

**第九届全国塑料光纤
聚合物光子学会议
暨国际研讨会**

会议 论文集

中国·常州

2013.10.23-24

第九届全国塑料光纤、聚合物光子学会议暨国际研讨会

论 文 集

中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会

常州市武进区人民政府

武进国家高新技术产业开发区管委会

主办

南京邮电大学

常州市华晟福涛光电科技有限公司

常州市武进区科学技术局

武进国家高新技术产业开发区科技局

集成光电子学国家重点联合实验室

常州市武进电子业商会

联合承办

会议时间：2013 年 10 月 23 日 -24 日

会议地点：江苏省常州市武进区西太湖明都国际会议中心酒店

第九届全国塑料光纤、聚合物光子学会议暨国际研讨会
会议组织机构

会议名誉主席

李乐民 院士（电子科技大学）
黄 维 院士（南京工业大学）
于荣金 教授（燕山大学）

会议主席

刘德森 教授（纤维光学与集成光学专业委员会主任、西南大学）
张大明 教授（吉林大学）
王 瑾 教授（南京邮电大学）

会议学术委员会主任

明 海 教授（中国科学技术大学）

副主任

（按姓氏拼音排名）

储九荣（四川汇源塑料光纤有限公司）
甘 露（工信部有线通信产品质量监督检验中心）
江晓清（浙江大学）
金小平（江苏金印福涛光电有限公司）
李宝军（中山大学）
廖进昆（电子科技大学）
刘新厚（中科院理化技术研究所）
王丽莉（中科院西安光机所）
王亚辉（深圳中技源科技有限公司）
吴文军（东莞市华鹰电子有限公司）
杨建义（浙江大学）
张其锦（中国科学技术大学）
张 彤（东南大学）
赵明山（大连理工大学）

委员

（排名不分先后）

孙小菡（东南大学）
王廷云（上海大学）
章献民（浙江大学）
曹庄琪（上海交通大学）
钟力生（西安交通大学）
张 宁（北京石油化工学院）
郑志强（福建师范大学）
周 骏（宁波大学）
余木火（东华大学）
朱 冰（中国科学技术大学）

江 源（南京玻璃纤维研究设计院）
王学忠（中科院西安光机所）
陈 明（江西大圣光电技术有限公司）
缪立山（西安飞讯光电有限公司）
王自和（东莞一普实业有限公司）
张在宣（中国计量学院）

会议组织委员会主任

金小平 董事长（常州市华晟福涛光电科技有限公司）

副主任

王 瑾 教授（南京邮电大学）

论文联系人

许吉 老师（南京邮电大学）
邮箱：xuji@njupt.edu.cn

会议联系人

金双（常州市华晟福涛光电科技有限公司）
电话：13584347300

目 录

001	塑料光纤技术与应用的最新进展
	中国科学技术大学
	明海 陈子豪 崔哲
020	高效率聚合物太阳能电池研究
	中科院宁波材料所
	葛子义 王洋
022	齐心协力，把塑料光纤和聚合物光子学推向一个发展新阶段
	燕山大学
	于荣金
025	小分子本体异质结光伏电池聚集态结构的调控
	上海大学化学系
	王洪宇 赖衍帮 高君 蒋彬
027	聚合物波导光栅研究进展
	吉林大学
	段宁 徐帅 孙雨 刘楠 王菲 张大明
032	结构紧凑的聚合物光波导交错滤波器
	电子科技大学
	陈开鑫
036	金属纳米结构在有机聚合物光电器件中的光局域增强特性研究
	东南大学
	Tong Zhang, Xiao-Yang Zhang, Ruo-Zhou Li, Sheng-Qing Zhu1, Yuan-Jun Song
042	基于 S-PIN 二极管的固态等离子体天线仿真设计
	东南大学
	ZENG Fanhuil, LI Weil, ZHANG Tong
049	掺铈光波导放大器研究进展
	厦门大学
	黄晓亮 汪建斌 张以亮 张丹

目 录

用于板间光互连的光波导及其关键技术 055

浙江大学

郝寅雷 杨建义 余辉 周强 江晓清 王明华

聚合物光纤带宽测试仪研制 062

中国科学技术大学

许立新 陈国良 魏安昆 顾春 王安廷 明海

微纳米压印聚合物光波导器件 063

大连理工大学

赵明山 韩秀友 王凌华 谷一英 武震林 任军 贾凌云 王锦艳 蹇锡高

Microwave Photonic filter based on polymer waveguide ring resonator 067

大连理工大学

Xiuyou Han, Yu Wangl, Linghua Wang, Pin Zou, Yiyang Gu, Jinyan Wang, Xigao Jian, Mingshan Zhao

四川汇源超低损耗 PMMA 塑料光纤研发进展 074

四川汇源塑料光纤有限公司

李凯 张用志 张海龙 储九荣 吴祥君

基于聚合物波导的混合光电集成技术 080

南京邮电大学

Jin Wang (王瑾) Ji Xu (许吉) Xu Fu (付旭) Xiyan Jiang (蒋锡燕) Jinbing Mao (冒进斌) Yang Han (韩洋)

