

辐射环境下的光纤传感技术

刘弘度
物理学教授

北京大学光学中心
华拓光研（北京）科技公司
富创光电（深圳）有限公司

liuhd@pku.edu.cn

liuhd@photonicshk.com



内容提要

- 核电与太空辐射环境
- 光纤传感与核电站安全监测
- 光纤抗辐射特性研究与光子晶体光纤
- 光电子器件抗辐射特性初步研究



中国核电发展概况

- ▶ 核电占总电力之比例
法**75%**; 日**55%**; 韩**40%**; 欧**35%**; 美**20%**; 全球平均**16%**
我国核电**30+**年, 占总电力不到**1/70**, 有核国家中倒数第一
到**2020**我国计划增长到 **8%**, 核电发展前景广阔
- ▶ 中国核电中长期发展专题规划 (**2005年-2020年**)
投入: 至少**4500**亿元人民币
引进: 第**3**代核电技术, 花费数百亿元人民币
(如: 美国西屋公司**AP1000**)
创新: 在引进、消化、吸收的基础上, 自主创新
开发具有自主知识产权的先进核电技术



核电环保与安全

▶ 百万千瓦级电站每年向大气排放

煤电：二氧化碳约为 **700 万吨**

二氧化硫约为 **6 万吨**

氮氧化物约为 **9 万吨**

火渣及飞灰约为 **80 万吨**

核电：**零排放 + 少量核废料**

▶ 核电大规模放射性泄漏事故的概率

第二代压水堆核电站在役运行：百万分之一

第三代先进压水堆核电站 *AP1000*：五千万分之一

采用先进的传感技术是关键技术之一



核电安全与光纤传感

- ▶ 核电站采用了大量的测量、传感仪器和电脑连成网络, 这些终端设备产生大量的电磁信号并需通过网络加以传播, 由于电站的强电磁干扰及辐射环境可使信号难以分析, 出现伪警报及测量数据偏差, 这是必须避免的;
- ▶ 使用光纤传输网络, 消除了导线因而消除了电磁能的传导和辐射. 光纤不但更耐受恶劣和腐蚀性环境, 便于铺设后长期使用, 还可免除大量仪器的接地问题。重要课题: 要求抗辐射;
- ▶ 目前还需使用许多电气传感器, 例如超声波流量计, 可经由光纤远距离传送光能再转换为这些电气传感器供电; 再进一步将其电信号转换为光信号而进入光纤局域网。要求抗辐射;
- ▶ 相比于传统的传感器, 光纤传感器还具有新的优越性, 例如干涉型光纤传感器具极高的灵敏度和动态范围, 光纤光栅的广泛适用性, 光纤高温计可测量极高温, 分布型光纤温度计可测量光纤沿线的温度, 等等。要求光纤传感器抗辐射。



辐射环境下的光纤网络

- 地面千兆光纤以太网已商用, **1Gb/s** 到**10Gb/s** 为光纤通信和光纤传感提供网络平台
- 辐射环境下的光纤以太网: 辐射损伤及附加光损耗需考查: 包括光纤, 无源和有源光器件, 光纤传感器
- 核电辐射环境: γ 射线和中子
特点: 高剂量率, 高总剂量
- 太空辐射环境: 宇宙射线的 γ 射线和重粒子, 来自太阳风质子; 地球磁场俘获带电粒子, 电子和质子
特点: 低剂量率 (太阳耀斑期间除外), 高总剂量



内容提要

- 核电与太空辐射环境
- 光纤传感与核电站安全监测
- 光纤抗辐射特性研究与光子晶体光纤
- 光电子器件抗辐射特性初步研究



核电站与光纤传感

- 美国很早就开展研究
评估光纤传感应用于核电站的可能性

Sensors and Nuclear Power

**Report by the Technology Transfer
Sensors Task Team**

June 1985



U.S. Department of Energy



Sensors and Nuclear Power

Report by the Technology Transfer Sensors Task Team

Fiber Optics

a. 考察目的

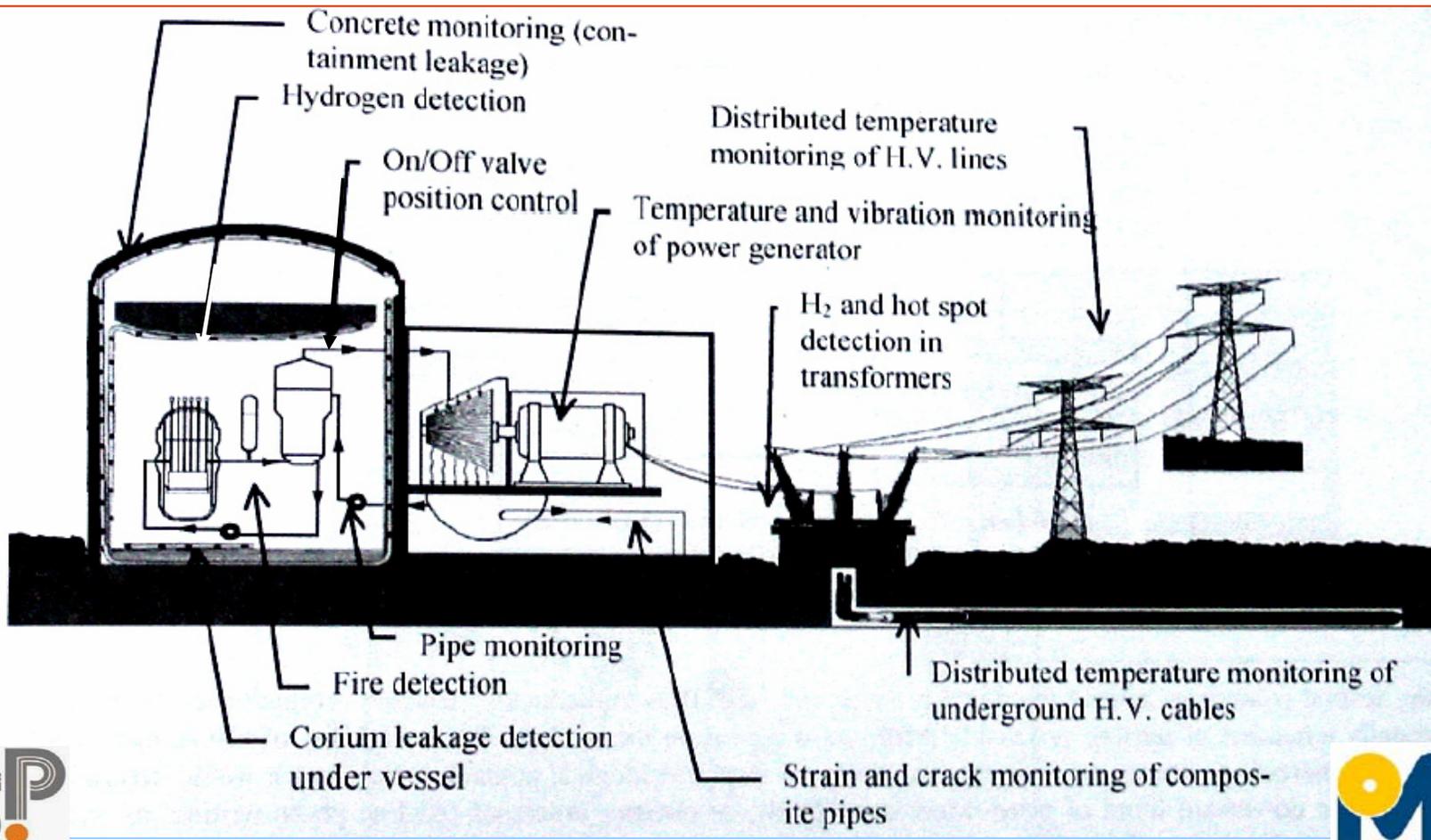
1. 利用光纤远程传送强激光, 在传感器所在地转化为所需电功率
2. 将传感器参数测量值转变为光信号, 再经光纤导入局域网或数据总线
3. 在运行中的核电站环境中, 展示所需光纤系统功能

(注) 研究光纤传感器在核电环境中的可能应用



核电站安全监测

法国CEA展望：光纤传感及光网络在核电站的应用



核电站光纤传感技术应用

1. 核反应堆混凝土壳层应变及物料泄漏监测

例如: 采用光纤光栅, 应变测量灵敏度可达**1微应变**, 动态范围**+/-2500微应变**, 重复性可达**0.05%**。

2. H₂监测

冷却剂泄漏损耗可导致核堆熔化并产生H₂气, 采用光纤传感技术可加以检测. 例如, 采用镀钼光纤构成的干涉仪, H₂气探测灵敏度达**ppb水平**; 采用光纤**RAMAN**光谱技术探测H₂气可收**更佳效果**。

3. 放射性检测

光纤光激发荧光强度正比于辐射剂量。

4. 电压/电流监测

利用光纤磁光效应或光纤**SAGNAC**干涉仪, 可监测电压/电流。

5. 核反应堆下方混凝土底座热点探测

设置X-Y光纤栅格, 准确探测核反应堆下方混凝土底座异常发热点。
可能要求达到**很高温度的**测量水平

6. 复杂高压蒸汽管道沿线监测

7. 架空输电线及地下电缆分布式温度监测

8. 变压器中H₂浓度和局部放电/热点的监测

9. 发电机汇流排温度和电机振动监测

10. 高压蒸汽管道阀门**ON/OFF**位置监测

11. 核反应堆废料监测



核电站光纤传感应用

需求及光纤传感应用场合	应用类别
核物料泄漏探测	安全
放射性及核废料监测	安全
H ₂ 及热点探测	安全
火警探测	安全
结构应变与裂隙监测	监测
高压蒸汽组合管道沿线监测	监测
发电机温度与振动监测	监测
电力设备(变压器, 架空/地下电缆)监测	监测
高压蒸汽管道阀门ON/OFF位置监测	监测



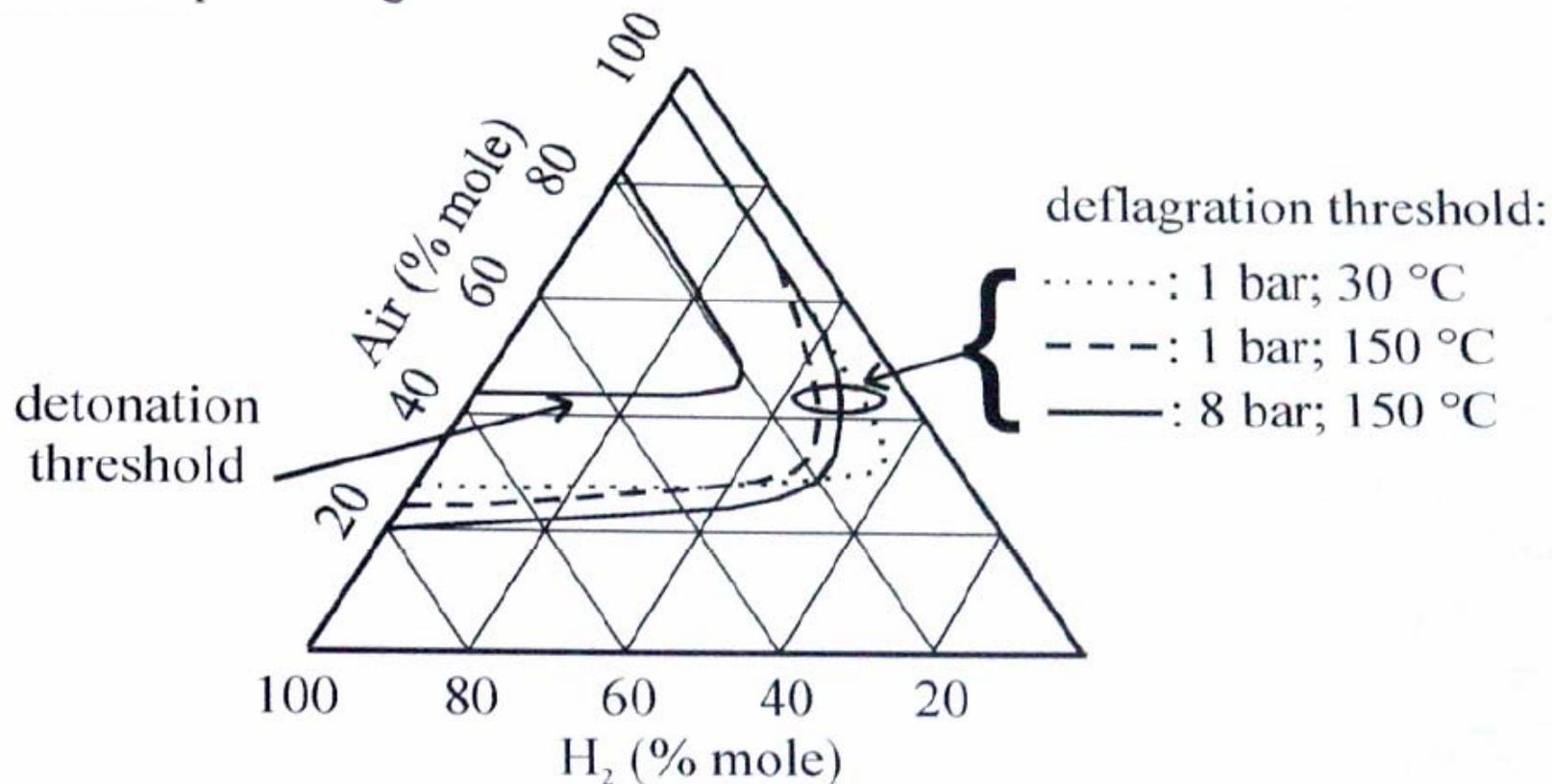
例1: 核电站H₂监测

- **H₂ Risk:** 冷却剂泄漏损耗, 导致核堆熔化并产生H₂气, 突燃及爆炸
美国宾州 Three Mile Island 核事故 1979.3.28
乌克兰 Tchernobyl 核事故 1986.4.26
- **法国原子能委员会(CEA)的要求**
H₂ 浓度测量范围 **0.5% ~ 20%**, 分辨率 **0.5%**;
环境条件: 气压1至(7~9)大气压, 温度高达**170℃**以上, 饱和水蒸气;
该监测系统响应时间: **≤60秒**;
系统能待机长达40年(核电站工作期), 但可随时进入工作状态;
采用遥测技术, 具备抗辐射能力。
- **采用光纤传感技术检测H₂**
采用镀钼光纤构成干涉仪, H₂气探测灵敏度可达**ppb水平**;
采用**光纤喇曼光谱技术**探测 H₂气可收**更佳效果**。



