

文章编号: 0258-7025(2002)12-1075-05

光纤中点缺陷对分布光纤拉曼放大器性能的影响

张 巍, 彭江得, 刘小明, 范崇澄
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要 阐述了考虑传输光纤中存在点缺陷损耗和反射时背向抽运光纤拉曼放大器(B-DFRA)性能的分析方法, 计算并分析了点缺陷对增益、放大的自发拉曼散射噪声和二次瑞利散射(DRB)噪声的影响, 还通过带 B-DFRA 预放器的接收终端等价接收灵敏度讨论了点缺陷作用的综合效果。

关键词 光纤拉曼放大器, 自发拉曼散射噪声, 二次瑞利散射

中图分类号 TN 253; O 422.8 文献标识码 A

Impact of Lump Defects in Transmission Fibers on the Performance of Distributed Fiber Raman Amplifiers

ZHANG Wei, PENG Jiang-de, LIU Xiao-ming, FAN Chong-cheng
(*Electronic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract A numerical method for the point defect impact in transmission fibers on back-pumped fiber Raman amplifiers (B-DFRAs) is derived, accounting to both loss and reflection effects. Characteristics of gain, amplified spontaneous Raman scattering and double Rayleigh backscattering in a B-DFRA with point defect are studied separately, and the comprehensive effect of the point defect is discussed by equivalent receiver sensitivity.

Key words fiber Raman amplifier, spontaneous Raman emission, double Rayleigh backscattering

1 引 言

背向抽运的分布式光纤拉曼放大器(B-DFRA)具有良好的噪声特性和较宽的增益带宽, 在下一代高速光通信网络中有重要应用前景, 通常将其用作掺铒光纤放大器(EDFA)或光接收机的预放大器。随着 B-DFRA 的研究日趋成熟, 一些涉及工程应用的实际问题受到重视。例如, 因 B-DFRA 利用传输光纤作为增益媒质, 传输光纤中不可避免的不连续点缺陷(如光纤焊点等)必然会影响 B-DFRA 的性能。最近, T. Hoshida 等提出利用光时域反射仪(OTDR)对实际光纤状况进行测量从而对 B-DFRA 的性能作出预估计的方法^[1], 但没有涉及到传输光纤中的光反馈机制。实际上, 传输光纤中普遍存在

的瑞利背向散射(RBS)会引起放大的自发拉曼散射(ASRS)光发生分布式的多次反射和放大, 导致光信噪比的恶化; 还会使信号光产生分布式多径反射光而对原信号形成交扰, 产生二次瑞利散射(DRB)噪声。传输光纤中的点缺陷除了具有集总的损耗外, 也可能在光纤中形成强的反射点, 同样会影响 B-DFRA 的噪声特性。对于这一问题, 目前还没有相应的理论研究方法。

我们就 RBS 对 B-DFRA 性能及其对光通信系统传输特性的影响进行了研究, 给出了 B-DFRA 各种噪声项的分析方法^[2-4]。在此基础上, 本文进一步给出了带有单个点缺陷的 B-DFRA 增益与噪声特性的分析方法, 就点缺陷的损耗和反射两种机制, 深入分析点缺陷对 B-DFRA 性能的影响。

收稿日期: 2001-09-10; 收到修改稿日期: 2002-01-17

作者简介: 张巍(1974—), 男, 清华大学电子工程系博士, 主要从事与光通信相关的光电子学研究。E-mail: wzhang98@mails.tsinghua.edu.cn

2 理论分析方法

考虑图 1 所示含一个点缺陷的 B-DFRA, 点缺陷将传输光纤分为两段, 相应变量分别用“1”和“2”标识。同时考虑点缺陷的光损耗和光反射两种机制, 其作用可以用六个参数来描述: 点缺陷的位置 x , 前向信号光损耗 L_f , 反向信号光损耗 L_b , 反向抽运光损耗 L_p , 前向信号光反射率 R_f 和反向信号光反射率 R_b 。