Small SU-8 microphotonic integrated devices on Si substrate 085

浙江大学

Daixin Dai, Li Jin

塑料光纤在 FTTX 的应用 090

吉林大学

张大明 王菲 陈长鸣

聚合物基 M-Z 干涉型热光调制器件的研制 095

吉林大学

牛小艳 谷云龙 郑阳 陈长鸣 孙小强 王菲 张大明

目 录

100	全聚合物电 – 光流控芯片设计及制备
	吉林大学
	王希斌 孙健 衣云骥 张大明
105	掩埋型共面波导电极聚合物电光调制器研究
	吉林大学
	赵旭亮 谢莹 牛小艳 岳远斌 孙小强 张大明
110	有机无机双层光波导混合集成器件的研究
	吉林大学
	张立钧 谢莹 王焕然 曲禄成 梁磊 衣云骥 张大明
115	位阻功能化有机 聚合物发光材料及其器件
	南京邮电大学
	解令海 孙明礼 钱妍 仪明东 石乃恩 黄维
117	聚合物光纤在汽车照明中的应用
	中材科技南京玻璃纤维研究设计院
	江源 李泽财
128	塑料光纤在车载系统中的应用
	日本三菱、日本共荣商事株式会社上海代表处
	中村 一己 刘纲
134	环烯烃共聚物空芯微结构太赫兹光纤的设计与制造
	西安光机所
	孔德鹏 姬江军 马天 陈琦 何晓阳 侯瑞宁 储九荣 王丽莉
144	西安光机所聚合物微结构太赫兹光纤技术研究进展
	西安光机所
	孔德鹏 王丽莉
150	Design of Graded-Index Terahertz Fiber with Ultra-flattened Chromatic Dispersion
	西安光机所
	Ma Tian (马天), Kong Depeng (孔德鹏), Ruining Hou(侯瑞宁), Wang Lili (王丽莉)

目 录

大孔包层亚波长多孔芯聚合物太赫兹纤维的设计与制造	158
--------------------------	-----

西安光机所

马天 孔德鹏 陈琦 何晓阳 侯瑞宁 储九荣 王丽莉

国外纤维光学新技术及 GI 聚合物光纤新技术研究进展	166
----------------------------	-----

西安光机所

王丽莉 孔德鹏

塑料光纤技术与应用的最新进展

明海 陈子豪 崔哲

中国科学技术大学光子技术研究所，安徽，合肥，230026

塑料光纤制备与应用国家地方联合工程实验，四川，成都

摘要：本文综述国内外塑料光纤研究工作的最新进展，介绍了低损耗，高带宽梯度折射率分布的塑料光纤的现状和发展，塑料光纤参数测试与标准，塑料光纤传感等研究工作。并概述了一些塑料光纤器件和塑料光纤一些最新概念及其应用

关键词：梯度折射率光纤 塑料光纤 测试标准 塑料光纤器件与应用

一、引言

人类社会的高速发展和信息技术的日新月异使人们对于通信的要求和期待更高，传输数据所依赖的网络和传输介质需要具有极高的数据通信能力。传统的双绞铜线或同轴电缆，由于带宽的限制，传送距离短，电缆重 (70g/m)，价格高；更重要的是噪声很大，在 100 Mbit/s 以上的传送速率下，电磁辐射噪声远超过 FCC 的规定值。而石英光纤具有带宽宽，衰减低等特点，是长距离通信干线的理想的传输介质，但是在整个通信网络的最后一环，却无法被大量应用，因为其芯径细 (8~6.25um)，在光纤耦合，互接中需要高精密度对准，几微米的连接偏差就会引起很大的耦合损耗，连接器件成本和安装费用大大增加了系统的造价，而且其柔韧性不佳，无法适应在终端由于房屋布置的各种可能布线方式，因此导致整个高速通信网络无法形成。塑料光纤 (POF，又名塑料光纤) 由于其较粗的芯径 (0.3~3mm) 和良好的柔韧性，所以连接方便，耦合效率高，更适合各种布线情况，从而解决了上述石英光纤遇到的困难。同时具有高带宽、耐震动、抗辐射、价格便宜、施工方便的优点，成为未来光纤入户工程中的首选材料之一。

美国和日本在塑料光纤和接入网的研发计划中投入巨额资金，企图在国际日趋激烈的知识经济竞争中一直占据有利的位置，并主导着行业标准。从 1994 年起，日美相继成立了塑料光纤合作组织：Packard Hughes、波音、波士顿光纤、Honeywell 等公司参加的美国高速塑料光纤网财团由 ARPA 资助 6000 万美金，1997 年以光纤微网络计划 (OMNET)，由美国政府和工业界再次资助 6000 万美元。2000 年，日本旭硝子公司采用全氟聚合物 (CYTOP) 制造出梯度折射率 (GI) 光纤。同年，AGC 公司开始商业化生产基于 CYTOP 材料的梯度折射率光纤 “Lucina”，并被广泛使用。2004 年，世界上第一个利用梯度型塑料光纤形成的达到 Gbit 传输的医疗通信网络于在日本东京的一家医院运行。2007 年，日本旭硝子 (AGC) 公司商业化生产出 40Gbps 的 CYTOP 基质的 GI POF。2008 年，贝尔实验室也达到了这一指标。在 2010 年，AGC 公司再次商业化生产了新一代的基于 CYTOP 材料的梯度折射率光纤 “Fontex”。

近年来，日本已经将 PMMA 材料的阶跃型折射率光纤广泛的运用于短距离信息传输中，比如铁路信号系统，汽车信号系统，数码声控系统等，尤其在汽车系统中，这种广泛更是起到了无可替代的作用，在蓝牙，汽车导航，声音识别，音箱功放及车载显示等都有应用。在家庭网络中的应用更是使 Gbit 传输的期望得以实现，比如 Gbit 以太网，高速局域网等。欧盟也不示弱，于 2006~2008 年发起了一项 POF-ALL (Paving the Optical Future with Affordable Lightning fast Links) 的计划，旨在实现住宅高速网络：发展 POF 数百米范围内实现 100Mbps 的网络；发展 POF 数十米范围内的 1Gbps 网络。于 2008~2011 再

次发起了一项名为 POF-PLUS (“Plastic Optical Fibre for Pervasive Low-cost Ultra-high capacity Systems”) 的计划, 旨在工业, 交通系统中: 实现商业化低价低功耗的 1Gbps 家庭网络覆盖; 发展相应的仪器; 逐步建立行业标准。

