

794085

58
5083
—
4967

光纤传感器

译文集

光纤传感技术情报协作组
南京仪表元器件研究所

3
57

光纤传感器译文集

1985年10月

编辑·出版·发行：光纤传感技术情报协作网
南京仪表元器件研究所

地 址：南京市珠江路443号

印刷厂：南京科技印刷厂

前 言

南京仪表元器件研究所所长 赵国臣

光纤传感技术的兴起，引起国内外的广泛重视。据报道，美国以光纤传感器的军事应用研究为主，列为八十年代军备改造计划的十五项重点之一，并制定出“纤维光学传感系统（FOSS）”等专门规划；日本则以光纤传感器的工业应用研究为主，制定出“光应用计测控制系统”等大型研究开发计划，目标是投入工业生产，以期实现强电磁干扰和易燃易爆等恶劣环境下信息检测，传输和过程控制。从总体看来，光纤传感器尚处于原理性探索和实验室研究阶段，但在检测力学量、温度量及电磁量等方面已有产品投放市场。

在我国，光纤传感技术像传统的传感技术一样受到重视。七十年代末期就有高等院校从事光纤传感技术研究，目前已有几十个院校、研究所和工厂对光纤材料、元器件及传感系统等，进行研究、开发和推广应用，取得一批令人鼓舞的成果，形成一支相当可观的力量。当前迫切需要的是：统一规划、联合协作、合理分工，避免分散重复，把有限的人力、物力和财力用好。这就要求我们切实加强光纤传感技术的情报交流，准确地掌握国内信息。为此，清华大学、华中工学院、中科院化工冶金研究所、上海自动化仪表研究所、北京玻璃研究所、中科院合肥智能机械研究所及南京仪表元器件研究所等二十九个单位的有关人员倡议成立“光纤传感技术情报交流协作组”，受到有关领导部门的大力支持。本译文集，就是在“协作组”成员单位和有关专家共同努力下编译出版的第一本技术资料，献给为发展我国传感技术而孜孜不倦工作的各级领导同志和广大科技人员。

一九八五年十月

目 录

| | |
|--------------------------------------------|---------|
| 1. 光纤敏感元件的现状和应用 | (1) |
| 2. 光学纤维传感器技术 | (9) |
| 3. 计测控制中的光纤利用技术 | (62) |
| 4. 高温光纤温度计 | (89) |
| 5. 带光纤工作的温度传感器 | (75) |
| 6. 从应用方面看光纤辐射温度计的优点 | (76) |
| 7. 应用红外线激励荧光体的光纤温度敏感元件 | (95) |
| 8. 热色转换效应光纤温度传感器 | (94) |
| 9. 使用光纤的高灵敏度磁场—电场敏感元件 | (99) |
| 10. 光导纤维磁场传感器中的新探测方案 | (112) |
| 11. 使用绞合光纤的应变传感器 | (114) |
| 12. 光纤膜片弯曲压力传感器 | (117) |
| 13. 利用光纤的全光式差压—压力传感器 | (122) |
| 14. 测量距离、速度用的光纤传感器 | (129) |
| 15. 光纤式工艺过程浓度计的开发和应用 | (137) |
| 16. 使用反射型光纤敏感元件的涡轮流量计 | (146) |
| 17. 使用低损耗光纤环的CH ₄ 气体近红外差分吸收遥感系统 | (151) |
| 18. 光纤液面传感器 | (157) |
| 19. 光纤化学传感器 | (161) |
| 20. 双折射光纤偏振耦合器 | (162) |
| 21. 单模光纤型偏振器的构造 | (166) |
| 22. 脉冲延迟测量光纤零材料色散波长范围 | (170) |
| 23. 中空全反射型光导纤维 | (176) |
| 24. 利用光导纤维的传输光强效应进行温度测量 | (184) |
| 25. 施行损伤处理的光纤敏感元件 | (190) |
| 26. 光纤敏感元件的基准通路检测法的改良和应用 | (195) |
| 27. 光纤的种类和选择法 | (200) |
| 28. 光导纤维传感器市场 | (203) |
| 29. 敏感元件技术的现状和未来 | (208) |

光纤敏感元件的现状和应用

久间 和生
布下 正宏

1. 前言

自六十年代激光被发明以来, 利用光的各种属性(干涉、衍射、偏振光、反射、吸收、发光等)的光计测技术, 作为非接触、高速度、高精度的计测手段获得飞跃发展。最近, 对这些光计测技术中引进低损耗光纤的“光纤敏感元件”, 正在积极开展研究工作。(1)~(4)光纤具有下列优点, 即: 绝缘性、无电感性、防爆性、重量轻、直径细、挠性好、频带宽等, 因此, 如果把它用到敏感元件或光传输线路时, 就能够在强磁场, 易燃易爆性气氛等恶劣环境下, 进行高速度、高精度、安全的远距离计测, 而以往只采用电子计测和光计测技术则是困难的。再者LD(光激励器), APD(雪崩光电二极管)等半导体光器件, 对于光计测系统的小型化和高可靠性是极为有效的。这样一来, 光纤计测作为实用的光计测技术, 可以说是到了飞跃发展时期。

本文将就光纤计测的原理, 开发现状, 应用实例和今后的问题加以论述。

2. 光纤计测技术的分类和基本原理(2), (3)

光纤计测技术, 一般可象图1那样进行分类。对光纤传输线路型敏感元件来说, 是一种

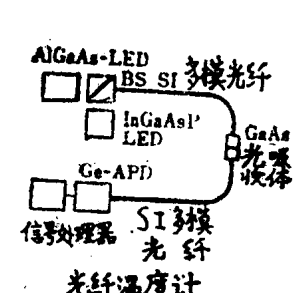
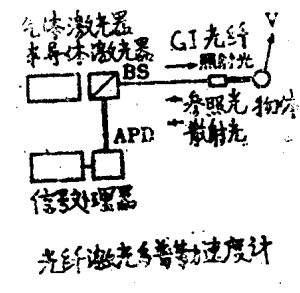
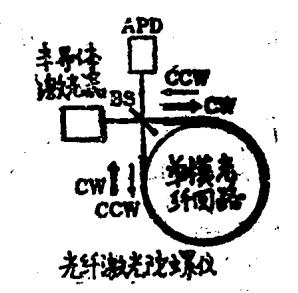
| | 光纤传输线路型敏感元件方式 | 光纤传感探针型敏感元件方式 | 光纤功能型敏感元件方式 |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 计测原理 | <ul style="list-style-type: none"> 光弹性效应 电—光学效应 磁—光学效应 光吸收—反射体 光路遮断 | <ul style="list-style-type: none"> 激光多谱勒效应 发热体的辐射 图象纤维 (image fiber) | <ul style="list-style-type: none"> 干涉现象 <ul style="list-style-type: none"> 马赫—策德尔干涉仪 迈克耳逊干涉仪 萨格纳克干涉仪 微弯曲损耗 |
| 光的调制 | 光强度 | 光频率 · 光强度 | 光相位(光强度) |
| 构成实例 |  |  |  |
| 敏感元件材料 | 分立光元件 | 光纤 | 光纤 |
| 特征 | <ul style="list-style-type: none"> 结构简单 可靠性高 | <ul style="list-style-type: none"> 非接触 高灵敏度 | <ul style="list-style-type: none"> 高灵敏度 |

