

大芯径石英光纤中皮秒脉冲激光的自聚焦*

李 劬 华一敏 王文珍 刘亚钢 陈英礼
(上海交通大学 应用物理系)

提 要

本文报道了对大芯径石英光纤中皮秒脉冲激光自聚焦现象的实验研究和理论分析。文中测量了自聚焦光场的近场光强轮廓,研究了自聚焦光场的时域和频域性质,并对环形自聚焦光场的成因进行了解释。
关键词: 石英光纤、自聚焦、皮秒脉冲。

激光束在液体和块状固体中的自聚焦从 1962 年起已有许多理论和实验研究的报道^[1,2],最近光纤中的自聚焦现象也开始引起注意。Baldek 等人^[3]报道了大芯径光纤中脉冲激光自聚焦现象的观察。作者认为对这一现象有进一步深入研究的必要,为此,进行了较为细致的实验研究和理论分析,测量了光纤自聚焦光场的近场光强轮廓,用示波器观察并拍摄了自聚焦光场时域 Q 包络的照片,测量了自聚焦区域内的受激喇曼散射光谱,解释了自聚焦光场成环形的原因,并用环形折射率轮廓光波导模型计算了近场光强分布。

一、实 验

实验光路如图 1 所示。光源为美国 Spectra-Physics 公司的连续锁模、调 Q、倍频 Nd:YAG 激光器。其输出波长为 532 nm,锁模重复频率为 82 MHz,脉宽为 85 ps,调 Q 重复频率为 300 pps, Q 包络半宽为 225 ns。光纤为国产梯度型折射率轮廓多模光纤(芯径为 82 μm)及美国 Newport 公司生产的 F-MLD 多模石英光纤** (芯径为 98 μm)。

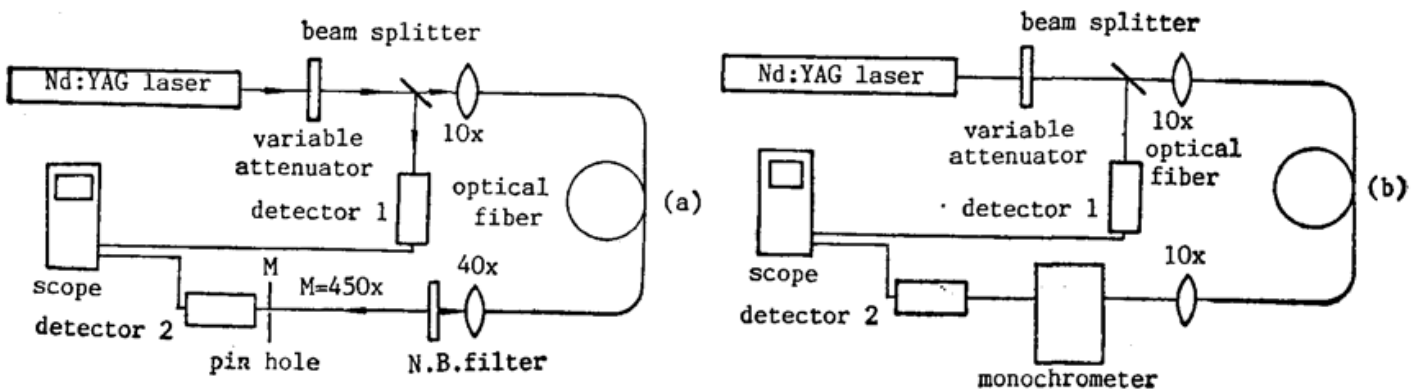


Fig. 1 Experimental setup

收稿日期: 1989 年 10 月 24 日; 收到修改稿日期: 1990 年 1 月 5 日

* 国家自然科学基金资助项目。

** 该光纤均匀性较好,损耗较小,且便于同的结果进行比较。

1. 近场光强轮廓的观察和测量

实验在一根 45 m 长、98 μm 芯径的 F-MLD 光纤和一根 7.5 m 长、82 μm 芯径的国产光纤中均观察到环形结构的皮秒脉冲激光自聚焦,并拍摄了放大的近场光强分布的照片,如图 2 所示。环区无干涉斑,表明环区光波的传输具有明显的单模特性。

