

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷



[12] 发 明 专 利 说 明 书

专利号 ZL 00819894.2

G02B 1/11

G02B 6/134

H01S 3/10

H01S 3/067

H01S 3/17

C03C 3/00

[45] 授权公告日 2005 年 7 月 27 日

[11] 授权公告号 CN 1212527C

[22] 申请日 2000.7.28 [21] 申请号 00819894.2

[86] 国际申请 PCT/US2000/020578 2000.7.28

[87] 国际公布 WO2002/010801 英 2002.2.7

[85] 进入国家阶段日期 2003.3.14

[71] 专利权人 里兰斯坦福初级大学理事会

地址 美国加利福尼亚州

[72] 发明人 Y·G·费兰斯

M·J·F·迪戈内

M·M·费耶尔

审查员 于行洲

[74] 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司

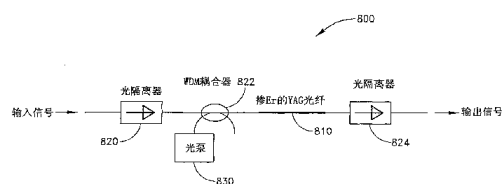
代理人 赵蓉民 彭益群

权利要求书 1 页 说明书 37 页 附图 25 页

[54] 发明名称 用于宽带光放大器的非晶化合物

[57] 摘要

在一个较宽的带宽上放大光输入信号的方法中，将光输入信号输入到由掺有稀土元素非晶材料（如掺铒钕铝氧化物材料）制成的光波导（810）内。该光输入信号包括的光信号的波长范围为至少 80 纳米，优选为至少 160 纳米。泵浦光（830）提供给光波导（810），使光波导（810）给光输入信号提供光增益。该光增益使光信号在波导（810）内放大，在加宽的 80 - 160 纳米的范围内提供放大的光信号，尤其包括该范围的一端波长和该范围的另一端波长的光信号。



ISSN 1008-4274

1、 一种在一个加宽的光带宽上放大光输入信号的方法，所述方法包括：

向包括掺有稀土的非晶 Y_2SiO_5 材料的光波导内输入光信号，所述光输入信号包括至少一个具有第一波长的第一光信号和一个具有第二波长的第二光信号，其中第二波长大于第一波长 160 纳米；及

对光波导施加泵浦光，使所述波导给光输入信号提供光增益，以便至少放大所述第一光信号和第二光信号。

2、如权利要求 1 所述的方法，其中所述非晶 Y_2SiO_5 材料掺有铒。

3、如权利要求 1 所述的方法，其中所述非晶 Y_2SiO_5 材料掺有铒和镱。

4、一种在一个加宽的光带宽上放大光输入信号的光放大器，所述光放大器包括：

一个提供光泵浦光的光泵浦源；和

一个包括掺有稀土的非晶 Y_2SiO_5 材料的光波导，所述光波导光耦合接收来自光泵浦源的光泵浦光，所述光波导接收具有多个波长的光输入信号，所述光输入信号包括至少一个具有第一波长的第一光信号和至少一个具有第二波长的第二光信号，所述第二波长大于所述第一波长 160 纳米，所述泵浦光在泵浦波长处具有一个泵浦波长和强度，使光波导提供光增益，以便至少放大所述第一光信号和第二光信号。

5、如权利要求 4 所述的光放大器，其中所述非晶 Y_2SiO_5 材料掺有铒。

6、如权利要求 4 所述的光放大器，其中所述非晶 Y_2SiO_5 材料掺有铒和镱。

用于宽带光放大器的非晶化合物

发明背景

技术领域

- 5 本发明涉及光放大器领域，更具体而言，本发明涉及包含一定长度的光导光纤的光放大器领域，其中光纤具有响应泵浦光而发出荧光的活性掺杂物。

背景技术

- 10 掺有铒的光纤放大器（EDFA）广泛应用于商业光学通信系统，既用作全光中继器，也用作预放大器。信息编码信号在通过很长的通信光纤（通常有数十公里）之后被光纤损耗大大削弱，掺有铒的光纤放大器（EDFA）的作用就是将这些信号放大到合理的功率水平。EDFA 的能效现在已经达到了最佳，减少了对泵浦功率（很昂贵）的要求。EDFA 的噪音性能已经进一步得到了优化，以致噪音数现在能够接近理论极限 3dB。最佳 EDFA 的增益平稳度现在超过数十纳米带宽数十 dB。EDFA 现在设计成能够使他们的增益很少依赖输入信号的偏振。

- EDFA 的一个还非常活跃的领域是增益带宽。该增益带宽参数非常重要，因为它最终确定能够由给定 EDFA 放大的不同波长的信号数。带宽越宽，则能够被放大的个别信号数越大，因此能够由严格单光纤携带的带宽（单位时间的信号比特）越大。由于基质影响铒离子的光谱，因此一直并将继续研究数种基质材料，包括硅石，氟磷酸盐玻璃和硫族化物，来试图确定一种能够为 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 转变提供更大的增益带宽的基质。在硅基玻璃内，带宽通常被分成 C 带和 L 带。在接近的术语中，C 带是低于约 1565 纳米的光谱部分，而所谓的 L 带是高于约 1565 纳米的光谱部分。C 带和 L 带的组合总带宽接近 80 纳米，尽管该数字迄今为止只是通过串联两个 EDFA 获得的。（例如参见 Y. Sun, et al., 80nm ultra-wideband erbium-doped silica fibre amplifier, Electronics Letters, Vol.33, No.23, November 1997, pp.1965-1967）。情况