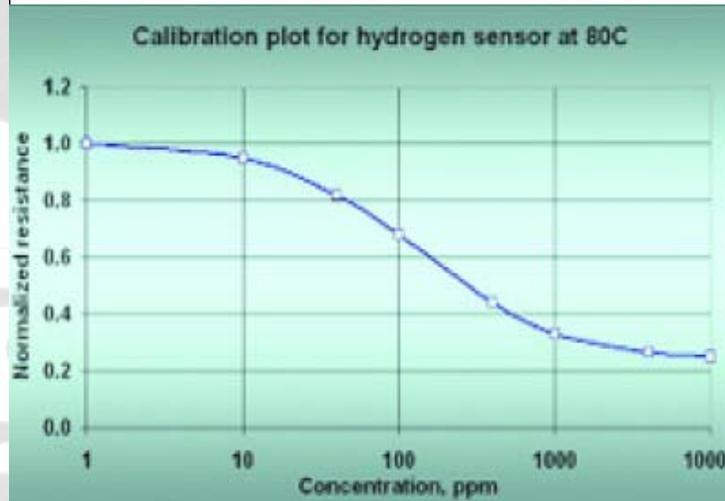
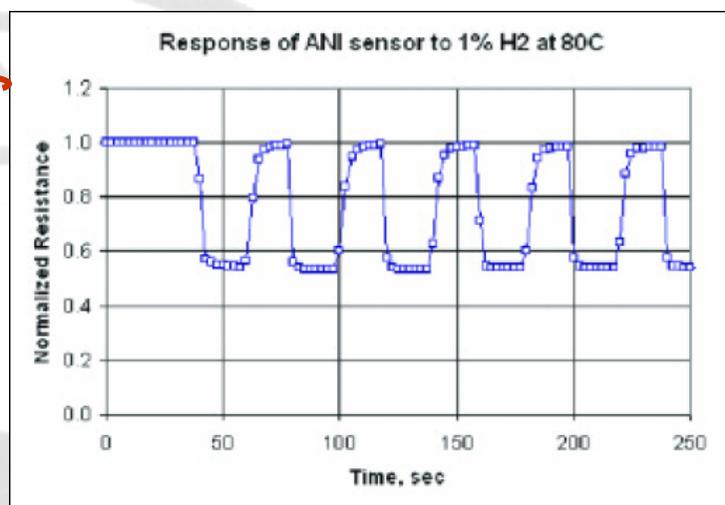
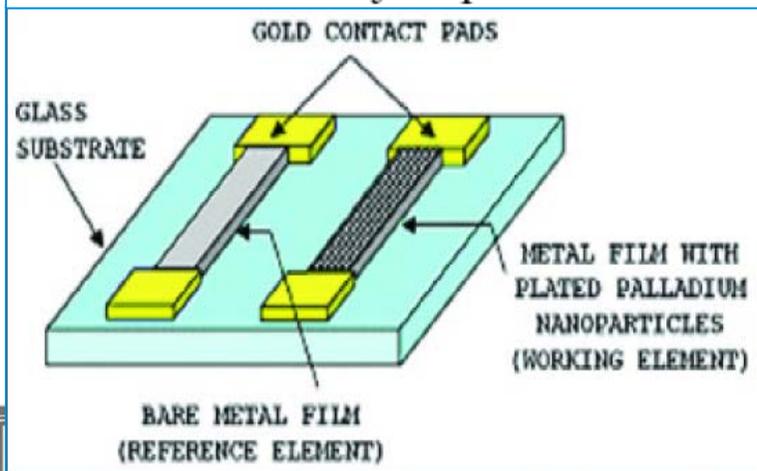
核电站之H₂-Risk

The Shapiro diagram

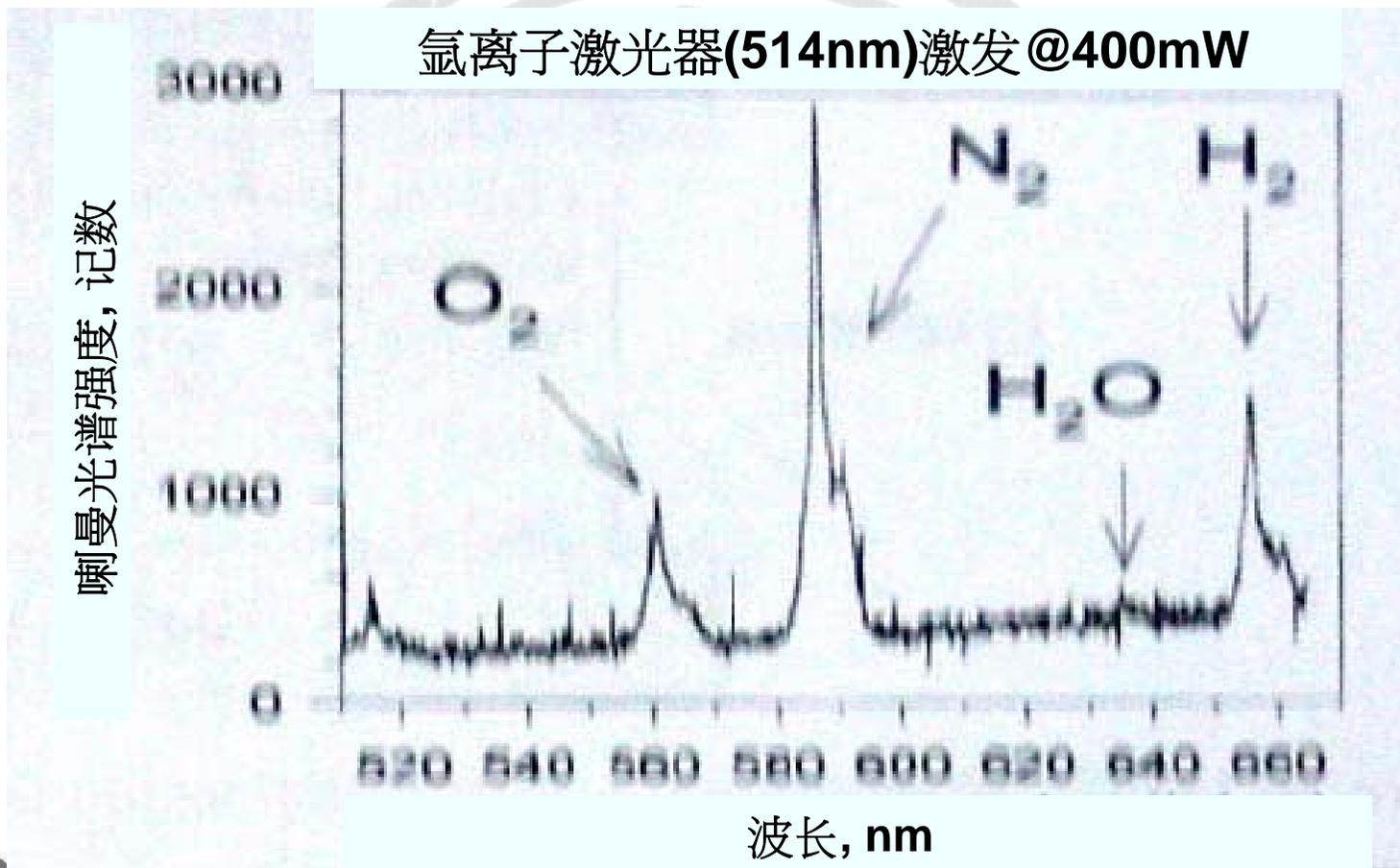


Pd-纳米颗粒 H₂ 传感器

Palladium nanoparticles are intrinsically selective to hydrogen and sensors, based on palladium nanoparticle networks, do not produce false alarms in the presence of other gases, such as CO and hydrocarbons. Hydrogen sensors based on metal oxide, electrochemical and optical platforms are cross sensitive to other gases and require modifications for selectivity improvement.



核电站H₂监测-- 喇曼光谱

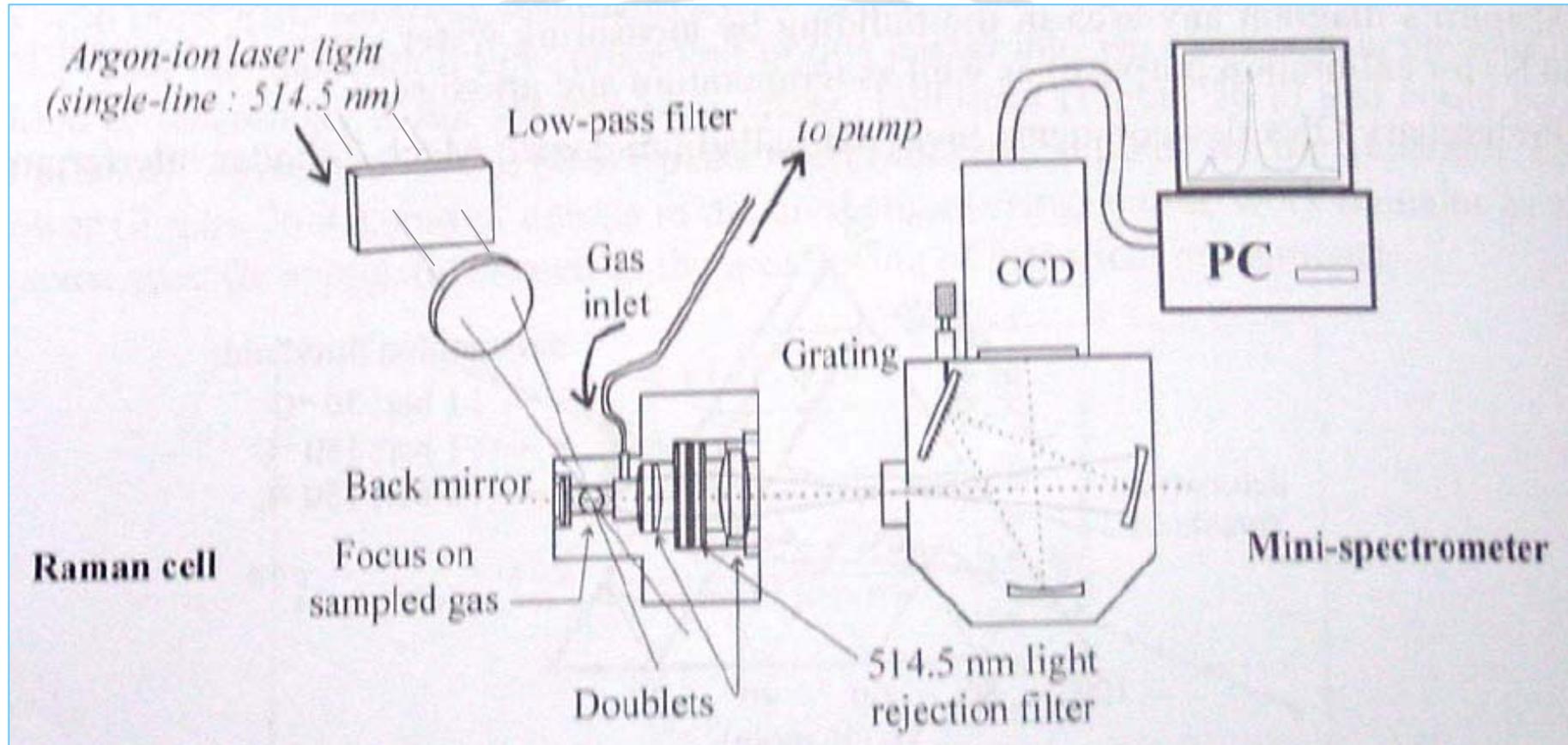


H₂喇曼光谱强度

分子	λ , nm (激发波长514.5nm)	$\Delta \lambda$, nm	σ / σ_{N_2}
H ₂	654.7	140.2	2.4
N ₂	584.6	70.1	1
O ₂	559.3	44.8	1.3
H ₂ O	633.5	119	3.8