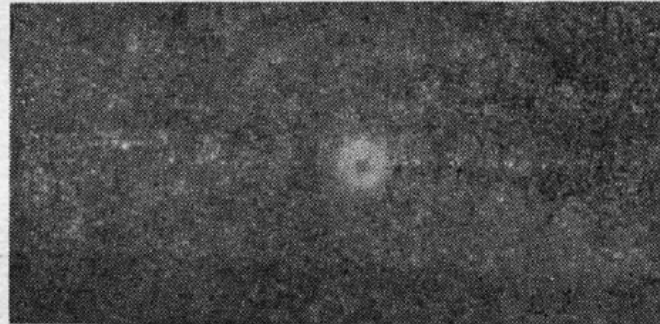


Fig. 2 Image of near field intensity distribution at the output end of fiber

为了更细致地了解光纤出射端处的近场光强分布,作者用带有小孔的 PIN 光电二极管沿放大 450 倍的近场象的直径进行扫描,小孔直径为 50 μm 。其结果示于图 3 及图 4。图 3 中所示三个轮廓是在 532 nm 波长下测的,对应于不同的入射激光功率,其光强轮廓的峰-峰间距不随入射光功率而变化,均为 5.1 μm 。图 4 所示轮廓是在 550 nm 的波长下测的,其峰-峰间距为 5.3 μm 。测量所用波长是由光路中的狭带滤光片来选择的。根据光纤理论^[4],光能量集中在光纤芯子里的程度由光斑尺寸 S_0 度量

$$S_0 = \{a/[k_0 n_1 \sqrt{2\Delta}]\}^{1/2}, \quad (1)$$

式中 a 为光纤芯子半径, Δ 为相对折射率差, n_1 为光纤轴心处折射率, k_0 为光波在自由空间的波矢。可见 S_0 与波长有关, $S_0 \propto \lambda^{1/2}$ 。如果把环形自聚焦光场看作是在多模光纤轴心附近形成的一个局部单模导波结构中传播的模式的话(这一点将在下文中涉及),则 550 nm 波长处光强峰-峰间距比 532 nm 波长处稍大是很自然的。

