

铒镱共掺光纤放大器的应用

1 引言

光纤，因其近乎无限的带宽，成为信息爆炸时代无可替代的信息传输媒质，而波分复用（WDM）方式则是利用光纤带宽的最有效方法。目前主干网的光传输都利用了 WDM 技术，而光纤 CATV 系统还是以单波长应用为主，因此光纤的带宽利用率很低。今后，随着 CATV 网络容量的增加以及业务管理灵活性的提高，应用 WDM 技术的光纤 CATV 系统会越来越受到重视。

掺铒光纤放大器（EDFA），因其补偿了光纤线路中 C（L）波段光信号的衰减，极大地延长了中继距离，是光纤通信蓬勃发展的关键因素。对于光纤 CATV 网，其光功率分配数目一般都比较小，因此对光放大器的输出功率要求都比较高。而由于 EDFA 的单模泵浦机理限制了泵浦功率（980nm/1480nm）水平，传统的 EDFA 很难实现高功率输出或者单位功率的成本非常昂贵，据了解，目前商用 EDFA 的最大饱和输出功率为 500mW 左右，这显然很难满足光纤 CATV 系统的应用要求。为了获得高功率输出，铒镱共掺双包层光纤放大器（EYDCFA）越来越受到关注。EYDCFA 采用了多模泵浦激光器和铒镱共掺双包层光纤（EYDCF），突破了传统 EDFA 的功率限制。目前，可用的多模泵浦激光器功率可达 6W（915—975nm），而 EYDCF 的双包层结构和纤芯铒镱共掺技术则很好地解决了多模泵吸收和单模 1550nm（C-Band）信号放大的问题，此外，两者利用光纤合波器连接，可实现多个泵浦激光器同时同向泵浦单根 EYDCF。目前武汉光迅科技股份有限公司（简称光迅科技）开发的单波长 EYDCFA 产品的最大输出功率可达 4W，在光纤 CATV 网和三网合一系统中已有较多应用[1]。本文主要研究了增益平坦型 EYDCFA（GF-EYDCFA）的基本原理及其在光纤 CATV 网的可能应用，这对今后光纤 CATV 网的 WDM 升级具有积极的指导意义。

2 增益平坦型铒镱共掺双包层光纤放大器

增益平坦型 EDFA（GF-EDFA）通常采用增益平坦滤波器（GFF）实现多波长放大时的增益均衡[2, 3]，即通过滤波器在不同波长的差异化衰减来补偿掺杂光纤内各波长间的增益不均衡，因此 GFF 的衰减谱通常是光放大器未加 GFF 时的增益谱。目前，制作 GFF 普遍采用薄膜滤波器技术和啁啾光栅技术。这两种技术都可以获得 WDM 系统要求的 GFF。薄膜滤波器技术是一种低成本的生产技术，一次镀膜生产数百甚至上千片 GFF，适合大规模生产，单位成本较低。而啁啾光栅则刚好相反，小批量生产时，单位成本低于薄膜滤波器，但由于是逐只生产，批量生产成本就相对较高。现阶段光纤通信发展迅速，EDFA 的需求量非常大，因此采用薄膜滤波器技术生产的 GFF 应用最为广泛，下文所指的 GFF 也均属这一类。

本质上，EYDCFA 仍是一种 EDFA，它通过镱离子吸收 915-975nm 的泵浦光，然后利用铒-镱离子间的交叉弛豫过程将能量转给铒离子，实现对铒离子的泵浦，接下来的信号放大过程与 EDFA 类似[4, 5]。有文献曾报道采用 GFF 的增益平坦型铒镱共掺光纤放大器[6]，不过该工作针对的是单模泵浦放大器，其输出功率仅为 24.6dBm。而将 EYDCFA 与 EDFA 的增益均衡技术相结合，就可实现高功率

GF-EYDCFA。GF-EYDCFA 的典型光路如图 1 所示，主要由低噪声 EDFA 前级、高功率 EYDCFA 后级和两级间的 GFF&ISOLATOR 组合器件构成。这种结构既能保证放大器较低的噪声指数 (NF)，又不至于 GFF 的插入而明显降低泵浦-信号转换效率 (PCE)。对于给定输入/输出功率的光放大器，设计时要综合考虑 PCE、NF 和未加 GFF 时光放大器的增益平坦度 (GF——定义为工作波长范围内的最大增益与最小增益之差)。根据级联 EDFA 的 NF 理论[2]，

$$NF = NF_1 + \frac{ATT_{GFF} - 1}{G_1} + \frac{NF_2 - 1}{G_1 / ATT_{GFF}} \quad (1)$$