图1 光纤计测技术的原理和分类

在光纤端面 and 发射—接收光用的光纤之间配置各种光学材料和机械式光学敏感元件的方式。光纤只作为强度调制光的传输线路使用，主要使用多模型和线群型(线束型)。结构简单，可靠性高是它的主要特征。对传感探针型敏感元件方式来说，是一种使用单模型、多模型、线群型等各种光纤，把从计测对象发射来的光信息和由计测对象反射散射来的光信息进行传感并导入光接收机的方式。该方式具有非接触，高灵敏度这些特征。对光纤功能型敏感元件方式来说，就是利用光纤本身的传输特性由于计测对象不同而产生变化，光纤中的波导光的属性被调制这一现象的，在利用光的相位和偏振光变化的情况下，使用单模型光纤，而在利用强度变化的情况下，则使用多模(型)光纤。使用各种干涉系统来检测光的相位变化的敏感元件具有超高灵敏度特性，对此正在积极进行研究。

表1 光纤计测技术的原理

表1中汇总了具有代表性的光纤敏感元件的原理和调制方式。

| 计测物理量 | 光的调制 | 光学现象 | 分类 | 光纤 |
|-----------------|------|----------------|------|------|
| 电流磁场 | 偏振光 | 法拉第效应 | a, c | S, M |
| | 相位 | 干涉现象(磁应变) | c | S |
| 电压—电场 | 偏振光 | 泡克耳斯效应(二次光电效应) | a | M |
| | 相位 | 干涉现象(电应变效应) | c | S |
| 温度 | 光强度 | 采用屏蔽板的光路遮断 | a | M |
| | | 半导体的透射率变化 | a | M |
| | | 荧光反射 | b | M |
| | | 发热体的辐射 | b | M |
| | | 双折射变化 | a | M |
| 角速度 | 相位 | 萨克纳克效应 | c | S |
| 速度—流速 | 频率 | 多普勒效应 | b | S, M |
| 振动 加速度 压力 | 光强度 | 微弯曲损耗 | c | M |
| | | 采用屏蔽板的光路遮断 | a | M |
| | | 采用光隔板的反射强度变化 | a | M |
| | | 光弹性效应 | a | M |
| | | 干涉现象(光弹性效应) | c | S |
| | 频率 | 多普勒效应 | b | S, M |

注：1. 分类与图1的符号相对应；

2. 光纤；

S：单模光纤
M：多模光纤

3. 光纤计测技术的应用⁽³⁾

3.1 电力领域中的应用

近年来，以应用到大容量高压发电—变电站的电压—电流变换器中为目的，正在积极开发具有重量轻、小型、无电感特性、绝缘性等优越特性的光纤电压—电流敏感元件（光PT—变压器和光CT—变流器）。图2中示出，在监视系统中引进各种光纤敏感元件的未来的气体绝缘变电站的概略图。

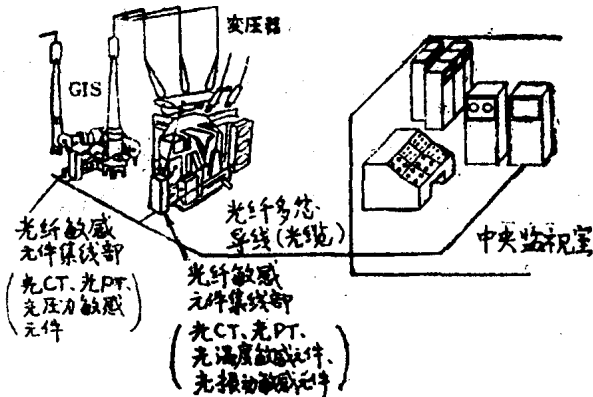


图2. 光纤计测技术在变电站监视系统中的应用

图3(a)中示出利用泡克耳斯效应的光纤电压敏感元件的构成实例。从LED来的出射光用多模光纤引导到光敏感元件部。如果把通过偏振器的直线偏振光波的偏振光面对泡克耳斯器件的两个主轴设定为45°时，由于通过外加电压而产生的双折射效应，从泡克耳斯器件来的出射光就被转换为椭圆偏振光波，该椭圆偏振光波借助用1/4波阻片使光学偏离，并用检偏器转换为与外加电压成正比的光强度，通过光纤被引导到光接收机。

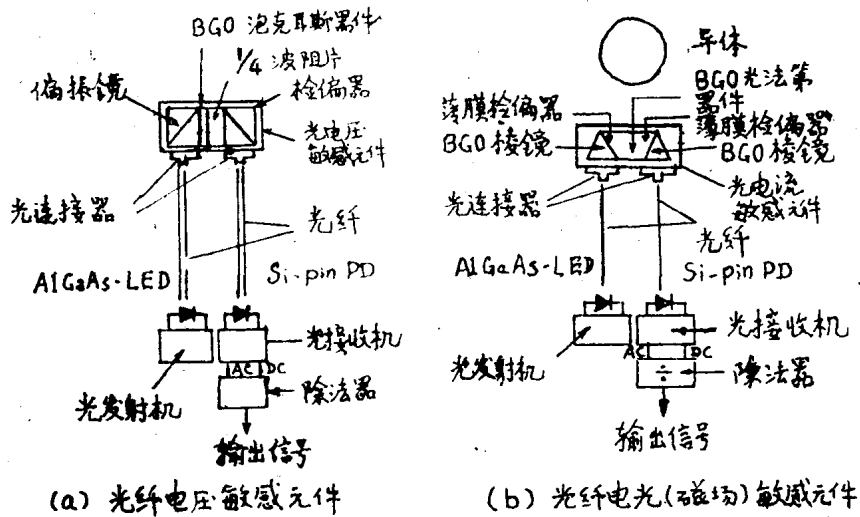


图3. 光纤电压—电流敏感元件的构成图

作为泡克耳斯器件，则使用了没有自然双折射的、温度特性良好的 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_8$ ⁽⁶⁾， $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ⁽⁷⁾等的等轴氧化物单晶。对于使用这种结晶的光电压敏感元件来说，在几~300V范围内，可获得0.5%以内的非线性；温度特性，在-20°~85°C范围内也稳定在±0.5%以内。另一方面，如果把 LiNbO_3 和 LiTaO_3 等单轴结晶用于敏感元件材料，则因自然双折射引起的温度相依性就增大，为达到实用化，就必须进行精密的温度补偿。^{(8), (9)}