光纤遥测喇曼分光计



例2: 核电站外壳光纤光栅应变传感

▶ 圆柱形水泥壳
传感器安置图

电阻应变规

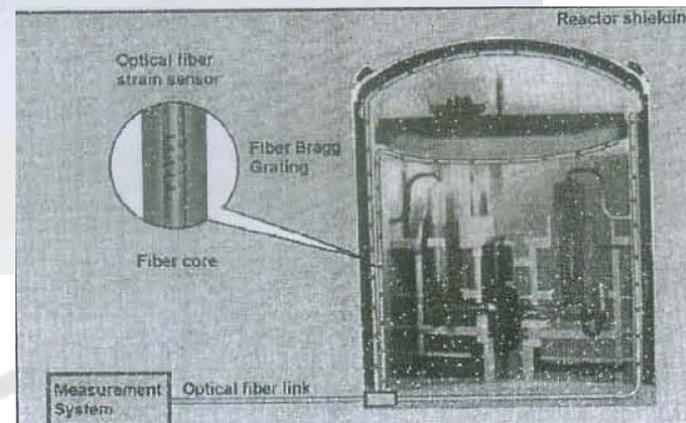
第一组
电感传感器

布喇格光栅
伸长计

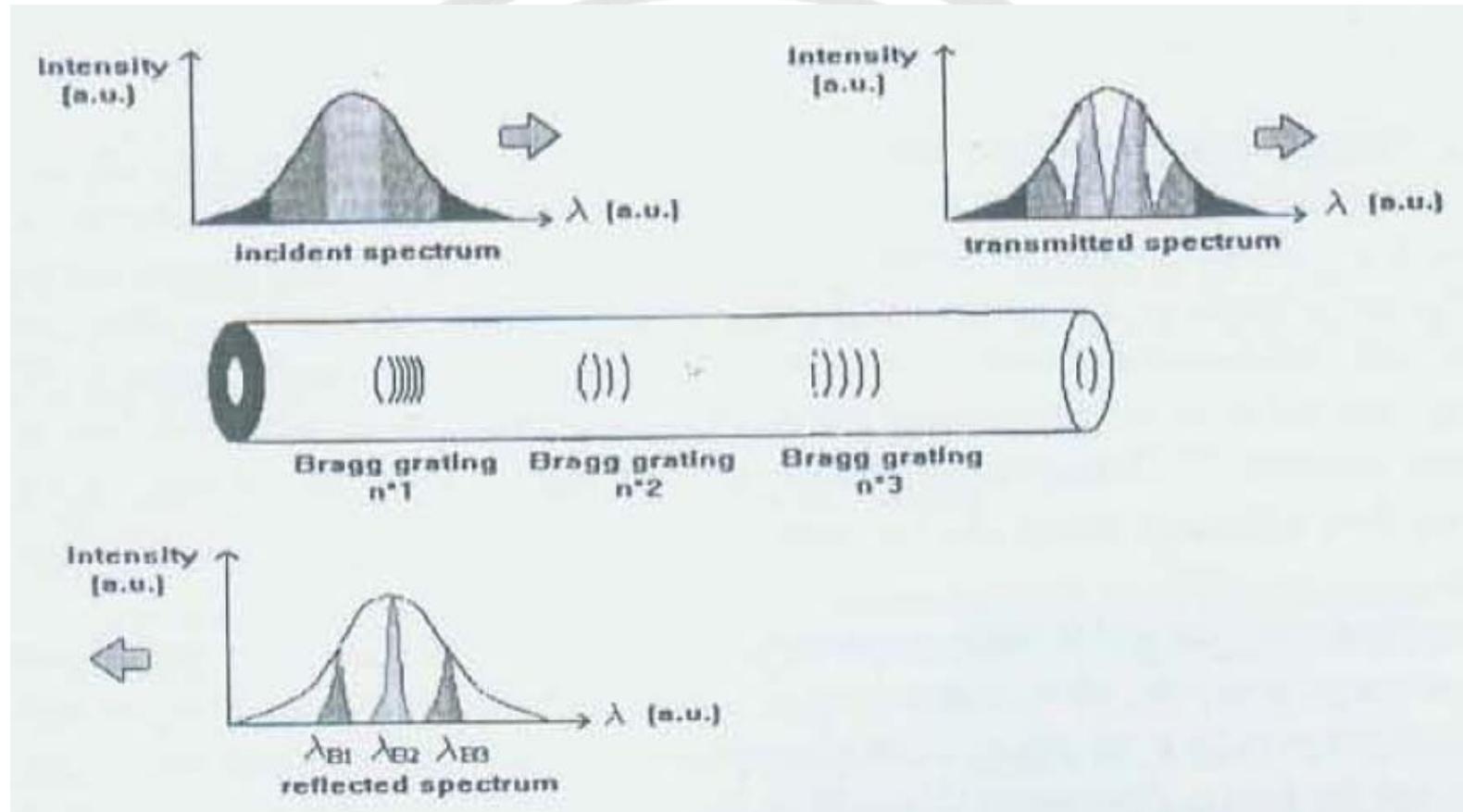
布喇格光栅
伸长计

第一组
电感传感器

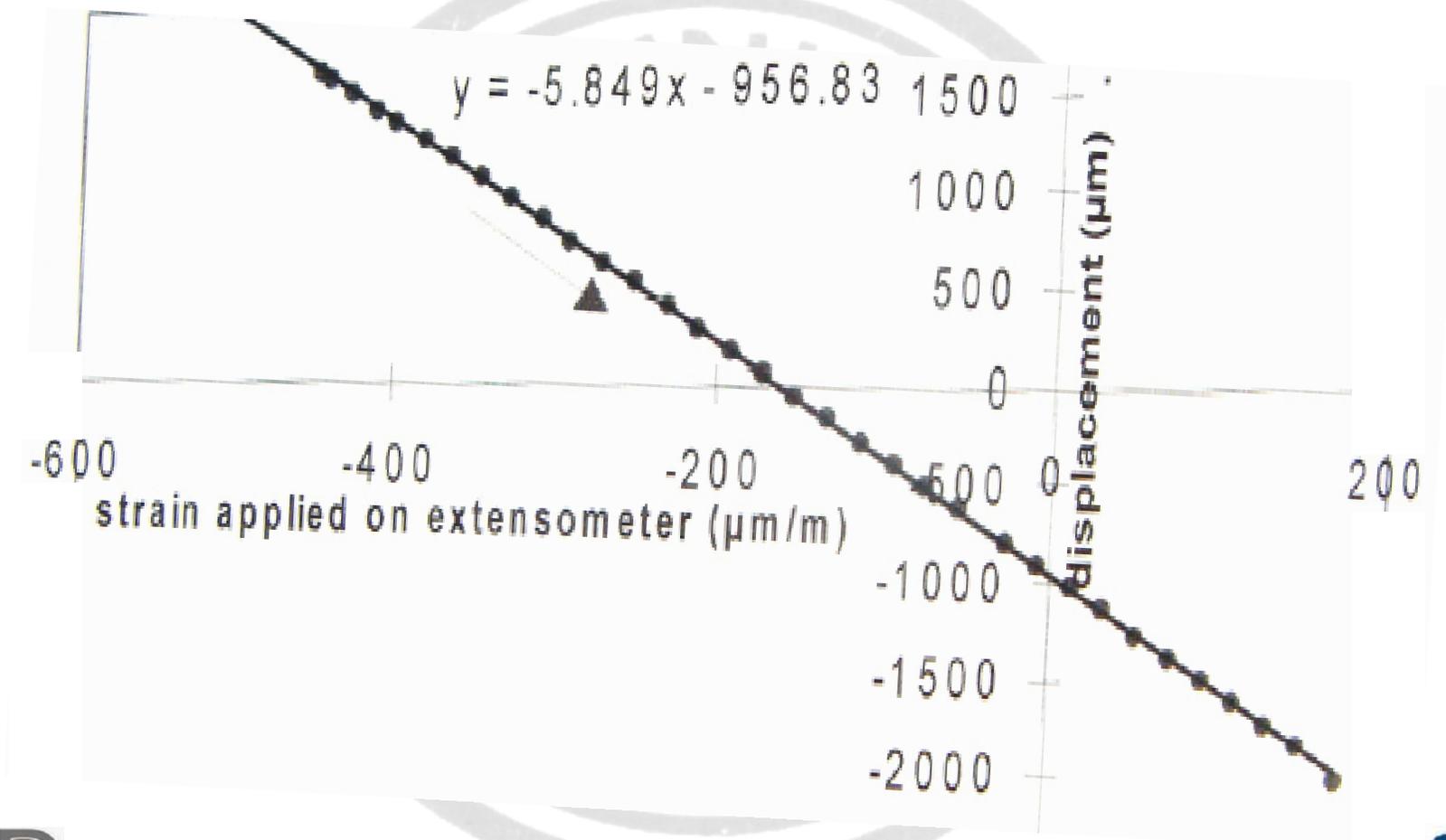
电阻应变规



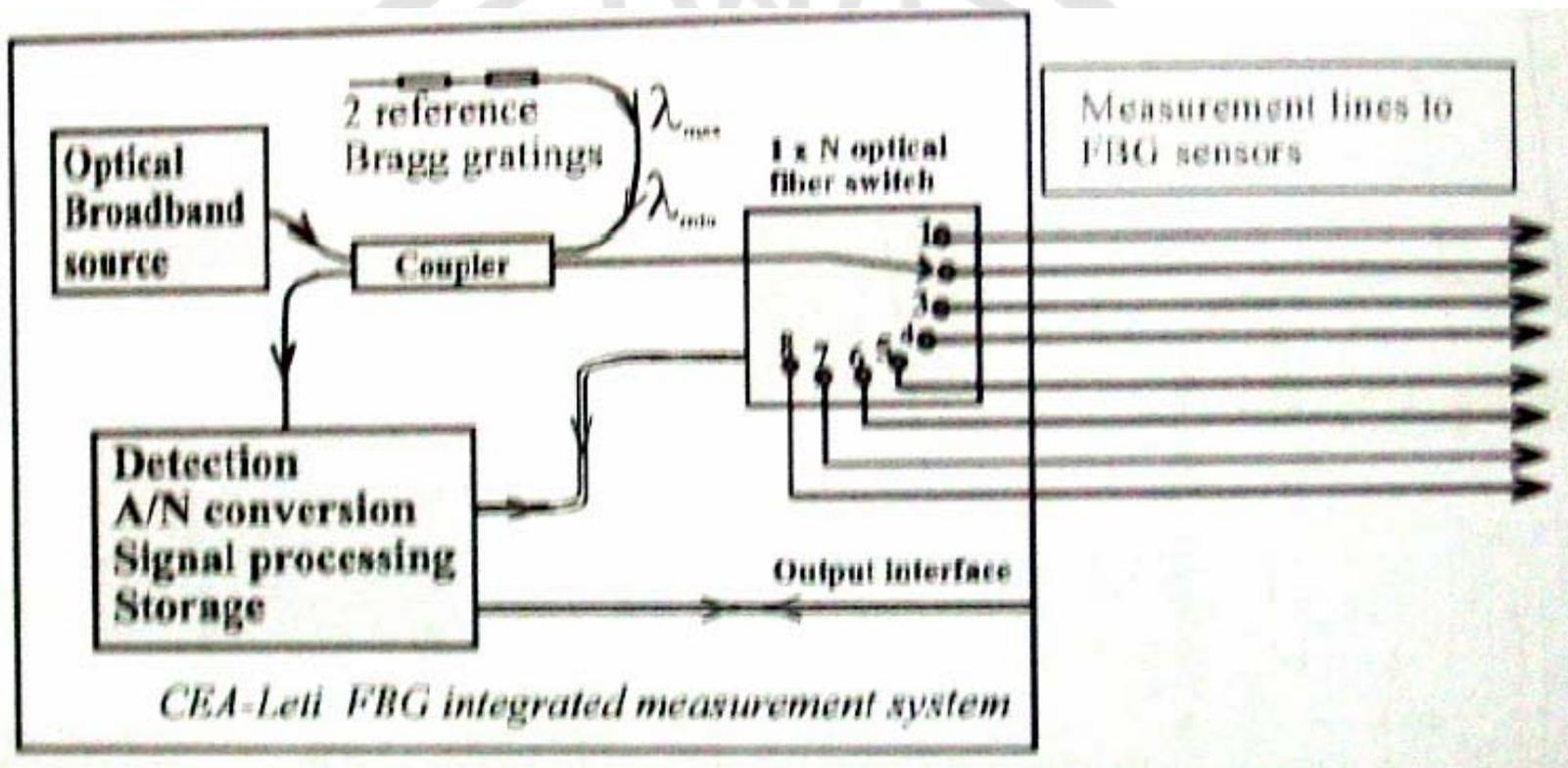
光纤布喇格光栅 (FBG)