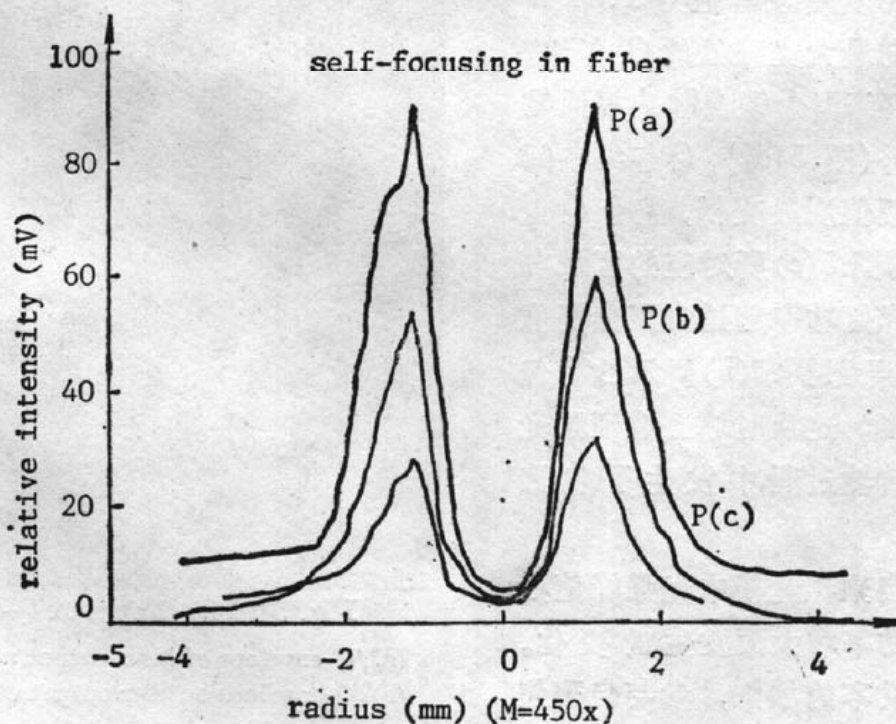


Fig. 3 Intensity distributions of the self-focusing light across its diameter at 0.532 μm wavelength, with peak power of incident laser light $P(a) > P(b) > P(c)$

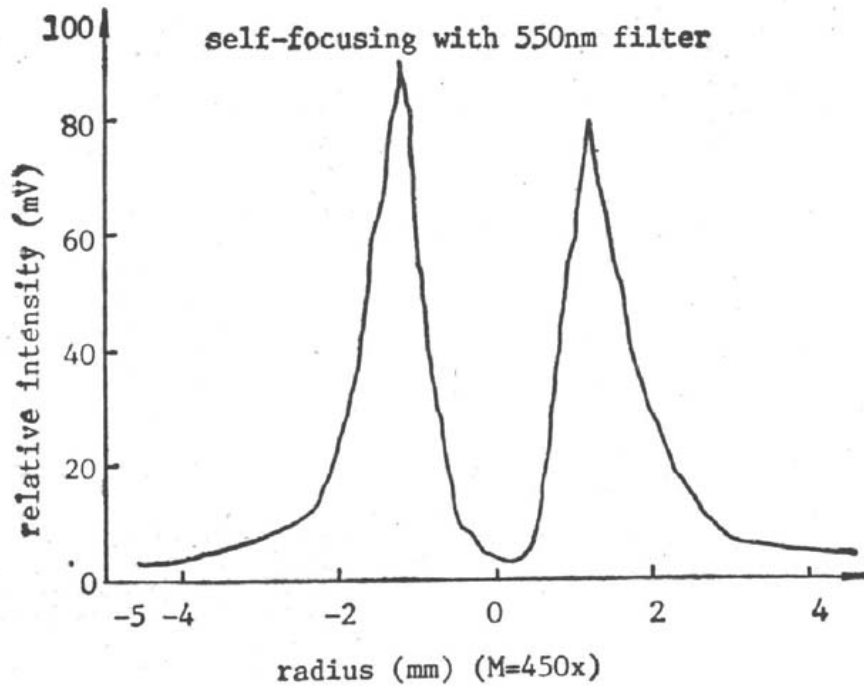


Fig. 4 Intensity distributions of the self-focusing light across its diameter at 0.550 μm wavelength

2. 时域观察

为进一步研究环形自聚焦光场的形成过程,用 Tektronix 7904 A 示波器观察并拍摄了一组反映自聚焦光场不同直径处光脉冲 Q 包络变化情况的照片,如图 5 所示。所用光纤是 45 m 长的 F-MLD 光纤。图 5(a) 是激光器输出的 532 nm 激光的 Q 包络,图 5(b) 是光纤内激光峰功率值为 1.3 kW 时自聚焦光场径向最大光强处的 Q 包络。很明显, Q 包络中有 11 个锁模脉冲幅值显著增大而在环区外(图.5(c)), Q 包络中间相应的锁模脉冲幅值明显变低,整个 Q 包络变平坦。这说明图 5(c) 所对应的区域内这些锁模脉冲的峰值功率超过自聚焦阈值而会聚到环区内,导致图 5(b) 所示的 Q 包络中间明显的突出。这从时域上佐证了光纤内激光脉冲在传输过程中发生了自聚焦。