式中均为波长相关的参量 (线性单位)，前级和后级的增益、噪声指数分别为 G_1 、 NF_1 和 G_2 、 NF_2 ，GFF 的衰减为 ATT_{GFF} 。由式 (1) 可以看出， G_1 越大、 NF_1 越低，整个放大器的 NF 就越低，而且在 G_1 较大时， NF_1 对整个放大器的 NF 起决定性作用。同时，较大的 G_1 也有利于提高后级的 PCE 和抑制 1060nm 波段的 ASE 激射。此外，还必须考虑 GFF 的设计，通常整个放大器未加 GFF 时的 GF 越小，GFF 的加工难度越低，应用效果也越好。依据以上原则设计的 GFF 的衰减谱如图 2 所示，并用该 GFF 制成 GF-EYDCFA，其额定输入和输出总功率分别为 6dBm 和 31dBm。图 3 为 Aglient 86142B 光谱分析仪的内插减元法测得的 GF-EYDCFA 的增益谱和 NF 谱。由测试数据可以看出，在 1543-1565nm 的工作波长范围内，放大器的 $GF < 0.25$ dB， $NF < 5.5$ dB，增益平坦效果相当理想，并不比 GF-EDFA 差 [2, 3]。需要说明的是，测试中为了设备安全，放大器的输出端经 1/8 分波后取其中一路用于测试。由于分波器件的波长相关损耗 (WDL) 和分波损耗，GF 和 NF 的测试数据一般会略偏大。不过瓦级的高功率光纤放大器在系统应用时，分波器件总是存在的，因此该测试方法也是合理的。

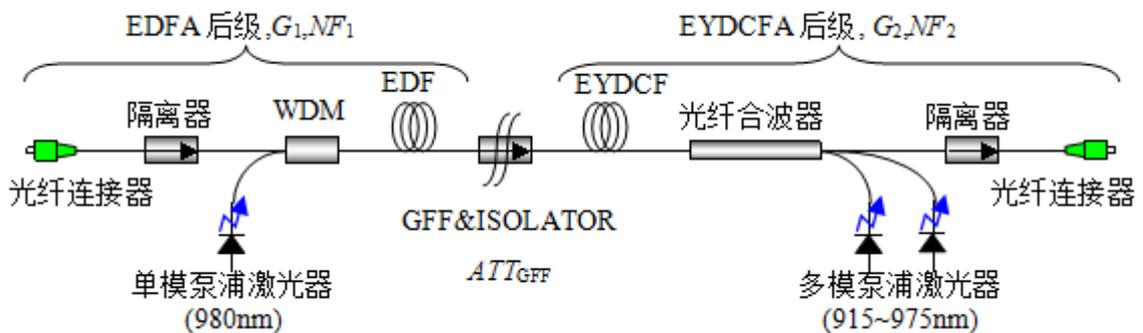


图 1 GF-EYDCFA 光路示意图

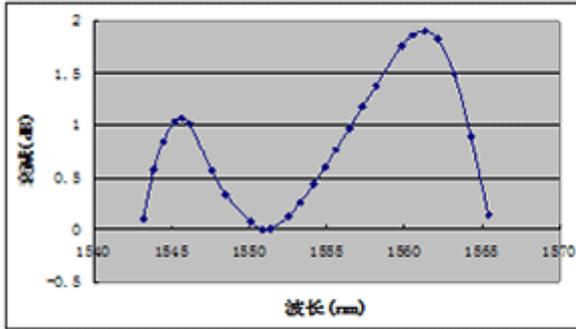


图 2 GF-EYDCFA 的 GFF 衰减谱

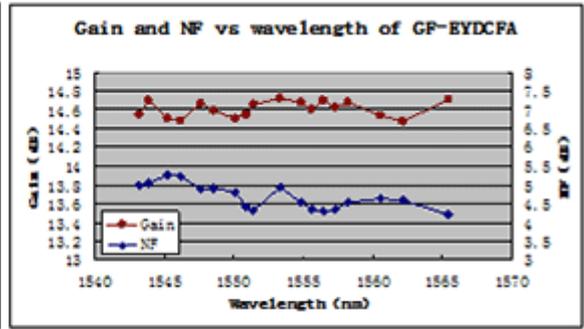


图 3 GF-EYDCFA 的增益谱与 NF 谱，

考虑批量生产中的个体差异和产品可靠性所需的指标余量，光迅科技的 GF-EYDCFA 产品的关键指标如表 1 所示。可以看出，GF-EYDCFA 的各项性能指标均达到了 GF-EDFA 同类产品的水平，而其 2W 的高输出功率水平则是 GF-EDFA 望尘莫及的。此外，通过调节 GF-EYDCFA 的相关设计，其工作波长可进一步拓宽至 1535-1565nm，总输出功率也可在 0.5W 到 2W 范围内任意选择。