在图 3.(b) 中示出利用光法拉第效应⁽⁵⁾的光纤磁场(电流)敏感元件的构成实例。它就是利用在法拉第器件内传播的直线偏振光的偏振光面与外部磁场成正比产生旋转。如果把检偏器的相对角度设定为45°时,从光磁场敏感元件来的出射光强度,则与外加磁场成正比。

使用下列材料作为光法拉第材料,即本质上温度特性优越的铅玻璃,⁽¹⁰⁾,⁽¹¹⁾Bi₁₂GeO₂₀⁽¹¹⁾, Bi₁₂SiO₂₀⁽¹²⁾单晶等反磁(性)体和温度稳定的(Tb_{0.10}Y_{0.90})₃Fe₅O₁₂单晶⁽¹³⁾和(YSmLuCa)₃(FeGe)₅O₁₂⁽¹⁴⁾外延薄膜等强磁(性)物质。使用反磁性体材料的敏感元件可以进行数Oe~数KOe宽的磁场计测,这是它的特征。另一方面,强磁(性)材料在几百Oe以上的磁场内因饱和磁化特性引起的非线性则成为问题,但是,具有能使敏感元件小型化的优点。由于光法拉第材料,检偏器,以及它们的安装法的改进,使用上述的任何一种材料,在-20~85°C左右的宽阔温度范围内都能够获得±1%以内的测定精度。

为了进行变压器和发电机等电力设备的监视控制,保证可靠性和最佳化设计,除电压,电流(磁场)之外,对温度、压力、振动、应变等进行计测,也是必要的,因而正在进行各种光纤敏感元件的研究工作。最近,也有的报告说,把GaAs光温度敏感元件组装到日本国有铁道载重车辆上用的变压器内,成功地计测了车辆行走时的线圈温度。⁽¹⁶⁾

3.2. 在工场测试仪表系统中的应用

图 4 是光应用计测控制系统的概念图,它是把工场区内广泛分散的计算机结合起来,把谋求高速信息集中化(统一化)的光数据通路系统与光纤计测系统组合而成的。在处于恶劣环境下的发电—变电设备,燃料槽,生产工艺的计测中,通过引进光纤敏感元件,有希望大幅度改善系统的安全性和可靠性。对钢铁石油化工等工场来说,起源于对温度、压力、流量、速度、液面等,都需要进行各种物理量的计测。

图 5 中示出光纤激光多普勒速度计(LDV)的构成实例⁽¹⁷⁾,⁽¹⁸⁾。把从光纤探针1, 2 出射的、并在计测对象上仅以正负相同量接收多普勒频率偏移的散射光,用探针 3 或 3'

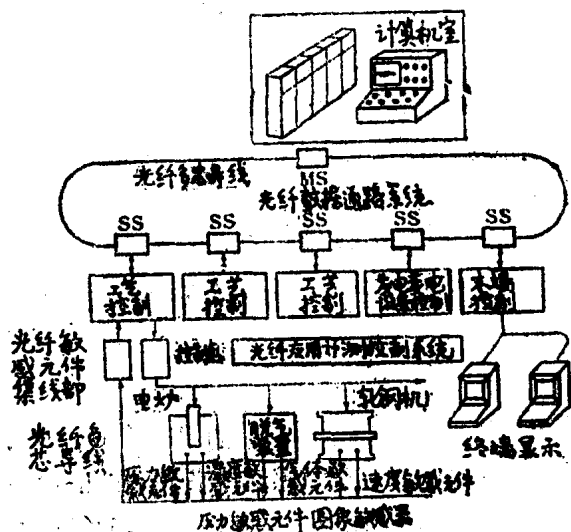


图 4 光纤计测技术在光数据通路系统中的应用实例 (概念图)

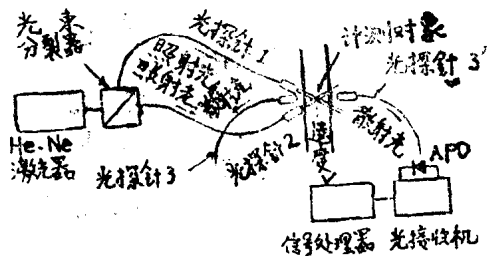


图 5 差动型光纤LDV的构成图

加以接收，用受光器件进行外差式检波。通过对该多普勒计测信号进行频率分析，就能测定计测对象的速度。能够对1~2000米/分左右速度以±0.5%以内的精度进行非接触计测。光纤LDV有希望应用到钢铁，有色金属，造纸等工场内的产品移动速度，⁽¹⁷⁾液体的流速⁽¹⁸⁾—流量⁽¹⁹⁾，物体的轻微振动⁽²⁰⁾计测中去。

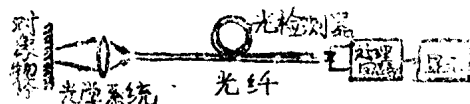
图6(a)中示出光纤辐射温度计的基本构成图⁽²¹⁾。从高温物体辐射来的红外线强度，如图6(b)所示，随温度的升高而增加，其峰值波长变短。因此，当把该辐射红外线用耐热石英棒等进行检测，用光纤引导到光接收机进行信号处理时，就能对高温物体的温度和位置进行非接触计测。再者，使用排列呈阵列状的石英棒和线群(线束)光纤对辐射红外线进行接收，在光接收部用光扫描器对这些输出信号逐点进行扫描时，就能够计测出物体的温度分布。⁽²²⁾现在，光纤辐射温度计的测温范围，大约在500~1,600°C左右。为了对较低的温度进行计测，必须开发红外光纤。光纤辐射温度计有希望应用到钢铁厂的热块检测和高温炉内的温度监视等中去。