图 6 记录了自聚焦光场中光强峰值处 Q 包络随入射光功率增大而发生的变化。随着入射光峰值功率的增加,参与自聚焦的锁模脉冲个数从包络中心对称也增多。可以清晰地分辨出参与和未参与自聚焦的

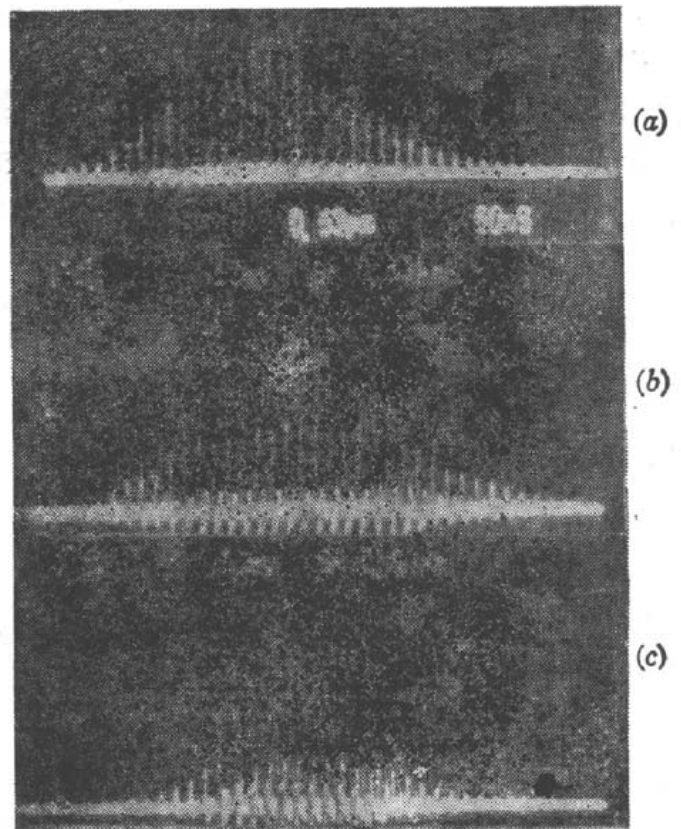


Fig. 5 The shapes of Q -envelopes

- (a) Q -envelope of laser output at 0.532 μm ;
- (b) Q -envelope of fiber output at the intensity peak of the ring structure;
- (c) Q -envelope of fiber output outside the ring structure