与氟锆酸盐基质相同。(例如见 S. Kawai, et al., Wide bandwidth and long distance WDM transmission using highly gain-flattened hybrid amplifier, Proceedings of Optical Fiber Communication OFC'99, Paper FC3, February 1999, pp.56-58)。在亚碲酸盐光纤中, 总带宽大约也是
5 80 纳米, 但是可以用一个单光纤实现。(例如见 Y. Ohishi, et al., Optical fiber amplifiers for WDM transmission, NTT R &D, Vol.46, No. 7, pp.693-698, 1997; Y. Ohishi, et al., Gain characteristics of tellurite-based erbium-doped fiber amplifiers for 1.5 μ m broadband amplification, Optics Letters, Vol.23, No.4, February 1998, pp.274-276.)

10 图 1 表示一种具有一个掺铒光纤 (EDFA) 110 的标准 EDFA 构造 100 的示例。光信号经一个第一光频隔离器 120 和一个波分复用 (WDM) 耦合器 122 输入掺铒光纤 110 内。光泵浦源 124 发出的一个光泵浦信号也经该 WDM 耦合器输入到该掺铒光纤 110 内。掺铒光纤 110 发出的放大输出信号通过一个第二光隔离器 126 输出。光隔离器
15 126, 120 用于分别消除从输出口进入掺铒光纤 110 内的向后的反射, 和从掺铒光纤 110 到 输入口的向后的反射。如图 1 所示, 可以朝前方泵浦出掺铒光纤 110, 或者朝后方泵浦出, 或者朝两个方向泵浦出。由于光纤增益介质的广泛性, 图 1 的构造产生的增益超过大的带宽。例如, 在图 1 的构造中已经使用了掺铒的碲光纤和掺铒的硫族化物光纤。
20 如 Y. Ohishi, et al., Gain characteristics of tellurite-based erbium-doped fiber amplifiers for 1.5 μ m broadband amplification, Optics Letters, Vol.23, No.4, February 1998, pp.274-276 所述, 使用碲光纤已经产生了大约 80 纳米的增益带宽。

当该光纤基质是硅基玻璃时, 用一个单光纤不能够提供超过整个
25 带宽 (大约 1525 纳米到 1610 纳米) 的增益。作为替换, 需要在两个相邻光谱区域之间产生增益, 接着将从该注意得到的输出组合起来。一种获得较宽增益带宽的一般方法是使用混合的放大器, 其中两个或多个由不同基质组成的放大器连接起来。这些放大器设计成能够提供互相补充的增益谱, 因此产生比只用任何一个时更大的总增益带宽。
30 通过在一个硅基 EDFA 后连接一个氟基 EDFA, 该方法已经成功地得到了证实, 该方法产生了 17 纳米的 0.5-dB-带宽。(见 P. F. Wysocki, et

al., Dual-stage erbium-doped, erbium/ytterbium-codoped fiber amplifier with up to +26-dBm output power and a 17-nm flat spectrum, Optics Letters, Vol.21, November 1996, pp.1744-1746.)). 最近, 对两个氟基 EDFA 采用了相同的概念。(见 Y. Sun, et al., 80nm ultrawideband
5 erbium-doped silica fibre amplifier, Electronics Letters, Vol.33, No.23, November 1997, pp.1965-1967.)

图 2 表示具有两个 EDFA 210 和 220 的一例构造 200。一个 EDFA 用于放大 C 带宽 (大约 1525-1565 纳米), 另一个 EDFA (上 EDFA) 用于放大 L 带宽 (大约 1565-1620 纳米)。这两个 EDFA 210, 220 都
10 包括各自的泵浦源 (未示出), 它们使用各自的 WDM 耦合器与掺铒光纤耦合, 如图 1 所示。间隔开一定量的不同波长的输入信号随一个 WDM 耦合器 230 分成两部分, 放大的输出信号在一个输出耦合器 232 内结合。一个输入光隔离器 240 和一个输出光隔离器 242 如上述那样工作。由于 WDM 耦合器 230, 波长比 1565 纳米短的信号耦合到下面的分支内, 传播到 C 带 EDFA 210, 波长比 1565 纳米大的信号耦合到
15 上部分支内, 传播到 L 带 EDFA 22. (实际上, 在 C 带和 L 带之间有避免两边内信号重叠的窄的保护带)。例如, 硅基 EDFA 可以设计成具有一个在 1568-1602 纳米的范围内增益谱平稳度在 0.5dB 内的 L 带。该增益平稳度可以部分地通过选择适当的光纤长度或采用过滤器获得。
20 这两种方法都是本领域公知。