光纤光栅应变传感



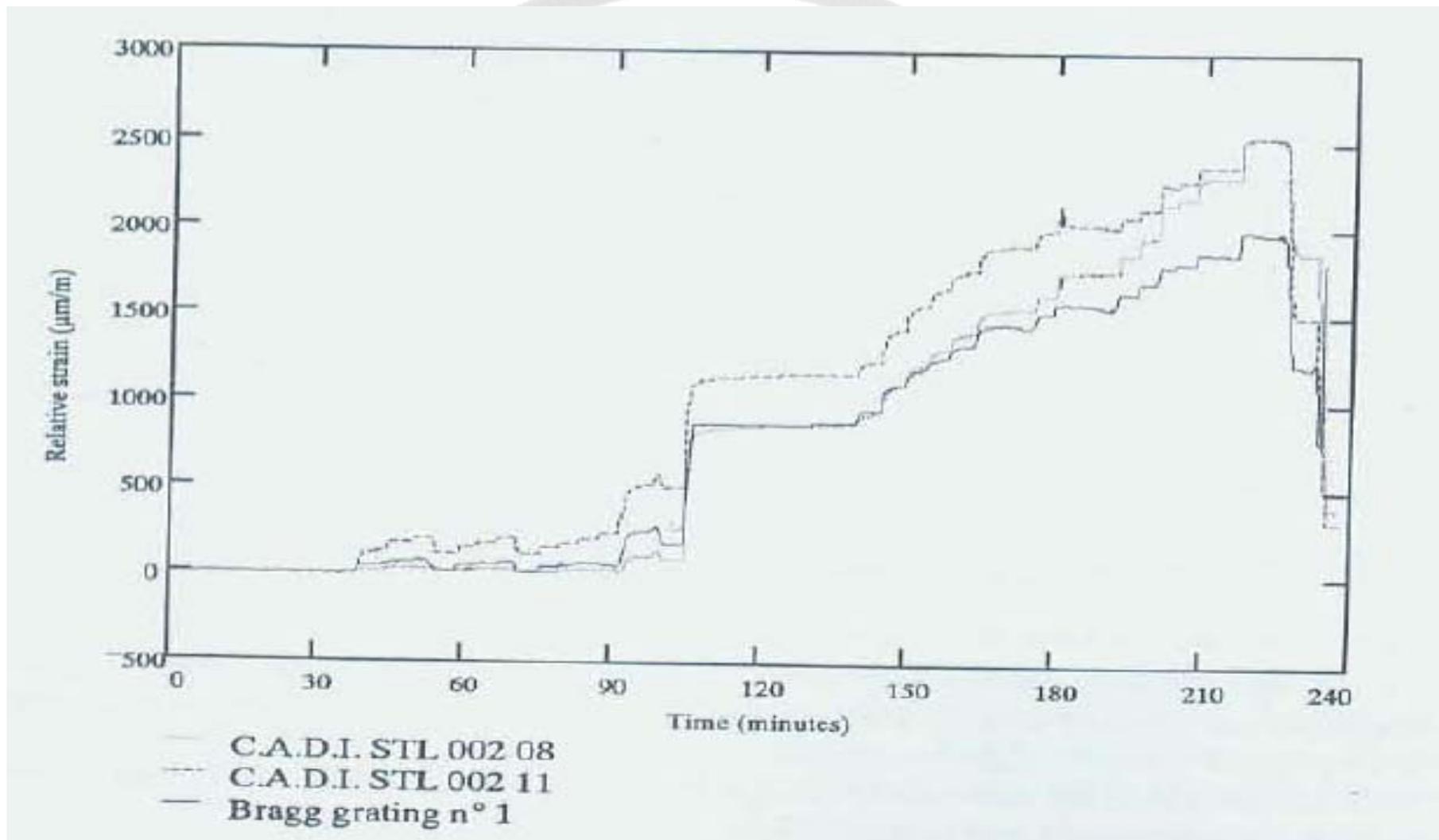
光纤光栅应变传感



* 应变测量灵敏度**1微应变**，动态范围**+/-2500微应变**，重复性**0.05%**。



光纤光栅应变传感

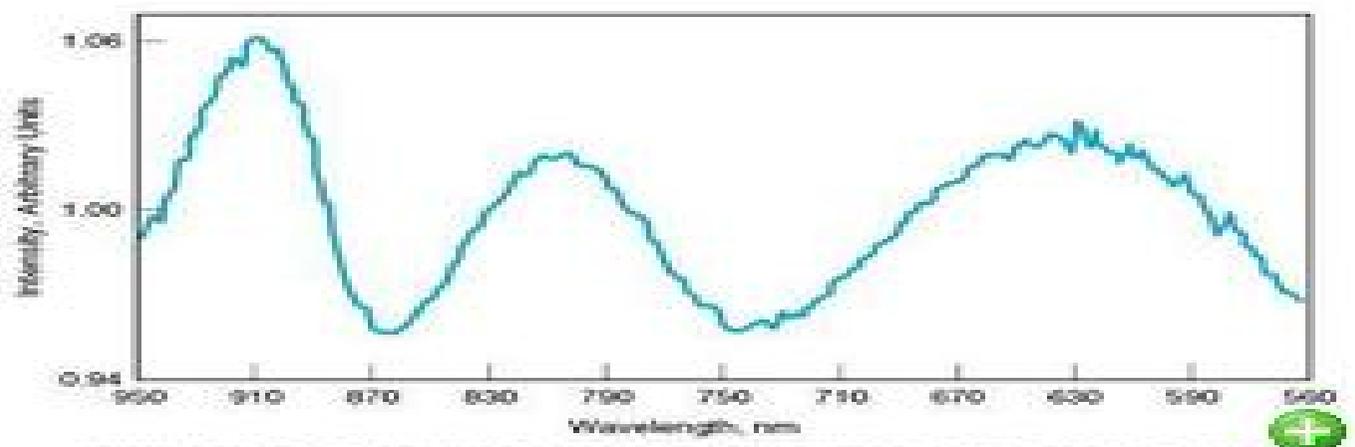
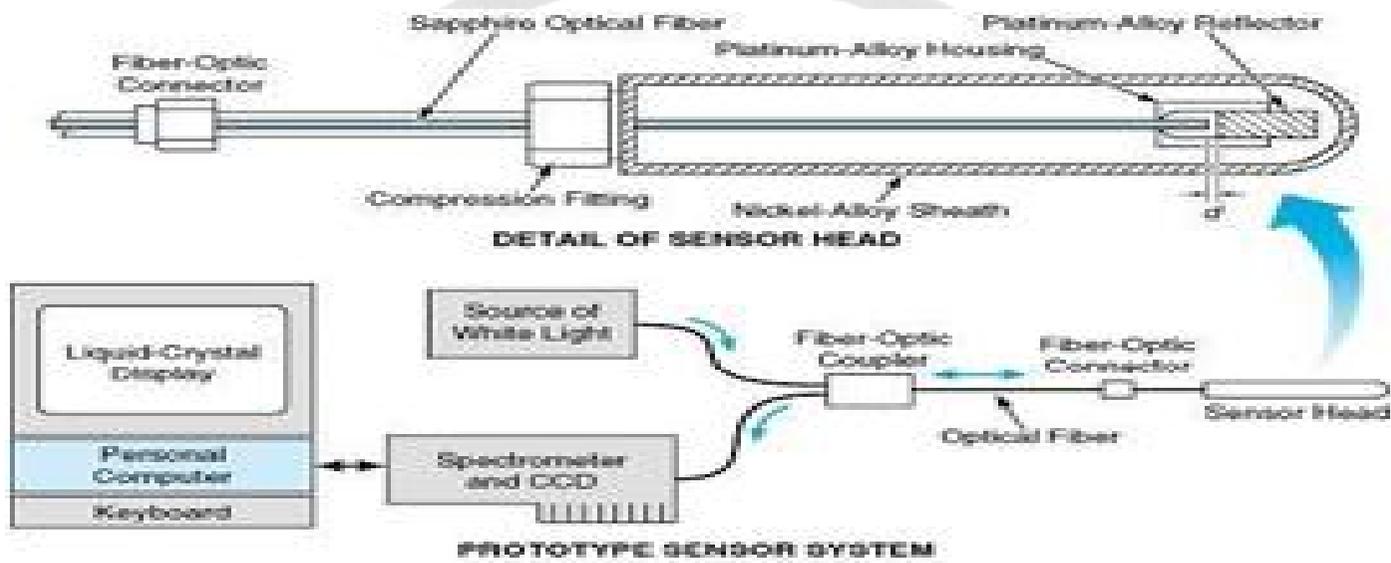


γ 射线对光纤光栅(FBG)的影响

- γ 射线在光纤芯区产生色心，使光纤退化
- 纯石英光纤抗辐射性能最好，但未能写入光栅
- 掺锗石英光纤经载氢处理后写入光栅，实验证明其光谱特性不受 γ 射线影响，不必重新校准
- 光纤FBG传感系统可应用于辐射环境

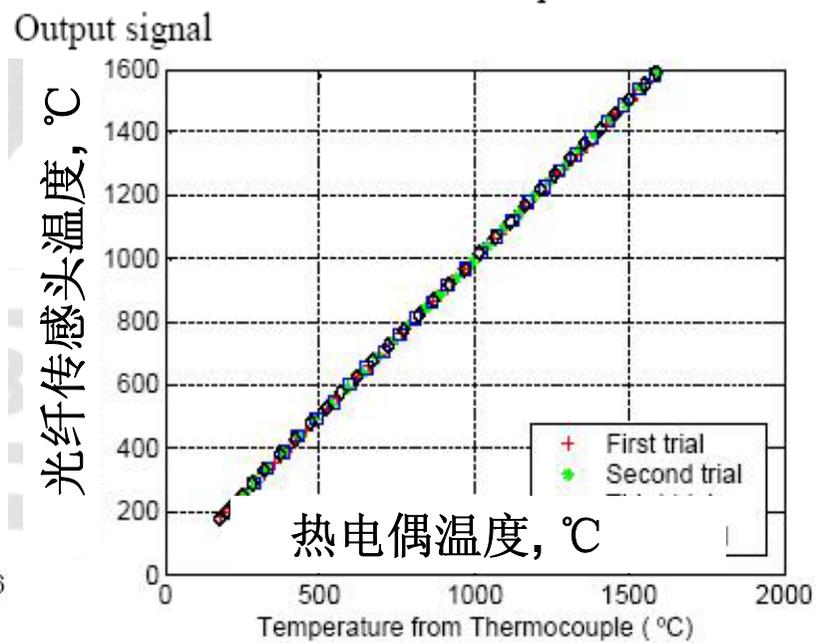
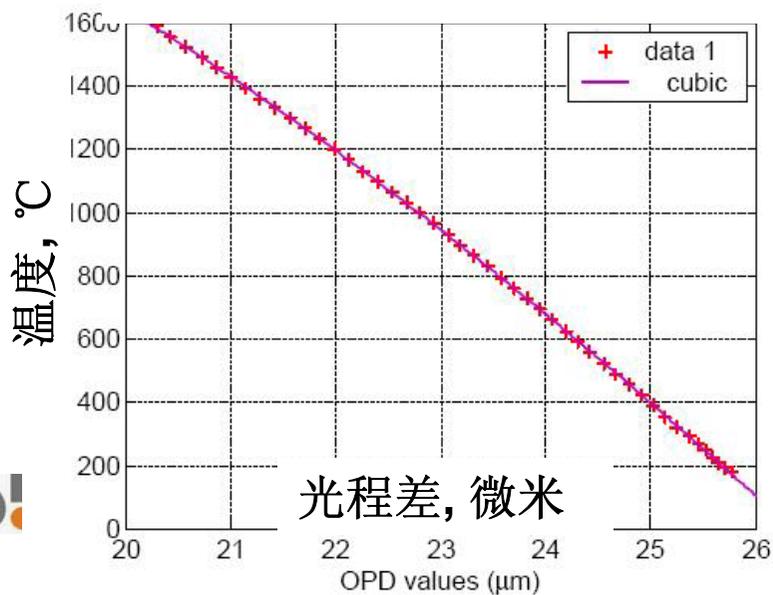
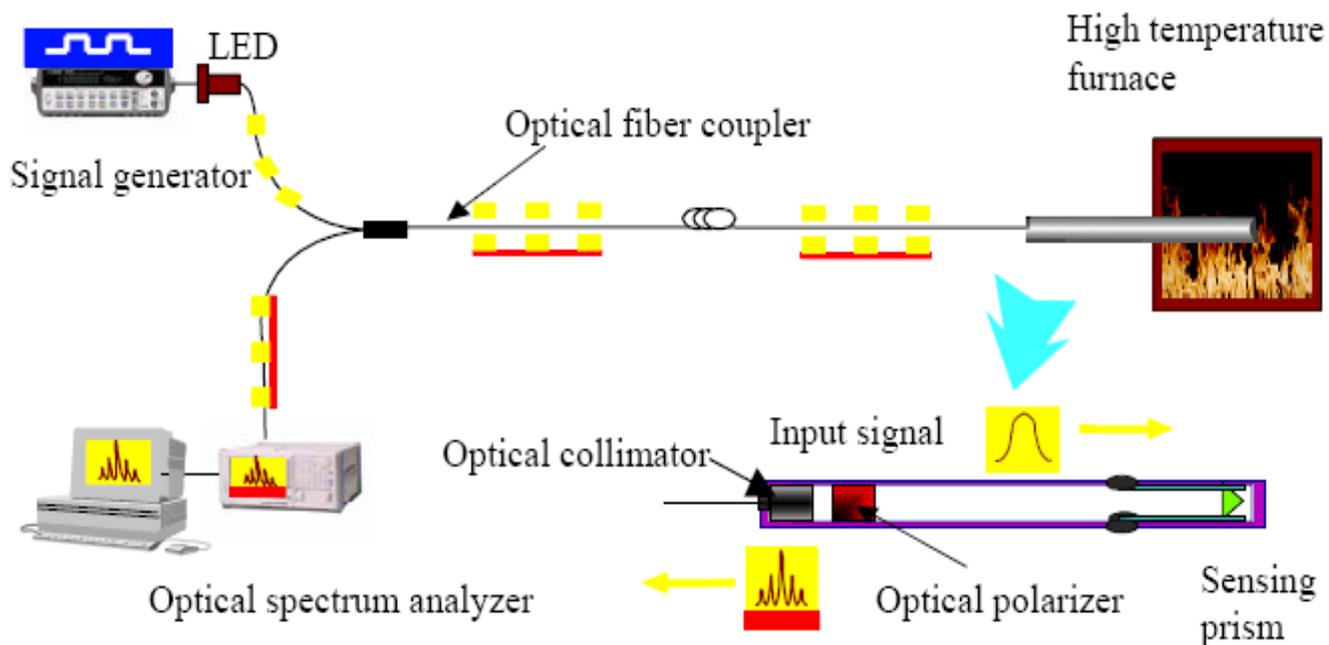


例3: 光纤法白腔温度传感



EXAMPLE OF SPECTRUM AT A TEMPERATURE NEAR UPPER END OF RANGE





光纤法白腔温度传感器抗辐射特性

Nuclear Regulatory Commission (NRC)

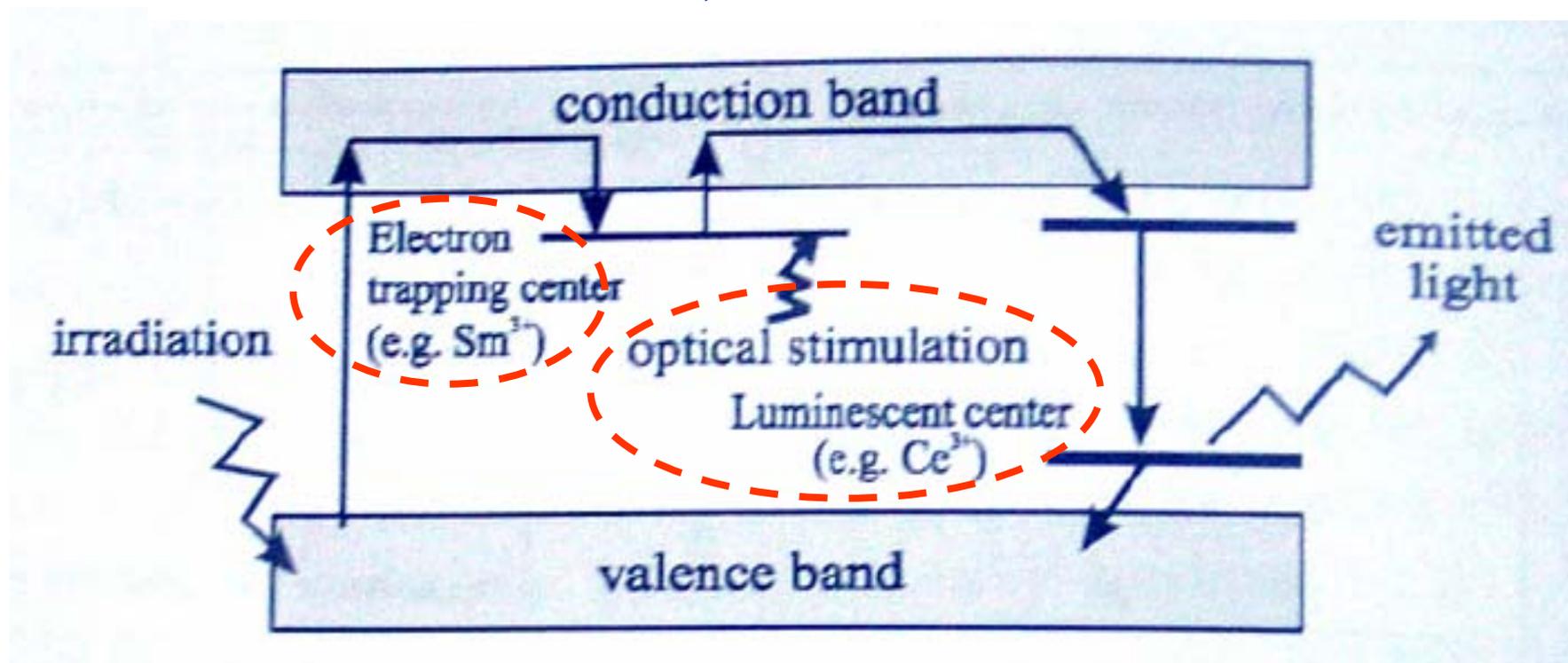
1998年选择一款法白腔型光纤温度传感器为例，完成了用于核辐射环境的研究。两只温度探头置于 γ 射线辐照之下，其中一只总辐射剂量达**133 Mrad**。

