

超宽连续谱产生的实验研究 *

陈险峰 李 劬 华一敏 陈英礼

(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

提 要

本文首次报道了利用强激光先后连续泵浦两种不同的光纤, 产生了带宽为 100 nm 的宽带连续辐射谱的方法, 并解释了实验结果.

关键词 超展宽, 受激克尔散射

1 引 言

利用光纤中的非线性光学效应, 产生连续相干辐射谱, 是获得波长连续可调谐相干光源的重要途径. 对石英光纤中的光谱展宽现象, 实验和研究已经比较成熟, 一般认为是由于自位相调制和喇曼增益线型引起的^[1]. 近几年来, 在液芯光纤中观测到超展宽现象, 引起了广泛兴趣. He 等人对此作了实验和研究, 提出了受激克尔散射模型, 较好地解释了液芯光纤中超展宽现象^[2,3,4]. 如果在 CS₂ 液芯光纤中注入一个染料激光作为宽带种子光, 观测到对注入种子光的受激克尔散射放大效应^[5].

本文利用石英光纤和 CS₂ 液芯光纤中的受激喇曼散射、自位相调制、互位相调制以及 CS₂ 液芯光纤中的受激克尔散射, 设计了一种用两种光纤产生超连续谱辐射的方法, 获得了宽带 (~100 nm) 连续辐射.

2 实验装置

实验装置如图 1 所示. 装置中光源是一台美国 SP 公司的锁模、调 Q、准连续 YAG 激光器. 其输出波长 1064 nm, 锁模频率 82 MHz, 锁模脉冲宽度 130 ps, 调 Q 重复频率(可调) 3 Hz, 调 Q 包络宽度 250 ns. 实验中使用 KTP 晶体获得 0.532 μm 的倍频光. 作者用一台单色仪、一只硅 PIN 光电二极管, 在宽带示波器上读出频谱分布.

F_1 、 F_2 是为了液芯光纤的端面耦合, 液体的注入和光纤的固定而设计的三通玻璃管液槽. 上面直径 8 mm 为液体注入口, 注入完毕之后用硅胶密封. 左管直径 6 mm, 这样可以把整个液槽正好插进专为光纤实验设计的一体化支架上, 这样液槽装置非常稳定, 便于调节. 用硅胶在管口内侧处贴一块厚的石英片. 右管直径 8 mm, 端口装上一个铝制中空螺丝系统, 与玻璃接触处首先用聚四氟乙烯固定住, 外面再用环氧胶固定住, 中间插入一毛细管, 用环氧固定, 毛

收稿日期: 1993年3月3日; 收到修改稿日期: 1993年3月26日

* 本工作由国家自然科学基金赞助

细管中间可插入中空光纤,光纤与毛细管出口处用硅胶阻漏,这样整个系统完全封闭.另外由于硅胶几乎不溶于CS₂,所以杂质损耗问题大大减小.在一端液槽注入CS₂液体,通过光纤渗入到另一端液槽中,形成液芯光纤.由于硅胶是软的,光纤拿下来调换而不损坏别的部分,因而可以洗净反复使用.

3 实验结果及分析

3.1 实验一

石英光纤长 45 m,芯径 98 μm;液芯光纤长 0.8 m,芯径 98 μm. 峰值功率密度约 70 MW/cm²,调Q 频率 3 kHz,实验结果如图 3, 4. 图 2 为在峰值功率密度约 200 MW/cm² 的泵浦条件下,泵浦石英光纤的输出频谱,从图 2,3,4 可以看到:

- 1) 原有石英光纤的泵浦光及一、二、三、四级喇曼光谱加宽了,且朝红移方向展宽,蓝移展宽很小,这个现象与原石英光纤输出的谱线峰两侧均有展宽不同.
- 2) 产生了 551.3 nm、572 nm 两条 CS₂ 的受激喇曼谱线,其中 551.3 nm 谱线与石英的一级受激喇曼峰 545.7 nm 重叠在一起,叠加起来形成一个较宽强的宽带辐射,展宽明显红移.在石英的第三级受激喇曼峰 545.7 nm 左侧有一小峰产生,它就是 CS₂ 的 572 nm 二级受激喇曼峰,与石英的 575 nm 峰重叠在一起.
- 3) 泵浦光和石英光纤的二级受激喇曼峰 559.9 nm 朝红移方向有明显的展宽.