3.3 在声纳系统中的应用

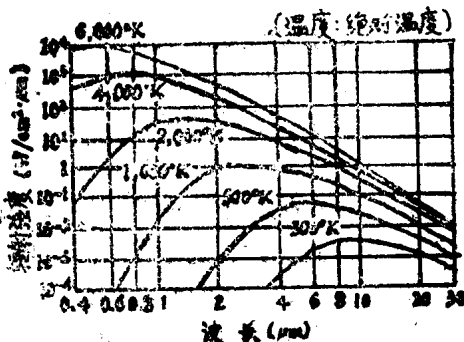
在鱼群探测器，海中-海底探测或军用设备的声纳系统中使用的，利用磁应变振子和压电陶瓷振子的音响敏感元件，由于阻抗匹配和防护海水有困难，因而存在易受电磁感应噪声影响等缺点。为了解决这些问题，以美国海军研究所为中心，正在进行利用单模光纤的超高灵敏度音响敏感元件的开发工作。⁽¹⁾

在光纤上加压力时，由于以光纤的伸缩和光弹性效应为媒介的折射率变化，光纤出射端的相位就产生变化。图7(a)中示出用光纤马赫—策德尔干涉仪检测这种相位变化量的音响敏感元件。光纤，则使用了石英系单模型，其包层材料则使用了对压力具有高灵敏度的聚苯乙烯和尼龙(酰胺纤维)等的高分子弹性物(elastomer)。图7(b)中示出压力P与相位变化 $\Delta\phi$ 的关系。

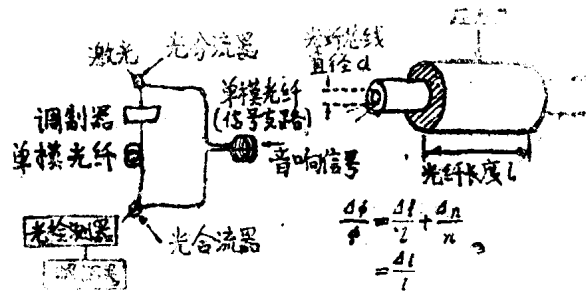
在图7(a)中，从激光光源来的出射光被分成两路，分别与信号支路(arm)和参考



(a) 光纤辐射温度计的构成



(b) 物体的温度与辐射频率



(a) 光纤音响敏感元件的构成图

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta n}{n}$$

$$= \frac{\Delta l}{l} + \frac{n^2}{2} \left[(P_{11} + P_{12}) \frac{\Delta C}{C} + P_{12} \frac{\Delta l}{l} \right] + \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial P} \right) \Delta P$$

(b) 光纤敏感元件的原理 (n:折射率, P_{ij}:光弹性系数)

图6 光纤辐射温度计的基本构成图和原理

图7 光纤音响敏感元件的基本构成图和原理。

支路相结合进行波导，如果把接受由于音响信号产生相位变化的信号光，用光合流器与参照光加以合并（合波），并用受光器件进行光学上的零差⁽²⁴⁾或外差⁽²⁵⁾检波时，就能检测出音响信号。对光零差法来说，为了补偿漂移并使相位检测灵敏度经常处于最佳状态，则在参考光（通）路中插入相位调制器，而对外差法来说，作为频率移相器，则插入超声波光调制器。作为采用光零差 $J_1(\max)$ 法的实验结果，能够线性良好地检测出 $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{rad}$ 相位变化⁽²⁶⁾，（使用He-Ne激光器，受光功率（power）= $5 \mu\text{W}$ ，信号频率 = 1 KHz，频带 = 1 Hz）。若设受光功率为 1 mW，信号臂长为 100m 时，作为最低检测水平，这个值就相当能够检测出 3.9dBre $1 \mu\text{Pa}$ 的声压。

利用马赫—策德尔干涉仪的光纤敏感元件，不仅可以作为音响敏感元件，也能够适于作加速度⁽²⁷⁾、磁场⁽²⁸⁾、电场⁽²⁹⁾、温度敏感元件⁽³⁰⁾，这对以往的计测法来说，这种微弱信号是不可能计测出来的。例如，对加速度敏感元件来说，可获得 $10^{-3} \mu\text{G}$ （400Hz）⁽³¹⁾的最小检测水平，而对使用金属玻璃套管的光纤磁场敏感元件来说，则可获得 10^{-9}Oe/m 的最小检测水平⁽³²⁾。再者，正如图 8 所示，对各种计测物理量专用的光纤，也正在进行开发⁽⁴⁾，今后有希望获得发展。

| 单模光纤敏感元件 | 音响敏感元件 | 场敏感元件 | 温度敏感元件 | 电场敏感元件 |
|----------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| 包层材料 | 高分子弹性物 • 聚苯乙烯 • 尼龙(酰胺纤维) | 磁应变材料 • 镍合金 • 金属玻璃 | 热膨胀材料 导电材料 • 镍 • 铝 | 压电材料 • PVF_2 • 共聚合物 |
| 制作方法 | 挤压法 | 电镀、蒸镀、 离子溅射 | | 挤压法 |
| 处理其它 | | 热处理 偏磁 | | 极化 分子排列 |

图 8 计测用单模光纤

3.4 在惯性导航系统中的应用⁽³³⁾

光纤陀螺仪⁽³⁴⁾，正如图 1 中光纤功能型敏感元件方式的实例所示，当被分为两路的光波在旋转的单模光纤中分别作反向传输时，两光波间的相位差 $\Delta\phi$ 由于萨格纳克效应而产生变化，就是利用这一点来计测旋转角速度的。这种光纤陀螺仪与现在实用的机械式或环形陀螺仪相比较，没有活动部分，不产生锁定（lock in）现象，具有高度线性、高灵敏度（ 10^{-8}rad/s ）等许多优点，因此，以应用到飞机和人造卫星的姿势控制为目的，在国内外正在积极进行研究。

对图 1 的光纤陀螺仪来说，由于两光波的干涉输出与 $1 + \cos\Delta\phi$ 成正比产生变化，因此，检测微小的旋转是困难的，为了使干涉输出达到 $5 \sin\Delta\phi$ 成正比这样的最佳灵敏度，提出了各种不同方法。^{(35) ~ (37)} 再者，为了达到上述的检测极限值 10^{-8}rad/s ，就必须清除下列噪声因素，即：因光学反馈产生的激光噪声；因光学元件的非涅耳反射和光纤的雷利散射所产生的斑点噪声；因光纤内的不均匀温度变化和 HE_{11} 模式退缩所引起的两光波之间的非互反性等所产生的噪声。图 9 是全光纤陀螺仪，为获得最佳灵敏度，它的相位调制器和偏