国内, 2003 年四川汇源光通信股份有限公司实现了低损耗 PMMA 塑料光纤的产业化生产并制定了两项通信行业标准。2006 年, 中国科学院理化技术研究所实现损耗 200dB/km 的 PMMA 光纤生产。中国科技大学从 1994 年就开展功能塑料光纤与器件的研究, 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, 以及 1.25Gbit 塑料光纤链路传输系统。2010 年 6 月在四川成都成立了塑料光纤制备与应用国家地方联合工程实验室, 2010 年西安飞讯光电有限公司等单位起草了 650nm 百兆以太网塑料光纤网络适配器, 650nm 塑料光纤转发器, 以及塑料光波长转换器等三个国家标准。2011 年国内首个由中联地产公司和江西大圣塑料光纤有限公司以及安徽铜陵电信公司共同合作开发的安徽省铜陵市“幸福家园”小区石英光纤与塑料光纤配合实现光纤到户。南京玻璃纤维设计院开展了以装潢为主要目的塑料光纤的研究, 但尚未用于通信领域。此外, 还有许多其他院校和研究所相应开展了塑料光纤和器件的研究工作。根据我国国情, 对于目前普遍较为集中居住条件而言, 发展高性能、低成本的入户塑料光纤网络, 具有巨大的经济和社会效益; 同时对于要求高度保密性的军事接入网和需要尽可能减轻重量的航空航天事业的发展, 也具有极其重要意义。

第一届 1992 年国际塑料光纤会议在美国召开, 现已延续到第 22 届, 2012 年 9 月 10-12 日在美国亚特兰大召开第 21 届国际塑料光纤会议的主题是: POF 最新进展, 应用和工业上进步。内容包括 Gbit 传输光纤, 高温塑料光纤, 航天及交通业应用, 家庭网络技术, 交互网络电视, 制造业应用等。2013 年 9 月 11-13 日将在巴西 Buzios 召开第 22 届国际塑料光纤会议, POF 在光通信中应用的新趋势, 以及 POF 传感将是会议中心议题。另外第一届亚太塑料光纤论坛于 2001 年在澳大利亚的悉尼举行。2003 年在香港又举行了第二届亚太塑料光纤会议。许多国际上塑料光纤领域的光电子专家汇聚香江, 此次论坛由香港城市大学光电子科技研究中心与日本庆应大学共同主办。全球首位发现以光纤为通讯骨干的“光纤之父”高锟教授以“强劲的新科技”为题, 畅谈塑料的未来发展。历届的 OFC 会议安排了塑料光纤会议专题, 2013 年在美国召开的 OFC 会议由国际塑料光纤销售组织 (POFTO) 主持塑料光纤会议专题, 中心议题是 POF 千兆网及它的产品和技术的发展。

二、低损耗、高带宽的塑料光纤及传输

2.1 塑料光纤的带宽与衰减

回顾 POF 的发展历史, 早期的材料主要是基于 PMMA 的阶跃折射率 POF。最初的 POF 是由杜邦公司生产的阶跃折射率光纤, 质量大, 半径大使得制造工艺变得简单, 廉价, 三菱丽阳公司, 旭化成和日本东丽公司也有产品问世。对比 PMMA, PC, PS 三种材料, PMMA 材料最优, 而且该材料还具有价格低廉, 工艺简单, 抗腐蚀性好的性能。但即便是非常纯的 PMMA 材料, 由于化学结构中 C-H 键的存在, 其高衰减始终无法被解决, 而且大口径也使材料带宽有限制。考虑到在家庭终端的尺度范围大概在 30 米左右, 合适材料的参数应该 <200dB/km。

信息技术领域迫切需要千兆容量的光纤铺设到家庭和办公网络中去。鉴于上述原因, 日本庆应大学在 2003 年的这次会议上首先提出了高速梯度塑料光纤和千兆岛的概念, 将低损氟化梯度塑料光纤用于千兆局域网的布线当中。

为了实现家庭网络中需应用的具有低损耗、高带宽性能的 POF，人们在降低损耗和提高带宽这两点上分别做了努力。首先，为了降低损耗，更多新的材料被广泛研究；其次，为了提高带宽，人们选择放弃阶跃折射率光纤，选用梯度折射率光纤。下面来分别讨论这两点。

首先是降低光纤的损耗，我们可以利用添加重原子如 F，D 的方法来实现。人们开始寻找部分氟化的材料，既能减少 C-H 键吸收损耗，又能维持聚合度。比如，多聚 TFEMA 在 670–680nm 的损耗率在 127–152dB/km，另一种共多聚材料（MMA 和多聚 PFPMA，摩尔配比为 65/35）的损耗率在 670–680nm 为 185dB/km，均符合家庭终端的应用同时，人们也开始大力研究全氟化聚合物，相比较大部分可以直接聚合的碳氢有机单体，只有少部分全氟化单体在常规条件即可聚合。而且塑料凝固点低，常温就可能结晶，变得不透光，因此必须在聚合主链上引入脂肪环。常见的两种透明材料材料是由美国杜邦和日本 AGC 旭硝子公司生产的 Teflon AF 和 CYTOP（全氟-丁烯基乙烯醚），两者常因为低折射率被制作外包层，尤其是 Teflon AF 折射率只有 1.29，比水低，可以用来研究水芯光纤。而 CYTOP 由于不含 C-H 键，损耗率极低，且透明性很好，在 1000nm 处，仅有 0.7dB/km，如图 1 所示，这一指标仍有降低潜能。实际上 CYTOP 材料卓越的低损耗性能（约 10dB/km）已经大大超出了家庭网络的要求，诸多采用重氢原子取代的材料的折射率指标依然很高，材料色散依然严重，其对于带宽的影响无法忽略。

