

# 石英光纤中二次谐波的产生及机理分析

孙小菡 张明德 沈光骏 周东翔

(东南大学电子工程系, 南京 210018)

**摘 要** 报道了采用预置法使石英光纤中产生二次谐波及由透射电子显微镜观察预置前后光纤内部物质结构变化的实验结果. 发现石英光纤中存有少量晶体, 正是它们在预置前后的结构变化导致了二次谐波的产生.

**关键词** 二次谐波产生, 石英光纤, 透射电镜, 晶体.

## 1 引 言

长期以来人们一直认为, 由于熔融石英是各向同性介质, 不存在由电偶极子非线性响应所引起的二次极化率, 所以石英光纤中不可能产生二次谐波. 然而近几年来一系列实验表明<sup>[1~4]</sup>, 普通石英光纤用  $1.064 \mu\text{m}$  激光强激励几小时(此过程称为预置)以后, 将产生有效的二次谐波且会达到饱和, 转换效率可达到  $3\sim 5\%$ . 其达到饱和的总时间与输入功率有关. 实验还发现<sup>[4]</sup>, 在光纤预置过程中耦合入少量的“种子”谐波光, 可大大缩短预置时间, 几十分钟即达饱和.

有关分析认为<sup>[5]</sup>, 石英光纤中二次谐波产生是由于高次非线性提供了有效的  $\chi^{(2)}$ . 然而详细计算表明, 即使在相位匹配的条件下, 这类非线性引起的转换效率最高也仅达  $10^{-5}$ . 显然, 一定存在着其它导致这类二次参量过程的因素. Osterberg 推测<sup>[2]</sup>, 石英光纤中的掺杂物(磷等)可引起非中心对称的电荷分布, 从而在强泵光场作用下取向. 然而实验表明光纤在预置初期并无二次谐波产生, 因而用取向型来解释较牵强. Stolen 认为<sup>[4]</sup>, 掺杂光纤中存在一些产生非线性效应的缺陷中心, 泵光和“种子”光混合形成一个相位匹配的周期性直流极化场, 缺陷和电荷陷落以与此直流极化同样的周期永久性地取向, 从而产生二阶非线性极化率  $\chi^{(2)}$ . Farries 认为<sup>[6]</sup>, 在用  $\text{GeO}_2$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  掺杂的石英光纤中产生了半永久性色心, 但遗憾的是没有从实验上直接证实已预置光纤中缺陷、色心的存在.

本文建立了石英光纤二次谐波产生的实验装置, 通过预置光纤, 获得较高的二次谐波功率. 对预置前后的石英光纤采用透射电子显微镜进行了微观结构分析, 观察到石英光纤中存有少量晶体, 在强光作用下预置光纤的晶体中出现缺陷, 缺陷的出现打破了材料的反对称性, 产生了有效的  $\chi^{(2)}$ , 进而出现了有效的二次谐波.

## 2 实 验

### 2.1 光纤的预置

图 1 为预置光纤并产生二次谐波的实验装置. 采用国产 Q 开关 Nd:YAG 固体脉冲激光器作为泵浦光源, 工作波长  $1.064 \mu\text{m}$ , 脉冲周期  $1\sim 5 \text{ c/s}$ , 输出光能量约  $0.6 \text{ J}$ . 由  $\text{LiNbO}_3$  晶体产生  $0.532 \mu\text{m}$  的“种子”绿光, 它和基波光一起由  $10\times$  显微物镜聚焦后耦合入光纤, 耦合效率约  $30\%$ . 被预置的光纤是掺 Ge/P 的商用多模光纤, 光纤芯、包层直径分别为  $50$ 、 $125 \mu\text{m}$ , 长约  $40 \text{ cm}$ . 光纤输出的光经绿色滤光片后只剩下  $0.532 \mu\text{m}$  的光, 硅光电检测器探测这一信号并送入示波器中, 可观察到二次谐波的变化情况.

