

# SRS Stokes 谱线的数值拟合与 Raman 放大的研究

王 智, 童 治, 简水生  
(北方交通大学光波所, 北京 100044)

**摘 要:** 本文利用 R. H. Stolen 的实验结果, 拟合得到 SRS Stokes 谱线的多项式近似表达式. 该表达式精度较高, 有一定的理论价值. 在此基础上, 研究了不同光纤的 Raman 增益和噪声指数. 结果表明增益和噪声指数差异主要由光纤的有效纤芯面积引起, 因而有效纤芯面积最小的 G.653 光纤 Raman 增益和噪声指数最大.

**关键词:** Stokes 谱线; Raman 增益; 噪声指数; 有效纤芯面积

**中图分类号:** TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12-1820-03

## Digitized Fit of the SRS Stokes Spectrum and Raman Gain

WANG Zhi, TONG Zhi, JIAN Shui-sheng

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

**Abstract:** An approximate polynomial of the SRS Stokes spectrum is obtained by digitized fit from the experimental measurements of R. H. Stolen. It has some theoretical value with its certain precision. Upon the Stokes spectra formulae, we researched the Raman gain and Noise figure in Raman amplifier with different fibers. It shows that the difference of the gain and noise figure is contributed by the effective core area of different fibers.

**Key words:** Stokes spectrum; Raman gain; noise figure; effective core area

### 1 引言

全球信息量的急剧膨胀和用户业务的宽带需求, 刺激宽带通信迅猛发展, 光纤通信首当其冲. 骨干网已经基本实现全光纤传输, 城域网和局域网也大量使用光纤作为传输线, 但是用户接入网目前仍然是宽带业务的瓶颈. ADSL 接入, CABLE MODEM 接入以及各种无线接入都是基于历史条件的权宜之策, 只有真正的全光网才能彻底解决宽带接入问题.

接入网用户一般比较密集, 为了保证足够的带宽和 QoS, 必须使用 DWDM 系统. 光纤的带宽达到 400nm (1300 ~ 1700nm), 随着科学技术的不断发展, 人们必将充分利用这些资源. Lucent 的全波光纤以及将来可能出现的新型光纤和宽带 Raman 放大器<sup>[4]</sup>使人们的期望得以实现.

全波光纤彻底除去 OH<sup>-</sup>, 降低整个光纤通信窗口的损耗, 使 DWDM 的波长范围拓宽. EDFA 放大 C 波段和 L 波段, PDFA 放大 S 波段, 它们的增益带宽都只有几十纳米, 不能配合全波光纤的宽窗口放大. 20 世纪九十年代中期再度掀起 Raman 放大器的研究热潮. Raman 放大器的增益范围达 30THz, 完全能覆盖光纤通信窗口.

Raman 放大器的增益与很多因素有关, 包括: 光纤 SRS Stokes 谱线形状, 泵浦光波长和功率, 光纤长度、损耗和有效纤芯面积, 光纤结构 (由光纤掺杂决定) 等等. Stokes 谱线可以

从理论上计算得到, 但非常复杂, 一般都是通过测量 SRS 散射截面来获得其谱线形式. 本文利用 R. H. Stolen 的实验结果<sup>[1-3]</sup>, 拟合得到 SRS Stokes 谱线的多项式近似表达式. 在此基础上, 研究了不同光纤在相同泵浦条件下的 Raman 增益和噪声指数, 结果表明增益和噪声指数差异主要由光纤的有效纤芯面积引起.

### 2 SRS Stokes 谱线的数值拟合

光纤 Raman 放大的不饱和增益  $G$  定义为信号光输出功率  $I_{out}$  与输入功率  $I_{in}$  之比, 用下式表示<sup>[5]</sup>:

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

其中  $R$  是受激拉曼散射 (SRS) 增益系数,  $P_p$  是泵浦光功率,  $A_{eff}$  是光纤有效纤芯面积,  $L_{eff}$  是泵浦波长处等效光纤长度, 由  $L_{eff} = (1 - \exp(-\alpha_p L))/\alpha_p$  定义,  $\alpha_p$  是泵浦波长处光纤损耗,  $\alpha_s$  是信号波长处光纤损耗,  $L$  是光纤实际长度. 在本文的研究中, 不考虑光纤损耗和泵浦消耗对拉曼放大的影响.