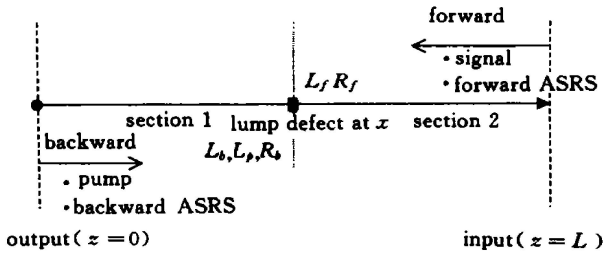


图 1 B-DFRA 中的点缺陷及其参量描述

Fig. 1 Point defect in B-DFRA and corresponding parameters

2.1 增益的计算

增益的计算实际上是输出信号光功率的计算。忽略 ASRS 噪声的影响, 信号光与背向抽运光的演化可以根据以下微分方程组通过迭代方法计算^[5]

$$\begin{aligned} \frac{dP_s}{dz} &= -\alpha_s P_s + C_r P_p P_s \\ \frac{dP_p}{dz} &= -\alpha_p P_p - \frac{\nu_s}{\nu_p} C_r P_p P_s \end{aligned} \quad (1)$$

其中, ν_s 和 ν_p 分别为信号光与抽运光的频率, α_s 和 α_p 为相应波长下的损耗, C_r 为与之对应的拉曼增益系数^[6], 而 P_s 和 P_p 为信号光与抽运光的功率。式中的符号应根据坐标的取向和实际信号光与抽运光的传输方向选取。(1) 式可以很容易地推广到多抽运多信道的情形。计算中不考虑点缺陷反射对增益特性的影响, 点缺陷损耗则通过迭代过程中各段初值条件的改变来体现。从信号输入端开始, 按迭代过程的顺序, 相应的各段初值由下式给出

$$\begin{aligned} P_{s,2}^n(L) &= P_s(L) \\ P_{s,1}^n(x) &= P_{s,2}^n(x) \cdot L_f \\ P_{p,1}^n(0) &= P_p(0) \\ P_{p,2}^n(x) &= P_{p,1}^n(x) \cdot L_b \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $P_s(L)$ 和 $P_p(0)$ 是输入信号光和抽运光的功率, $P_{s,i}^n(z)$ 和 $P_{p,i}^n(z)$ 是迭代过程中信号光功率和抽运光功率的计算值, 上标 n 代表迭代的次数, i

为光纤段的标识。

2.2 ASRS 的计算

利用文献[6]中的下述微分方程组通过迭代方法计算 ASRS 光功率, 从而得到 B-DFRA 的等效噪声系数

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} P_{\text{ASRS}f}(z) &= -C_r P_p(z) [P_{\text{ASRS}f}(z) + h\nu] + \\ &\quad \alpha_s P_{\text{ASRS}f}(z) - r P_{\text{ASRS}b}(z) \\ \frac{d}{dz} P_{\text{ASRS}b}(z) &= C_r P_p(z) [P_{\text{ASRS}b}(z) + h\nu] - \\ &\quad \alpha_s P_{\text{ASRS}b}(z) + r P_{\text{ASRS}f}(z) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $P_{\text{ASRS}f}$ 和 $P_{\text{ASRS}b}$ 分别为前向与背向 ASRS 功率, r 为光纤单位长度瑞利反射率, $h\nu$ 为相应 ASRS 波长的单光子能量。 P_p 由增益计算过程给出。微分方程组中已经考虑了 RBS 的影响, 缺陷点引起的损耗和反射同样通过迭代过程中各段初值条件的改变来体现, 相应的各段初值由下式给出

$$\begin{aligned} P_{\text{ASRS}f,2}^n(L) &= P_{\text{ASRS}}(L) \\ P_{\text{ASRS}f,1}^n(x) &= P_{\text{ASRS}f,2}^n(x) \cdot L_f + \\ &\quad P_{\text{ASRS}b,1}^{n-1}(x) \cdot R_b \\ P_{\text{ASRS}b,1}^n(0) &= 0 \\ P_{\text{ASRS}b,2}^n(x) &= P_{\text{ASRS}b,1}^n(x) \cdot L_b + \\ &\quad P_{\text{ASRS}f,2}^n(x) \cdot R_f \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $P_{\text{ASRS}}(L)$ 为输入 ASRS 光功率, $P_{\text{ASRS}f,i}^n(z)$ 和 $P_{\text{ASRS}b,i}^n(z)$ 分别为正向和背向 ASRS 光功率的计算值。

2.3 DRB 噪声的计算

点缺陷作为一个集总反射体, 对 DRB 噪声的影响机制与分布式的 RBS 是不同的。我们扩展了文献[3]中 DRB 噪声分析方法, 使之能兼顾集总反射和分布反射, 由此得到 DRB 噪声的均方噪声电流

