

文章编号 : 0258-7025(2002)11-0991-04

# 不同光纤多波长抽运宽带 Raman 放大器研究

王 智, 简水生

(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要** 利用 R. H. Stolen 等的测量结果, 经取样拟合得到 SRS 的 Stokes 谱线的多项式表达式, 在此基础上, 考虑到多抽运波之间的相互放大作用, 研究了多波长抽运宽带光纤 Raman 放大器的增益与噪声指数。对 ITU-T 的 G652, G653, G655 和大有效面积(LEAF)光纤进行了数值分析, 得到它们的 Raman 增益和噪声指数特性曲线。

**关键词** Raman 放大器, Stokes 谱线, Raman 增益, 噪声指数, 有效纤芯面积

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A

## Properties of Multi-wavelength Pumping Broadband Raman Amplifier in Different Fibers

WANG Zhi, JIAN Shui-sheng

(Institute of Lightwave Technology Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

**Abstract** By using the experiment results of R. H. Stolen's, a polynomial formula of the SRS Stokes spectrum is got by sampling and digitized fitting. Based on the formula, the Raman gain and noise figure properties of multi-wavelength pumping broadband Raman amplifier are obtained with considering the inter-amplifying between multi pumps. After numerical analyze, the characteristic curves of Raman gain and noise figure of different fibers G652, G653, G655 and LEAF are got.

**Key words** Raman amplifier, Stokes spectrum, Raman gain, noise figure, effective core area

### 1 引 言

光纤通信的容量在急剧增大, 工作波长窗口由  $1.31 \mu\text{m}$  扩展到  $1.55 \mu\text{m}$ , 进而扩展到整个低损耗波长范围( $1.28 \sim 1.7 \mu\text{m}$ )。从掺铒光纤放大器(EDFA), 掺镨光纤放大器(PDFA), 半导体光放大器(SOA)到 Raman 放大器, 光通信系统对放大器的要求也在随之变化。

光纤 Raman 放大器不饱和增益  $G$  定义为信号光输出功率  $I_{\text{out}}$  与输入功率  $I_{\text{in}}$  之比, 用下式表示<sup>[1]</sup>

$$G = \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = \exp\left(R \frac{P}{A_{\text{eff}}} L_{\text{eff}}\right) \cdot \exp(-\alpha_s L) \quad (1)$$

其中  $R$  为受激拉曼散射(SRS)增益系数,  $P$  为抽运光功率,  $A_{\text{eff}}$  为光纤有效纤芯面积,  $L_{\text{eff}}$  为抽运波长

处等效光纤长度, 由  $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_p L)]/\alpha_p$  定义,  $\alpha_p$  为抽运波长处光纤损耗,  $\alpha_s$  为信号波长处光纤损耗,  $L$  为光纤实际长度。在本文的研究中, 不考虑光纤损耗和抽运消耗对 Raman 放大的影响。

$R$  由绝对零度时的 Raman 散射截面  $\sigma_0$  按式  $R = \sigma_0 \lambda^3 (c^2 h n^2)$  决定<sup>[2]</sup>, 其中  $h$  为 Planck 常数,  $n$  为折射率。通过测量常温(300 K) Raman 增益谱, 从而得到常温时的 Raman 散射截面  $\sigma_{300 \text{ K}}$ , 这样  $\sigma_0$  可以根据下式得到<sup>[2]</sup>

$$\sigma_0 = \sigma_{300 \text{ K}} \frac{1}{1 + \exp(h \cdot \Delta\nu / KT) - 1} \quad (2)$$

$\Delta\nu$  为信号光与抽运光的频率差,  $K$  为 Boltzman 常数,  $T$  为绝对温度。

以前有很多人测量了石英光纤的 Raman 增益

收稿日期: 2001-09-10; 收到修改稿日期: 2001-12-03

基金项目: 北方交通大学攀登基金(PD98)资助项目。

作者简介: 王智(1971—), 男, 湖北省蕲春县人。工学博士, 目前主要从事光纤通信及相关课题研究与教学工作, 包括光纤工艺、光纤非线性、光电子学、光纤放大器等的研究。E-mail: zhiwang@center.njtu.edu.cn