表 1 光迅科技 GF-EYDCFA 产品的关键指标

NO.	PARAMETER	SPECIFICATION			UNITS
		MIN.	TYP.	MAX.	
1	工作波长	1543		1565	Nm
2	输入信号光总功率 (Pin)	5		10	dBm
3	输出总功率	0.5		2	W
4	噪声指数 (NF) @Pin=+6dBm			6	dB
5	增益平坦度(GF) @ Pin=+6dBm			0.8	dB
6	输入/输出端回波损耗		50/50		dB
7	输入/输出端的泵浦泄漏			-10/-10	dBm
8	偏振相关增益			0.4	dB
9	功耗			40	W

3 GF-EYDCFA 在 WDM-CATV 系统中的应用

应用 WDM 技术是光纤 CATV 系统升级的一个重要方向，它能在光域进行节目的上/下，避免“光-RF-光”的转换，同时增加网络的可扩展性和灵活性，也能有效降低运行、维护和升级成本[7]。关于 WDM-CATV 方案已有不少研究[7,8]和应用案例，采用 1550nm 激光器发射机组和 EDFA 的多波长视频传输网络的典型应用[8]如图 4 所示。主前端通过卫星接收等方式获得节目源，将节目源按需求分配、组合和编码后调制到波长为 λ_i 的 C 波段光波上，并由波分复用器 (WDM)

合波后通过一级自愈环传送至一级集线器（PH）；PH 取用一级自愈环上部分波长的光信号，再经二级自愈环送至二级集线器（SH）；SH 对光信号进行处理并通过功率分配器分配至各光节点，用于广播或窄波。

光纤线路中，EDFA 是为了补偿光纤传输损耗和光功率分配损耗，在多波长光信号传输的光路中则必须使用 GF-EDFA，而 GF-EYDCFA 应用于用户密集和波长数较多的网络，能解决 GF-EDFA 功率水平不够和常规 EYDCFA 增益不均衡的问题。此外，高功率 GF-EYDCFA 还能减小系统终端各波长信号的功率差异。由于采用薄膜滤波器技术制造的同一批 GFF 具有相同的衰减谱偏差，因此实际网络中同类光放大器（OA）的增益谱是相似的，所以如果多个 OA 级联——即光信号经 OA 放大后传输或分波，当光功率降至一定水平时再经另一个 OA 放大，然后接着传输，如此重复，直至到达光节点——虽然能有效克服较大的传输或分波损耗，但级联 OA 的 GF 必定会劣化，而且级联个数越多，最终的 GF 越差，从而影响系统性能。所以，使用高功率的 GF-EYDCFA 以相对减少系统中 OA 的使用个数，能有效降低因 OA 级联而造成的 GF 劣化。