光器,方向性结(耦)合器,偏光控制等光学零件全部由单模光纤来构成的。为谋求系统稳定化的同时,减低了从光学元件来的菲涅耳反射。

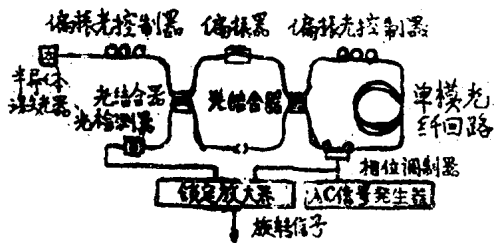


图9 相位调制方式的全光纤陀螺仪的构成实例

此外,光源使用多模LD(光激励器),降低了因光学反馈所产生的激光噪声和雷利散射所产生的噪声。这种陀螺仪获得了短期分辨率为 10^{-7} rad/s和长期稳定性为 10^{-7} rad/s。

作为最近的研究活动来说,正在探讨:采用使偏振波面保持一定的纤维⁽³⁰⁾;地磁引起的光法拉第效应⁽⁴⁰⁾和波导光的电场引起的克尔效应所造成的漂移的(防止)对策。

4. 今后的技术课题

4.1. 计测用光纤

在光纤计测中,根据计测物理量,计测原理,计测环境,需要各种不同性能的光纤。

对光纤传输通路型敏感元件来说,除了使用通常结构的光通信用光纤之外,往往多使用大口径、大开口角的光纤。再者,对于利用光纤的微弯损耗⁽⁴²⁾的敏感元件来说,相反,小开口角光纤则是合适的。另一方面,对利用光干涉的敏感元件来说,则必须开发只能感应某特定物理量的单模光纤和使定偏振波光纤维的高性能化并降低价格。

在材料方面,除了在特别恶劣环境下的计测外,可以认为,今后将会更多地使用经济的塑性系统的和多成分玻璃系统的光纤。而如果以ZrF玻璃系统光纤为代表的红外光纤达到实用时,而辐射温度计的低温计测等,将会在广阔领域内加以应用。

这样,在计测领域里,可望开发出各种各样的光纤,并达到高性能化。

4.2 计测用半导体激光器

对利用光干涉的光纤敏感元件来说,则需要可干涉性高、低噪声的LD(光激励器)。

目前已实用化了的LD的振荡频谱线宽 Δf 为 $5 \sim 100$ MHz,相干长度 L 为 $15\text{cm} \sim 3\text{m}$ 。对通常的光纤敏感元件来说,这种程度的特性在大多数场合下能够满足要求,但对LD的光反馈量达到 $10^{-2}\%$ 以上时, Δf 就显著扩展⁽⁴⁵⁾,因此一般说来,光单向波导管(光隔离器—optical isolator)是不可缺少的。为了获得更高的相干性,如图10所示,提出了积极利用光反馈的外部谐振器型LD的方案。由于把光反馈量控制在 $10^{-3} \sim 10^{-5}\%$,因而可获得 $\Delta f \approx 0.5\text{MHz}$ ($L \approx 30\text{m}$)⁽⁴⁶⁾。

激光噪声分为振幅噪声和相位噪声⁽⁴⁷⁾,但对于光纤敏感元件来说,相位噪声则成为主要的噪声因素。相位噪声则依赖于光源的波长变化和干涉系统的臂(arm)间的光程差。当使用通常的LD时,为了检测出 10^{-8} rad的相位变化,必须使光程差在 1mm 以内。也有的报告说,以使用外部法布里珀罗干涉系统的反馈回路来控制LD的电流和温度,使振荡频率变化稳定在几KHz $\sim 1\text{MHz}$,但是,存在系统复杂这一缺点。今后,希望开发出一种小型波波长稳定的LD。

4.3 光纤回路器件

光纤计测中,从偏振器,光结(耦)合器开始,大量使用各种光回路器件。作为多模光纤用器件来说,利用微光学的器件已经达到实用,今后必须使各种器件降低价格。另一方面,单

模光纤用器件,目前多处于开发阶段。图11中示出在两条单模光纤内传输的、利用波导光间的消逝场 (evanescent) 耦合的分枝合流器的构成实例⁽⁴⁹⁾。此外,还提出了光纤偏振器和隔离器等方案。为了使单模光纤敏感元件达到实用化,就必须进一步开发这些器件。

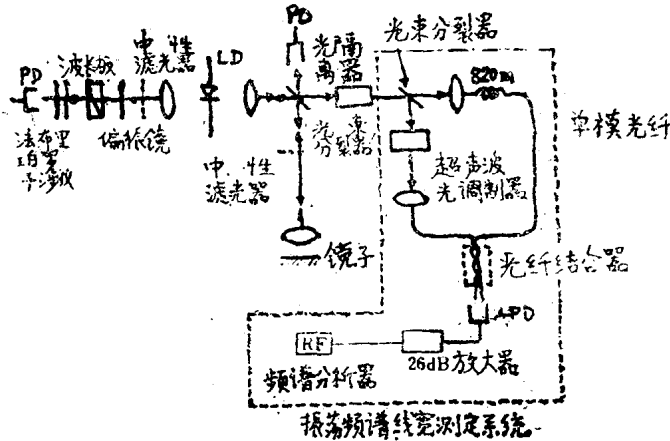


图10 外部谐振型半导体激光器的构成实例和振荡频谱线宽测定法

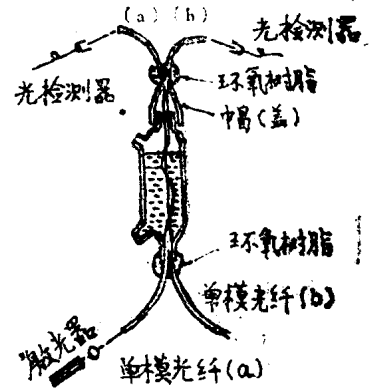


图11 利用消逝场耦合的单模光纤分支合流器的构成实例

5. 结束语

本文就最近研究开发中的光纤敏感元件的原理,现状,应用,以及今后的动向加以概述。光纤敏感元件的特征是,即使在高电磁场,化学气氛,狭窄间隙等恶劣环境下,也能够安全地而且高精度地进行计测。今后,可以认为在改善各个光纤敏感元件的特性的同时,通过开发上述的计测用光纤,半导体激光器,各种光纤回路器件,光纤敏感元件技术将日益发展,不仅在电力领域,各种工业工场,军用设备,人造卫星,飞机等领域,而且在医疗器械,工业用机器人,汽车,船舶,家用电器等各种领域起着重要作用。