研究结论：本款法白腔型光纤温度传感器适于在高 γ 射线剂量环境下应用。

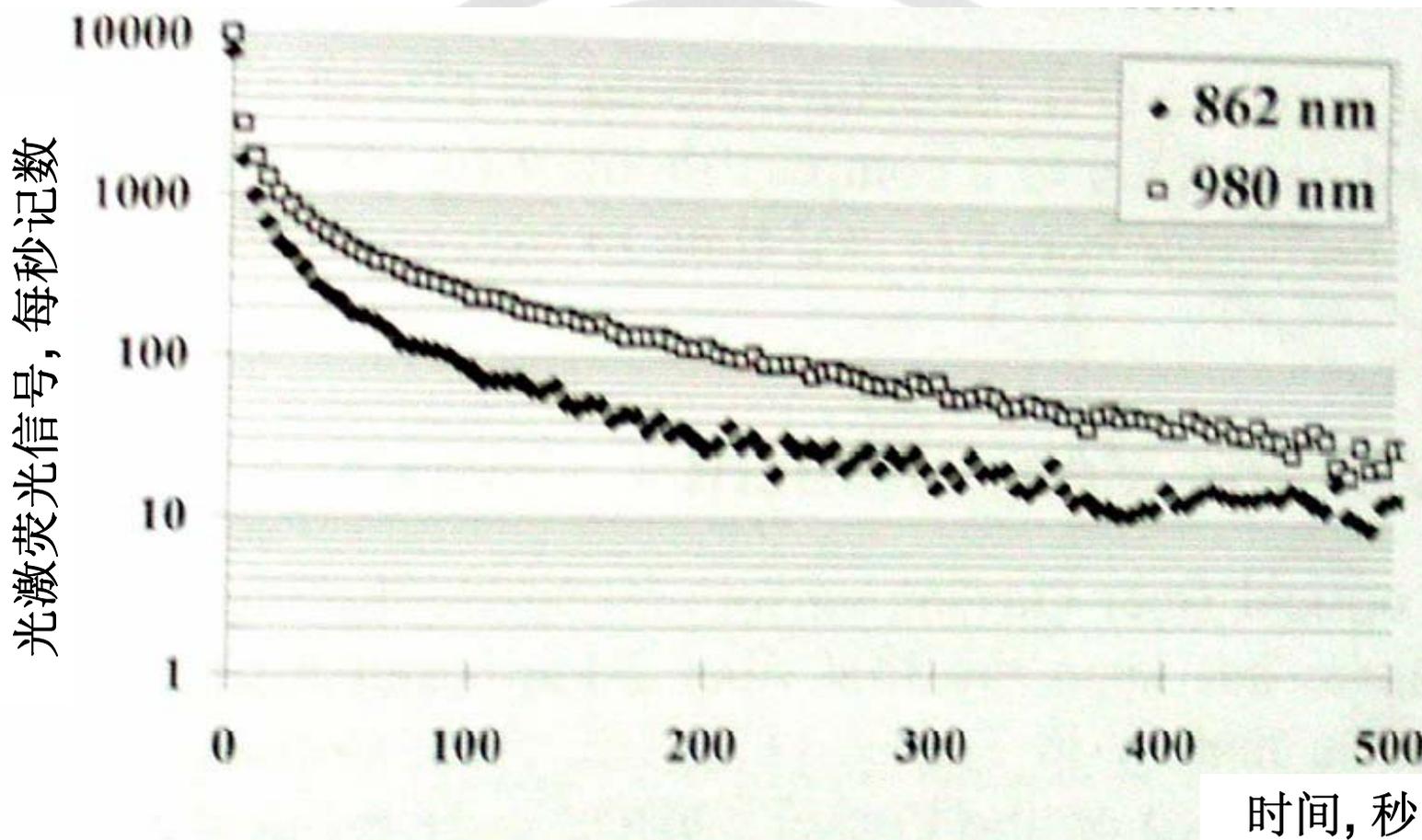


例4: 辐射探测--光激荧光(OSL)法

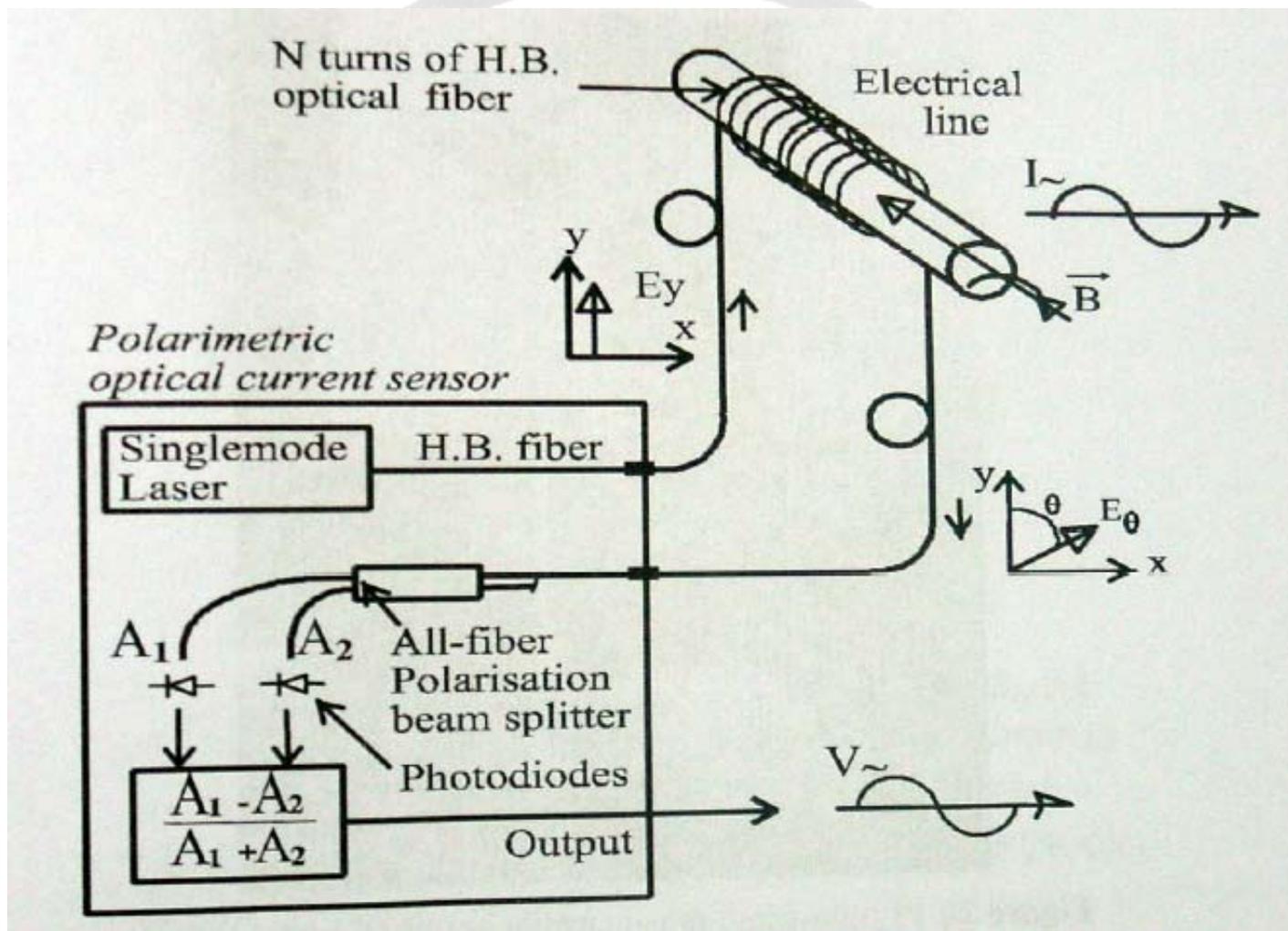
稀土掺杂碱金属硫化物显示强光激荧光, 如硫化镁掺**Ce**作为发光中心, 掺**Sm** 作为电子俘获中心