C 带 EDFA 210 和 L 带 EDFA 220 可以由相同的掺铒光纤, 或者由不同的光纤构成, 或者由不同的基质材料构成。C 带和 L 带 EDFA 210, 220 在设计上可以各自不同, 尤其是泵浦波长、泵浦构造和光纤长度不同。

25 L 带 EDFA 220 的上限大约为 1610 纳米。一些研究团体已经做了大量的努力来通过调整基质材料增加该上限。进一步增加该上限的困难在于对于碲玻璃而言在 1620 纳米左右和对于硅玻璃而言在 1610 纳米左右存在信号激发状态吸收 (ESA)。该 ESA 构成不希望有的信号损失机理。根据这些结果, 现在的硅基 (上面引用的 Y. Sun 等) 和氟基
30 EDFA (上面引用的 S. Kawai 等) 的带宽记录大约为 80-85 纳米 (即, 与上面引用的 Y. Ohishi 等的文章内公开的碲基 EDFA 带宽记录相同)。

发明内容

本发明一方面在于提供一种在一个加宽的光带宽上放大光输入信号的方法。该方法包括掺有稀土的非晶 Y_2SiO_5 。这些光输入信号包括
5 至少一个具有第一波长的第一光信号和一个具有第二波长的第二光信号，其中第二波长大于第一波长。该方法包括对光波导施加泵浦光，使所述波导给光输入信号提供光增益，以便至少放大所述第一光信号和第二光信号。

在该方法的一个实施例中，非晶材料是掺有铒的 Y_2SiO_5 ，第二波
10 长大约比第一波长长 160 纳米。或者，非晶 Y_2SiO_5 材料也可以掺有铒和镱。

在该方法的第二实施例中，该非晶材料是 $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ，第二波长大约比第一波长长 160 纳米。

在该方法的第三实施例中，该非晶材料是 $\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ ，第二波长大约
15 比第一波长长 140 纳米。

在该方法的第四实施例中，该非晶材料是 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ，第二波长大约比第一波长长 130 纳米。

在该方法的第五实施例中，该非晶材料是 $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ ，第二波长大约比第一波长长 130 纳米。或者，该非晶 $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ 材料也可以掺有
20 铒和镱。还或者，该非晶 $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ 材料也可以掺有铒和铬。

在该方法的第六实施例中，该非晶材料是 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ，第二波长大约比第一波长长 125 纳米。

在该方法的第七实施例中，该非晶材料是 GdAlO_3 ，第二波长大约比第一波长长 125 纳米。

25 在该方法的第八实施例中，该非晶材料是 $\text{SrY}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$ ，第二波长大约比第一波长长 125 纳米。

在该方法的第九实施例中，该非晶材料是 LiYF_4 ，第二波长大约比第一波长长 110 纳米。

在该方法的第十实施例中，该非晶材料是 $\text{CaF}_2\text{-YF}_3$ ，第二波长大约
30 比第一波长长 110 纳米。

在该方法的第十一实施例中，该非晶材料是 YVO_4 ，第二波长大约

比第一波长长 90 纳米。

在该方法的第十二实施例中, 该非晶材料是 $\text{LiErYP}_4\text{O}_{12}$, 第二波长大约比第一波长长 80 纳米。

本发明的另一个方法是一种能够在一个扩展的光带宽上放大光输入信号的光放大器。该光放大器包括一个提供光泵浦光的光泵浦源, 和一个包括一种掺有稀土的非晶材料的光波导。该光波导光耦合接收来自光泵浦源的光泵浦光。该光波导接收具有多个波长的光输入信号。这些光输入信号包括至少一个具有第一波长的第一光信号和至少一个具有比第一波长更大波长的第二波长的第二光信号。该泵浦光在泵浦波长处有一个泵浦波长和强度, 使光波导提供光增益, 以便至少放大所述第一光信号和第二光信号。

在该装置的一个实施例中, 非晶材料是掺有铒的 Y_2SiO_5 , 第二波长大约比第一波长长 160 纳米。或者, 非晶 Y_2SiO_5 材料也可以掺有铒和镱。

在该装置的第二实施例中, 该非晶材料是 $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, 第二波长大约比第一波长长 160 纳米。

在该装置的第三实施例中, 该非晶材料是 $\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, 第二波长大约比第一波长长 140 纳米。

在该装置的第四实施例中, 该非晶材料是 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$, 第二波长大约比第一波长长 130 纳米。

在该装置的第五实施例中, 该非晶材料是 $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$, 第二波长大约比第一波长长 130 纳米。或者, 该非晶 $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ 材料也可以掺有铒和镱。还或者, 该非晶 $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ 材料也可以掺有铒和铬。

在该装置的第六实施例中, 该非晶材料是 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, 第二波长大约比第一波长长 125 纳米。

在该装置的第七实施例中, 该非晶材料是 GdAlO_3 , 第二波长大约比第一波长长 125 纳米。

在该装置的第八实施例中, 该非晶材料是 $\text{SrY}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$, 第二波长大约比第一波长长 125 纳米。