$R$  由绝对零度时的 Raman 散射截面  $\alpha_0$  按式  $R = \alpha_0 \lambda^3 / (c^2 h n^2)$  决定<sup>[6]</sup>, 其中  $h$  是 Planck 常数,  $n$  是折射率,  $c$  是真空光速. 通过测量常温 (300K) Raman 增益谱, 从而得到常温时的 Raman 散射截面, 这样可以按下式得到<sup>[6]</sup>:

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

收稿日期: 2001-08-02; 修回日期: 2002-03-20  
基金项目: 北方交通大学攀登基金 (No. PD145)

$\Delta\nu$  是信号光与泵浦光的频率差,  $K$  是 Boltzman 常数,  $T$  为绝对温度.

历史上很多人测量了石英光纤的 Raman 增益曲线<sup>[1,2,3,6,7]</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. 我们对 R. H. Stolen 测量结果进行了多项式拟合, 假定归一化 Stokes 谱线形状可以用下式表示:

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

多项式系数  $P_r$  如表(1)所示,  $r = 20 - 3m - n$ . 图(1)中的“\*”是根据 R. H. Stolen 测量结果得到的数据<sup>[1-3]</sup>, 实线是我们进行多项式拟合后的结果. 从图上可以看出, 我们的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>[3]</sup>. 我们的后续研究工作将进一步完善这方面的理论分析.

表 1 Stokes 谱线拟合多项式系数

$m \setminus n$	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

表 2 有效纤芯面积的拟合多项式系数

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

利用得到的关于  $R$  和  $A_{\text{eff}}$  的结论, 可以进一步计算四种不同光纤的 Raman 增益. 给定泵浦条件为: 泵浦波长 1455nm, 泵浦功率 100mw, 光纤长度 10km, 这样得到的 Raman 增益谱如图(3)所示.

图(2,3)表明, 在相同泵浦条件下, 不同光纤的 Raman 增益一般不同, 增益大小因有效纤芯面积  $A_{\text{eff}}$  的变化而变化,  $A_{\text{eff}}$  大的光纤 Raman 增益小, 所以  $A_{\text{eff}}$  较小的 G.653 光纤有最大的 Raman 增益, 更适合用于 Raman 光纤放大器.

#### 4 噪声指数

噪声指数  $NF$  定义为输入光信噪比与输出光信噪比之比<sup>[8]</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>[5]</sup>:

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

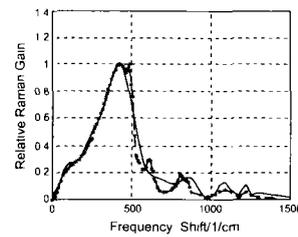


图 1 Stokes 谱线测量结果和数值拟合曲线

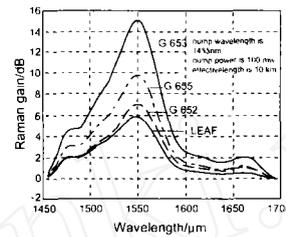


图 3 四种光纤的 Raman 增益

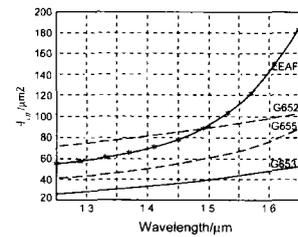


图 2 四种光纤的有效纤芯面积

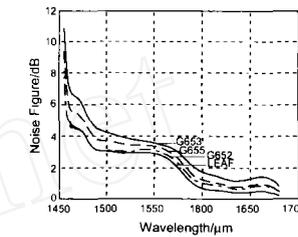


图 4 Raman 放大器的噪声指数(300k)

### 3 不同光纤的 Raman 增益

式(1)中的  $A_{\text{eff}}$  和  $L_{\text{eff}}$  以及损耗都因光纤而异, 光纤通信中使用的光纤主要有 G652、G653、G655 和大有有效面积光纤(LEAF), 它们传输特性的主要区别是色散零点的位置不同, 而且  $A_{\text{eff}}$  也有较大差异. 图(2)是它们的  $A_{\text{eff}}$  随波长的变化情况, 我们对四种光纤的  $A_{\text{eff}}$  做了多项式近似, 即  $A_{\text{eff}} = \sum_{m=0}^3 A_m \lambda^m$ , 系数  $A_m$  如表(2)所示.