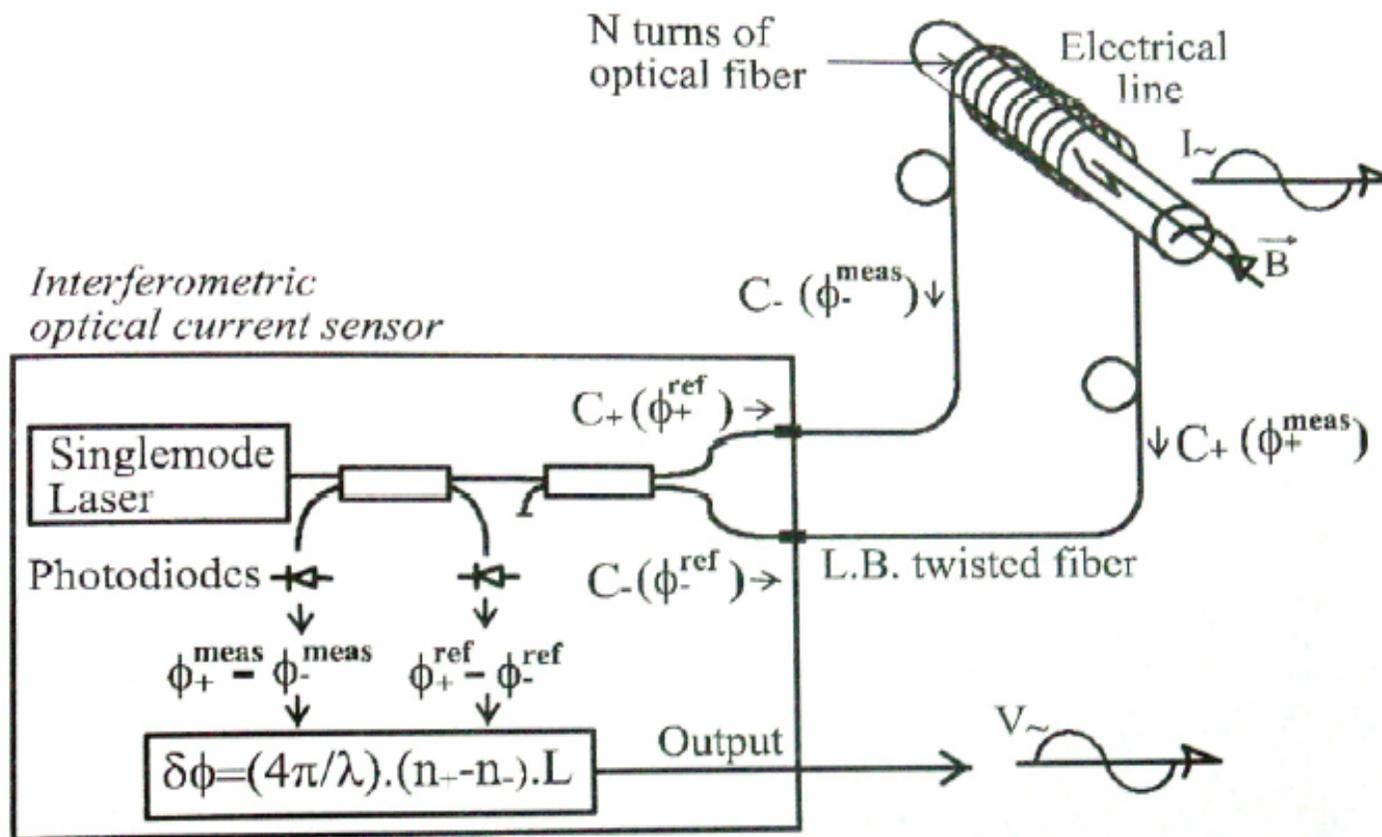
光激发荧光强度v.s.时间



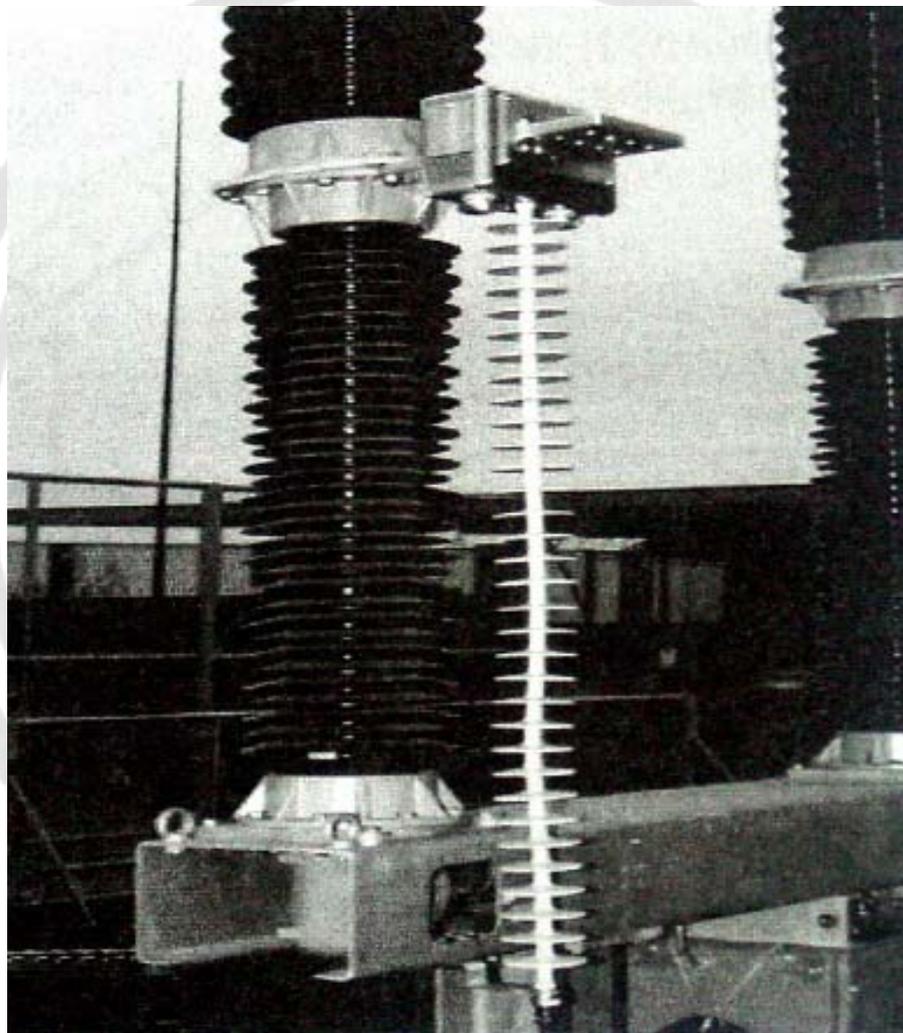
例5: 光纤偏光计电流传感原理



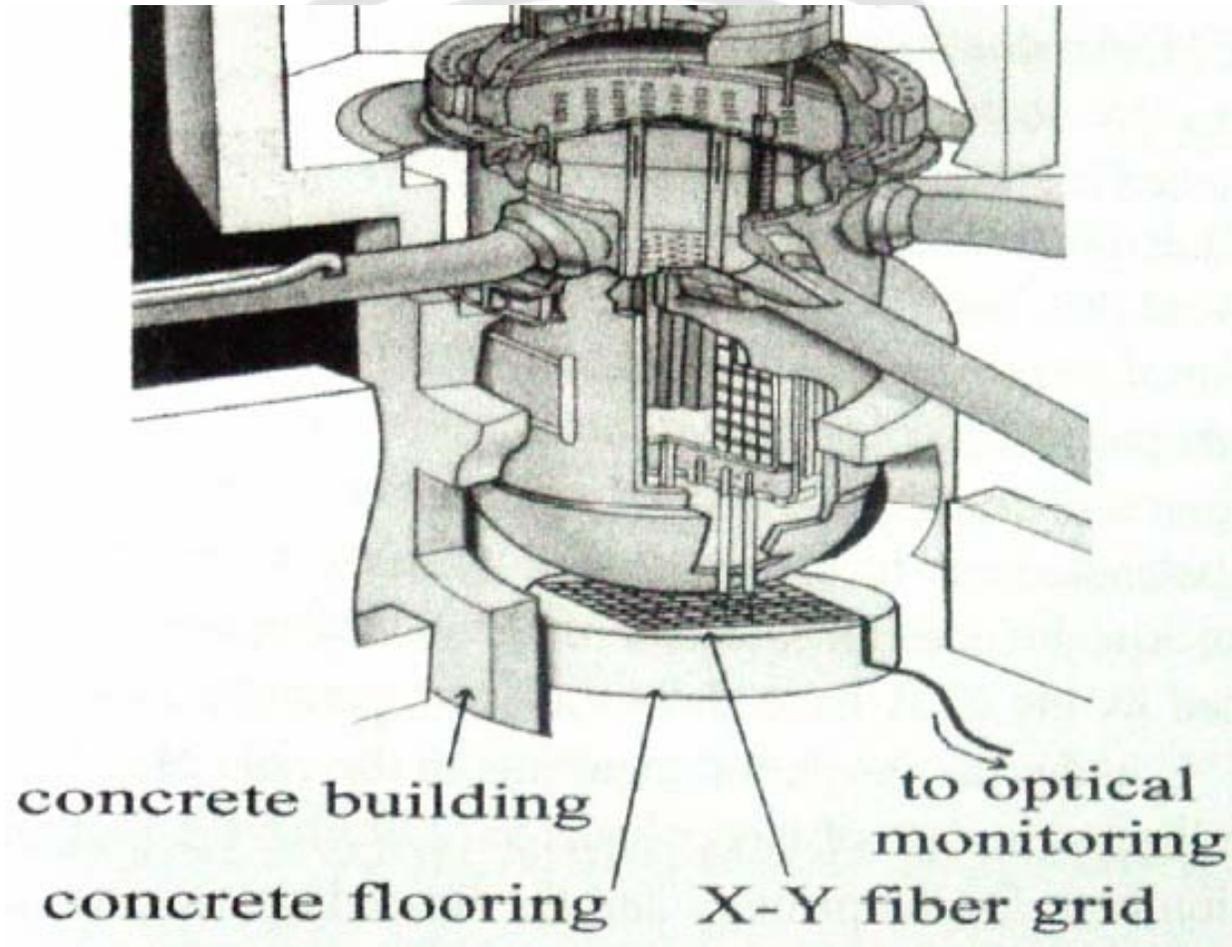
光纤Sagnac干涉仪电流传感原理



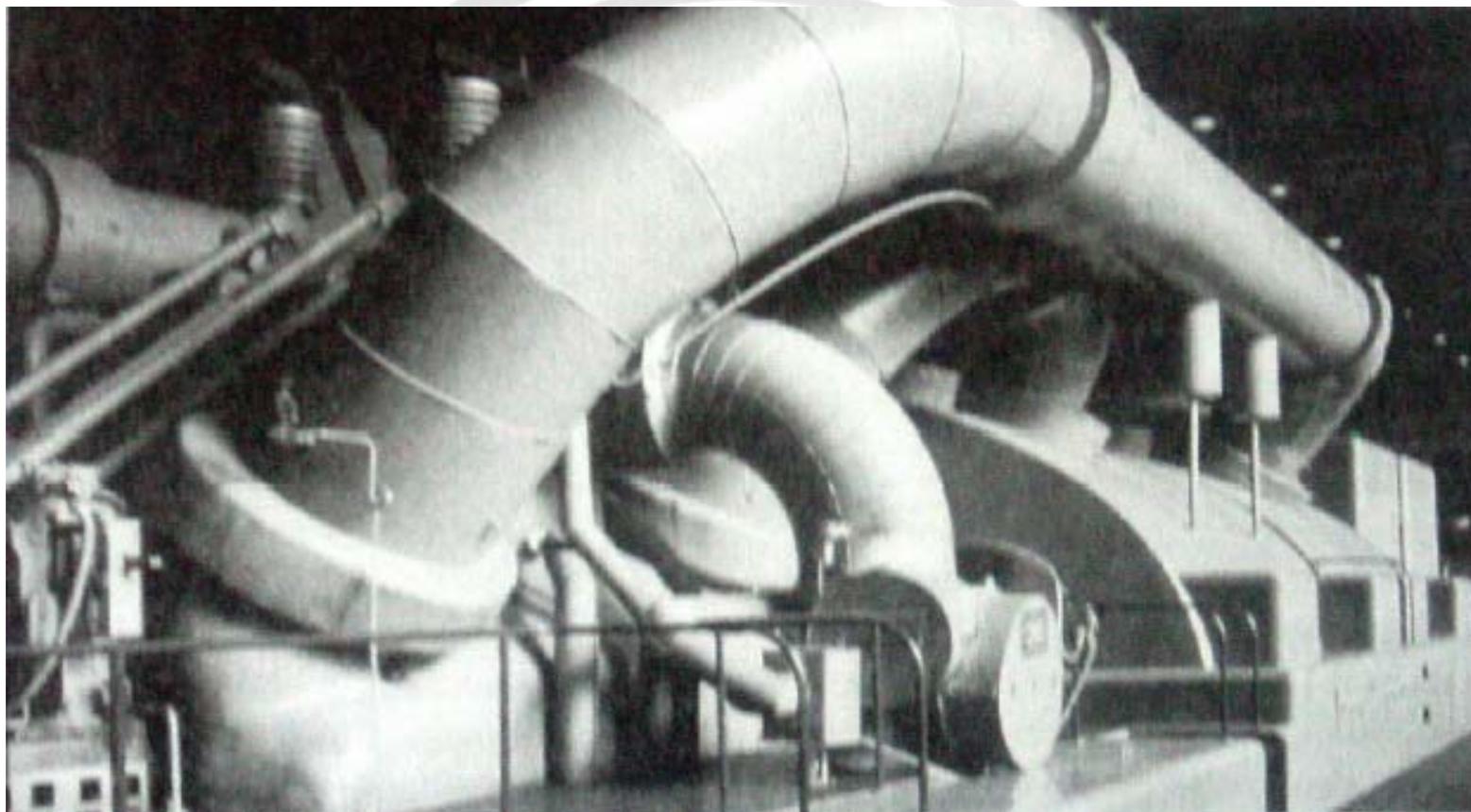
光纤电流传感器



例6: 核反应堆底座光纤热点探测



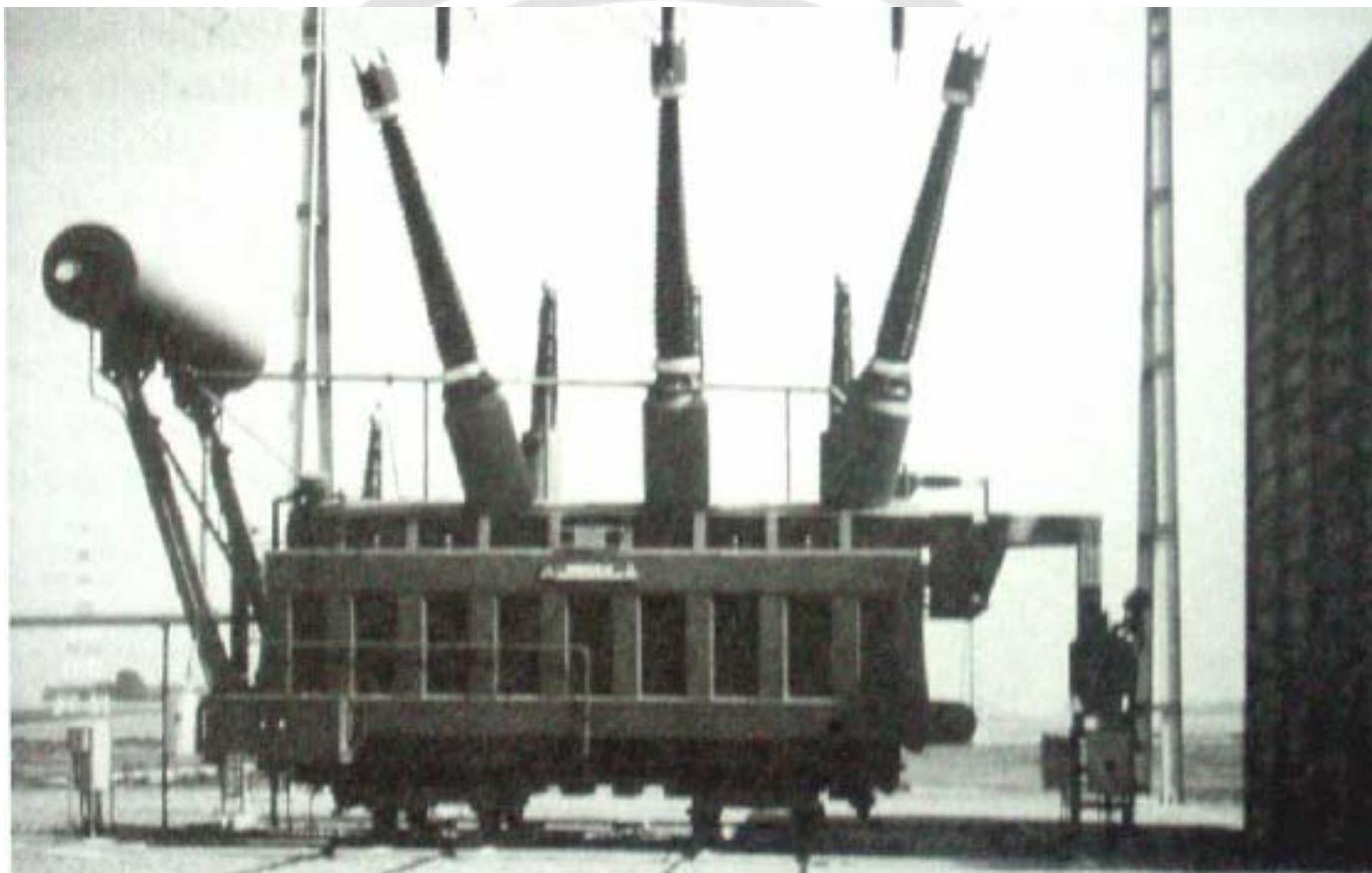
例7: 电厂高温蒸气管道光纤监测



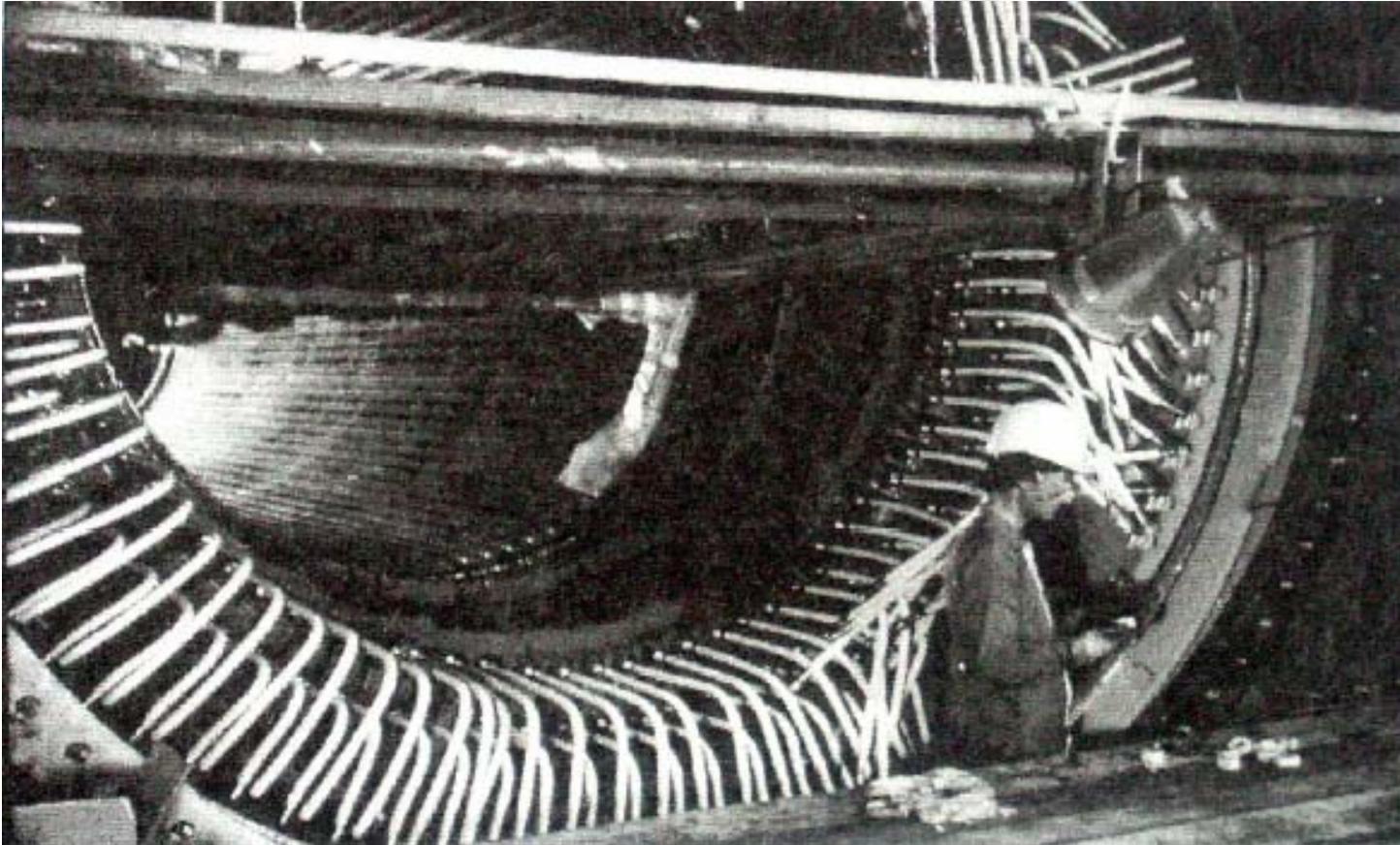
例8: 电力传输线及地下电缆光纤监测



例9: 变 压 器 中 氢 气 光 纤 传 感



例10: 发电机温度和振动光纤传感



内容提要

- 核电与太空辐射环境
- 光纤传感与核电站安全监测
- 光纤抗辐射特性研究与光子晶体光纤
- 光电子器件抗辐射特性初步研究



光纤抗辐射特性研究

- ▶ 对于标准的掺Ge单模石英光纤，其辐照导致的损耗增大值显著小于Ge/B 或Ge/P 共掺杂的光纤（相差可达一个数量级以上），但不同厂家的同类产品相差可达数倍之多；
- ▶ **纯石英**单模及多模光纤抗辐照能力或损耗增量明显优于掺Ge的石英光纤，且纯石英光纤中OH含量较高（200~1500ppm）者优于OH 含量<5ppm的样品，这一结论适用的剂量范围为
$$20\text{Gy} \leq D_{\gamma} \leq 3 \times 10^4 \text{ Gy}$$
或
$$2 \times 10^3 \text{ rad} \leq D_{\gamma} \leq 3 \times 10^6 \text{ rad}$$
- ▶ 与纯石英光纤相比，在石英纤芯掺入N或纤芯与包层适度掺F的光纤样品，其抗辐照能力有一定的提高；
- ▶ 纯石英光纤经载H₂ 处理，表现出较优的抗辐射能力；