在该装置的第九实施例中, 该非晶材料是 LiYF_4 , 第二波长大约比第一波长长 110 纳米。

在该装置的第十实施例中,该非晶材料是 $\text{CaF}_2\text{-YF}_3$,第二波长大约比第一波长长 110 纳米。

在该装置的第十一实施例中,该非晶材料是 YVO_4 ,第二波长大约比第一波长长 90 纳米。

5 在该装置的第十二实施例中,该非晶材料是 $\text{LiErYP}_4\text{O}_{12}$,第二波长大约比第一波长长 80 纳米。

附图说明

下面将结合附图描述本发明的这些和其它方面。

10 图 1 表示一例包括一个掺铒光纤的标准 EDFA 构造;

图 2 表示一例有两个 EDFA 的构造,其中一个 EDFA 放大 C 带,另一个 EDFA 放大 L 带;

图 3 表示非晶 YAG 光纤和在掺有各种浓度的铒和在 980 纳米下用大约 45 毫瓦泵浦出的非晶镧替代 YAG 光纤;

15 图 4 表示该非晶 YAG 光纤和该非晶镧替代 YAG 光纤的向后荧光谱测量谱;

图 5 表示铒摩尔浓度增加对掺铒非晶 YAG 和掺铒非晶镧替代 YAG 的向前和向后的带宽的影响;

20 图 6A 表示掺铒 1% 的非晶 YAG 光纤辐射的荧光的暂时衰变(张驰);

图 6B 表示掺铒 5% 的非晶 YAG 光纤辐射的荧光的暂时衰变(张驰);

图 7 表示铒浓度对掺铒非晶 YAG 光纤荧光的快光(下部曲线内的方形标记)和慢光(上部曲线内的圆形标记)的影响;

25 图 8 表示用于实现本发明的方法的第一实施例的一种放大器的第一构造;

图 9 表示用于实现本发明的方法的第二实施例的一种放大器的第二构造;

30 图 10 表示一个包括单一长度的掺铒非晶 YAG 光纤的前 L 带放大器;

图 11 表示类似图 8 的构造但是却具有用做 L 带放大器的更长的掺

钕非晶 YAG 光纤的一种放大器构造;

图 12 表示一种 L 带放大器的构造, 其中一个掺钕非晶 YAG 光纤位于两个 WDM 耦合器之间, 这些耦合器接收各个泵浦信号, 向前后两个方向泵浦出掺钕的非晶 YAG 光纤;

5 图 13 表示一种包括两个由一个 WDM 耦合器串联连接的掺钕非晶 YAG 光纤的 L 带放大器的构造, 其中带有引向前泵浦第二光纤的泵浦光;

图 14 表示一种包括由一个 WDM 多路复用器串联连接的第一掺钕非晶 YAG 光纤和第二掺钕非晶 YAG 光纤的放大器构造, 其中带有引
10 向后泵浦第二光纤的泵浦光;

图 15 表示从图 6A 和 6B 所示相同荧光衰变曲线测量的荧光功率的 $1/e$ 衰变时间常数, 其中 $1/e$ 时间常数代表快和慢时间常数的平均值;

图 16-23 是国际专利申请 PCT/US97/00466 中附图的再现, 该专利申请的申请日是 1997 年 1 月 9 日, 公开于 1997 年 7 月 17 日, 国际公
15 开号为 WO97/25284, 其附图和说明书在此引入用于说明一种制造一种光纤的方法, 用于完成本发明, 其中:

图 16 表示一种制造光纤的方法的光纤插入管拉制系统的一个实施例的示意图;

图 17 表示根据 WO97/25284 的原理, 沿相反的方向从过冷和漂浮
20 的融化物中拉制光纤的一种方法的一个实施例;

图 18 表示根据 WO97/25284 的原理, 从保持在圆锥形喷嘴漂浮器中的过冷融化物内拉制光纤的一种方法的一个实施例;

图 19 表示漂浮和融化在空气声学漂浮器内的 0.3cm 直径富铝红柱石 (mullite) 样品的典型冷却曲线图;

25 图 20 表示典型的铝-硅相图;

图 21 表示从保持在非等温容器内的过冷融化物中拉制光纤的一种方法的一个实施例;

图 22 表示富铝红柱石接近融化温度的行为的一部分异常铝-硅相图; 及

30 图 23 表示含富铝红柱石成分的玻璃光纤的典型张力测试结果图;

图 24 表示掺钕结晶铝石榴石 (LuAG) 的荧光谱。

具体实施方式

本发明涉及一种在较宽的增益带宽上放大光信号的方法。该方法部分依赖使用一种具有较宽荧光（fluorescent）带宽的光纤。更具体而言，Containerless Research 公司（CRI）最近已经研制了一种由固体均

5 衡融化点下形成几乎无粘液体的材料制造光纤和少量样品的方法。

（见 J. K. R. Weber, et al., Glass fibers of pure and erbium or neodymium-doped yttria-alumina compositions, Nature, Vol.393, 1998, PP.769-771; 及 Paul C. Nordine, et al., Fiber Drawing from Undercooled Molten Materials, 其国际公开号为 WO97/25284, 公开于