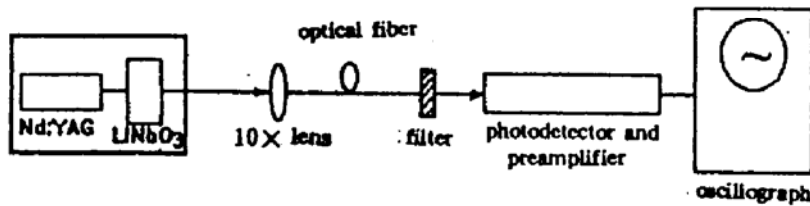


Fig. 1 Experiment arrangement used for investigating SHG in the fiber

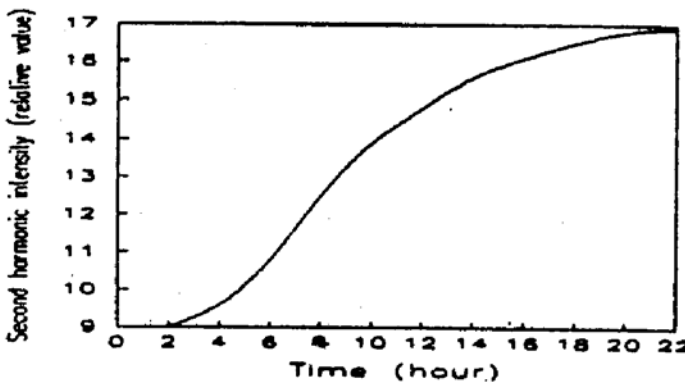


Fig. 2 Second harmonic intensity as a function of time

由于激光器脉冲重复率低, 所以光纤的预置过程时间较长. 实验表明, 经近  $30 \text{ hr}$  的预置, 二次谐波才达到饱和. 图 2 示出了实验结果. 从图中可见, 随着预置时间的增加, 二次谐波强度不断增加.  $20 \text{ hr}$  后光纤中所产生的二次谐波强度接近于输入的“种子”光, 并趋于饱和. 这与已报道的许多实验结果是一致的.

### 2.2 电镜观察结果

为了探讨石英光纤中二次谐波产生的起因, 本文采用 JEM-2000 EX 透射电子显微镜观察石英光纤预置前、后微观结构变化, 电镜加速电压  $160 \text{ kV}$ .

取一段光纤, 剥去其外涂敷层, 放入玛瑙研钵中加入氟仿进行研磨, 再用滴管将溶液中的悬浮微粒滴在复有碳膜的钢网上, 即形成了电镜样品. 实验时分别制成了光纤预置前后两种样品.

将未预置光纤的样品送入电镜进行观察, 发现样品中绝大部分是非晶体, 仅  $5\%$  左右为晶体, 厚约  $0.2\sim 40 \text{ nm}$ . 观察多个样品, 均得此结果. 图 3 为由电镜摄得的非晶及晶体的衍射照片. 将裸光纤数根聚成束, 端面研磨抛光后置于金相显微镜下进行观察, 得知晶体存在于光纤纤芯中.

对预置光纤样品进行观察, 发现非晶体占大多数, 与未预置的相比没有什么变化, 而约占  $5\%$  的晶体中却出现了一些小孔. 样品中约有  $40$  个可观察晶粒, 均存在这一现象. 图 4 示出了预置前后光纤中晶粒的电镜照片, 放大倍数为  $7.5$  万倍.

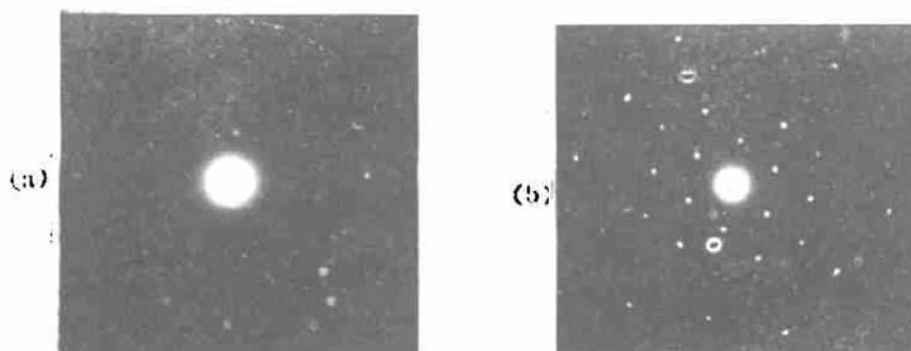


Fig. 3 Diffraction photographs of (a) non-crystal and (b) crystal in the fiber before prepared

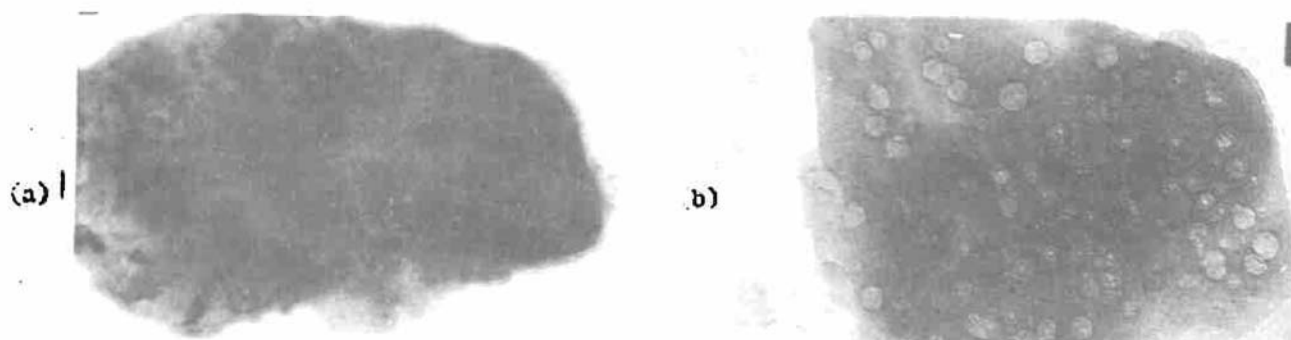


Fig. 4 TEM photographs of crystals in two fiber samples  
(a) the fiber before prepared, (b) the fiber after prepared

