掺铒光纤放大器放大的自发辐射噪声的研究*

彭拥军** 邱昆 邱琪
(电子科技大学光纤通信国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】 推导出了EDFA的ASE功率与信号光功率的关系式。当EDFA作为功率放大器时,由于对EDFA的光功率速率方程数值求解能够求得信号光功率在掺铒光纤纵向的分布,用该方法能够简便地计算出EDFA ASE光输出功率。

关 键 词 掺铒光纤放大器; 自发辐射; 增益; 噪声指数
中图分类号 TN914.1

掺铒光纤放大器(EDFA)具有高增益、高饱和输出功率、低噪声、小连接损耗、增益与偏振无关等优点,在光纤通信领域中得到越来越多的应用。但是,其放大的自发辐射噪声以及噪声指数一直未得到解决;尤其是用精确模型研究EDFA的行为时,必须用EDFA的光功率速率方程进行数值求解,由于每一信号光都伴随两个方向的ASE光,给求解耦合微分方程组增加了难度。为了简化运算,本文推导出ASE光功率和信号光功率的关系式,当EDFA用作功率放大器时,用该关系式能简易地计算出正反向ASE功率以及噪声指数。

1 掺铒光纤放大器的速率方程

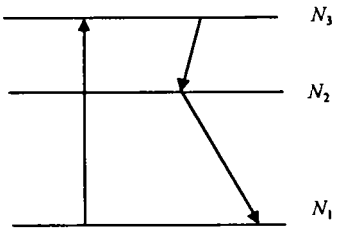

图1 Er^{3+}的简化能级图

泵浦波长为0.98 μm或1.48 μm时,Er^{3+}可以作为一个三能级系统来考虑,如图1所示。设总的Er^{3+}浓度为ρ,基态粒子浓度为N_1,亚稳态粒子浓度为N_2,激发态粒子浓度为N_3,由于从激发态到亚稳态的跃迁基本上是非辐射的,并且跃迁速率非常大,因此$N_3 \approx 0$,则

$$N_1 + N_2 = \rho \tag{1}$$

EDFA中光功率速率方程为[1]

$$\frac{dP_{sk}^{\pm}}{dz} = \pm P_{sk}^{\pm}\int_S \{\eta(v_k)N_2 - N_1\}\bar{\psi}_{sk}\,\sigma_a(v_k)dS \tag{2}$$

$$\frac{dP_{pm}^{\pm}}{dz} = \pm P_{pm}^{\pm}\int_S \{\eta(v_m)N_2 - N_1\}\bar{\psi}_{pm}\,\sigma_a(v_m)dS \tag{3}$$

$$\frac{dP_{ASEK}^{\pm}}{dz} = \pm 2P_{ok}\,\sigma_e(v_k)\int_S N_2\bar{\psi}_{sk}dS \pm \sigma_a(v_k)P_{ASEK}^{\pm}\int_S \{\eta(v_k)N_2 - N_1\}\bar{\psi}_{sk}dS \tag{4}$$

$$P_{ok} = hv_k\delta v \tag{5}$$

1998年1月12日收稿
* 国家科委863高科技项目,基金编号:863-307-02-03-03
** 男 30岁 硕士

式(2)～(5)中各符号分别为：z 表示 EDF 纵向坐标，“±”表示与 z 轴同向或反向；S 表示 EDF 横截面；$P_{sk}^{\pm}$表示频率υ_k 的信号光功率；P_{ok}表示频率υ_k 处$\delta\upsilon$ 内一个光子的能量；$P_{pm}^{\pm}$表示频率υ_m 处泵浦光功率；$\sigma_a(\upsilon_j)$为频率 υ_j 处铒粒子的吸收截面；$\sigma_e(\upsilon_j)$为频率 υ_j 处铒粒子的发射截面；$\eta(\upsilon_j)$为频率 υ_j 处铒粒子的吸收、发射截面之比；$\bar{\psi}_{sk}=\psi_{sk}/(\pi\omega_{sk}^2)$，$\bar{\psi}_{pm}=\psi_{pm}/(\pi\omega_{pm}^2)$表示归一化信号光泵浦光包络；$\psi_{sk}$、$\psi_{pm}$表示信号光、泵浦光包络；$\omega_{sk}$、$\omega_{pm}$表示信号光、泵浦光功率模半径；$P_{ASEK}^{\pm}$表示中心频率$\upsilon_k$ 处带宽$\delta\upsilon$ 内 ASE 光功率。式(4)中“2”表示 EDF 中有两个偏振模式。