10 1997 年 7 月 17 日）。该国际专利申请 WO97/25284 在此引入作为参考。该国际专利申请的详细描述作为本申请说明书的一部分给出。

该方法包括完全融化一种固体，在处于或稍微高于结晶材料均衡融化点处形成一种成分均匀的液体。为了获得支持光纤拉制所要求的

15 粘性，要把该液体过冷（即冷却到其均衡融化点以下）。使用过冷来增加粘性在该方法中是一个主要步骤。接着从该粘性的过冷液体中拉制玻璃光纤。

该光纤合成方法的一个实施例使用无容器处理技术，能够避免接触固体容器壁产生的复相成核，允许深冷到低于结晶先兆材料融化点的温度。无容器处理技术消除了接触外部物体（例如坩埚带来的液体污染）。它们还可以用于从各种氧化材料中合成直径 2-3 毫米的玻璃球体。（例如见 J. K. R. Weber, et al., Enhanced Formation of Calcia-Gallia Glass by Containerless Processing, J. Am. Ceram. Soc. Vol.76, No.9, 1993, pp.2139-2141; 及 J. K. R. Weber, et al., Aeroacoustic levitation-A method

20 for containerless liquid-phase processing at high temperatures, Rev. Sci. Instrumen., Vol.65, 1994, pp.456-465）。新的光纤制造工艺已经应用于很多种既不含有二氧化硅（硅石）也不含有任何其它通过传统光纤制造技术制造的典型玻璃光纤成分的“网络”形成物。该方法允许生成直径通常为 10-30 微米长达 1 米的光纤。

30 一种可以通过该方法制造的原型材料是 $Y_3Al_5O_{12}$ 成分。本申请中讨论的这些材料是通过在材料内用镧（La），镱（Yb）和/或铒（Er）

替代钇(Y)原子形成的组分的改型。这些材料由纯氧化物按一定重量的混合物合成,这些氧化物是 Y_2O_3 , Al_2O_3 , La_2O_3 , Yb_2O_3 , Er_2O_3 , 每种组分的称重误差大约占总质量 0.5 克的 0.5 毫克。纯氧化物的纯度是 99.999%, 比 325 粉末小, 可以从 Cerac, of Milwaukee, Wisconsin 获得。

5 对于含 Er_2O_3 0.5 摩尔%的一种成分, 使用 Yb_2O_3 : Er_2O_3 等于 9: 1 的“母合金”能够容易称量掺杂剂。这些氧化物成分的混合物融化在激光炉融化器内, 首先融化并搅匀 0.5 克的样品, 然后通过再次融化物体内的碎片来获得大约 3 毫米的球体。(例如见 J. K. R. Weber, et al., Laser hearth melt processing of ceramic materials, Rev. Sci. Instrum., Vol. 67,

10 1996, pp.522-524)。这些球体接着由激光光束在一个空气声学悬浮器(例如如 J. K. R. Weber, et al., Aero-acoustic levitation-A method for containerless liquidphase processing at high temperatures, Rev. Sci. Instrumen., Vol.65,1994,pp.456-465 中所述的)或在一个锥形喷嘴悬浮器(如 J. P. Coutures, et al., Contactless Treatments of Liquids in a Large

15 Temperature Range by an Aerodynamic Levitation Device under Laser Heating, Proc. 6th European Symposium on Materials under Microgravity Conditions, Bordeaux, France, December 2-5,1986,pp.427-30; J. K. R. Weber, et al., Containerless LiquidPhase Processing of Ceramic Materials, Microgravity Sci. Technol., Vol.7,1995,pp.279-282; S. Krishnan, et al.,

20 Levitation apparatus for structural studies of high temperature liquids using synchrotron radiation, Rev. Sci. Instrum., Vol.68,1997,pp.3512-3518 所述)中受热得到悬浮和融化。

在无容器条件下, 切断加热激光光束的电源使液体样品迅速冷却到室温可以制备玻璃球。可以通过减少加热激光器的功率直到液体温度

25 度为 1600° - 1700° K 来制备玻璃光纤, 其中液体粘性足以进行光纤牵引。接着将钨丝插入管迅速插入融化物中, 并以恒定的的大约为 100 厘米/秒的速度抽出来从该融化物中牵引光纤。上述部分过程描述在 Paul C. Nordine, et al., Fiber Drawing from Undercooled Molten Materials 中, 它是公开号为 WO97/25284 的国际专利申请, 公开于 1997 年 7 月 17 日,

30 在此公开了其中的一部分。

纯 $Y_3Al_5O_{12}$ 的结晶形态公知的是钇铝石榴石或简称为 YAG。这里所述的“YAG”指结晶材料。掺有钕离子(Nd^{3+})是将要论证的最早

和最成功的激光器材料。钕-YAG (Nd: YAG) 激光器可以购买已经有 25 年之多，他们现在仍然是一个最有效和功率最高和最广泛使用的激光器。相反，这里论述的 $Y_3Al_5O_{12}$ 成分的非晶光纤将被称作非晶 YAG，由镧替代的 $Y_3Al_5O_{12}$ 光纤将被称为由非晶镧替代（或由 La 替代）的 YAG 光纤。