曲线<sup>[2-5]</sup>,也就是 Stokes 谱线形状或者  $R$  的线型,但没有看到解析式或者近似表达式.本文对前人的测量结果进行数值拟合,得到  $R$  的多项式近似表达式,在此基础上,研究 ITU-T 4 种光纤在多波长抽运时,宽带 Raman 放大器的增益和噪声指数特性.

## 2 SRS Stokes 谱线数值拟合

我们对 R. H. Stolen 等的测量结果<sup>[3,4]</sup>进行取样和多项式拟合,假定归一化 Stokes 谱线形状可以用下式表示

$$R(\Delta\nu) = \sum_{r=0}^{20} K_r \Delta\nu^r \quad (3)$$

拟合后的多项式系数  $K_r$  如表 1 所示,  $r = 20 - 3m - n$ . 图 1 中的“\*”是根据 R. H. Stolen 等的测量结果取样的数据<sup>[3,4]</sup>,实线是我们进行多项式拟合后的结果.从图上可以看出,多项式拟合在很宽范围内非常精确,基本能反映 SRS 的实际情况.由于 SRS Stokes 谱线的多峰结构,多项式拟合很难实现,所以在  $490 \text{ cm}^{-1}$  和  $602 \text{ cm}^{-1}$  处的增益峰拟合后消失了,因而我们的拟合结果不能反映 Stokes 谱线的漂移和增益峰值波长的变化,不能解释 SRS 的能量红移效应<sup>[5]</sup>.

表 1 Stokes 谱线拟合多项式系数

Table 1 Coefficients of the fitting polynomial of the Stokes spectrum

$m \backslash n$	0	1	2
0	$2.478926272783464e-053$	$-3.310548602365791e-049$	$2.036443341683818e-045$
1	$-7.650544578535498e-042$	$1.962221855416958e-038$	$-3.638259431073272e-035$
2	$5.037065555011477e-032$	$-5.302999163523535e-029$	$4.283126867103418e-026$
3	$-2.658050404220844e-023$	$1.261060913699611e-020$	$-4.519331439731594e-018$
4	$1.198587031632414e-015$	$-2.276629510650029e-013$	$2.934967099098214e-011$
5	$-2.325887497901504e-009$	$8.839109666864022e-008$	$1.922532956408083e-007$
6	$-1.015519557048337e-004$	$4.091650633092706e-003$	$1.597257917112972e-002$

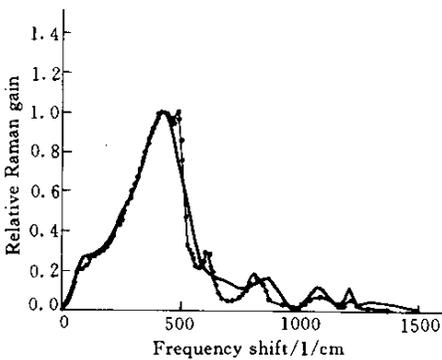


图 1 Stokes 谱线测量结果和数值拟合曲线

Fig.1 Experimental and fitted results of the Stokes spectrum

## 3 多波长抽运的增益与噪声指数

假设  $n$  个抽运波,波长和入射抽运功率分别为  $\lambda_i$  和  $p_{i0}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),各抽运波的增益  $G_i$  仍由式(1)表示,这里重复一次如下

$$G_i = \exp\left(R_i \frac{p_i}{A_{\text{eff}}} L_{\text{eff}}\right) \cdot \exp(-\alpha_s L)$$

$$R_i = \sum_{r=0}^{20} k_r (1/\lambda_i - 1/\lambda_s)^r, \quad k_r = c^r \cdot K_r^r$$