### 2.3 讨 论

由实验及电镜观察结果可见, 掺 Ge/P 的石英光纤中存有约 5% 的晶体, 其余均为非晶体. 在光纤制棒及拉丝过程中, 若石英玻璃长时间处于比转化温度稍低的温度下, 就很容易形成微结晶区, 从而构成少量晶粒. 文献[7]中已讨论过这一问题, 如今又用电镜观察到这一现象.

由图 4(a) 可见, 未预置光纤的晶粒平滑透明, 未见任何小孔存在. 图 4(b) 表明已预置光纤晶粒微观结构却发生了变化, 出现了许多小孔. 两种光纤样品采用同样方法制作, 用玛瑙体研磨不可能改变光纤的微观结构和化学成分, 因而这些小孔是在光纤预置过程中由于强泵浦光照射而产生的. 作者认为, 这些小孔是一些空位, 其大小约为 10~40 nm. 在掺磷光纤的位制过程中, 磷在微结晶区很可能成为替位式杂质, 大大改变了晶体的物理性质. 当强泵光通过这些区域时, 较容易地产生了大量空位, 形成肖脱基缺陷<sup>[8]</sup>, 并较长期地存于晶体内部, 这些缺陷都可能形成色心, 色心形成偶极中心并使  $\chi^{(2)}$  升高, 自动达到相位匹配, 从而大大提高二次谐波转换效率. 缺陷产生的快慢及多少与泵光强弱及激励时间有关. 泵光越强、重复时间越短就越易产生缺陷, 达到饱和的时间也就越短; 在达到饱和之前, 随着激励时间的增加缺陷也在增加, 则使二次谐波功率增加.

以上仅初步探讨石英光纤中二次谐波产生的起因, 尚未深究由此涉及的一系列现象, 如种子光的作用、产生饱和的原因、缺陷大小与二次谐波功率的关系等等. 在下一步工作中可用光纤制成电镜样品, 并进行电镜照相; 然后将此样品预置, 再放在电镜下观察, 多次循环直至出现饱和. 完成这些工作应采用脉冲重复时间短、高输出功率的激光器.

### 3 结 论

本文从实验得知通信用掺磷石英光纤在预置作用下可产生二次谐波. 电镜观察表明, 石英光纤中存有少量晶体, 正是这些晶体在强泵光激励下出现了缺陷, 缺陷的出现提高了  $\chi^{(2)}$ , 并自动达到相位匹配, 从而产生了有效的二次谐波. 由于肖特基缺陷属于热缺陷, 所以泵光越强、重复时间越短就越易产生缺陷, 达到饱和的时间也就越短, 二次谐波转换效率也会越高.

### 参 考 文 献

- [1] U. Österberg, W. Margulis, Dye laser pumped by Nd:YAG laser pulses frequency doubled in a glass optical fiber. *Opt. Lett.*, 1986, 11(8): 516~518
- [2] U. Österberg, W. Margulis, Experimental studies on efficient frequency doubling in glass optical fibers. *Opt. Lett.*, 1987, 12(1): 57~59
- [3] M. A. Saifi, M. J. Andrejco, Second harmonic generation in single-mode and multimode fibers. *Opt. Lett.*, 1988, 13(9): 773~775
- [4] R. H. Stolen, H. W. K. Tom, Self-organized phase-matched harmonic generation in optical fibers. *Opt. Lett.*, 1987, 12(8): 585~587
- [5] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, San Diego, Academic Press, Inc., 1989, 319~325
- [6] M. C. Farries, Second-harmonic generation in an optical fiber by self-written  $\chi^{(2)}$  grating. *Electron. Lett.*, 1987, 23(7): 322~323
- [7] C. K. Kao, *Optical Fiber*. London, Peter Peregrinus Ltd., 1988, 85~93
- [8] 方俊鑫, 陆 栋, 固体物理学(上册), 上海, 上海科学技术出版社, 1980, 147~170

## SHG in the Silica Optical Fiber and Its Mechanism Analysis

Sun Xiaohan      Zhang Mingde      Shen Guangjun      Zhou Dongxiang

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210018)

(Received 17 September 1992; revised 17 February 1993)

**Abstract** We report the experimental results of second-harmonic generation (SHG) in the silica optical fiber using the prepared method and the microstructure change inner the fiber observed by the transmission electron microscope (TEM). A little of crystal in the fiber is observed. It is the structure change in the crystals after prepared the fiber that induced SHG.

**Key words** second harmonic generation, silica optical fiber, transmission-electron microscope, crystal.