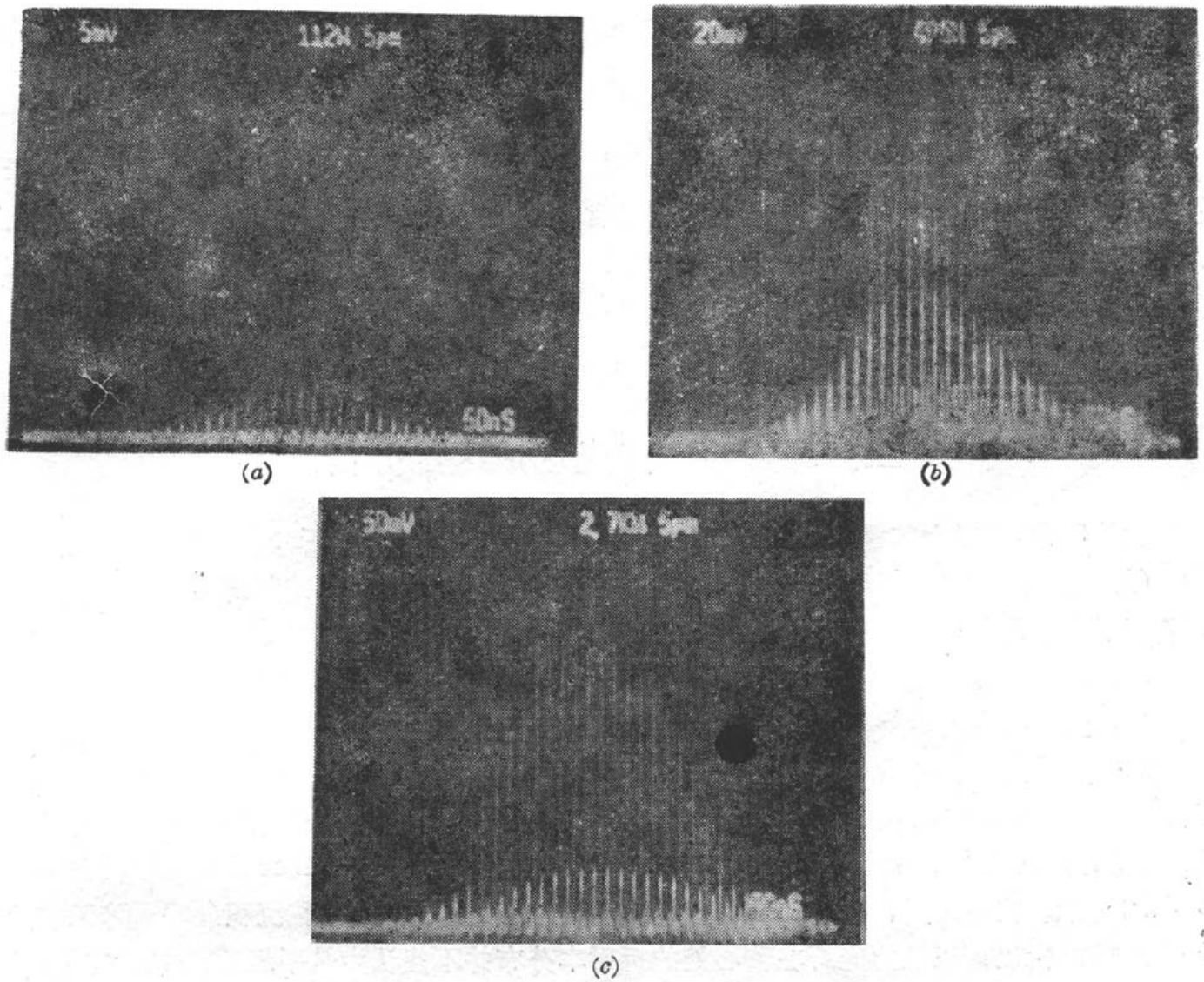


Fig. 6 The variation of Q -envelopes at the intensity peak of the ring structure as the incident laser power increases: (a) 112 W; (b) 495 W; (c) 2.7 kW