〔参 考 文 献〕

(共有49件,请参照原文末文献目录)

牛春发 译自《电子通信学会志》

1984年第67卷第5期第544~551页

王式正 校

光学纤维传感器技术

作者: THOMAS G. GIALLORENZI, JOSEPH A. BUCARO, ANTHONY DANDRIDGE, G. H. SIGEL, JR, JAMES H. COLE, SCOTT C, RASHLEIGH, RICHARD G. PRIEST

(特邀文章)

摘要——本文评论了光学纤维传感器目前的工艺状态。详细论述了该传感器的工作原理并概述了各种类型的纤维传感器。讨论了可达到的性能与限度并介绍了用以制造传感器的工艺技术。描述了声学,磁学,陀螺仪,激光二极管的特性以及其它传感器的特性。简要地叙述了这种传感器技术的发展趋向以及予期的应用领域。

一概论、引言

光学纤维传感器已趋成熟,该新技术的冲击已很明显。光纤传感器具有许多优点:比现在的技术提高了灵敏度,几何图形的通用性使纤维传感器能以任何形态构成,以及构成一种通用的工艺基础,从而各种器件可以检测许多种物理波动(声学的,磁学的,温度的,旋转的波动等等),还有它的介电结构使它能用于高电压,电噪声,高温,腐蚀,或其它的受力环境中,并能与光学纤维遥测技术兼容。为证明这些优点,在过去几年中大体上研制了60种不同的类型传感器。这种大量的分离器件一般分成调幅传感器或相位(干涉测量)传感器。在调幅传感器中,物理波动与纤维或者与附在纤维上起直接调制纤维中光强作用的某些器件的相互作用。将详细描述强度传感器的优点是结构简单并能与多模纤维技术兼容。在某些情况中,为实现这些优点,灵敏度只能取折衷的办法。鉴于大部分应用都不需要高度灵敏,这些器件与现有的器件相竞争,这类传感器现在就具有广阔的市场。

相位传感器(或干涉测量传感器),不管是用于磁性、声学、旋转等还是检测、以及在理论上,都比现存技术的灵敏度有数量级的提高。在利用光学纤维干涉测量仪构成的声学传感器中,这些理论上予示的在声学测量中的工艺水平都已完全得到证实。此外,另一个优点是由于这些纤维声学传感器能够作为扩展元件而组成,允许为降低傍瓣,取消噪音,或取消纤维信号处理而进行调整带来了好处。在磁性传感器中,纤维传感器在室温下操作显示出的检测灵敏度可与低温超导量子干涉仪技术相比美或超过此技术,而低温超导量子干涉仪技术要在4~10k间工作,因此相位传感器能够满足以几何图形的通用性和高灵敏度为基本要求的市场需要。

光学纤维传感器的研制最早是在1977年进行的，某些分离的工作比这还早。在过去的四年中，许多实验室都进入了这一领域，并取得了很快的进展。例如，在1977年~1979年间的纤维声学传感器，其灵敏度提高了约100dB，因此，这类传感器中的许多种现已成为竞争对手或已超过其以前的电声特性。磁性的，声学的，压力，温度，加速度，陀螺仪，位移，液面，转矩，光声学的，电流和应变等传感器是属调查研究的光学纤维传感器之列。由于纤维传感器利用介质材料构成，并能与纤维的遥测技术相兼容，因此该技术具有前所未有的灵活性。

一方面这项技术取得了很快的进展，已制成多种类型的传感器，另一方面，该技术仍未得到充分研究，也未充分开发。在噪声源和检测过程，封装与选用最佳的纤维涂层方面存在实际问题。例如，纤维陀螺仪中的单向噪声阻止实现最大灵敏度。在磁性传感器中，可得到的磁性敏感涂层纤维的长度只有短的，（约1米），而实际上却需要千米的长度。最后，能经受住分散操作中所遇到的恶劣环境的传感器的封装尚未实现。这些问题是目前努力的领域，而且对这些问题所进行的工作仅仅最近才开始，因此，不能期望这些问题在目前能得到完全解决。

本文意在描述传感器工艺，详细说明目前的工艺水平，对那些试图制作这些传感器的人对一些技术设想进行评论，给读者对新出现的技术潜力一种感性知识。第二节将讨论目前最热衷于研制的传感器，声学传感器。介绍一种对声学领域敏感的或不敏感的纤维技术。概述了噪声源，频率依赖作用，结构响应。对设计性能机测量性能水平与传感器的封装一起进行扼要的介绍。

第三节讨论磁性纤维传感器。叙述了涂层的作用，芯轴对灵敏度，传感器响应的频率依赖性以及噪声源的作用。介绍期待的性能与工艺现状。第四节介绍旋转传感器（陀螺仪）的纤维光学角速率。这些器件在旋转检测性能方面有很大的提高；但是，噪声问题阻碍了这种性能的实现。本节还将评论噪声的考虑，介绍不同的陀螺仪技术和结构，以及现在的技术状态。

第五节将介绍调幅传感器。将概要地介绍其工作原理，优、缺点，以及已经证明的性能。第六节介绍二极管激光传感器。这些传感器大多利用三镜激光腔结构，在这种结构中，一面镜子的位置受检测的现场影响。这些传感器可以用也可以不用纤维作传感器腔的一部分。本节也介绍噪声源，优、缺点以及已证明的性能。

第七节简单地介绍加速度，电流，温度，光声，转矩，液面等传感器。几种类型利用相位作用，而其它一些类型则利用调幅作用。本节中初步讨论的这些传感器只是因为刚处于研究的初级阶段。这些讨论是简单的，只是希望这些意见能有助于提供更多的有希望的信息。最后一节讨论纤维传感器发展的主要技术，特别是讨论检测和激光技术，激光源对纤维传感器的性能起不好的作用，本节将介绍这些缺点。也介绍各种检测方案，以及各种检测方法间的交替使用以使读者能够估计可用的方法以及了解每种方法的缺点。本文对未来的方向作了评价并期望利用光学纤维传感器技术。