- ▶ 光纤制造参数对抗辐照能力有不同程度的影响，包括材料纯度，拉丝速度，应力和温度，聚合物保护层材料等



光纤辐射损耗测量实例

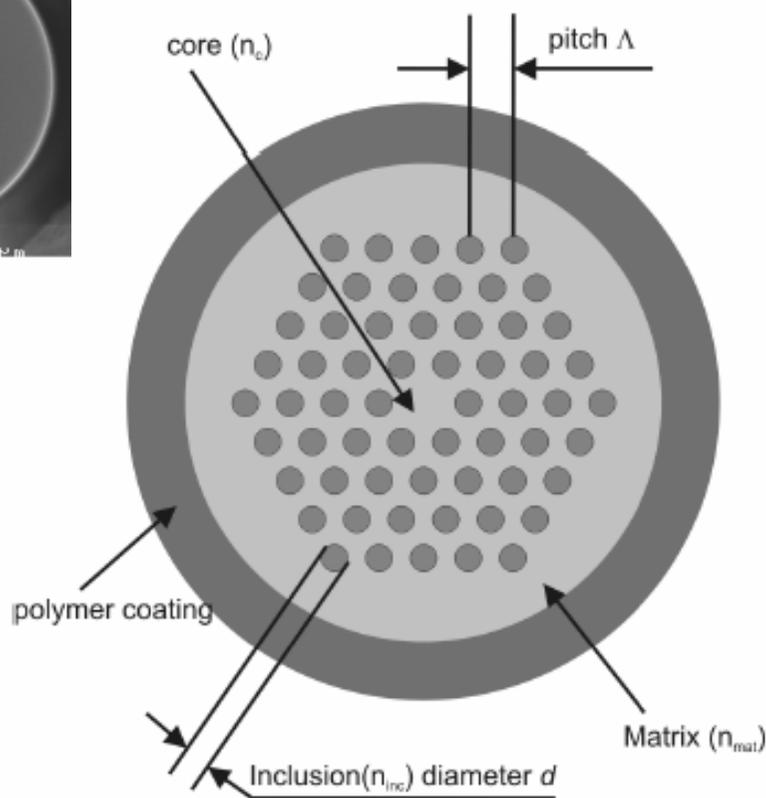
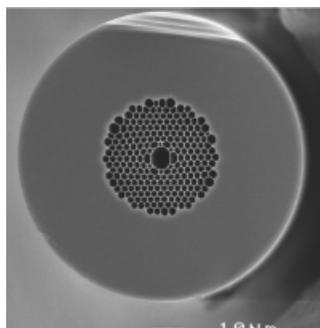
中子流： 1.5×10^{14} n/cm² (3.5h irradiation)

γ 射线剂量： 3×10^5 R (3.5h irradiation)

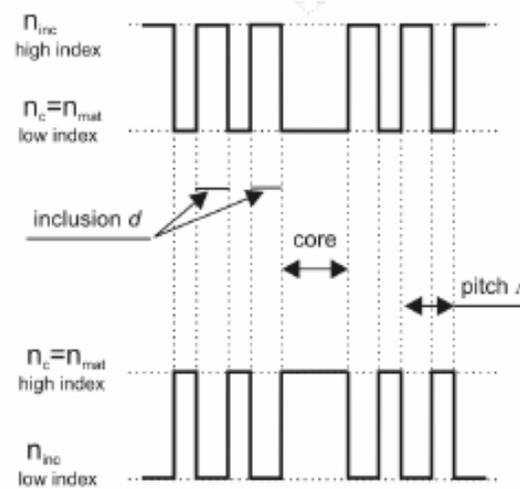
Fiber	Radiation	Initial loss (dB/km)	Induced loss (dB/km)	Loss after irradiation (dB/km)
纯石英 光纤	Neutron	0.47	12	12.47
	γ -ray	0.35	10	10.35
掺锗 光纤	Neutron	0.40	74	74.40
	γ -ray	0.36	30	30.30



光子晶体光纤和光子带隙光纤 (PCF和PBF)



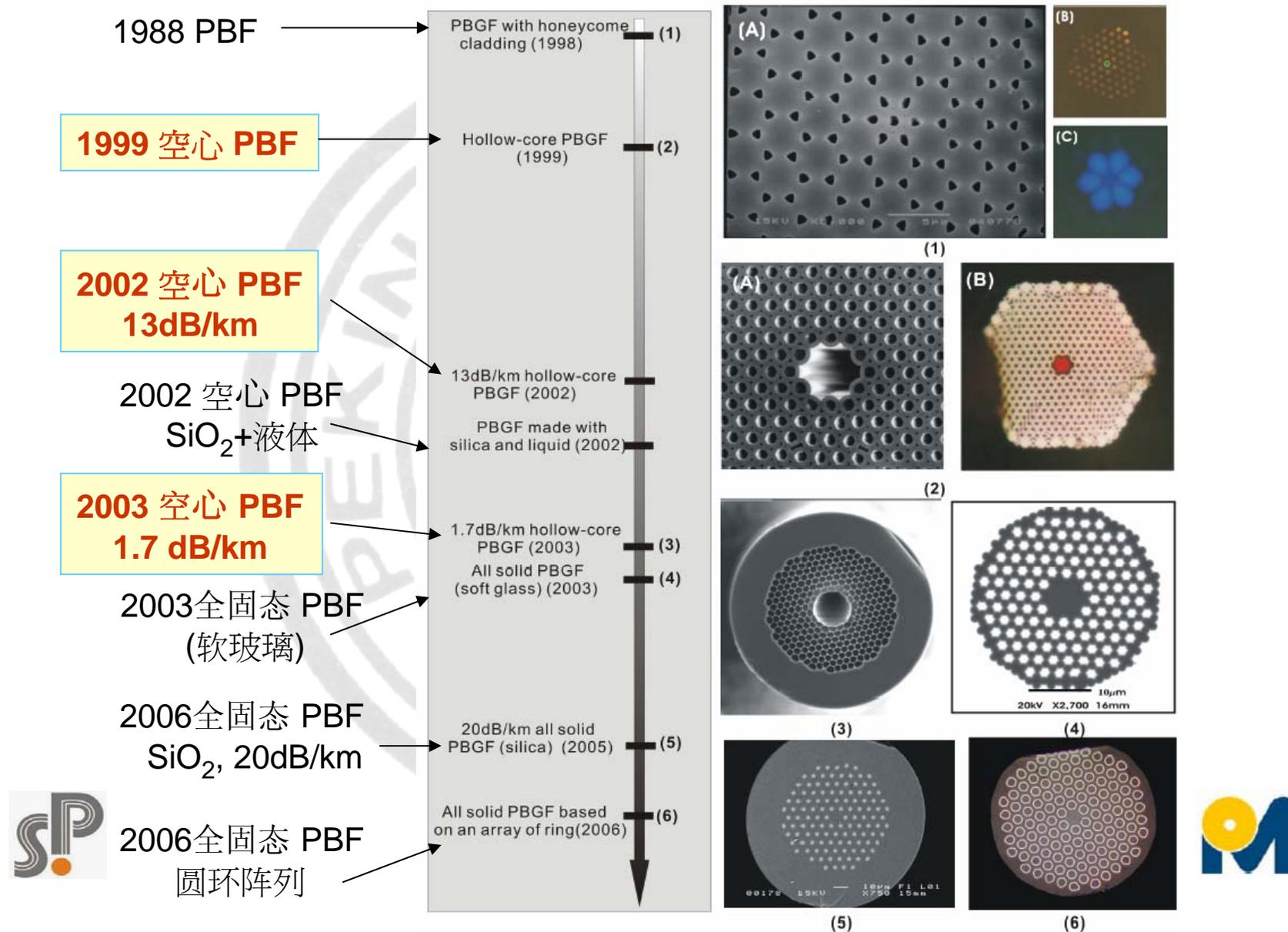
光子带隙光纤(PBF)



折射率导引光子 晶体光纤 (PCF)



光子带隙光纤 (PBF) 的发展



光子晶体光纤抗辐射特性

- 光子晶体光纤(PCF)由纯石英材料所制，毋需添加任何掺杂组分，实验证实其抗辐射特性优于任何掺杂的石英光纤；
- 空心光子带隙光纤(PBF)中光场被限制在在空心波导内传播，仅有2~3%的光能在空心波导周围的纯石英材料中传播，理论上应表现出优异的抗辐射特性；

高能物理实验: X射线辐照, X射线能量为1MeV,剂量率高达 10^7 Gy/秒 (10^9 Rad/秒), 辐射脉冲35纳秒, 总剂量为几十Gy, 证明PBF空心光纤抗辐照能力胜于石英光纤;

- 光子晶体光纤和光子带隙光纤, 工艺尚不成熟, 样品价格昂贵, 处理和接续较困难, 但在核辐射环境下具有应用前景.