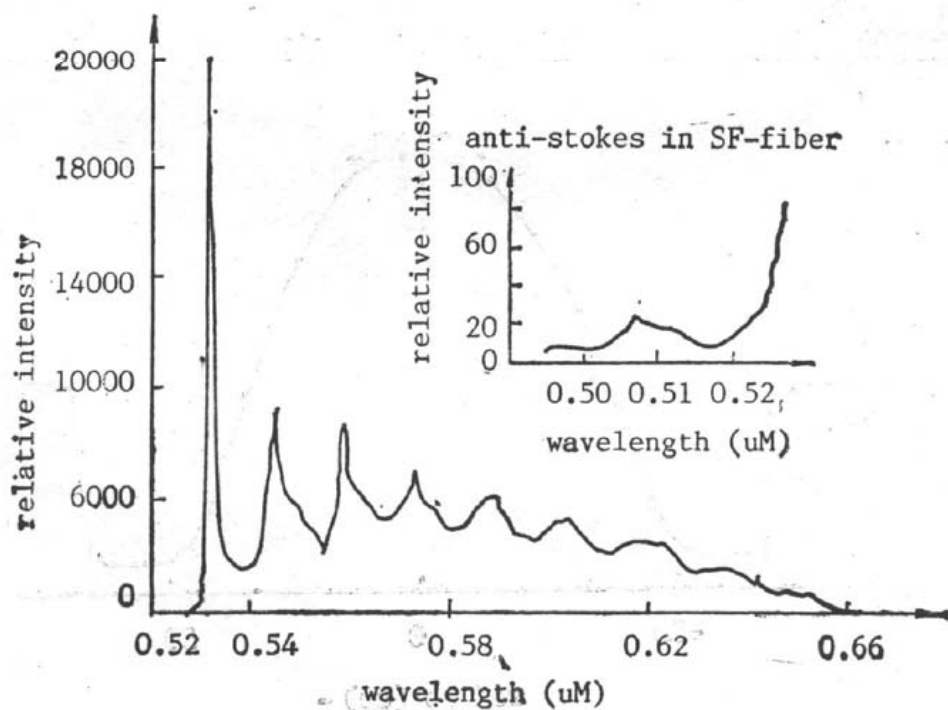


Fig. 7 Quasi-continuum accompanying the self-focusing

锁模脉冲峰值功率的差异,这表明自聚焦现象有明显的阈值性,并且相邻锁模脉冲的传输特性互不影响。

3. 受激散射光谱的测量

测量光路[示意图见图 1(b)]所用光纤仍是 F-MLD 光纤,长 45 m。当光纤内入射光峰值功率为 1 kW 时,在泵浦光长被记录到包含 8 级受激喇曼散射峰的准连续谱,而在短波侧则记录到一个很弱的反斯托克斯峰,它对应于负 2 级受激喇曼散射。负 1 级受激喇曼散射明显地被泵浦光抽空了。测量结果示于图 7。准连续谱的出现是受激喇曼散射、自相位调制互相位调制和受激器光子混合同时参与的结果,是一个相当复杂的过程。

二、环形自聚焦光场成因的分析

文献[1]中曾对大芯径光纤中环形自聚焦光场的成因进行了分析,其基本出发点是:

- (1) 所用多模光纤折射率分布可认为近似于理想的阶梯光纤,即其折射率轮廓在轴心附近可视为平坦的;
- (2) 伴随着自聚焦,光纤轴心处折射率增加,呈抛物型分布;
- (3) 光波在这个抛物型折射率分布的局部导波结构中模式的横向场分布是环状的。

对于这种分析,作者认为需进一步商榷。文献[3]中所使用的光纤与本文所用的都是 Newport 的 F-MLD 石英光纤,芯径也相同。作者曾对这种光纤的折射率轮廓进行了测量,所用仪器为 York Technology 公司的 FCM-1000 型光纤剖析仪 (Fiber Profiler) 其结果如图 8(a)所示。由图可见,中间有一明显的凹陷,这是改进的化学汽相沉积(MCVD)工艺的典型结果。所以可以认为光纤在轴心处的折射率分布并不能认为是平坦的。根据文献[1]中所报道的激光功率密度及石英光纤的非线性折射率系数,估计由非线性折射率效应引起的折射率变化为 $\sim 10^{-6}$,而实际测量表明光纤轴心处折射率凹陷的深度约为 $\sim 7 \times 10^{-3}$,因此文献[3]中提出的模型中(1)、(2)两点是过于粗糙了。另外,既然已形成环状自聚焦场分布,则由于非线性折射率效应而引起的折射率变化必然也在中间形成凹陷,因此抛物型折射