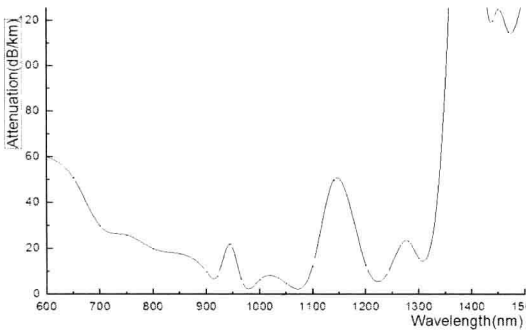


图 1 全氟 GIPOF 的光谱衰减与波长的关系

图 2a 展示了新型材料 CYTOP 低材料色散的优质性能，甚至优于石英光纤。图 2b 则表现出 CYTOP 基质的 GI POF 的带宽性能，甚至要优于多模石英光纤。2007 年，AGC 公司制造出来 40Gbps 的 CYTOP 基质的 GI POF。2008 年，贝尔实验室也达到了这一指标，这些都说明了 CYTOP 材料在光纤技术中的美好前景。2010 年 AGC 公司已经推出了采用联合挤压法生产的 CYTOP 基质的 GI POF Fontex。

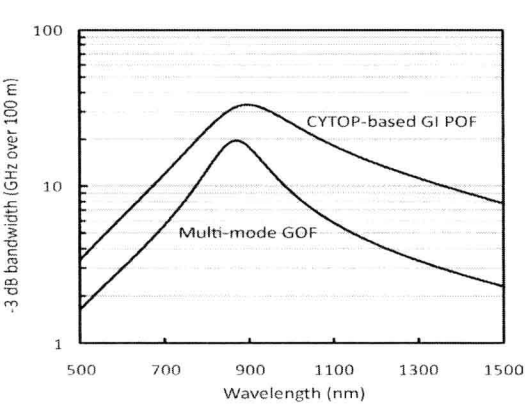


图 2a PMMA，CYTOP，石英的材料色散

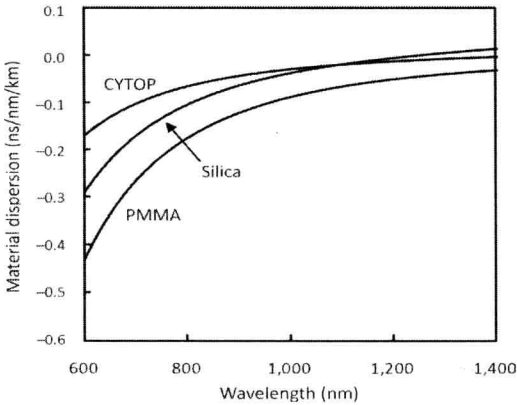


图 2b 多模 GOF 和 CYTOP 基质 POF 的带宽

其次人们采用梯度折射率光纤来提高光纤的带宽性能。阶跃折射率 POF 由于直径较大，多重模的色散效应直接导致频带降低至 100Mbps，采用梯度折射率光纤来进行光程补偿，以减少带宽损失。折射率分布为：

$$n(r)=n_1\left[1-2\Delta\left(\frac{r}{a}\right)^g\right]^{\frac{1}{2}}\qquad 0\leq r\leq a\qquad (1)$$

其中，

$$\Delta=\frac{n_1^2-n_2^2}{2n_1^2}\qquad (2)$$

近年来，人们在技术上想尽了办法提高梯度折射率光纤的带宽性能。最初的工艺技术是同时聚合多个有不同折射率指标的单体材料，很明显，这种混合材料的损耗，带宽，数值孔径、透明度等参数因为单体材料的不同指标而受到限制。不足以用于最后几百米，这些年技术的发展使一些参数逼近理论极限，而且其热稳定性低于石英材质的问题也在从三个角度逐渐克服，一是采用高热稳定分子构型的材料，二是采用共聚化合物，三是采用交联聚合物。各种各样的制造方法层出不穷，工艺发展的着眼点主要有三个，一是特定折射率光纤的制造工艺，二是降低光纤的衰减，三是减少光纤的材料色散。

为了制造出带宽性能更好的梯度折射率光纤，人们发展了很多方法，其中有两种方法使用低分子掺杂的技术最为广泛。

一种方法是界面凝胶法（如图 3 示），界面掺杂后利用离心技术聚合，使得折射率按照抛物线型分布，这种方法可以控制 POF 的侧面进而较为精确的控制折射率分布，使得 POF 的带宽性能较优越。但是由于步骤复杂，并且光纤的长度预先被确定，导致其大规模生产的成本较高。