二 光纤声学传感器

光纤干涉测量仪

光纤干涉测量声学传感器〔1〕，〔2〕一般采用图1中示出的Mach-Zehnder方案。一激

光束分成两股，一部分由参考纤维发送，另一部分在暴露于声学场中的传感纤维中发送，在参考臂中，有一些装置用来转移光频率（即—布拉格调制器）或用作相位调制（即—纤维伸展器〔3〕或集成光学移相器）。两支光束重新组合，使它们在光电检测器的表面相互作用，然后，采用一合适的调制器来检测原来的相位调制信号。可以利用各种解调技术包括调频鉴别〔4〕，稳定的零差〔4〕，合成外差〔5〕，以及其它技术〔6〕。解调器的实际选择是由特殊的传感器的应用来决定的，这在第八节中将详细讨论。

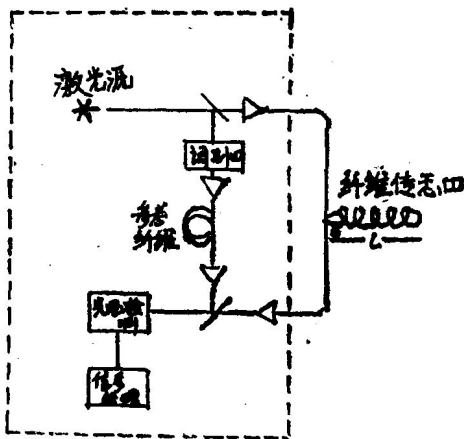


图1. 光学纤维干涉测量仪的基本原理

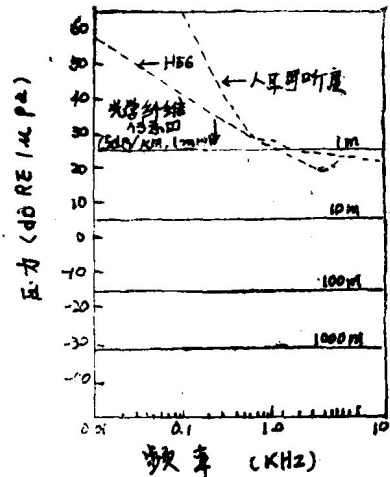


图2. 涂有各种长度的光学纤维的短噪声限制的纤维光声传感器的最小可测压力

图2示出纤维干涉测量传感器的高度灵敏的可能性，此例中，信—噪比由散粒或量子极限来决定。为比较用常规的压电传感器（H56水下听音器）的技术水平可达到的检测阈值能力，图中示出了人耳的检测值能力。如图所示，这些检测阈值能力可能被短到1米长的光纤传感器所超过。

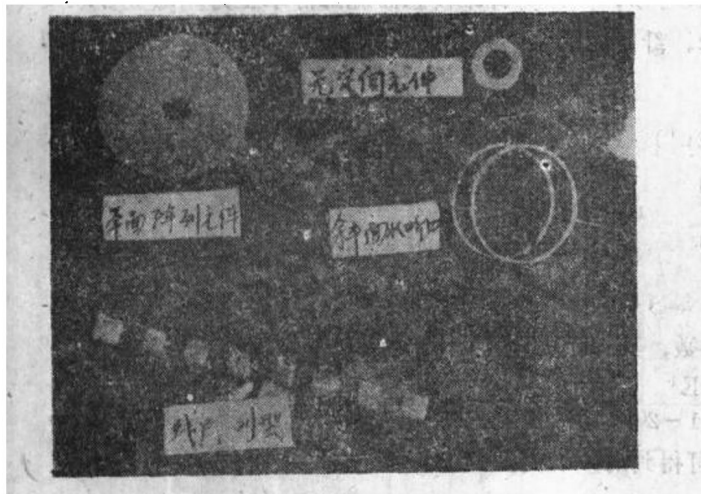


图3. 各种光学纤维传感器的湿端

纤维声学传感器的主要优点之一是它们的几何图形的通用性。图3中示出一些实例。如图左上方所示，可制成轻巧，灵敏的平面的传感器元件。如图左下方所示，可制成线性阵列还可制成用在要求方向性较高的接收机中比声波长还长的单纤维元件。或者，具有所需特性的单个纤维传感器能够置入一线列中，形成一重量轻，体积小的线性阵列。如图右所示，在“敏感”纤维近旁放一“参考”纤维（此例中是一环），就可制成简单的梯度

传感器。如果两个环的压力灵敏度是匹配的，那么这一对环对压力就不响应，但对空间压力

的梯度却起反应。这样的梯度传感器可以用来检测入射声波的方向。如图所示，梯度传感器可制成小型而牢固的。大多数纤维传感器都可屏蔽空间以达到预先检测信号/噪声处理的优点。为此只要简单地改变纤维绕线的密度。最后，如图右上角所示，只要使敏感元件的尺寸比声波波长小，就能很容易地制成灵敏的无定向元件。

低频时的声学灵敏度

纤维中光传播的相位声学调制，通常认为在三个不同的频率范围，它们对应于在纤维与声学信号间不同的相互作用范围。为限定这些范围，研制一特殊的传感器结构是有用的，例如，直径为d的纤维组成一直径为D的环。在低频时，声波波长λ比直径D大得多，声波将改为静水压力作用于纤维上。在中频时，λ与D差不多，但仍比d小得多，沿声音传播方向的压力梯度变得重要了。最后，在超声波频率时，λ与d相差不多，或比d小，在纤维横截面上的弹性应变分布变成各向异性，因此必须考虑光学模式分布。

纤维中光学相位的压力灵敏度限定为 $\Delta\phi/\phi \Delta P$ ， $\Delta\phi$ 是由压力改变(ΔP)所引起的相位(ϕ)中的位移。如果给定一个压力改变(ΔP)，则纤维芯轴应力 ϵ_r 和径向应力 ϵ_θ ，可用下式表示〔1〕：

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \epsilon_r - \frac{n^2}{2} [(P_{11} + P_{12})\epsilon_r + P_{12}\epsilon_\theta] \quad (1)$$

式中 P_{11} 和 P_{12} 是纤维芯的光弹性或波可尔(Pockels)系数，n是纤维芯的折射率。(1)式中的第一项是 $\Delta\phi/\phi \Delta P$ 的部分，是由纤维长度变化引起的，而第二项和第三项则是纤维芯的折射率调制引起的部分，与光弹性效应有关〔8〕。