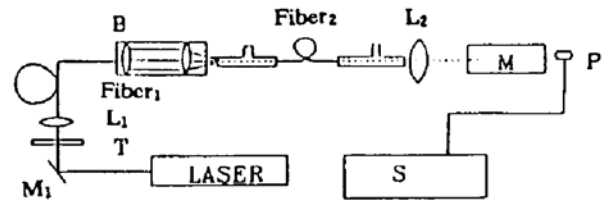


Fig. 1 Experimental setup of spectral broadening of two fiber coupling system

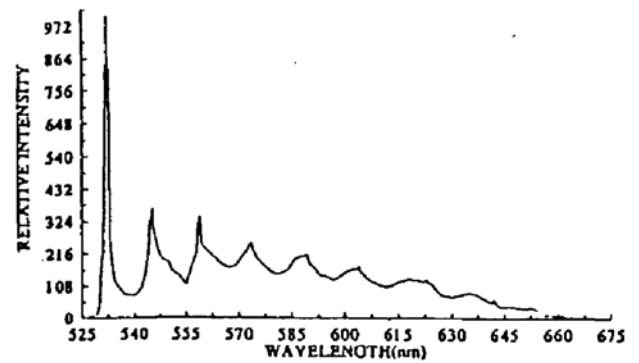


Fig. 2 Relative intensity distribution of spectral broadening of two fiber coupling system

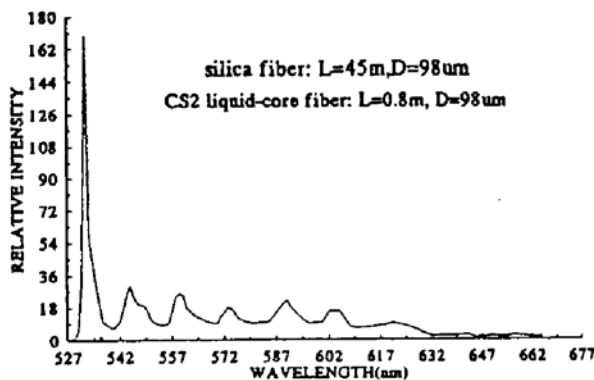


Fig. 3 Details of relative intensity distribution of spectral broadening of two fiber coupling system

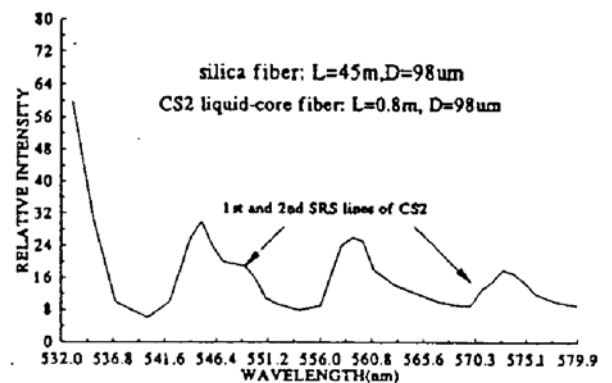


Fig. 4 Relative intensity distribution of spectral broadening of two fiber coupling system

3.2 实验结果分析

3.2.1 石英光纤的喇曼宽增益线宽及串联作用是石英光纤中产生准连续谱的主要原因.

由自位相调制引起的展宽,可作如下估计:

石英光纤 $n_2 = 1.2 \times 10^{-13}$ esu, 弛豫时间 $\tau_s < 1$ ps, 泵浦锁模脉冲宽度 $\Delta\tau_s = 130$ ps, 峰值功率为 1 KW, $n = 1.5$, $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$, $L = 40\text{m}$. 考虑自聚焦效应^[1], $A_{\text{eff}} \approx 10^{-11} \text{m}^2$

$$\delta\nu = 0.864\nu\Phi_{\text{max}} = 1000 \text{ GHz} = 30 \text{ cm}^{-1}$$

其中 Φ_{\max} 是由于光克尔效应引起的附加位相: $\Phi(t) = 2\pi/\lambda \times n_2 L E^2(t)$ 的最大值考虑互位相调制, 展宽为 $\delta\nu = 60 \text{ cm}^{-1}$, 展宽仍然远小于石英的喇曼频移 467 cm^{-1} .