YAG 和这里论述的材料有两个主要差别。首先，这里描述的材料不同，因为它们与 YAG 相比是非晶的玻璃材料，它是一种结晶材料。其次，这里论述的材料含有镧 (La) 原子，铽 (Yb) 原子，和/或铒 (Er) 原子取代 $Y_3Al_5O_{12}$ 成分中的一些钕 (Y) 原子。这里讨论的材料将被称为掺铒非晶 YAG，掺铽非晶 YAG，非晶镧替代 YAG 或非晶 YAG。该术语源于不同的目的，用于铒原子，铽原子和镧原子替代钕原子。铒原子和铽原子替代在基质玻璃材料内的光学活性掺杂剂。

元素钕、镧、铒和铽是“稀土”族元素，即这些元素的原子序数为 21、39、57 到 71 个。这些稀土元素有+3 的原子价，尽管一些稀土元素尤其是铽也会有+2 的原子价。该说明书中合成的所有材料的一般化学式都可以书写为 $RE_3Al_5O_{12}$ ，其中“RE”的下标“3”代表 Y、La、Er、Yb 的总量。这些玻璃球和光纤含有镧和或铒，并在空气、纯氩气或纯氧气中制造。尽管在此已经针对前面的稀土元素进行了描述，但是可以理解也可以使用其他稀土材料。

用镧原子、铒原子和铽原子替代钕原子合成的非晶 YAG 成分的材料化学成分由表 I 给出：

化学成分，摩尔百分数					形成的玻璃材料	
Al_2O_3	Y_2O_3	La_2O_3	Er_2O_3	Yb_2O_3	光纤	球体
62.5	37.5	0	0	0	X	X
62.5	37.49	0	0.01	0	X	
62.5	37.45	0	0.05	0	X	X
62.5	37.4	0	0.1	0	X	X
62.5	37.2	0	0.3	0	X	X
62.5	37.0	0	0.5	0	X	X
62.5	36.5	0	1.0	0	X	X
62.5	35.5	0	2.0	0	X	X

62.5	32.5	0	5.0	0	X	X
62.5	29.5	0	8.0	0	X	X
62.5	12.5	12.5	12.5	0	X	X
62.5	17.75	17.75	2.0	0	X	X
62.5	17.75	11.75	8.0	0	X	X
62.5	32.0	0	0.5	0.5		X

掺杂的和替代的非晶 YAG 材料的一个最吸引人的特点是他们可以掺有很高浓度的 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 或其他稀土离子。能够在玻璃中得到的最大浓度取决于 Er_2O_3 在玻璃中的溶解率。如果稀土氧化物在玻璃融化物中的浓度太高，那么结晶氧化物粒子沉淀在基质内。这些结晶粒子通常是对具有该材料的激光器和放大器性能有害的。限制一些材料尤其是硅基玻璃内掺杂物浓度的第二个因素是基质材料内溶解的掺杂物离子簇的形成，该形成发生在在浓度小于危害氧化物粒子规定浓度的浓度下。

不象铒离子那样均匀地分布在基质中，成簇的铒离子受到一种公知的交叉驰豫的有害过程。（例如见 J. L. Wagener, et al., modeling of ion pairs in erbium-doped fiber amplifiers, Optics Letters, Vol.19, March 1994, pp.347-349）。通过该过程，当两个离子受到光激发成为亚稳定（激光器）状态时，其中的一个离子迅速失去了其能量，把能量给了另外一个离子，导致了不希望出现的粒子数反转损失和光增益的巨大减少。在硅基玻璃中，在该作用变得显著之前，可以使用的最大铒浓度大约为百万分之 100（ppm）摩尔 Er_2O_3 。为了避免这种影响，绝大多数硅基光纤激光器和放大器使用少于 500ppm 摩尔的 Er_2O_3 。这个数字在氟基光纤中是比较高的，其中几千 ppm 的浓度是可以接受的。（例如见 J. S. Sanghera, et al., Rare earth doped heavy-metal fluoride glass fiber, in Rare Earth Doped Fiber lasers and Amplifiers, M. J. F. Digonnet, Ed., Marcel Dekker, Inc., N.Y., 1993）。在碲光纤中，该数字是几千 ppm，即一摩尔百分比的十分之几。（见 Y. Ohishi, et al., Gain characteristics of tellurite-based erbium-doped fiber amplifiers for 1.5- μm broadband amplification, Optics Letters, Vol.23, No.4, February 1998, pp.274-276）。这些浓度限制的主要后果是单位长度上如此多的离子都能够被组合在

一个光纤内，长光纤用于制造有用的装置，这样成本高、体积大。例如，一种典型的硅基 EDFA 要求数十米长度的掺杂光纤。

人们已经对掺有 Er^{3+} 的新玻璃材料的光谱性能的早期实验研究。这些研究的一个目的是给这些材料添加新的几个光学性能，或者是球体或者是光纤形态的。尤其是，该研究是将材料的吸收和辐射交叉部分引向是否存在簇（交叉弛豫）和在这样的浓度，荧光光谱的带宽（它反映该材料的增益带宽）。