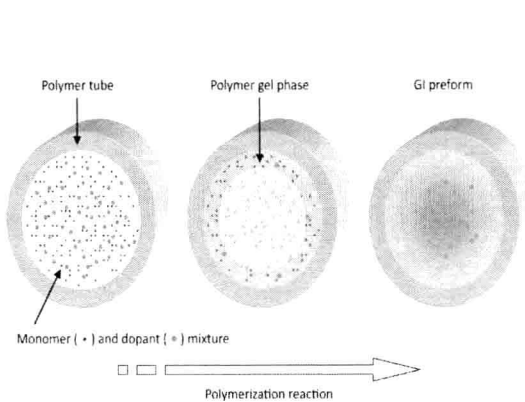


图 3 界面凝胶法

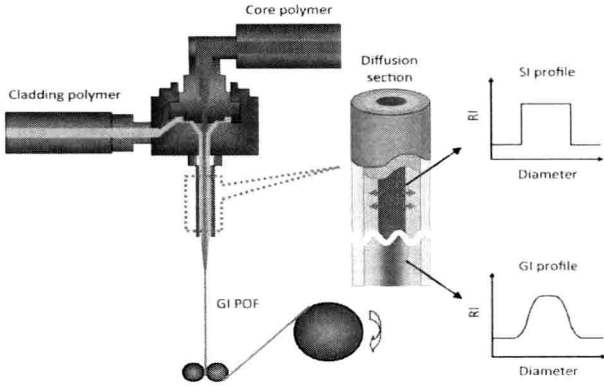


图 4 联合挤压法

为了实现大规模生产，近年来人们又提出了联合挤压法（如图 4 所示），这种方法掺杂的低分子和同质的单体各自聚合为芯和外包层。然后两者联合挤压，混合成同芯结构，但此时光纤的折射率分布并不是梯度型的，此时要加热使分子径向扩散凝结形成折射率梯度分布，最后将其卷起形成 GI POF。以 DPS-PMMA 系统为例，两者首先在 90℃ 分别聚合 24 小时，然后再讲聚合块在 110℃ 加热 48 小时，之后再将其与 210℃ -250℃ 共同挤压混合，形成复合同芯结构，此时的光纤还不是梯度折射率光纤，再将其加热，为了让集中的小分子聚合物沿径向扩散，形成一定的浓度梯度。整个物理过程实际可以用菲克扩散定律来描述。

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(Dr\frac{\partial C}{\partial r}\right)\qquad (3)$$

其中，C 表征小分子的浓度，t 是扩散时间，r 是到内芯距离，D 是表征小分子相互扩散浓度的系数。这个

公式可以数值计算出梯度折射率光纤的梯度分布，可以看到，这种方法确实构造了一个折射率缓变分布的光纤。然而实验数据与理论计算略有偏差是因为理论计算时，我们将扩散系数 D 视为常数，然而在实际多聚物掺杂的系统中，掺杂效应必须被考虑。这是因为由于掺杂效应，石英转变温度 T_g 也随之线性下降。在工艺中必须保证聚合温度要高于石英转变温度 T_g ，才能保证损耗率。因此掺杂间接的影响了工艺温度，而影响了小分子的扩散度和活性，导致折射率梯度分布与理论计算的的不同。也即，扩散过程实际是满足一个 D 随着掺杂浓度变化作为参量的菲克定律。这种误差虽然小，但是能够导致材料色散的增强及带宽性能的下降，而且还能使光线对于光的禁闭能力变差，也降低了其弯折和机械性能。

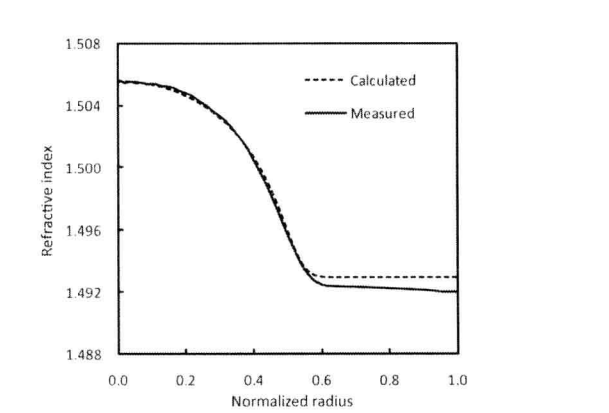


图 5 DPS-PMMA 系统的 -3dB 带宽性能

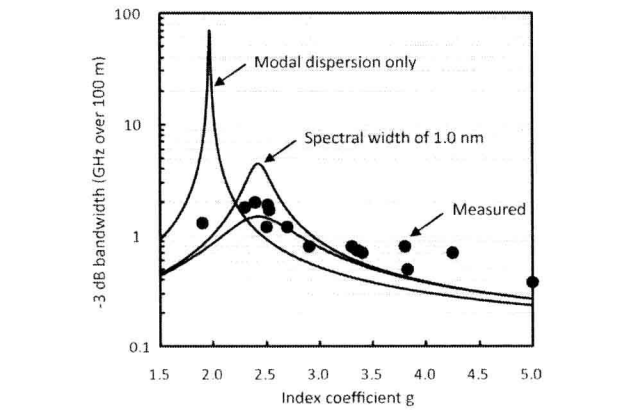


图 6 联合挤压法制造的 DPS-PMMA 系统的折射率分布

图 6 是 DPS-PMMA 中利用该联合挤压法中得到的梯度折射率分布的理论计算值和实验值，发现吻合的相当不错。目前实验所测结果与理论计算结果已经非常贴近意味着我们采用联合挤压法生产的梯度折射率光纤已经拥有十分优异的带宽性能（如图 5 所示），这种技术是完全可行的并且已经被广泛采用并被商用生产所采纳。现在人们正在为如何精确的有效的控制折射率梯度，进一步提高其带宽性能而做着努力。

一种新型研制的双包层光纤（如图 7 所示）可以大大降低弯折损耗，就是利用新型的共同挤压法来实现传统方法实现不了的结构。这种新型的联合挤压法可以实现传统方法无法实现的光纤结构。而这种弯折损耗率是室内家庭光纤布线的重要考量因素。这种光纤的弯折损耗率的降低时依靠增加内芯和外包层折射率的差异实现的，它有两个外包层，每层都比传统光纤的外包层的折射率更低。现如今电视的高清晰度和高视觉效果所要求的高清晰度的多媒体界面标准（HDMI）的 10Gbps 已经无法靠传统的电缆线实现。利用这种双包层光纤，我们已经可以实现系统中的 HDMI 要求的 10Gbps 传输速度。其优异的弯折性能如下图所示，即便弯折十次，也仍然可以达到传输标准，其他结构的 POF 也正在如火如荼的被研制中，依赖于联合挤压的技术，家庭信息高速路的贯通值日可待。