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{DRB}}^2 &= \left| \frac{10}{9} r^2 \int_0^{L/2} \int_0^{L/2} G(z_1, z_2)^2 dz_1 dz_2 + \right. \\ &\quad \left. \frac{4}{3} r R_b \int_0^x G(z_1, x)^2 dz_1 + \right. \\ &\quad \left. \frac{4}{3} r R_f \int_0^L G(x, z_2)^2 dz_2 \right| \cdot P_s P_{\text{re}} \cdot \eta^2 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $G(\zeta, \xi)$ 为信号光在 ζ, ξ 两点间的净增益, 而 P_{re} 为 P_s 平均值, η 为光探测器响应度。定义(5) 式中 (\cdot) 内的部分为 B-DFRA 的 DRB 噪声参量 F_{DRB} 。则(5) 式可以简化为

$$\sigma_{\text{DRB}}^2 = F_{\text{DRB}} \cdot \eta^2 \cdot P_s \cdot P_{\text{re}} \quad (6)$$

根据 F_{DRB} 可以比较不同条件下 DRB 噪声的大小。

结合以上方法, 将[3]中的分析方法应用到带有
点缺陷的 B-DFRA 中, 通过计算等价接收机灵敏度
来考察点缺陷对 B-DFRA 性能影响的综合效果。

3 计算结果与分析

3.1 纯损耗点缺陷对 B-DFRA 性能的影响

纯损耗点缺陷是指点缺陷反射可以忽略, 仅对
信号光和抽运光有损耗作用的情况。图 2 给出了一个
典型的纯损耗点缺陷对 B-DFRA 各方面性能影响
的计算结果。在计算中, 取光纤段长 100 km, 抽
运和信号波长分别为 1450 nm 和 1550 nm, B-DFRA
的抽运功率和点缺陷位置 x 作为计算参数。计算
中采用的光纤参数和点缺陷参数如表 1 所示。

表 1 光纤参数和纯损耗点缺陷参数

Fiber parameters		Point defect parameters	
α_p (1450 nm)	0.2799 dB/km	L_f	0.5 dB
α_s (1550 nm)	0.2179 dB/km	L_b	0.5 dB
C_r	0.5283/W/km	L_p	0.5 dB
r	-40 dB/km	R_f/R_b	0/0

图 2(a) 是在不同抽运功率下 B-DFRA 净增益
随缺陷位置变化的关系。由图可见, 当缺陷靠近信
号输入端时, 点缺陷仅对信号光有一附加衰减, 对净
增益的影响不大。然而, 当缺陷点趋近于输出端时,
因其对抽运光功率的衰减量越来越大, 导致 B-
DFRA 的净增益大大降低。