其中  $\nu$  是信号光频率,  $A(L)$  是 Raman 放大器光纤末端的放大的自发辐射(ASE), 根据文献<sup>[5]</sup>的式(2)可以得到单波长泵浦时的形式为:

$$A(L) = h\nu E(G-1) \quad (5)$$

其中  $E$  为自发辐射因子, 由  $E = 1 + \exp(h\Delta\nu/kT) - 1$  决定. 将式(5)代入式(4), 得

$$NF = 2E + \frac{1}{G} - \frac{2E}{G} \quad (6)$$

这一形式与文献<sup>[5]</sup>的近似结论  $NF = 2E$  存在区别: 噪声指数是否大于 3dB. 室温条件(300K)的 Raman 放大器噪声指数的数值分析结果如图(4), 显然在增益较小的长波长处出现噪声指数小于 3dB 情况. 文献<sup>[5]</sup>的近似结论是在增益  $G$  很大的条件下得到的, 由式(6)也能得到这一近似结果.

## 5 结论

本文对 R. H. Stolen 的实验测量结果进行数字拟合, 得到 SRS Stokes 谱线的多项式近似表达式. 同时给出了 G652、G653、G655 和 LEAF 光纤有效纤芯面积的多项式近似. 以此为基础, 研究了这四种不同光纤的 Raman 增益和噪声指数. 结果表明增益和噪声指数差异主要由光纤的有效纤芯面积引起, 有效纤芯面积越小, 光纤 Raman 增益和噪声指数越大.

## 参考文献:

- [ 1 ] R H Stolen, E P Ippen. Raman gain in glass optical waveguides[J]. Appl Phys Lett, 1973, 22: 276 - 277.
- [ 2 ] R H Stolen, E P Ippen, A R Tynes. Raman Oscillation in Glass Optical Waveguide[J]. Appl Phys Lett, 1972, 20: 62 - 63.
- [ 3 ] Katherine X Liu, Elsa Garraire, Understanding the formation of the SRS Stokes Spectrum in Fused Silica Fibers [J]. IEEE J Quantum Electronics, 1991, 27: 1022 - 1030.
- [ 4 ] S A E Lewis, Chernikov S V, Taylor J R. Multi-wavelength pumped silica-fibre Raman amplifiers[A]. OFC2000[C]. Optical Society of America, Washington DC: 2000.
- [ 5 ] C R S Fludger, V Handerek. Fundamental Noise Limits in Broadband Raman Amplifiers[A]. OFC2001[C]. Optical Society of America, Washington DC: 2001.
- [ 6 ] S T Davey, Williams D L, Ainslie B J, *et al.* Optical gain spectrum of  $\text{CeO}_2$ - $\text{SiO}_2$  Raman fibre amplifiers[J]. IEE Proceedings, 1989, 136: 301 - 302.
- [ 7 ] E M Dianov. Raman fiber amplifiers[A]. OFC2000[C]. Optical Society of America, Washington DC: 2000.
- [ 8 ] S R Chinn. Analysis of counter-pumped small-signal fibre Raman amplifiers[J]. Electron. Lett, 1997, 33: 607 - 608.

## 作者简介:



**王 智 男**, 1971 年 11 月生于湖北省蕲春县, 汉族. 1993 年毕业于北京师范大学物理系, 获理学学士学位, 1996 年毕业于北方交通大学电磁场与微波技术专业, 获工学硕士学位, 2000 年毕业于北方交通大学通信与信息系统专业, 获工学博士学位, 现在北方交通大学光波技术研究所任教. 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, 在国内外各种期刊和会议上发表论文近 20 篇.



**童 治 男**, 1977 年 5 月生于天津, 祖籍江苏高邮, 汉族. 1999 年毕业于北方交通大学通信与控制系, 获工学学士学位, 同年考入北方交通大学光波技术研究所攻读硕士学位, 2001 年硕博连读, 现在攻读通信与信息系统专业博士学位, 主要从事高速光通信, 光器件方面的研究.