对 EDFA 进行性能分析就需对该耦合方程组进行稳态分析(在高频调制下不用考虑粒子数反转的瞬态响应[2])，尤其是 ASE 功率，对每一信号，有两个微分方程与之相伴，求解非常复杂。本文为此推导出了 ASE 功率与信号功率的简单关系式。

2　掺铒光纤放大器输出 ASE 功率

只考虑正向信号 P_{sk}^{+}，式(2)可写为

$$\frac{\mathrm{d}P_{sk}^{+}}{\mathrm{d}z}=P_{sk}^{+}\int_S\{\eta(\upsilon_k)N_2-N_1\}\bar{\psi}_{sk}\,\sigma_a(\upsilon_k)\mathrm{d}S \tag{6}$$

将式(1)代入式(6)得

$$\frac{\mathrm{d}(\ln P_{sk}^{+})}{\mathrm{d}z}=\int_S\{\eta(\upsilon_k)N_2-N_1\}\bar{\psi}_{sk}\,\sigma_a(\upsilon_k)\mathrm{d}S \tag{7}$$

$$\frac{\mathrm{d}(\ln P_{sk}^{+})}{\mathrm{d}z}=[1+\eta(\upsilon_k)]\sigma_a(\upsilon_k)\int_S N_2\bar{\psi}_{sk}\mathrm{d}S-\rho_0\sigma_a(\upsilon_k)\Gamma_{sk} \tag{8}$$

式中

$$\Gamma_{sk}=\frac{1}{\rho_0\sigma_a(\upsilon_k)}\int_S\rho\bar{\psi}_{sk}\,\sigma_a(\upsilon_k)\mathrm{d}S=\int_S\frac{\rho\psi_{sk}}{\rho_0\pi\omega_{sk}^2}\,\mathrm{d}S \tag{9}$$

式中　Γ_{sk}为信号光与铒粒子的重叠积分因子；ρ_0 为 EDF 中心处铒粒子浓度。

将式(7)、(8)代入式(6)，并化简得

$$\frac{\mathrm{d}P_{ASEK}^{\pm}}{\mathrm{d}z}=\pm P_{ASEK}^{\pm}\frac{\mathrm{d}\ln P_{sk}^{+}}{\mathrm{d}z}\pm A\pm B\frac{\mathrm{d}\ln P_{sk}^{+}}{\mathrm{d}z} \tag{10}$$

式中　常数 $A=\dfrac{2\rho_0P_{ok}\sigma_e(\upsilon_k)\Gamma_{sk}}{1+\eta(\upsilon_k)}$；常数 $B=\dfrac{2P_{ok}\eta(\upsilon_k)}{1+\eta(\upsilon_k)}$。

用常数变异法求解式(10)，得

$$P_{ASEK}^{\pm}=\exp\left(\int\pm\frac{\mathrm{d}\ln P_{sk}^{+}}{\mathrm{d}z}\mathrm{d}z\right)\left\{\int\left(\pm A\pm B\frac{\mathrm{d}\ln P_{sk}^{+}}{\mathrm{d}z}\right)\exp\left(-\int\pm\frac{\mathrm{d}\ln P_{sk}^{+}}{\mathrm{d}z}\mathrm{d}z\right)\mathrm{d}z+c\right\} \tag{11}$$

$$P_{ASEK}^{+}=\exp\left(\int\frac{\mathrm{d}\ln P_{sk}^{+}}{\mathrm{d}z}\mathrm{d}z\right)\left\{\int\left(A+B\frac{\mathrm{d}\ln P_{sk}^{+}}{\mathrm{d}z}\right)\exp\left(-\int\frac{\mathrm{d}\ln P_{sk}^{+}}{\mathrm{d}z}\mathrm{d}z\right)\mathrm{d}z+c_1\right\} \tag{12}$$

$$P_{ASEK}^{-}=\exp\left(\int-\frac{\mathrm{d}\ln P_{sk}^{+}}{\mathrm{d}z}\mathrm{d}z\right)\left\{\int\left(-A-B\frac{\mathrm{d}\ln P_{sk}^{+}}{\mathrm{d}z}\right)\exp\left(\int\frac{\mathrm{d}\ln P_{sk}^{+}}{\mathrm{d}z}\mathrm{d}z\right)\mathrm{d}z+c_2\right\} \tag{13}$$

式中　c、c_1、c_2 为待定常数。

分别化简式(12)、(13)，可得

$$P^{+}_{ASEK} = c_1 P^{+}_{sk} - B + P^{+}_{sk}\int \frac{A}{P^{+}_{sk}}\mathrm{d}z \tag{14}$$

$$P^{-}_{ASEK} = \frac{c_2}{P^{+}_{sk}} - B - \frac{A}{P^{+}_{sk}}\int P^{+}_{sk}\mathrm{d}z \tag{15}$$