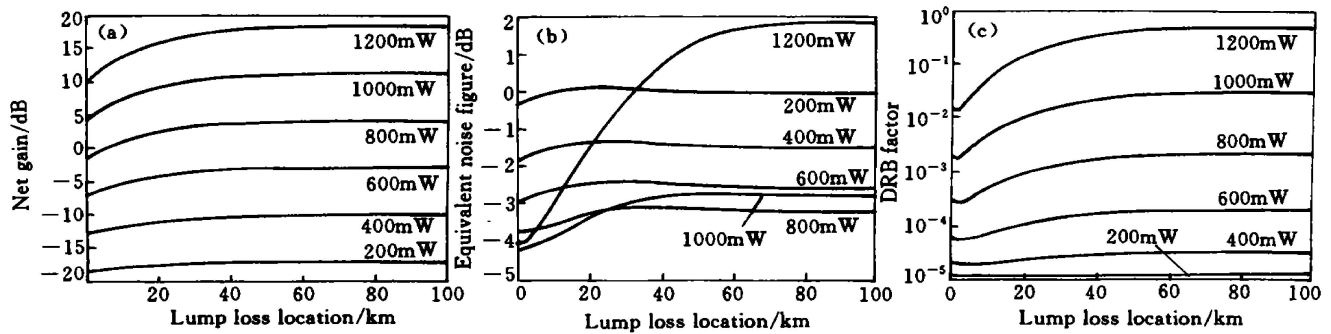


图 2 B-DFRA 的性能与纯损耗点缺陷位置的关系

Fig. 2 B-DFRA Performance vs lump loss location

图 2(b) 是在不同抽运功率下 B-DFRA 等效噪
声系数相对缺陷位置的变化规律。点缺陷引入三种
物理机制影响等效噪声系数: 1) 点缺陷对抽运光的
损耗作用。随着缺陷位置向信号输出端移动, 被点
缺陷损耗的抽运光功率将逐渐增加, 导致拉曼放大
作用下降, 使等效噪声系数有上升的趋势; 2) 点缺
陷对 ASRS 光的损耗作用。ASRS 光集中产生于信
号输出端附近, 因此这一机制会导致点缺陷位于输
出端附近时等效噪声系数下降; 3) 点缺陷对两侧光
纤段间由于 RBS 引起的 ASRS 光反馈的抑制作用。
抽运功率较小时, ASRS 光受 RBS 反馈的影响可以
忽略。然而在较大抽运功率下, 这种光反馈的抑制
将对等价噪声系数起到改善作用, 尤其是当点缺陷
位于信号输出端附近时, 这种效应尤为明显。图 2
(b) 是三种机制相互作用的结果。当抽运功率较低
时, 随着点缺陷位置向信号输出端移动, 等效噪声系
数首先受点缺陷对抽运光损耗作用的逐渐增强而升
高, 而后因点缺陷对 ASRS 光损耗作用的逐渐增强
在输出端附近迅速下降。当抽运功率升高时, 因

RBS 引起的 ASRS 光反馈影响逐渐增大, 当点缺陷
位于信号输入端附近时, 等效噪声系数随抽运功率
增加先下降至一最低点后迅速上升, 在 1.2 W 时接
近 2 dB。这种变化趋势与文献[6]的实验结果及
[4]的理论分析是一致的。随着点缺陷位置向信号
输出端移动, 对 ASRS 光反馈的抑制增强, 等价噪
声系数下降, 在抽运功率为 1 W 时低达 -4.3 dB, 甚
至低于无点缺陷时 B-DFRA 所能达到的最低等效
噪声系数。由此可见, 靠近信号输出端的点缺陷有
改善 B-DFRA 噪声特性的作用。

图 2(c) 是在不同抽运功率下 DRB 噪声参量与
缺陷位置的关系。点缺陷在靠近信号输入端时对抽
运光没有影响, 此时 DRB 噪声参量随着抽运功率的
增加而迅速增加。当缺陷靠近信号输出端时, 有两
种机制抑制了 DRB 噪声的增长: 一方面, 点缺陷使
抽运功率受到附加损耗致使 B-DFRA 的分布增益
下降, 而 DRB 光比信号光要多经历两次两反射点间
的增益和光纤损耗, 其受分布增益下降的影响更大,
相应地使 DRB 噪声参量减小。这一机制决定了

DRB 参量随缺陷位置移近 B-DFRA 输出端而下降的大趋势。另一方面, 分别位于点缺陷两侧的两反射点产生的 DRB 光比信号光要多经历两次缺陷损耗, 因而受点缺陷损耗的影响较大。这部分 DRB 光所占比重将随缺陷点趋近信号输出端而相对减小。由图 2(c) 可以看出, 在信号输出端附近存在一个点缺陷位置使 DRB 噪声参量最小。

由以上结果可以看出, 尽管在 B-DFRA 信号输出端的点缺陷对增益影响较大, 但这种恶化可以通过提高抽运功率来弥补, 同时可以确保 B-DFRA 噪声特性不致变坏。而对于靠近信号输入端的点缺陷, 由于提升抽运功率会造成噪声的增大, 点缺陷造成的性能恶化无法弥补。为了验证这一推论, 计算了带有 B-DFRA 预放器的 2.5Gbit/s 接收终端的等价接收灵敏度。计算中光纤与点缺陷的参数如表 1, 接收机参数如表 2 所示。

表 2 接收机参数

Table 2 Receiver parameters

EXT	0.05
B_e (Receiver electrical bandwidth)	$0.75 \times \text{Bite rate}$
B_o (Filter optical bandwidth)	50 GHz
PIN detector quantum efficiency	0.8
Receiver thermal noise currents	$0.036 \mu\text{A}^2$
BER requirement	10^{-15}

计算结果如图 3 所示。图中的粗实线是无点缺陷时接收终端等价接收灵敏度随抽运功率变化的曲线, 在一定的抽运功率下等价接收灵敏度达到最小值; 其他曲线是点缺陷在不同位置时的计算结果。可以看出, 当点缺陷很接近信号输出端时, 通过提升抽运功率可使等价接收灵敏度逼近无缺陷时能达到的最小值; 而当点缺陷距离信号输出端较远时, 则无法用提升抽运功率来弥补等价接收灵敏度的恶化。