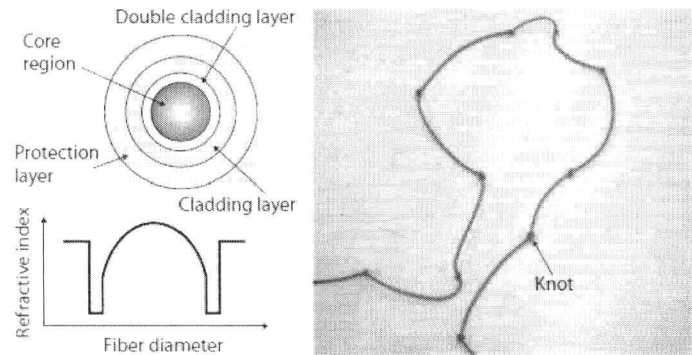


图 7 新型双包层光纤结构示意图

2.2GIPOF 高速传输实验和应用

对于未来的家庭网络（如图 8 所示），交换式的因特网服务可以实现在线购物、转帐、储备和投资、电子邮件、可视邮件、IP 电话以及在线电视会议，家庭网路、在线医疗、在线教育、数字高清晰度广播、网络娱乐游戏等。所有这些需要高速的家庭网络系统（10M/100M ~ 1Gbps）。在日本许多城市已经开始用管道实现光纤入户工程，对机械弯曲和外部环境要求较高，而 PFGI-POF 则非常适合恶劣的化学环境和大的弯曲曲率情形，带宽达到 Gbit 量级，远满足宽带家庭网络的要求，PFGI-POF 具有许多优点。如用廉价的工具安装 SC 型连接器只需要 1 分钟，PFGI-POF 的端面可以直接用一般的刀片切割，PFGI-POF 可以明显降低线缆和连接器的安装成本等等。加上 PFGI-POF 固有的低传输损耗和高的带宽，PFGI-POF 在局域网（LAN），存储部分网络（SAN），互联以及家庭网络等领域有着广泛的应用。因此成为最具有前景的家庭网络信息传输材料之一。

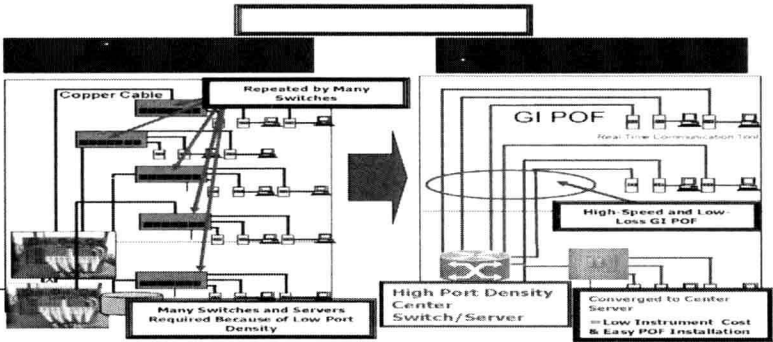


图 8 基于 POF 的千兆网示意图

GIPOF 的 Gbit/s 以上传输性能已被庆应大学及其他研究机构从实验上证实。1995 年，T. Ishigure 等人用 0.65μm 波长高速 LD 在 GIPOF 上的 2.5Gbit/s 100m 数据传输实验。1997 年 H. Imai 在 1.3μm 波长用氟化聚合物 GIPOF 的 2.5Gbit/s 200m 传输实验。较新的记录是：G. D. Khoe 等人在 PMMA 基质 GIPOF 上的 2.5Gbit/s 200m 数据传输和使用氟化聚合物 GIPOF(Asahi) 在 1.3μm 波长的 2.5Gbit/s 320m 数据传输实验结果^[12]。1999 年 AGC 和美国贝尔实验室利用 CYTOP 基质的 GIPOF 在 100 米进行传输实验，速率达到 11Gbit/s。2007 年，日本 AGC 公司在利用 CYTOP 基质 GIPOF 进行超过 100 米的传输实验中速率达到 40Gbit/s（如图 9 所示）。2008 年，美国贝尔实验室利用 CYTOP 基质 GIPOF 进行 100 米传输实验中速率也达到 40Gbit/s。

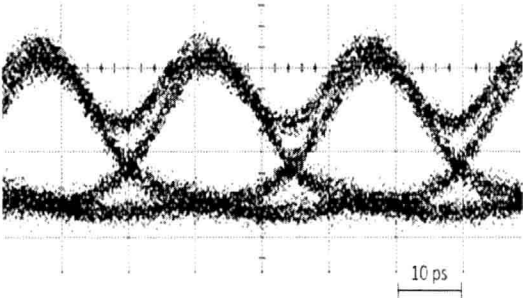


图 9 CYTOP 基质 POF100 米 1550nm40Gbit/s 眼线图

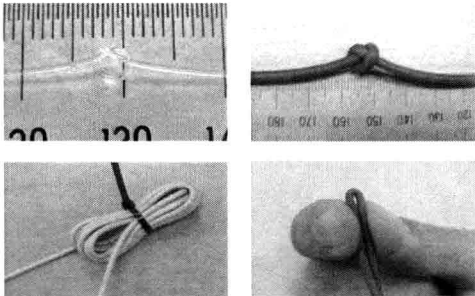


图 10 AGC 公司产品 -CYTOP 基质的 Fontex

而商业化的商品的指标也在年年提高。近年来新型的 GIPOF 的出现又提高了其带宽性能和传输速度，如日本 AGC 公司研发生产的 CYTOP 基质的高透明聚合物产品，具有优良的透光性能、适宜的折射率、低损耗，可大容量生产，其技术指标已经达到 10Gbit/s 以上。Chromis Fiberoptics 的全氟 GIPOF 在近红外区展示了非常低的损耗（10dB/km），进行了 100 米传输