$c$  为真空光速.如果不考虑抽运波之间的相互作用,

$p_i = p_{i0}$ . 因为 Raman 增益的 Stokes 谱线带宽很宽,我们认为所有较短波长的抽运波对较长波长的抽运波都有增益,因此考虑抽运波之间的相互作用,第  $i$  个抽运波的功率可以写成  $p_i = p_{i0} \cdot \prod_{m=1}^{i-1} G_m(\lambda_i)$ ,  $n$  个抽运波的总增益等于所有增益的叠加,即:  $G = \prod_{i=1}^n G_i$ .

噪声指数  $NF$  (Noise Figure) 定义为输入光信噪比与输出光信噪比之比<sup>[6]</sup>,高增益无损耗光纤 Raman 放大器的噪声指数可以由下式得到<sup>[1]</sup>

$$NF = \frac{1}{G} + \frac{2A(L)}{h\nu G} \quad (4)$$

其中  $\nu$  为信号光频率,  $A(L)$  为 Raman 放大器光纤末端的放大的自发辐射 (ASE),不考虑光纤损耗时的形式为

$$A(L) = h\nu(G-1) \frac{\sum_i E_i \ln G_i}{\sum_i \ln G_i} \quad (5)$$

其中  $E_i$  为自发辐射因子,由  $E_i = 1 + [\exp(h\Delta\nu_i/kT) - 1]^{-1}$  决定,  $\Delta\nu_i$  是第  $i$  个抽运光与信号光的频率差.将式(5)代入式(4),得

$$NF = \frac{1}{G} + \frac{2(G-1)}{G} \frac{\sum_i E_i \ln G_i}{\sum_i \ln G_i} \cong 2 \frac{\sum_i E_i \ln G_i}{\sum_i \ln G_i} (G \gg 1) \quad (6)$$

### 4 不同光纤 Raman 放大器的差异之源——有效纤芯面积

光纤通信中使用的光纤主要有 G652 ,G653 , G655 和 大有效面积光纤( LEAF ),它们传输特性的主要区别是色散零点的位置不同 ,而且  $A_{eff}$  也有较大差异。用作 Raman 放大器时 ,不同光纤的增益特性差异主要由式 (1) 中的  $R$  和  $A_{eff}$  决定 ,二者都和芯层的掺杂浓度有关 , $A_{eff}$  还取决于光纤剖面结构。普通光纤的芯层掺杂浓度基本相同 ,所以  $R$  的差异较弱 ,可以认为相同 ,因此光纤 Raman 放大器增益特性的不同根源是  $A_{eff}$ 。

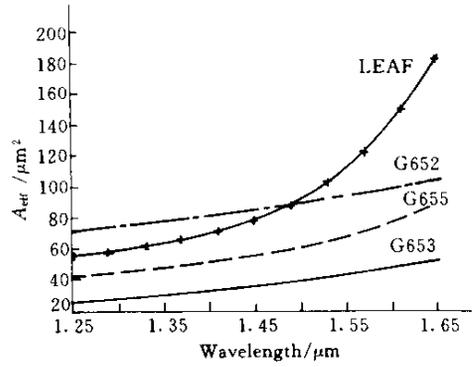


图 2 4 种光纤的有效纤芯面积

Fig.2 Effective core area of four different kinds of fibers

图 2 是 4 种光纤  $A_{eff}$  随波长的变化情况 ,我们对它们的  $A_{eff}$  做了多项式近似 ,即  $A_{eff} = \sum_{m=0}^3 A_m \lambda^m$  ,系数  $A_m$  如表 2 所示。