假设

$$\left.\begin{aligned} f_1(z) &= \int \frac{A}{P^{+}_{sk}}\mathrm{d}z \\ f_2(z) &= \int A P^{+}_{sk}\mathrm{d}z \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

于是式(14)、(15)变为

$$P^{+}_{ASEK} = c_1 P^{+}_{sk} - B + P^{+}_{sk} f_1(z) \tag{17}$$

$$P^{-}_{ASEK} = \frac{c_2}{P^{+}_{sk}} - B - \frac{1}{P^{+}_{sk}} f_2(z) \tag{18}$$

由初始条件得

$$P^{+}_{ASEK}(0) = 0 \qquad P^{-}_{ASEK}(L) = 0 \tag{19}$$

式中 L 为 EDF 长度。

由式(17)~(19)联合确定出常数 c_1、c_2 为

$$c_1 = \frac{[B - P^{+}_{sk} f_1(0)]}{P^{+}_{sk}(0)} \tag{20}$$

$$c_2 = \left[B + \frac{f_2(L)}{P^{+}_{sk}(:L)}\right] P^{+}_{sk}(L) \tag{21}$$

将式(20)、(21)代入式(17)、(18)中,得

$$P^{+}_{ASEK} = \frac{B}{P^{+}_{sk}(0)}[P^{+}_{sk} - P^{+}_{sk}(0)] + P^{+}_{sk}[f_1(z) - f_1(0)] \tag{22}$$

$$P^{-}_{ASEK} = \frac{B}{P^{+}_{sk}}[P^{+}_{sk}(L) - P^{+}_{sk}] + \frac{f_2(L) - f_2(z)}{P^{+}_{sk}} \tag{23}$$

根据式(16)的定义,有

$$\begin{aligned} f_1(z) - f_1(0) &= \int_0^z \frac{A}{P^{+}_{sk}}\mathrm{d}z \\ f_2(L) - f_2(z) &= \int_z^L A P^{+}_{sk}\mathrm{d}z \end{aligned} \tag{24}$$

将式(24)代入式(22)、(23),得到 EDFA 中的 ASE 光功率表达式

$$P^{+}_{ASEK}(z) = \frac{B}{P^{+}_{sk}(0)}[P^{+}_{sk}(z) - P^{-}_{sk}(0)] + A P^{+}_{sk}(z)\int_0^z \frac{\mathrm{d}z}{P^{+}_{sk}(z)} \tag{25}$$

$$P^{-}_{ASEK}(z) = \frac{B}{P^{+}_{sk}(z)}[P^{+}_{sk}(L) - P^{-}_{sk}(z)] + \frac{A}{P^{+}_{sk}(z)}\int_z^L P^{+}_{sk}(z)\mathrm{d}z \tag{26}$$

进一步可得出在 EDFA 输出端的 ASE 功率为

$$P^{+}_{ASEK}(L) = \frac{B}{P^{+}_{sk}(0)}[P^{+}_{sk}(L) - P^{-}_{sk}(0)] + A P^{+}_{sk}(L)\int_0^L \frac{\mathrm{d}z}{P^{+}_{sk}(z)} \tag{27}$$

$$P_{ASEK}^{-}(0) = \frac{B}{P_{sk}^{+}(0)}[P_{sk}^{+}(L) - P_{sk}^{-}(0)] + \frac{A}{P_{sk}^{+}(0)}\int_{0}^{L} P_{sk}^{+}(z)\mathrm{d}z \tag{28}$$

从式(27)、(28)可见 ASE 功率一方面得到放大(第一项),另一方面又受到信号功率的抑制(第二项)。这两式对任意情况均适用,但从操作角度考虑,大信号输入时就显出其优点。

3　掺铒光纤放大器的噪声指数

用式(2)~(4)以及三能级系统粒子速率方程可以对 EDFA 进行全面分析。尤其是在大信号输入时,可以忽略 EDFA 的自饱和,在计算信号光、泵浦光沿 EDF 纵向分布时不用考虑 ASE 光的影响。这样,EDFA 作功率放大器时,仅用式(2)、(3)以及粒子速率方程进行分析即可。用龙格—库塔法求解微分方程组时能计算出沿 EDF 纵向信号光功率分布,用式(27)、(28)能方便地求出 ASE 的输出光功率,且只用一个简单的数值积分(梯形法)即可,然后计算出 EDFA 的噪声指数[1,3]

$$NF = \frac{P_{ASEK}^{+}(L)}{h\upsilon_k\ \delta\upsilon G} + \frac{1}{G} \tag{29}$$

