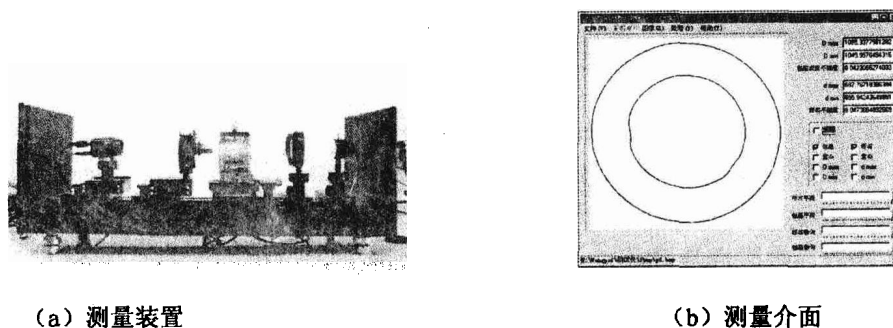


图 16 聚合物光纤特征参数测量仪

2) 聚合物光纤谱损测量仪

聚合物光纤谱损测量仪，如图 17 所示。波长范围：400nm~800nm，可以实现聚合物光纤的单波