表 2 有效纤芯面积的拟合多项式系数

Table 2 Coefficients of the fitting polynomial of the effective core area

$m$	3	2	1	0
G653	14.84182874416820	-2.063545217784189	-22.78670418217343	28.13451962678886
G655	616.8162059295157	-2430.688006719969	325.1572558906252	-1430.181396639649
G652	-44.78006325271202	246.2510483136327	-352.4240656234345	214.3630554013736
LEAF	2701.397860820040	-10721.18063556368	14263.91785698158	-6299.499474919012

### 5 不同光纤增益与噪声指数的数值分析

根据上节的理论研究结果 ,对 4 种光纤分别进行了数值分析 ,研究它们在 5 种抽运波作用下的宽带 Raman 增益特性(增益和噪声指数)。抽运波长的选择参照文献 [1] ,光纤有效长度  $L_{eff} = 5 \text{ km}$  ,  $R$  的峰值取  $1.5 \times 10^{-12} \text{ cm/W}$ 。为了便于比较 ,我们配置各抽运波入射功率 ,使 Raman 增益谱比较平坦 ,从配置方案也可以发现不同光纤的 Raman 增益特性的明显区别。表 3 是 4 种光纤多波长抽运宽带 Raman 放大器增益平坦的抽运功率配置方案 ,图 3 ~ 6 是 4 种光纤的增益特性曲线。

从数值分析结果可以发现 , $A_{eff}$  较大的 G652 光纤和 LEAF 光纤 ,虽然抽运功率很高 ,但平坦增益仍然比较小 ,G653 光纤因为  $A_{eff}$  很小 ,即使抽运功率较小 ,仍能获得很大的 Raman 增益。有一点值得注意 ,G652 ,G653 和 G655 光纤的抽运功率随抽

运波长的增大而降低 ,LEAF 光纤则表现为先降低后升高的趋势。这说明前 3 种光纤的有效面积增大效应比抽运波之间相互放大的作用要弱 ,而 LEAF 光纤的有效面积增大效应则较强 ,这一点图 2 也能体现出来。比较 4 种光纤的分析结果 ,可以看到 ,理论上 G653 光纤最适合用于 Raman 放大器。但由于密集波分复用(DWDM)系统的广泛应用 ,预计在 G652 和 G655 光纤上的 Raman 放大器的研究与应用将更多。

表 3 4 种光纤多波长抽运宽带 Raman 放大器增益平坦的抽运功率配置

Table 3 Pumping scheme of different fibers by which the gain of the Raman amplifier is flattened

Wavelength/nm	1402	1423	1443	1464	1495	
Power /mW	G652	900	600	500	500	350
	G653	590	400	330	170	106
	G655	750	400	330	330	200
	LEAF	900	600	500	580	580