3.2 点缺陷的光反射对 B-DFRA 噪声特性的影响

点缺陷对光的反射不会影响信号光的增益, 但它在传输光纤中引入了新的光反馈机制, 这会对 B-DFRA 的噪声特性产生严重影响。图 4 给出在不同点缺陷反射率下(假设前向传输信号反射率 R_f 与背向传输信号反射率 R_b 相等) B-DFRA 的等价噪声系数和 DRB 噪声参量随点缺陷位置变化的规律, 计算中抽运功率为 600 mW, 光纤段长 100 km, 抽运和信号波长分别为 1450 nm 和 1550 nm, 点缺陷无损, 最大反射率选为 -14 dB。其他参数如表 1 和表 2 所示。

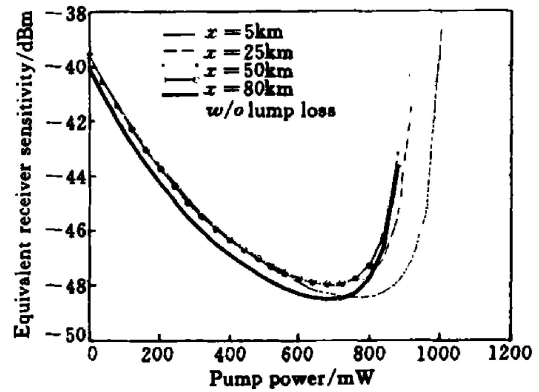


图 3 不同纯损耗点缺陷位置下等价接收灵敏度与抽运功率的关系

Fig. 3 Equivalent receiver sensitivity vs pump power under different lump loss locations

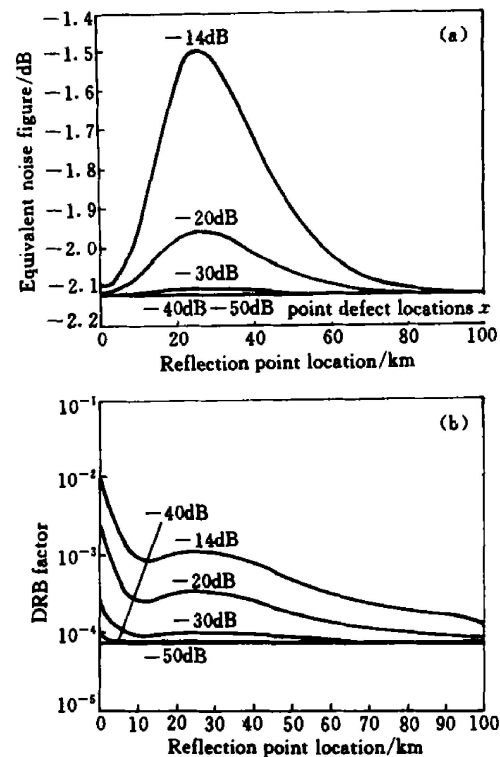


图 4 不同点缺陷反射率下 B-DFRA 的性能与点缺陷位置的关系

Fig. 4 B-DFRA performance vs point defect locations under different reflectivity

由图 4(a) 可见, 对于 ASRS 噪声, 当点缺陷位于距输出端 20~30 km 时缺陷反射造成的等价噪声系数恶化最大; 当点缺陷靠近信号输入端或输出端时, 噪声恶化则小得多。这是因为距输出端 20~30 km 处是背向 ASRS 光功率最大的位置, 在该处引入反射点将极大地增大正向 ASRS 输出光功率, 而在信号输入和输出端, 背向 ASRS 较小, 位于该处的点缺陷不足以产生很强的 ASRS 反射光功率。

对于 DRB 噪声, 计算结果如图 4(b) 所示。当点缺陷位于接近信号输出端相当大的范围内时, DRB 噪声对缺陷反射相当敏感。点缺陷在输出端附近和距输出端 20~30 km 时恶化最大。这一现象可以由图 5 解释, 其中, z_1, z_2 分别标识产生 DRB 光的两反射点的位置。B-DFRA 沿信号光传输方向可以分为两个部分: 靠近输出端的区段因信号光获得分布增益而成为增益区; 余下的区段信号光经历光纤损耗而成为损耗区。两区的分界线大致在距输出端 20~30 km 处。由于两反射点间的 DRB 光在增益区与信号光相比多获得两次增益, 在损耗区多获得两次损耗, 因此, DRB 光的主要贡献来自增益区。在(5)式中, 点缺陷反射为 DRB 噪声引入了两个附加项, 分别对应于图 1 中 1, 2 两区段的贡献。当点缺陷位于增益区和损耗区的交界时, 区段 1 与增益区重合, 而当点缺陷位于信号输出端时区段 2 与增益区重合, 此时点缺陷引入的 DRB 噪声附加项较大。