实验，可支持 10Gbit/s 以上的传输速率。而最新的 AGC 公司的产品 Fontex（如图 10 所示）目前传输的实验记录已达 100Gbit/s。

为了促进塑料光纤在入户中的应用，国内，中国科技大学实现了 1.25Gbps 数据传输实验，图 11 为研制出 1.25Gbps 塑料光纤通信模块，图 12 是传输 50 米的眼图。

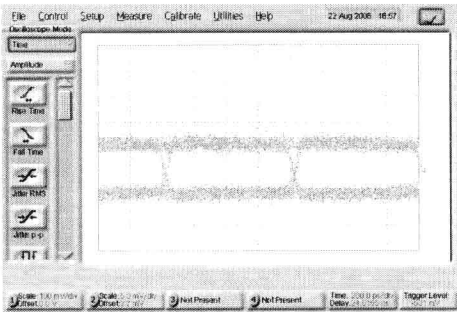


图 11 Gbps 塑料光纤通信链路

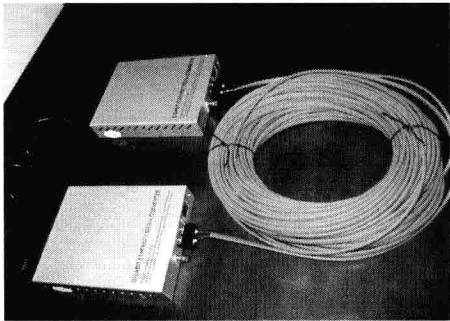


图 12 传输 50 米的眼图

三、塑料光纤的参数测试和标准

3.1 塑料光纤的参数测试

塑料光纤的相关参数包括光纤的基本参数（如芯径、数值孔径、传输损耗、带宽和折射率分布等）以及相关的工业参数（包括温度特性、机械特性和寿命等）。德国工程师学会和电子工程学会研究小组已经详细规定了塑料光纤数值孔径、衰减、传输和机械特性以及环境和寿命的测量方法。塑料光纤检验方法和标准的建立必将促进国际塑料光纤贸易的发展，并消除贸易中的误解。

目前国内外尚未有塑料光纤参数测试仪器的供应商，图 13a 是我们研制塑料光纤特征参数测量仪；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，如图 13b 所示。图 14a 是我们研制的塑料光纤微型谱损测试仪，长 167mm，宽 116mm，高 94mm，净重为 1 千克，便携，普通的工具箱即可装下；测试仪使用 USB 接口传输数据，方便用户的使用；使用笔记本电脑作为控制终端，使仪器一体化、微型化；软件界面智能化，功能更加全面，数据处理非常轻松；软件基于 Matlab 平台开发，因此具有很好 的功能扩展性。波长范围：400nm ~ 800nm，可以实现塑料光纤的单波长传输损耗和整个可见光波段的损耗光谱情况，光谱分辨率达到 1nm，如图 14b 所示。已经为三菱人造丝公司和南京玻纤院，四川汇源光通信股份有限公司等国内外多家单位负责测试。

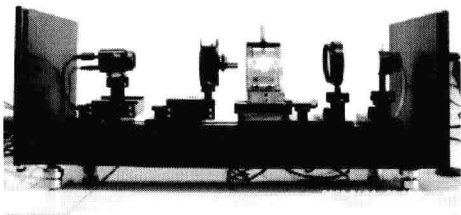


图 13a 塑料光纤特征参数测试仪

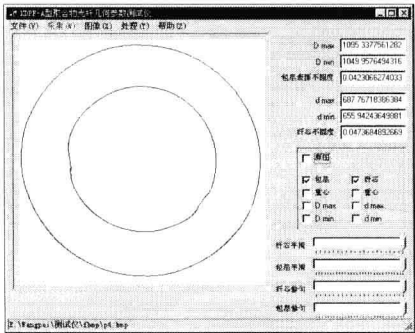


图 13b 芯径、椭圆度测试结果

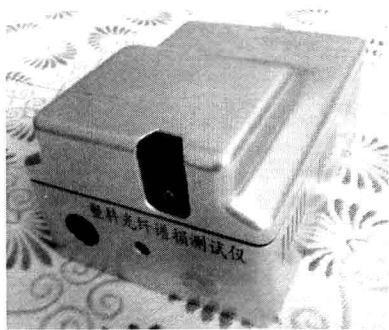


图 14a 塑料光纤谱损测试仪

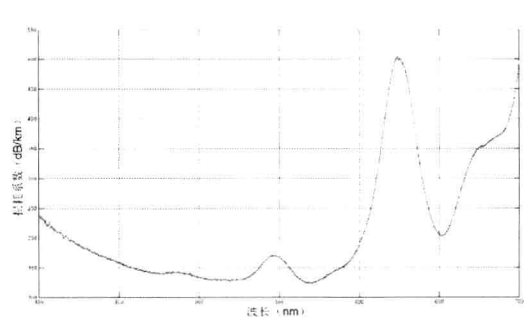


图 14b 谱损测试结果

关于常规的塑料光纤参数测试，比较重要的国际标准有：IEC 60793-1:1995，IEC 60794-1:1999，EN 187000:1992 和 EN 188000:1992。其中欧洲的 EN 标准比国际 IEC 标准规定的内容要更为详细。但这些标准均是针对包括塑料光纤的整个光纤领域提出的。而专门对塑料光纤提出的测试标准有日本的 JIS C-6861:1999 标准和一些制造商（如三菱人造丝、Asahi 化学工业公司）以及独立的测试公司（如 BAM）给出的测试方案。2002 年由来自汽车工业、辅助工业、线缆和测试仪器制造商以及大学和研究所等单位的专家推出一项新的调整的国际 VDI/VDE 准则（VDI/VDE5570），该准则将进一步规范用于不同领域的塑料光纤的测试标准，这种准则被德国工程师协会大力推崇。其中关于塑料光纤张力强度测试方面的仪器如图 20 所示。整个待测光纤部分放置在气候腔内，两端分别用半径为 40mm 的卡盘鼓轮将待测光纤固定缠绕，右侧卡盘通过驱动单元来施加拉力，该拉力的大小可通过力学传感器给出的。光源从待测光纤的一端注入，在另外一端进行探测。测试的结果包括了相对透过光强随光纤应变增加的变化曲线，该曲线与测得的应力曲线是相关的。