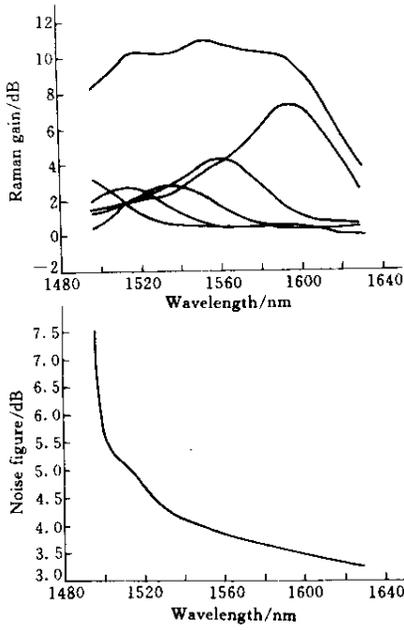


图 3 G652 光纤 Raman 增益和噪声指数特性曲线

Fig.3 Raman gain and the noise figure of G652 fiber

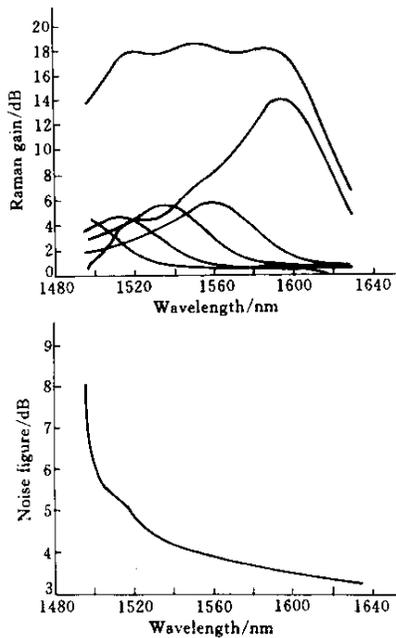


图 4 G653 光纤 Raman 增益和噪声指数特性曲线

Fig.4 Raman gain and the noise figure of G653 fiber

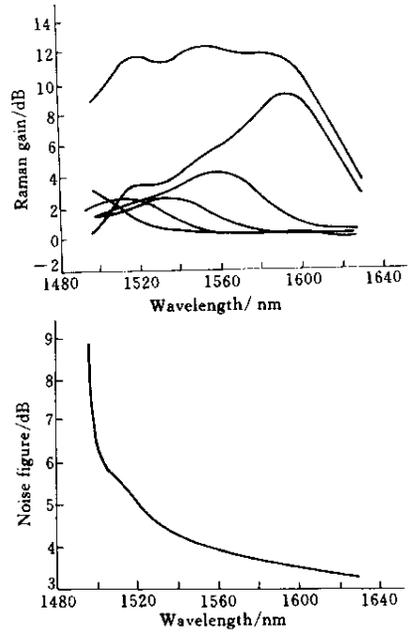


图 5 G655 光纤 Raman 增益和噪声指数特性曲线

Fig.5 Raman gain and the noise figure of G655 fiber

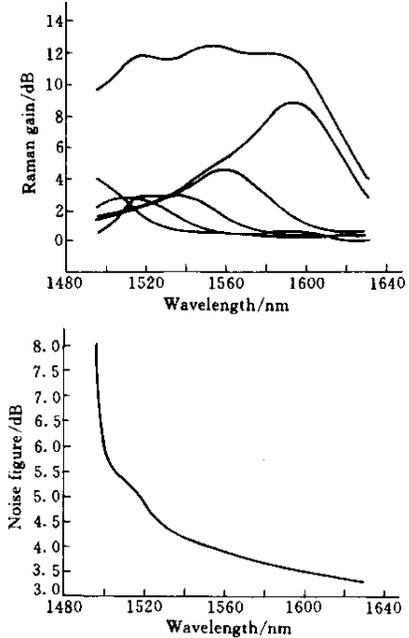


图 6 LEAF 光纤 Raman 增益和噪声指数特性曲线

Fig.6 Raman gain and the noise figure of LEAF fiber

参 考 文 献

- 1 C. R. S. Fludger, V. Handerek, R. J. Mears. Fundamental Noise Limits in Broadband Raman Amplifiers [M]. OFC2001, MA5-1 ~ 3
- 2 S. T. Davey, D. L. Williams, B. J. Ainslie et al.. Optical gain spectrum of GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> Raman fibre amplifiers [J]. IEE Proceedings, 1989, 136 301 ~ 306
- 3 R. H. Stolen, E. P. Ippen. Raman gain in glass optical waveguides [J]. Appl. Phys. Lett., 1973, 22 276 ~ 278

- 4 R. H. Stolen, E. P. Ippen, A. R. Tynes. Raman oscillation in glass optical waveguide [J]. Appl. Phys. Lett., 1972, 20 62 ~ 64
- 5 Katherine X. Liu, Elsa Garmire. Understanding the formation of the SRS Stokes spectrum in fused silica fibers [J]. IEEE J. Quantum Electron., 1991, 27 1022 ~ 1030
- 6 S. R. Chinn. Analysis of counter-pumped small-signal fibre Raman amplifiers [J]. Electron. Lett., 1997, 33(7) 607 ~ 608