(*J. Lightw. Technol.*, Vol. 22, No.1, pp. 11-15, 2004)



内容提要

- 核电与太空辐射环境
- 光纤传感与核电站安全监测
- 光纤抗辐射特性研究与光子晶体光纤
- 光电子器件抗辐射特性初步研究



光电子器件抗辐射特性

➤ 光电子元器件

无源器件包括光纤, 光纤光栅, 光学透镜和光准直器, 光隔离器或环行器, 活动连接器等; 有源器件包括激光光源和光发射机, 光电二极管及光接收机等。

➤ 无源光器件

在辐射环境中主要受 γ 射线影响, 例如**BK7**玻璃透镜受相当剂量 γ 射线辐照后”变黑”, 损耗增量达**2.3dB**;

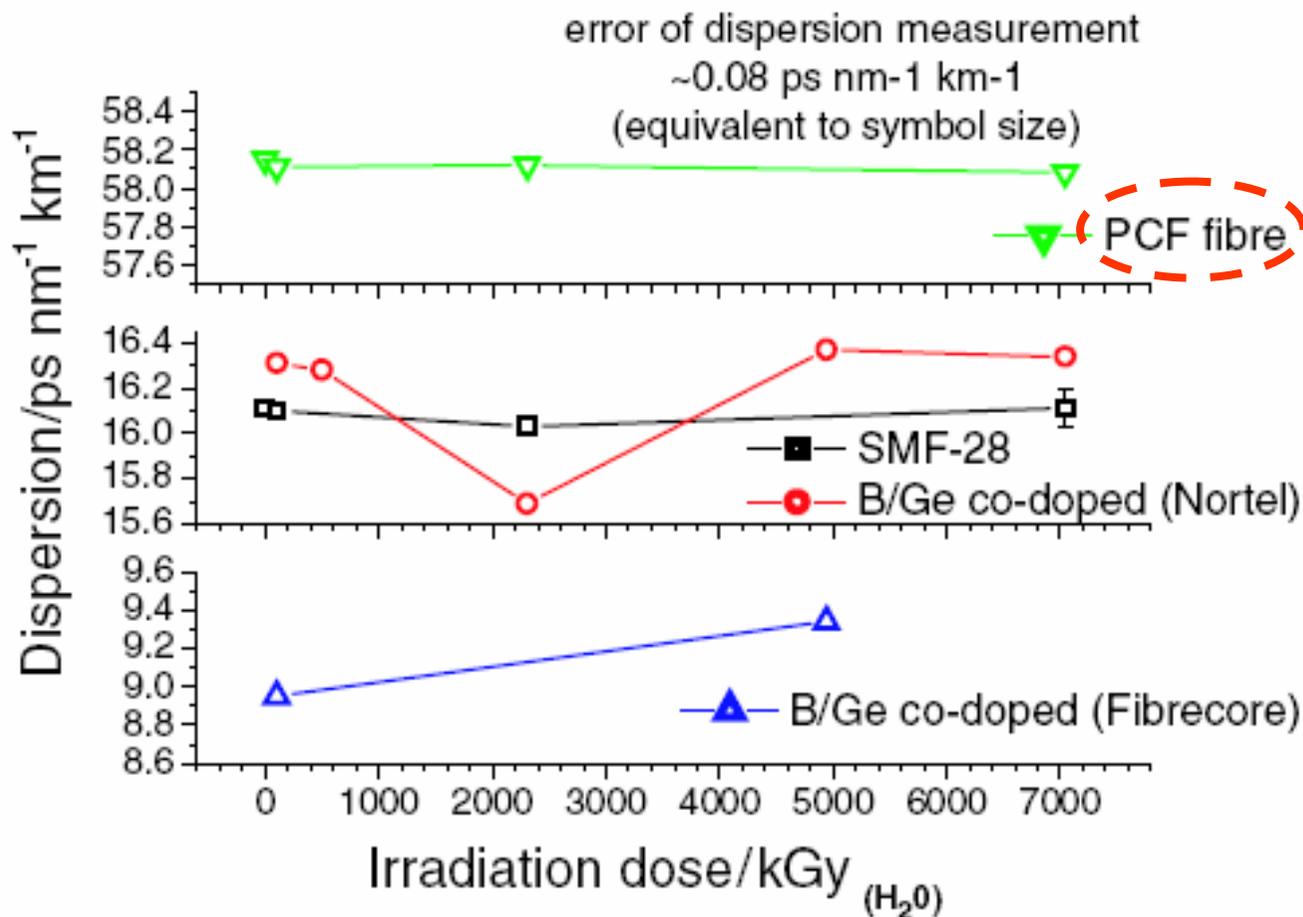
➤ 有源器件

受电离粒子(如质子)影响, 材料和封装非常重要
实验证实**850**纳米波段Si PIN管的抗辐射特性优于GaAs PIN管, 但**1310**纳米波段InGaAs PIN抗辐射能力更强。
在**24GeV**的高能质子的轰击下, 总辐照剂量高达**69 Mrad**, Si PIN的响应度可下降 $\sim 65\%$;

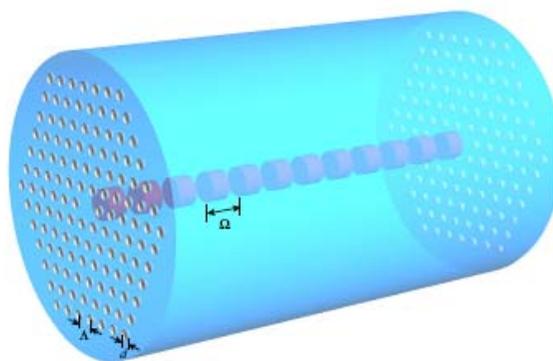
➤ 光纤传感器 例如光纤光栅和光纤法白腔传感器



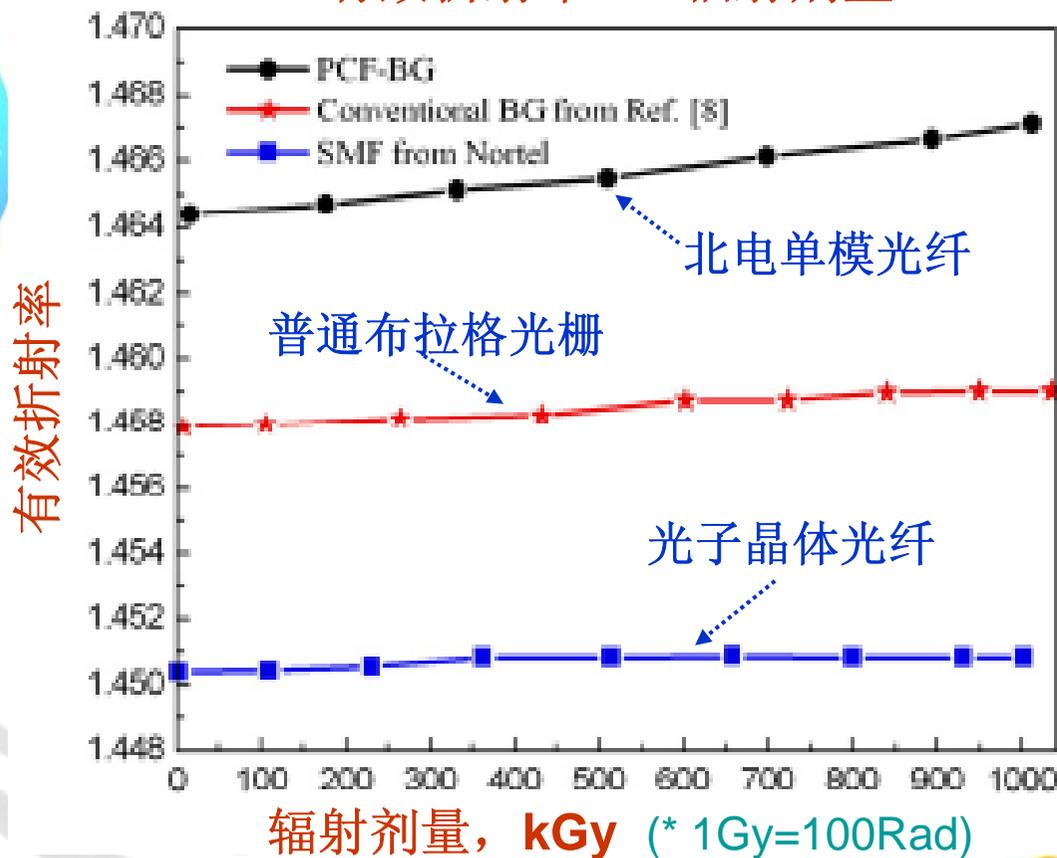
γ 射线辐照下光纤色散变化



光纤光栅抗辐射特性



有效折射率 vs 辐射剂量

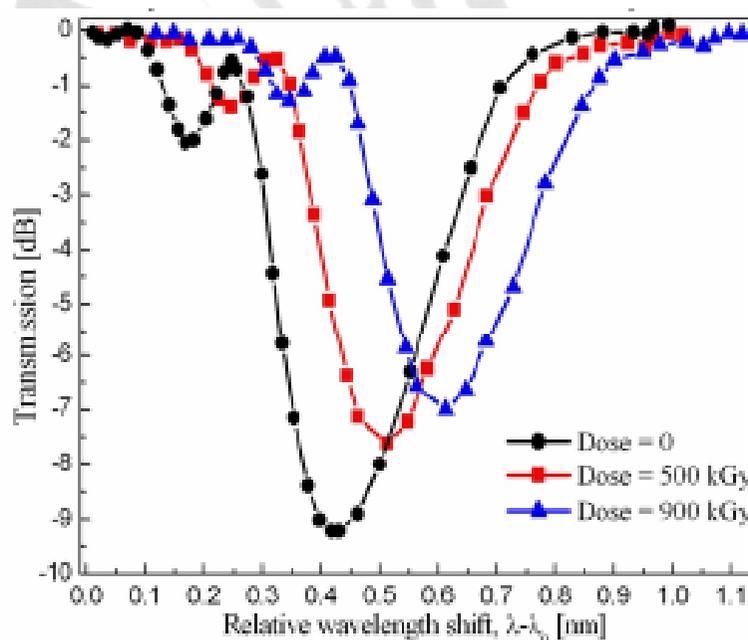
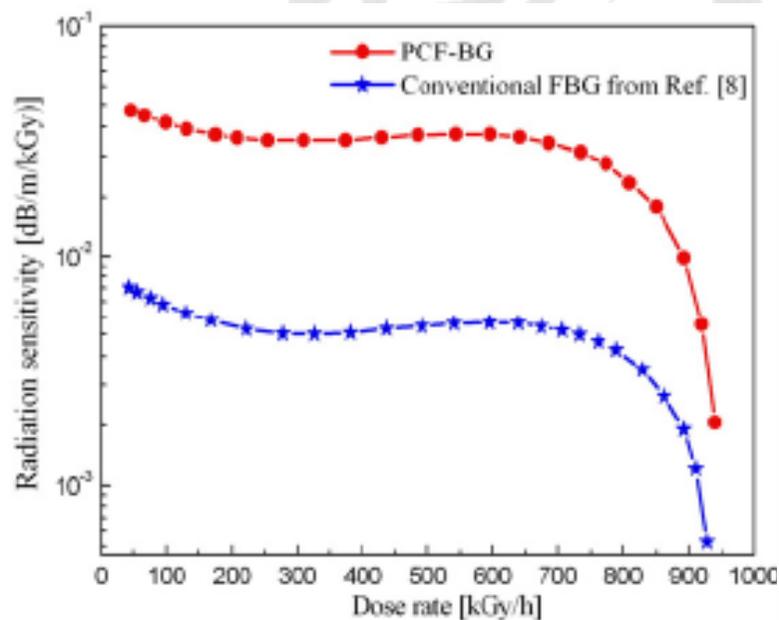


光子晶体光纤光栅(PC-FBG)抗辐射特性

光子晶体光纤光栅

波长移动 ~ 0.1nm@ 500Gy
(0.1nm@ 5x10⁴Rad)

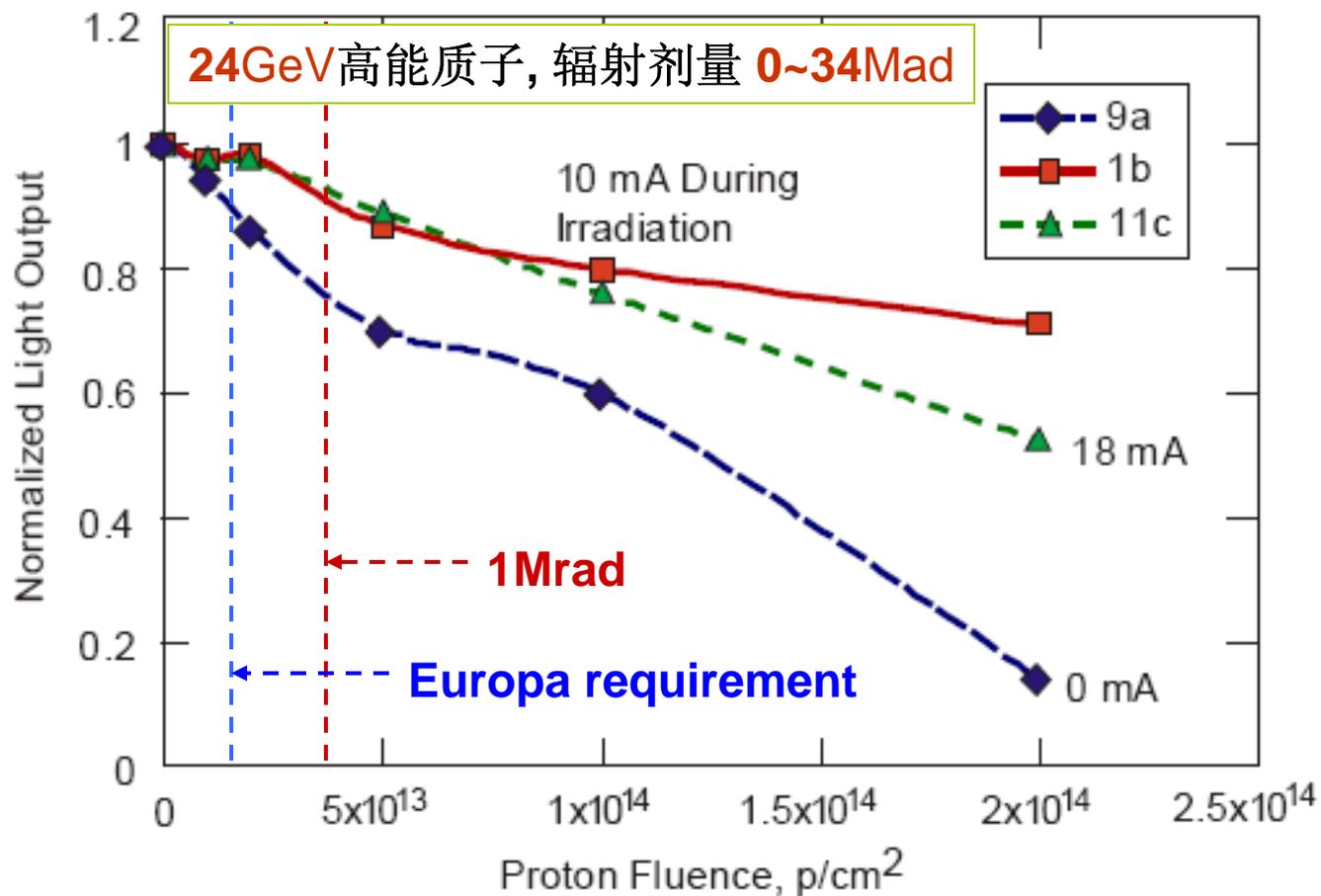
反射峰高度下降较小



PCF 和 SMF 辐射灵敏度比较



850nm VCSEL抗辐射特性



与作者联系 (Contact Author)

感谢您下载并阅读本演讲稿，针对本演讲内容如您希望与作者本人交流，可先联系：

中国光电产业高层论坛办公室
OFweek光电新闻网编辑部

林先生、于先生

电话:0755-83279360/61/63/65

传真:0755-83279008

Email:market@coeic.cn;editors@ofweek.com

地址:深圳市深南中路北方大厦705室

邮编:518033



Thank you!