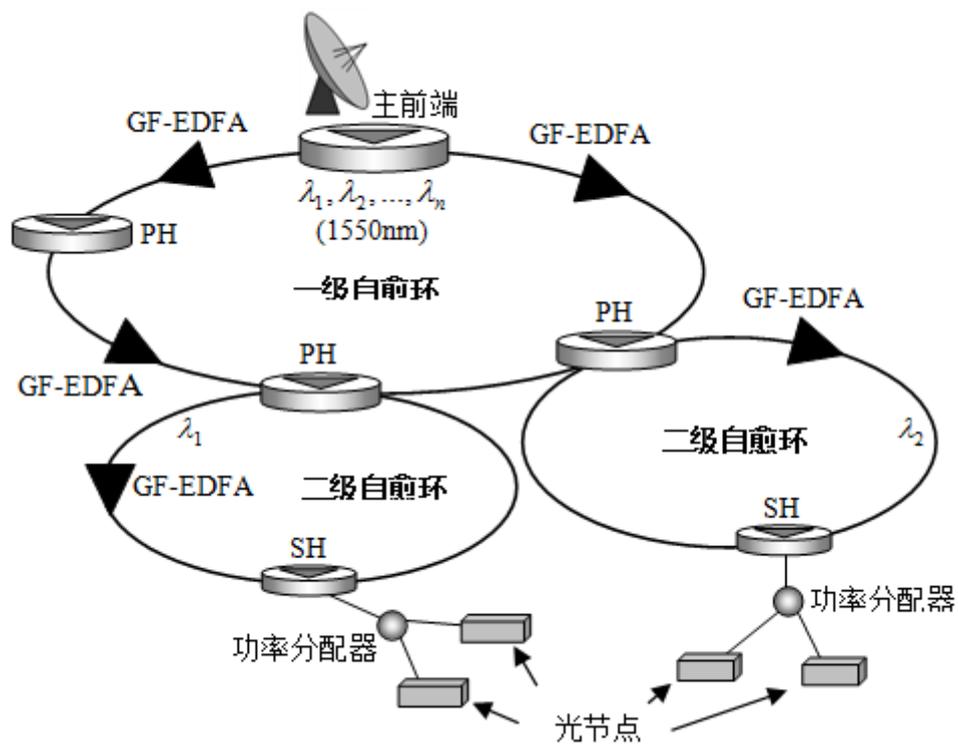


图 4 采用 1550nm 激光器发射机组和 EDFA 的多波长视频传输网络

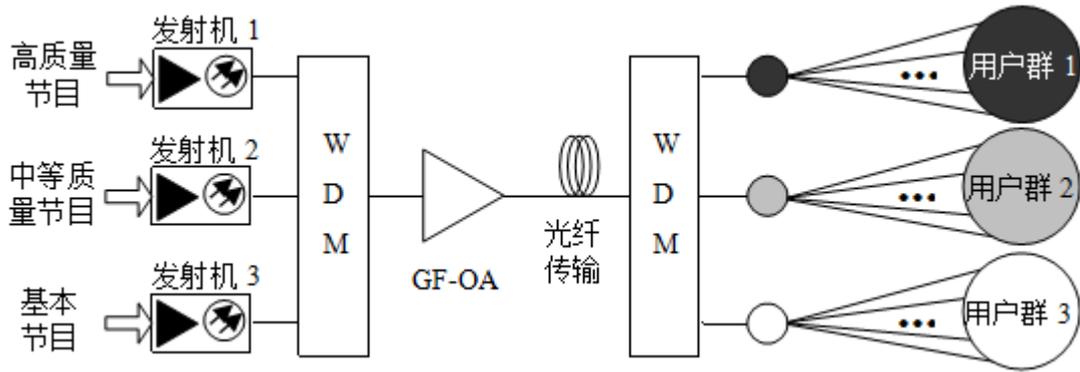


图 5 利用 WDM 方式提供差异化服务的 CATV 系统示意图

图 5 是利用 WDM 方式提供差异化服务的 CATV 系统实例，其中不同波长承载不同服务质量的 CATV 信号，每一波长对应同一类型需求的用户群，其中增益平坦光放大器（GF-OA）是为了克服各波长光信号的传输损耗和分波损耗。当网络的差异化服务程度较高且用户数较多时，使用 GF-EYDCFA 能够有效降低 OA 的单位功率成本。光迅科技 1W 和 0.5W 输出的 GF-EYDCFA 产品已成功应用于类似的 CATV 系统。

4 总结

本文介绍了增益平坦型铟镱共掺双包层光纤放大器（GF-EYDCFA）的基本原理：铟镱共掺双包层光纤放大技术和增益均衡技术相结合，能实现多波长信号光高功率且增益均衡地放大。光迅科技现有 GF-EYDCFA 产品的主要性能指标，如增益平坦度 $<0.25\text{dB}$ 和噪声指数 $<5.5\text{dB}$ ，与同类掺铟光纤放大器（EDFA）产品相当，但其输出功率大于 1W，远高于目前 EDFA 的最高水平。此外，结合光迅科技相关产品的应用实例，本文还介绍了 GF-EYDCFA 在 WDM-CATV 系统中的应用。GF-EYDCFA 能有效补偿多波长信号光的传输损耗和功率分配损耗，弥补了 EDFA 在输出功率水平方面的不足；同时 GF-EYDCFA 能大大减少光放大器的使用数量，节约成本，也能明显减小由于光放大器级联造成的增益平坦度劣化。