为了光学特征的目的，将长度短的掺铒非晶 YAG 光纤插入毛细管内，接着与 UV 熟化环氧树脂结合，然后抛光。通常在相同的毛细管内安装四到五个具有相同基质和铒浓度的光纤。制备几个毛细管，其中每个都具有几种浓度（0.5, 1, 2, 5, 8 摩尔%的 Er_2O_3 ）。这些光纤是暴露的。这些光纤的外径大约为 30-15 微米或更小，在抛光后光纤的长度为大约 5 毫米或大约为 10 毫米。已经对两种新的氧化物玻璃基质成分进行了实验，也就是非晶 YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ，用铒替代 Y) 和非晶镧替代 YAG 光纤，其中 50% 的铈用镧替代 ($\text{La}_{1.5}\text{Y}_{1.5}\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ，用铒替代 La 和 Y)。对于所有测量，这些光纤用 980 纳米 50 毫瓦的光功率从市场上可以购买的辫状光纤激光器二极管泵浦出。

通过测量输出和输入泵浦功率的比值，然后假定泵浦入光纤内的耦合为 100%，并在每个光纤端部修正菲涅尔（Fresnel）反射（大约 8.3%），可以测量光纤吸收。菲涅尔反射是在假定材料的折射系数与晶体 YAG 的折射系数相同的情况下计算的，该系数在这些波长下大约为 1.8。从这些数据可以推导出吸收系数 α_a ，以及吸收交叉部分 $\sigma_a = \alpha_a / N_0$ ，其中 N_0 是光纤中的铒浓度。在具有两种不同浓度的几种样品中观察到的平均值是 $\sigma_a = 2.4 \times 10^{-21} \text{cm}^2$ 。它能够与标准值为 $2.2 \times 10^{-21} \text{cm}^2$ 的掺铒硅光纤相比。

图 3 表示在非晶 YAG 光纤内和非晶镧替代 YAG 光纤内测量的荧光光谱，其中光纤长度为 0.5-1.0 厘米，直径为 30 微米，掺有各种浓度的铒，在 980 纳米以大约 45 毫瓦泵浦出。这些谱是从前方测出的，即该谱代表按照与光纤的泵浦出方向相同的方向辐射出的荧光。所有光谱都是宽的，并且不受掺铒晶体的转变线的影响。该观察证实了 X 线衍射分析的结果，它表明从 YAG 成分的过冷液体中牵引的光纤是非晶的。

(例如见 J. K. R. Weber, et al., Glass fibers of pure and erbium or neodymium-doped yttria-alumina compositions, Nature, Vol.393, 1998, pp.769-771)。在铒浓度低的光纤中, 该谱表现出的特性是: 在其他氧化物玻璃内通常具有低功率的 Er^{3+} 荧光谱, 即峰值在 1530 纳米左右, 平的侧翼大约在 1550 纳米左右。在较高浓度下, 这些特性变得不明显, 光谱朝长波长移动, 因为泵浦功率不足以激发所有铒离子, 基态吸收筛选出 1530-1550 纳米带宽 (C 带)。在这些光纤中, L 带 (波长大于 1565 纳米) 更突出。该材料的 L 带极宽。在 1 厘米和掺杂 8% 的光纤内, L 带拓宽到 1653 纳米。人们已经观察到 3dB 荧光带宽在 1 厘米和掺杂 5%YAG 光纤内达到 116 纳米。这远远高于以前报道的任何基质内的铒转变带宽。作为一个比较点, 在 1650 纳米的标准掺铒硅基光纤内, 荧光功率通常从 1530 纳米处的峰值下降 50dB。相反, 在本发明的非晶 YAG 光纤内, 荧光功率只减少大约 12dB (见图 3)。这可以解释成一种荧光光谱, 该谱从 20-40 纳米进一步拓宽到比掺铒硅基光纤更长的波长。

后荧光光谱表示在图 4 中, 其中表示了 C 带的特点, 如期望的那样, 但是这里的光谱也非常宽。在 0.5 厘米掺杂 8% 的 YAG 光纤中, 对于后光谱观察到的最高 3-dB 的带宽是 121 纳米。

前和后荧光带宽通常都随浓度的增加而增加, 如图 5 所示。菱形代表掺铒非晶 YAG, 而圆圈表示掺铒非晶镧替代 YAG。前和后荧光分别由实心 and 空心符号表示。在实验误差内, 这两种材料都具有大体相同的性能。

通过在输入泵浦束路径内放置一个 80MHz 的声光调制器 (acousto-optic modulator), 将泵浦强度调制成大约 20 毫秒长和衰减时间短 (大约 5 毫秒) 的方脉冲可以测量荧光的临时弛豫。接着用快速光电探测器记录在每个泵浦脉冲之后光纤辐射的荧光的临时衰减。对于低的浓度, 弛豫曲线表现出单指数衰减, 如图 6A 中对于 1% 掺铒非晶 YAG 光纤所示的。对于较高的铒浓度, 弛豫曲线不再是单指数的, 而是随时间增加的具有时间常数的指数衰减。对于 5% 掺铒非晶 YAG 光纤, 这表示在图 6B 中。该曲线随时间常数 τ_1 开始衰减。随时间变化, 该常数增加 (衰减斜率), 直到在衰减曲线的下端时间常数达到渐进值