Mechanical	Climatic / Radiation	Chemical / Biological
Static bending,	Temperature,	Acids,
Cyclic bending,	Humidity,	Solvents,
Flexing,	Cyclic climates,	Lubricants,
Compressive and	UV- and High-	Fuel,
Impact Load,	energy radiation,	Fuel vapour,
Tension,	White frost,	Hydraulic oil,
Twisting,	Splash water	Brake fluid,
Vibration		Micro-organisms

另外，在实际应用当中，应对塑料光纤的可靠性予以表征。这里包括了允许外界环境温度和应力的极限情况。例如，对于标准的 POF（聚乙烯套层，1mm 直径的阶跃 PMMA 材料光纤），可以承受 105 圈半径为 50mm 的弯曲而不造成损耗的增加，也可以短时间内承受 70N 的应力而不造成自身的损坏。对于商用的梯度塑料光纤，长时间的加热到 70℃ 而不会对光纤截面的折射率分布线型造成影响，同时也不会影响到光纤的带宽和传输损耗。

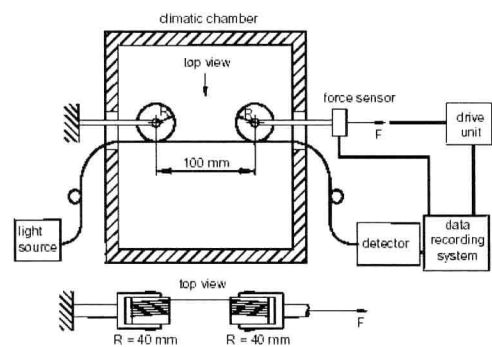


图 15 VDI/VDE5570 准则中描述的塑料光纤张力强度测试仪器

为了深入表征塑料光纤的光学、物理、化学和力学的特性，比如考虑到耐用性问题，对塑料光纤衰老和退化的情况进行描述等，除了上述常规的测试标准，需要一些特殊的测试方案。这些新的特殊测试方案包括红外傅立叶谱分析、化学发光测量、三维微脏器显像和后向散射测量等技术。

3.2 塑料光纤的标准

聚合物有自己的分类标准，按照 IEC 60793-2-40 标准。A4a—A4c 是代指 PMMA 基质的 SI POF，比如 A4c，其中 1000 μm 的 POF 常用于汽车内部和家庭互联网，而 500 μm 的 POF 则是用于传感器。A4c 则是标志着数值孔径较小的 POF，也就意味着内部的半径更小，不适用于家庭网络，其与 A4a 比较，最大的不同就是更平衡的模式分配（前者 180dB/km，后者 300dB/km）和带宽性能（前者 100Mhz. 100m，后者 10Mhz. 100m）。这种标准也不仅仅区分数据通讯，比如 A4a 也应用于照明和短距离传输，但是综合比较 A4a 和 A4d 的性能才将 4Ad 分类与标准数据传输用途，现在这种分类标准更加细化，以综合考虑工作波长和衰减指标。

在工业和汽车领域中应用时，塑料光纤的安装和工作性能会受到外部环境的很大影响。总的来说可以分为三类：机械的，气候上的和化学或生物上的。这些因素的具体描述见表 1。当然，对于工业环境和汽车环境中的应用，对塑料光纤的要求是不一样的。比如，前者对塑料光纤的机械和化学承受特性有很高的要求，而后者则对气候温度方面要求较高。关于塑料光纤在汽车中的应用标准，欧洲的汽车制造商引入的塑料光纤作为光信号传输总线的物理层，引入了一个网络标准模型，即面向媒体的传输系统（MOST for Media Oriented System Transport），其数据总线允许的最大传输速率为 25Mbps，格式是压缩视频传输的优化方式。不久的将来，这种标准可能会被更多的汽车制造厂商采用。而对于日本和美国的企业，采用的则是 IEEE1394 标准，这种标准下允许的最大传输速率是 400Mbps。

数据通讯领域，塑料光纤也有重要标准。以异步数据传输（ATM）为例，在 ATM 会议上，详细的规定了物理层媒体亚层（PMD），POF 提供速率为 155. 52Mbps 的个人网络设备传输。日本标准协会则推动 PMD 采用高带宽 POF 的 IEEE1359-1555 或者 IEEE1394a-2000 标准，其主要用途是在家庭多媒体网络，以 PMMA 基质的 GI POF 为例，内芯和光纤半径标准被试探性的定为 500 和 750 μm。

随着欧盟 POF-ALL 和 POF-PLUS 项目的实施，相关和家庭网络的通信标准也随之出台。2010 年 1 月，欧洲电信标准协会颁布了“接入、终端、传输和复用（ATTM）；100Mbit/s 和 1Gbit/s 的塑料光纤系统技术规范 ETSI TS 105 175-1 V1.1.1”（2010-01），并于 2011 年 8 月进行了改版（V2.0.0），V2.0.0 中明确规定了百兆及千兆塑料光纤系统的要求及连接方式。基于 SIPOF 的有线，ETSI TS 105 175-1 规定塑料光纤