或[4]

$$NF = \frac{P_{ASEK}^{+}(L)}{h\upsilon_k\ \delta\upsilon G} \tag{30}$$

式中　NF 为噪声指数;G 为 EDFA 的增益。

图 2、图 3 就是用该方法计算出的正向泵浦结构 EDFA 的信号增益及噪声指数。所用参数如下:光纤芯径为 1.2 μm,掺铒半径为 1.2 μm,数值孔径为 0.225,EDF 长度为 15 m,信号吸收截面为 $0.443\times10^{-25}\ \mathrm{m}^2$,信号发射截面为 $1.7\times10^{-25}\ \mathrm{m}^2$,泵浦吸收截面为 $0.195\times10^{-25}\ \mathrm{m}^2$,EDFA 带宽为 20 nm,信号波长为 1.532 μm,泵浦波长为 0.975 μm,掺铒浓度为 $26.88\times10^{24}\ \mathrm{m}^{-3}$。

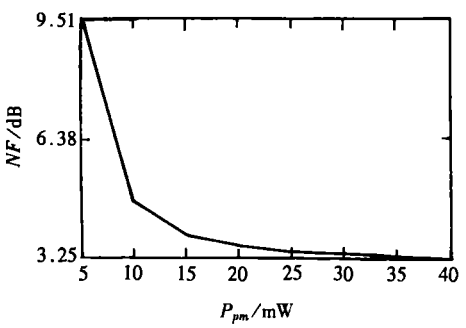

图 2　噪声指数与输入泵浦的关系曲线

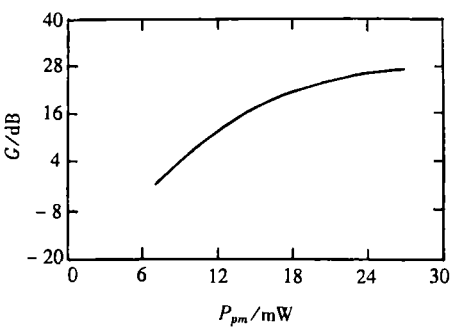

图 3　增益与输入泵浦功率的关系曲线

4　结 束 语

本文推导出了用信号光功率计算噪声光功率的简单公式,用该公式将计算噪声功率及噪声指数从解微分方程简化为一个简单的积分计算,大大简化了用于功率放大器的 EDFA 的数值分析。

参 考 文 献

1 Emmanuel Desurvire. Erbivum doped fiber amplifiers princilpes and applications. New York: A Wiley-Interscience Publincation, 1994: 1 ~ 140

2 何华杰,顾畹仪,李国瑞.掺铒光纤放大器稳态增益和瞬态增益分析.光子学报,1996,3:267 ~ 271

3 邱 昆,汤启兵,唐明光.掺铒光纤放大器的简化模型.中国激光,1995,2:108 ~ 112

4 Kiiveri Pauli, Tommela Simo. Spectral gain and measurement system for fiber amplifiers. SPIE, 1994, 2 449: 16 ~ 22

Study of Amplified Spontaneous Emission in Erbium-doped fiber Amplifier

Peng Yongjun Qiu Kun Qiu Qi

(State Key lab of Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract Spontaneous emission in EDFAs is amplified with signal, constructing amplified spontaneous emission. In order to analyze the noise characteristics of EDFAs, the output power of ASE must be calculated. In this paper, the relation equations between ASE and signal optical power are derived. When EDFA is used as the power booster, the ASE output power of EDFAs can be calculated simply by this method because the longitudinal distribution of signal optical power in EDFA can be calculated by numerical solution of the optical power rate equations of EDFA.

Key words Erbium doped fiber amplifier; spontaneous emission; gain; noise figure

编辑 黄 辛

·科研成果介绍·

Esc OPT 1300 型光纤 CATV 光发射机系列

主研人员:王志玉 冯 波 邱 昆 周 波 谢 凯 徐大钧

OPT1300 系列光发射机,采用美国 ORTEL 公司专为 CATV 光传输设备制造的光发射机模块作为核心部件,配置该公司自行开发生产的监测、显示、告警功能块和高可靠主、备电源,构成普及型和标准型的系列机。

该系列产品的设计定型生产,填补了我国光电子产业同类产品生产的空白,其技术性能指标已达到国际同类同期产品水平,能满足我国 CATV 网对光传输设备的应用要求。

·科 卞·