2) 由受激喇曼散射线型引起的展宽, 可作如下估计:

激光输出锁模脉冲 $\tau = 130 \text{ ps}$, $\Delta\nu_1 = (\ln 2/G_0)^{1/2} \Delta\nu$, $\Delta\nu_s = (\Delta\nu_1/\Delta\nu_p)/(\Delta\nu_1/\Delta\nu_p)^h \Delta\nu_1$, $h = (1/2)^{h-1}$. 各阶喇曼展宽分别为 12 cm^{-1} 、 113 cm^{-1} 、 360 cm^{-1} 、 615 cm^{-1} . 实验观察到第一、二阶喇曼展宽小于喇曼频移, 而第三、四阶喇曼展宽就接近或超过喇曼频移, 这点与实验结果一致. 所以石英光纤的喇曼增益线宽及其串联作用是石英光纤中产生准连续谱的主要原因.

3.3.2 CS₂ 液芯光纤中受激喇曼散射过程本身对展宽的贡献及定量分析

1) 前级泵浦石英光纤产生了一个一定强度的准连续谱线, 它作为种子光, 在液芯光纤中受到不同程度的喇曼放大.

2) 从石英光纤输出的泵浦光, 已不是严格的单色光. 考虑在液芯光纤中的受激喇曼散射阈值条件, 频率展宽大约为几个 cm^{-1} , 这个展宽大小也是远远小于 CS₂ 液芯光纤中的受激喇曼散射频移.

3.2.3 CS₂ 液芯光纤中自位相调制和喇曼增益线宽作用

考虑自位相调制, 对于 CS₂ 液芯光纤, $n_2 = 4 \times 10^{-18} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$, 设峰值功率为 200 W , $n = 1.6$, $\lambda = 0.532 \mu\text{m}$, $L = 0.8 \text{ m}$, $A_{\text{eff}} = 8 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ (由于自聚焦取 $A_{\text{eff}} = 8 \times 10^{-9} \text{ m}^2$), 则 $\delta\nu \approx 20 \text{ cm}^{-1}$. 考虑 CS₂ 液芯光纤喇曼增益线宽作用 $\Delta\nu_s \ll 1 \text{ cm}^{-1}$. 所以, CS₂ 液芯光纤中的自位相调制和喇曼增益线宽作用对展宽的贡献很小.

3.2.4 受激瑞利-克尔散射和受激喇曼-克尔散射

从实验结果看, 泵浦光强度仍远大于其它频率的光, 各向异性的 CS₂ 液芯分子在泵浦场作用下, 其极化率主轴存在沿泵浦场偏振方向排列的趋向, 即重取向. 此时, 泵浦 CS₂ 液芯光纤的光场是多频场, 所以泵浦场由于受激瑞利-克尔散射而展宽, 同时受激克尔散射对其它较弱的频率光进行了放大^[5].

在泵浦光仍然远大于其它频率光的情况下, 实验中观测到由泵浦光泵浦的两阶 CS₂ 受激喇曼峰, 这时在对应的 CS₂ 喇曼线上可看到附加红移, 是由于受激喇曼-克尔散射而展宽, 在受激喇曼-克尔散射过程中 CS₂ 分子吸收一个泵浦光子克服粘滞性重取向, 同时伴随着散射分子从基态到高一阶激发态的跃迁.

分子重取向过程中, 分子吸收一个光场光子, 克服分子粘滞性而重取向排列, 同时产生一个频移的光子, 如果考虑碰撞, 克尔散射过程中能量守恒关系为:

$$h\nu \pm E_r = \omega(\Delta\theta) + h\nu_1, \quad \Delta\nu = \nu - \nu_1 = [\omega(\Delta\theta) \pm E_r]/h$$

其中 ν 是泵浦或喇曼频率, ν_1 是由于受激克尔散射而产生的新频率.

3.3 实验二:

为了比较不同泵浦功率下的超展宽现象, 实验利用调节衰减器和调节耦合等方法改变入射泵浦功率, 测量了不同泵浦功率下的频谱分布.

石英光纤长 45 m , 芯径 $98 \mu\text{m}$; 液芯光纤长 2.5 m , 芯径 $98 \mu\text{m}$. 调 Q 频率 3 kHz . 用功率测量仪测量泵浦平均功率分别为: a. 加衰减片 0.5 V 、 2.9 div , b. 加衰减片 0.2 V 、 2.9 div , c. 加衰减片 0.1 V 、 4.2 div , 如图 5, 6. 作者测量了 CS₂ 液芯光纤中的损耗系数 $\alpha = 0.0042 \text{ cm}^{-1}$. 由此计算出其有效长度 $L_{\text{eff}} = 1/\alpha = 2.5 \text{ m}$, 此时受激喇曼效应最强. 从图 6 中的 a, b, c. 可以看到三种情况下均产生了超连续辐射, 其中的主要机理在实验一中已详细地阐述了, 这里分析一下不同之处:

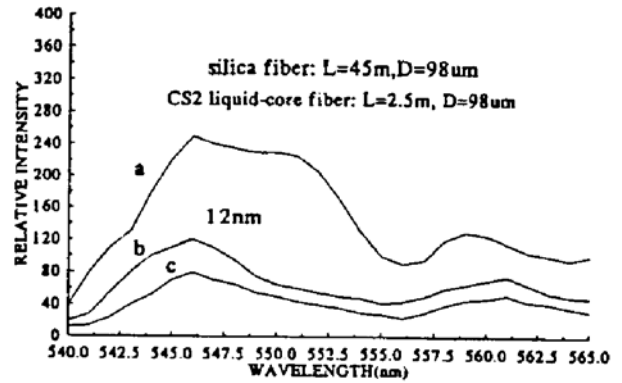
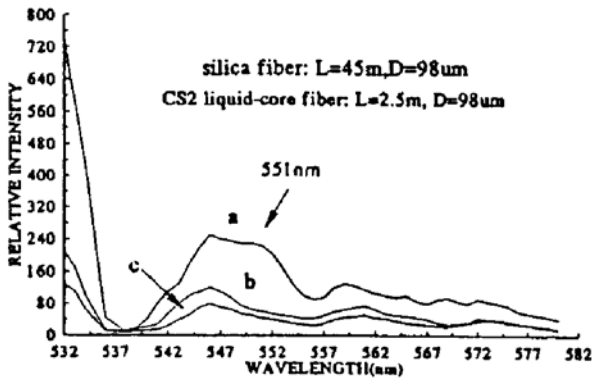


Fig. 5 Details of relative intensity distributionsystem Fig. 6 Relative intensity distribution of spectral broadening of two fiber coupling system

1) 与 0.8 m 长的 CS₂ 液芯光纤情况相比,泵浦与第一阶受激喇曼强度之比变小,这是由于现在 CS₂ 液芯光纤的长度大约为 CS₂ 液芯光纤的有效距离 2.5 m,此时受激喇曼效应最强.通过受激喇曼散射,泵浦光更多地转化成为受激喇曼光.

2) 在不同泵浦功率下,超展宽现象有较大的差异,强泵浦峰值功率下(曲线 a)的展宽效应,及在 CS₂ 液芯光纤中的受激喇曼散射效应,远大于较弱泵浦峰值功率下(曲线 b 和 c)的展宽效应,前者产生了 CS₂ 液芯光纤中的一、二阶受激喇曼光 551.3 nm、572 nm,特别是一阶受激喇曼光 551.3 nm,强度与石英光纤的一阶受激喇曼光强度相当,形成一个较强的连续宽带峰,半宽为 12 nm.

3) 产生了一个新的峰 566 nm. 这是石英的一阶受激喇曼 545.7 nm 在 CS₂ 液芯光纤中通过受激喇曼散射泵浦出来的一条谱线.

4) 三种实验情况下,谱线的蓝移展宽较实验一条件下明显. 作者认为蓝移展宽主要是由于 CS₂ 液芯光纤中的自位相调制展宽效应形成的.

由上述分析,我们认为,选择强泵浦峰值功率和液芯光纤的有效距离长度对形成超展宽是有利的.

在上述两组实验中,实验观察到了各阶喇曼谱的加宽及重叠,但尚未形成真正的宽带连续辐射,为此又进行了第三组实验.

3.4 实验三

石英光纤长 200 m,芯径 10 μm;液芯光纤长 2.5 m,芯径 98 μm,峰值功率 1 kW. 实验中观测到在 540 nm~640 nm 长达 100 nm 光谱范围内形成连续辐射,光强分布很均匀,如图 7,完全可以作为连续可调辐射光源. 除了一阶、二阶受激喇曼谱线外,其它峰值已经分不清.

1) 从 YAG 激光器中出来的激光首先泵浦石英光纤,由于自位相调制作用导致展宽. 在前面实验一条件下,由于自位相调制导致展宽的大小进行了计算,大约为 30 cm⁻¹;在现在实验条件下,光纤长度更加长,横截面积更加小,估算由于自位相调制作用导致展宽将增加一个数量级,达 200 cm⁻¹. 图 7 中,第一阶受激喇曼谱的蓝移线宽测量大约为 20 到 30 nm,与估算的数量级大致相同.