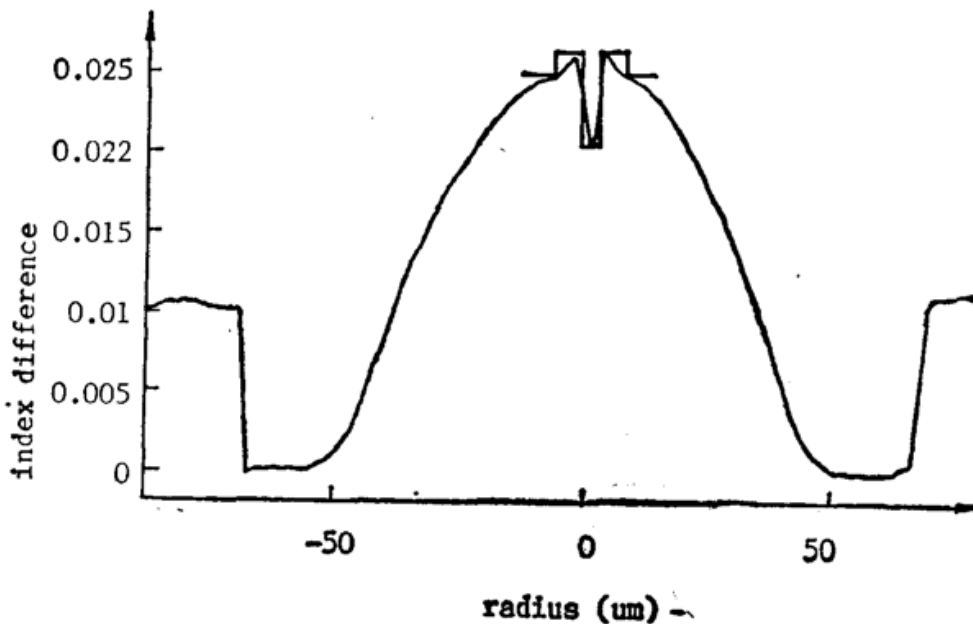


Fig. 8 Index profile of F-MLD fiber

率分布模型与实际情况偏离较大。作者认为自聚焦光场之所以呈环形是与实验所用光纤的折射率变化引起的凹陷密切相关。首先,注意到实验测得的及文献[3]中报道的自聚焦环结构的直径与 F-MLD 光纤轴心处折射率凹陷区的尺度是很接近的;其次,原始的光纤折射率变化引起的凹陷,其周边有明显的凸起,这样就在局部形成了一个环形导波结构,其形状可近似成如图 8(b)中粗实线所示。Stolen^[5] 对这类波导的传输特性进行过研究,证明这种波导中基模的场分布是中间凹陷的,即为环状的。在自聚焦过程中非线性折射率效应的结果是对这种局部导波结构的折射率分布产生正反馈,使这种结构中折射率分布的峰-谷之差趋于增大。基于以上考虑,作者利用上述模型进行了数值计算。结果如图 9 所示。考虑到本文是用理想的环形波导结构来近似实际的结构以及某些参数选择时的任意性,这种计算结果与实验的符合程度可以认为是相当好的。