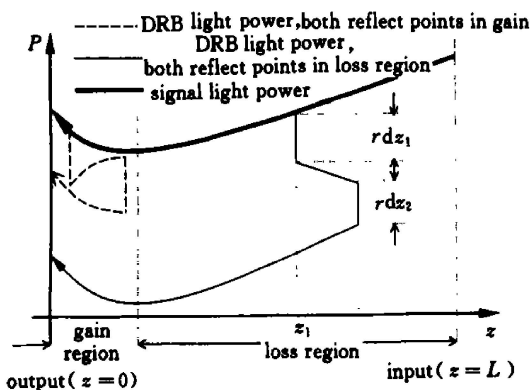


图 5 不同光纤段对 DRB 噪声贡献的比较

Fig. 5 Comparison of DRB noise contributions generated in different fiber sections

计算还表明, 无论是 ASRS 噪声还是 DRB 噪声, 当点缺陷反射率超过 -30dB 时, 噪声会大幅度提升。反之, 点缺陷反射可以在系统设计中予以忽略。

我们计算了带有不同位置下点缺陷的 B-DFRA 预放器的 2.5 Gbit/s 接收终端性能随拉曼抽运功率的变化关系。计算中, 点缺陷损耗不计, 反射率取 -20 dB, 其他的计算参数见表 1 和表 2。计算结果如图 6 所示, 图中粗实线是无点缺陷时接收终端等价接收灵敏度随拉曼抽运功率变化的结果。比较表明点缺陷反射会使最佳等价接收灵敏度变坏, 相应地使最优抽运功率变小。点缺陷反射对接收终端性能

的影响与点缺陷的位置有关。靠近信号输出端的点缺陷反射对等价接收灵敏度恶化较大。

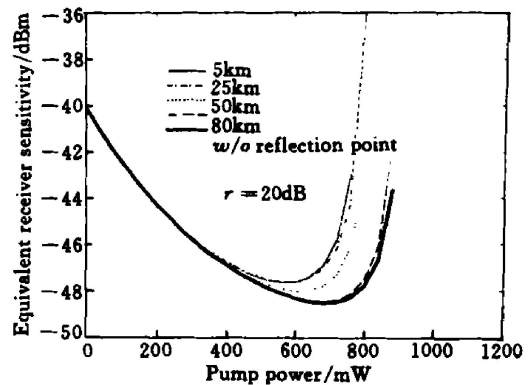


图 6 不同点缺陷位置下等价接收灵敏度与抽运功率的关系

Fig. 6 Equivalent receiver sensitivity vs pump power under different point defect locations

4 结 论

分析表明, 对于纯损耗点缺陷, 当点缺陷接近信号输出端, 通过提升抽运功率可以弥补点缺陷损耗带来的性能恶化; 而如果点缺陷靠近信号输入端, 则缺陷损耗造成的性能恶化是无法弥补的。点缺陷的光反射对 ASRS 和 DRB 噪声都会产生影响, 当点缺陷靠近信号输出端时, 这种影响非常明显。当缺陷反射率大于 -30 dB 时, 缺陷反射的作用就必须在系统设计中加以认真考虑。

参 考 文 献

- 1 T. Hoshida, T. Terahara, H. Onaka. Performance prediction method for distributed Raman amplification in installed fiber systems based on OTDR data [C]. in Proceeding of Optical Fiber Communication Conference 2001, Baltimal, CA, MI4
- 2 Zhang Wei, Peng Jiangde, Liu Xiaoming. An analytical expression for the impact of Rayleigh scattering on distributed fiber Raman amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2001, **28**(12): 1108~ 1112 (in Chinese)
- 3 Zhang Wei, Peng Jiangde, Liu Xiaoming *et al.*. Impact of Rayleigh backscattering on noise characteristic of distributed fiber Raman amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2002, **29**(2): 143~ 148 (in Chinese)
- 4 Zhang Wei, Peng Jiangde, Liu Xiaoming *et al.*. The performance improvement of optical communication systems by back-pumped fiber Raman amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2002, **29**(8): 729~ 734 (in Chinese)
- 5 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 2nd ed. . Academic Press, 1995, Chap. 4
- 6 P. B. Hansen, L. Eskildsen, A. J. Stentz *et al.*. Rayleigh scattering limitations in distributed Raman pre-amplifier [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10** (1): 159~ 161