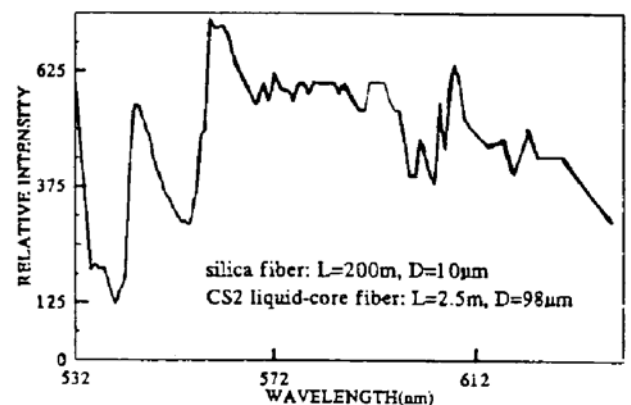


Fig. 7 Relative intensity distribution of spectral broadening of two fiber coupling system

2) 喇曼辐射线宽很宽所导致的展宽效应,也是石英光纤中展宽的机理之一,估算出的各阶喇曼展宽为:5.3 cm^{-1} , 44 cm^{-1} , 128 cm^{-1} , 260 cm^{-1} . 作者注意到,由于光纤相当长且芯径小,光纤中泵浦光和一阶喇曼光均出现“倒空”现象. 这样能量大部分转移至长波方向.

3) 进入 CS_2 液芯光纤中后,由于自位相调制作用导致了谱线展宽. 不同频率的部分在液芯光纤中都各自由于自位相调制效应而展宽.

4) 在 CS_2 液芯光纤中,分子重取向导致的受激瑞利-克尔散射和受激喇曼-克尔散射仍然存在. 由于在这个实验条件下,各种频率的光强度已较均匀,在满足受激克尔散射的阈值条件下(即某一频率下的受激克尔散射指数增益大于损耗),分子克服粘滞性重取向所吸收的泵浦光子,不仅来自于 0.532 μm 泵浦光,而且来自于所有多频光. 这样,频移将发生在整个频谱上,从而使频谱进一步连续. 这是 CS_2 液芯光纤中,形成较均匀连续辐射的主要原因.

结 论 本文利用两种光纤产生超宽连续辐射谱的实验表明,利用石英光纤中自位相调制、受激喇曼增益线型和 CS_2 液芯光纤中受激克尔散射、注入宽带种子光的受激喇曼放大效应导致的谱线展宽,可产生带宽约 100 nm 的宽带连续辐射谱.

CS_2 液芯光纤长度为其有效长度时,谱线展宽最大. 泵浦激光越强,受激喇曼散射过程和受激克尔散射过程越强,谱线展宽越大.

根据本文的实验条件,利用受激克尔散射模型,较好地解释了实验观测到的超宽谱现象.

本文实验和分析表明:利用石英光纤和 CS_2 液芯光纤产生谱线展宽的特点,用强激光泵浦,可得到实用化宽带辐射源.

参 考 文 献

- [1] 李劬,华一敏,王文珍等, 大芯径石英光纤中皮秒脉冲激光的自聚焦. 光学学报,1990,10(6): 514~520
- [2] G. S. He, D. Y. Tang, Z. L. Chao *et al.*, A super-broadened stimulated scattering in liquid-filled waveguide with long gain length, *Chin. Phys. Lett.*, 1985, 2(10): 477~479
- [3] G. S. He, N. Prasad, Stimulated Kerr scattering and reorientation work of molecules in liquid CS_2 . *Phys. Rev. A.*, 1990, 41(5): 2687~2697
- [4] G. S. He, G. C. Xu, Efficient amplification of a broad-band optical signal through stimulated Kerr scattering in a CS_2 liquid-core fiber system. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, 28(1): 323~329
- [5] G. S. He, R. Burzynski, P. N. Prasad, A novel nonlinear optical effect; stimulated Raman-Kerr scattering in a benzene liquid-core fiber. *J. Chem. Phys.*, 1990, 93(11): 7647~7655
- [6] B. J. Berne, R. Pecora, *Dynamic Light Scattering*, Wiley, New York, 1976, Chap. 7.

Experimental study of superbroadening continuous spectrum generation

Cen Xianfeng Li Qu Hua Yiming Chen Yinli

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(Received 3 March 1993; revised 26 March 1993)

Abstract

This paper reports for the first time the experiment of superbroadening continuous spectrum (100 nm) generated by pumping two kinds of fibers successively with intensive laser. The experimental phenomena are explained in details.

Key words superbroadening, stimulated Keer scattering