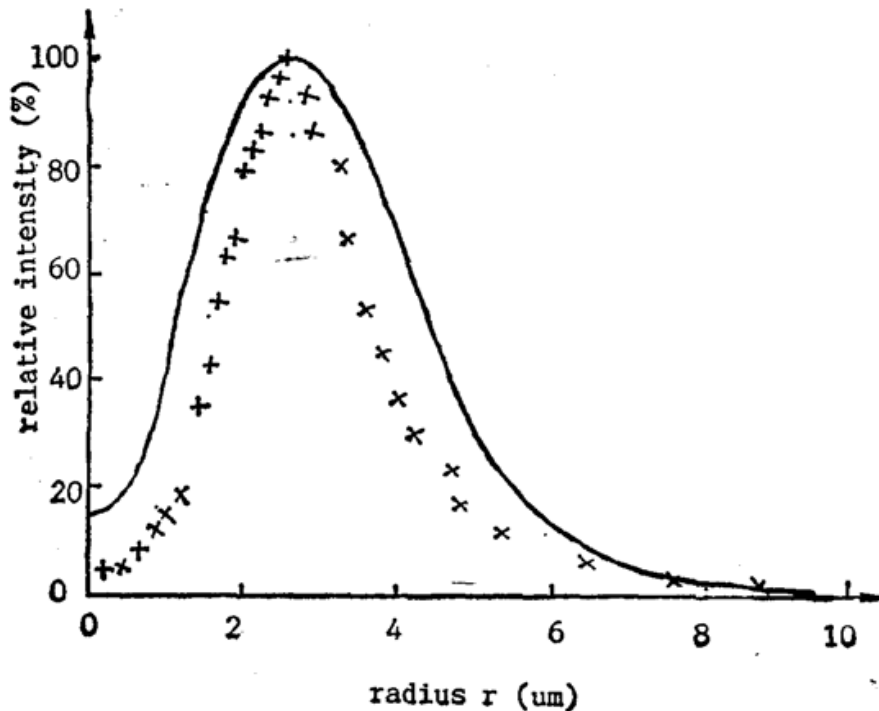


Fig. 9 Calculated intensity distribution of self-focusing light

--- result of calculation

+++ result of measurement (for comparison)

三、结 论

(1) 在大芯径石英光纤中观察到皮秒激光脉冲自聚焦现象,测量了自聚焦光场的近场光强分布,在 532 nm 处光强轮廓峰值所在环直径为 $5.1 \mu\text{m}$ 。

(2) 作者认为环的形成与改进的化学汽相沉积(MCVD)工艺造成的原光纤轴心附近的折射率变化引起的凹陷有密切关系,非线性折射率效应加深了这个凹陷的深度。在这种考虑下所进行的计算与实验结果符合甚好。

(3) 光脉冲 Q 包络照片中参与和未参与自聚焦的锁模脉冲之间的明显差异,进一步证实了光纤中自聚焦现象的阈值性。

(4) 由于自聚焦区光强可达 10^9 Wcm^{-2} 量级,在这种光强下受激喇曼散射,自相位调制,互相位调制和受激器光子混频等非线性效应的共同作用产生了实验中观察到的准连续

谱。进一步提高光功率可望得到覆盖整个可见光区的超连续谱。

(5) 多模光纤中的自聚焦光波实际上是在一个瞬时的局部准单模导波结构中传播的。基于目前尚无法制作氟化物基质的单模光纤, 利用自聚焦的这一特点可在现有的氟化物基质的多模红外光纤中进行单模传输的实验探索。

此外, 如能使斯托克斯光出现于光纤的负色散区, 则就有可能在大芯径光纤中实现光脉冲的无畸变单孤子传输和多孤子脉冲压缩。进一步的研究正在进行中。

本项目的研究还得到上海交通大学科学基金的资助, 谨此致谢!

参 考 文 献

- [1] E. Garmire, R. Y. Chiao *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1966, **16**, No. 9 (28 Feb), 347~349.
- [2] R. R. Alfano, S. L. Shapiro; *Phys. Rev. Lett.*, 1970, **21**, No. 11 (16 Mar), 592~594.
- [3] P. L. Baldeck, F. Raccach *et al.*; *Opt. Lett.*, 1987, **12**, No. 8 (Aug), 588~589.
- [4] 叶培大; 《光纤理论》, (知识出版社, 上海, 1985)。
- [5] R. H. Stolen; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. 7 (Jul), 1533~1537.

Self-focusing of picosecond pulses in large-core optical fibers

LI QU, HUA YIMIN, WANG WENZHEN, LIU YAGANG AND CHEN YINGTI

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiao Tong University)

(Received 24 October 1989; revised 5 January 1990)

Abstract

In this paper, experimental observation and theoretical analysis of self-focusing of picosecond laser pulses in large-core silica fibers are reported. The near-field intensity distribution of self-focusing light field was measured. Temporal and spectral characteristics were recorded. A waveguide model was proposed to explain the formation of ring structure of the self-focusing light.

Key words: silica optical fiber; self-focusing; picosecond pulse.