典型的光学纤维是由芯子，包层和一个衬垫组成，所有的材料都用具有性质相似的玻璃制成。传感器纤维通常用一软橡胶涂层，然后再用硬塑料涂层。为计算(1)式中给出的灵敏度，芯子的应力 ϵ_r 和 ϵ_θ ，必须与纤维的各种涂层的特性相联系。具有一层〔7〕，〔9〕，或两层〔8〕涂层的纤维的压力灵敏度已作了报导。下面我们介绍典型的四层纤维的确切的结构。

在低频(即、 $\lambda \gg$ 传感器的最大尺寸)，声波对纤维传感器施加静水压力。对英寸级尺寸的传感器来说，频率可高达几KHz。纤维的极化应力 σ_r ， σ_θ ，和 σ_z 与应变 ϵ_r ， ϵ_θ 和 ϵ_z 的关系如下：

$$\begin{vmatrix} \sigma_r^i \\ \sigma_\theta^i \\ \sigma_z^i \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (\lambda^i + 2u^i) & & \lambda^i \\ \lambda^i & (\lambda^i + 2u^i) & \lambda^i \\ \lambda^i & \lambda^i & (\lambda^i + 2u^i) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \epsilon_r^i \\ \epsilon_\theta^i \\ \epsilon_z^i \end{vmatrix} \quad (2)$$

式中i是层指数(芯子为0，包层为1等)， λ^i 和 u^i 是与杨氏弹性模量 E^i 和泊松(Poisson's)比 ν^i 有关的Lame(莱姆)参数，其关系如下：

$$\lambda^i = \frac{\nu^i E^i}{(1 + \nu^i)(1 - 2\nu^i)}, \quad u^i = \frac{E^i}{2(1 + \nu^i)} \quad (3)$$

对一圆柱体而言，从Lame方程〔11〕可得到的应变为：

$$\epsilon_r^i = \nu_0^i + \frac{\nu^i}{r^2} \epsilon_0^i = \nu_0^i \frac{\nu^i}{r^2} \epsilon_z^i = w_0^i \quad (4)$$

式中 v_0^i , v_1^i , 和 W_0^i 为要被测定的常数。由于应变必须限定在芯子中心, $v_1^0 = 0$ 。对具有 m 层的纤维来说, (4) 式中的常数 v_0^i , v_1^i 和 W_0^i 由边界条件来决定。

$$\sigma_r^i |_{r=r_i} = \sigma_r^{i+1} |_{r=r_i} \quad (i=0, 1, \dots, m-1), \quad (5)$$

$$u_r^i |_{r=r_i} = u_r^{i+1} |_{r=r_i} \quad (i=0, 1, \dots, m-1), \quad (6)$$

$$\sigma_r^m |_{r=r_m} = -p, \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^m \sigma_z^i \Lambda_i = -p \Lambda_m, \quad (8)$$

$$\epsilon_z^0 = \epsilon_z^1 = \dots = \epsilon_z^m \quad (9)$$

式中 u_r^i ($= \int \epsilon_r^i dr$) 是第 i 层中的径向位移, r_i 和 Λ_i 分别是第 i 层的半径和截面积。方程式 (5) 和 (6) 是越过层边界上的径向应变和位移连续性。方程 (7) 和 (8) 假设使用的压力是静水压力。方程 (9) 是水平应变的近似值, 而对端点作用忽略不计。对类似于纤维的长而薄的圆柱体来说, 将会导入比百分之一小的误差 [7]。

利用 (5) — (9) 式中描述的边界条件, v_0^i , v_1^i 和 W_0^i 常数就能决定, 从 (4) 式可标出 ϵ_r^0 和 ϵ_z^0 。然后从 (1) 式求出灵敏度 $\Delta \phi / \Delta \phi p$ 。

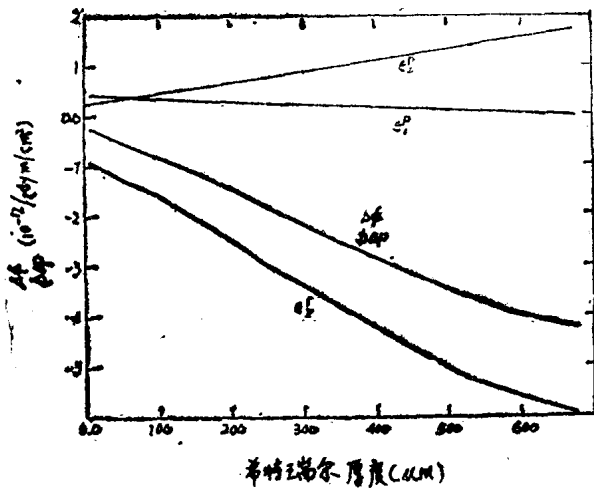


图 4: ITT 纤维的压力灵敏度 $\Delta \phi / \phi \Delta p$ 与希特瑞尔厚度间的关系。 ϵ_z^1 显示了由于长度的改变而引起的相位的改变; ϵ_r^0 和 ϵ_z^0 示出了折射指数调制项 (继 [B] 后)。

当希特瑞尔厚度提高时 (图 4), 由于 ϵ_z^1 的变化, 压力灵敏度的幅度提高很快。

通常使用的光学纤维的涂料包括橡胶, 热处理塑料和紫外线处理过的合成橡胶 [12]。直

图 4 示出典型的商用 (ITT) 单膜纤维与塑料涂层 (商用名希特瑞尔) 的厚度的关系。纤维与纤维间的厚度可改变。标称的纤维是由含有微量 GeO_2 (二氧化锗) 的熔化的硅石心, 外包上一种含百分之五的 B_2O_3 (三氧化二硼) 加百分之九十五的 SiO_2 (二氧化硅), 和以 W 形状为外形的熔融硅石衬底所组成。纤维套管由硅和希特瑞尔层组成。该纤维的声学响应已用试验和分析进行了仔细的研究 [4], [8]。表 1 列出了用来计算该纤维的灵敏度 $\Delta \phi = \phi \Delta p$ 的全部参数。从图 4 中可以看出, 由于纤维长度的改变 ((1) 中的第一项) 最有影响的 ϵ_r^1 是 $\Delta \phi / \phi \Delta p$ 的一部分。 ϵ_r^0 和 ϵ_z^0 项 ((1) 式中的后两项) 是由光弹性作用给出的, 它们对相反极性的作用很小。