τ_2 (比 τ_1 大)。

图 6A 和 6B 中另一个显著的重要结果是这些光纤基本不受铒簇影响, 即使在最高浓度下。如果出现这些簇, 那么弛豫曲线表现出首先由于簇离子而非常快的弛豫成分, 然后由于非成簇离子的慢成分。(例如见 P. F. Wysocki, et al., Evidence and modeling of paired ions and other loss mechanisms in erbium-doped silica fibers, in SPIE Proceedings on Fiber Laser Sources and Amplifiers IV, Vol. 1789, 1993, pp.66-79)。在其他材料中, 快速成分通常比辐射寿命小 2-3 个数量级 (即期望它为 100 微秒以下)。每个有观察到这种成分的事实表明在这两个新基质中存在可忽略的铒离子簇, 其浓度达到在非晶 YAG 中 80%, 这大约比硅基玻璃中无簇浓度的高 600 倍。

从对所有浓度测量的衰减曲线中推导出的寿命 τ_1 和 τ_2 绘制在图 7 中。方形代表快速成分 (τ_1) 的寿命, 圆圈代表慢速成分 (τ_2) 的寿命, 实心 and 空心符号分别代表非晶 YAG 基质光纤和非晶镧替代 YAG 基质光纤。两个寿命都随铒浓度的增加而单调减少, 如通常在其他基质中观察到的那样。慢成分 τ_2 是辐射寿命。在 5% 和 8% 的 YAG 光纤内测量的最低辐射寿命大约是 4 毫秒, 而最短寿命是 0.6-1.0 毫秒 (也是在这些材料内)。相比之下, 在现在作为商业 EDFA 的碲玻璃内的铒的寿命为几毫秒, 而在硅基玻璃内通常为 8-10 毫秒。

为了更好地估算两种材料的相对性能, 图 15 表示了从与图 6A 和 6B 相同的荧光衰减曲线中测量的荧光功率的 $1/e$ 衰减时间常数。 $1/e$ 时间常数代表快时间常数和慢时间常数的平均值, 在某种意义上, 它提供铒离子激发状态的测量平均寿命 (该平均寿命尤其部分控制放大器的动力学和饱和性能)。图 15 表示 $1/e$ 寿命随铒浓度增加单调减少, 镧替代材料内的铒有较短的寿命, 尽管这两种材料的差异在实验误差内。结论是在两种材料内的铒表现出大致相同的带宽和相同的寿命, 比非晶 YAG 稍微有利。

玻璃光纤掺有一种以上的稀土离子, 利用了两种或两种以上掺杂机物样品材料相互作用的优点。例如, 掺铒光纤掺有 Yb^{3+} , 能够泵浦出接近 1.06 微米的铒离子。(例如, 见 J. E. Townsend, et al., Yb^{3+} sensitised Er^{3+} doped silica optical fibre with ultrahigh transfer efficiency

and gain, Electronics Letters, Vol.10, No.21, 1991, pp.1958-1959)。原因是在某些方面对泵浦出大约 1.06 微米的 EDFA (其他掺铒光纤装置), 一种可以在更大功率下可以得到的低成本的激光波长, 它来自商业 Nd: YAG 激光或覆层的掺钕光纤激光器, 比现在用做泵浦源的 980 纳米和 1480 纳米的激光器二极管更有利。Er³⁺不能表现出 1.06 微米的吸收带, 但是 Yb³⁺可以。在掺有 Er³⁺和 Yb³⁺和泵浦出的接近 1.06 微米的光纤中, 泵浦能量由 Yb³⁺离子吸收。由于 Yb³⁺ (²F_{5/2}) 的激发状态具有的能量与 Er³⁺的 ⁴I_{11/2} 能级 (level) 相近, 该激发的 Yb³⁺离子的能量迅速转移到邻近的 Er³⁺离子的 ⁴I_{11/2} 能级。来自该 ⁴I_{11/2} 能级的下一个弛豫将铒离子带到潜在的激发状态 (⁴I_{13/2} 能级)。实际上, 镱离子通过吸收泵浦和将所需能量传递给铒离子而作为中介物。该原理在光纤中的使用目的与上述表 I 中最后的项目中表示的掺镱/铒的非晶 YAG 光纤的相同。

在掺有铒之外的其它稀土离子的玻璃光纤也已经被证实具有其他光纤和波导装置的潜在商业重要性。尤其是, 连续波 (CW)、Q 开关和模式锁定的光纤激光器, 无论工作在从紫外光直到远红外光都已经被证实了。(例如见 Rare Earth Doped Fiber Lasers and Amplifiers, M. J. F. Digonnet, Ed., Marcel Dekker, Inc., New York, 1993)。上述这些实验结果, 已经用 Er³⁺的 ⁴I_{13/2}→⁴I_{15/2} 转换收集在一起, 但是他们的普遍性不应该被忽略。

这里描述的掺铒非晶 YAG 光纤的特点是能够提供一种在比现有装置和方法提供的带宽更宽的带宽上放大输入信号的方法。通过用掺铒非晶 YAG 光纤替代硅基掺铒光纤, 与现有公知放大器大约为 1620 纳米的上限相比, 同样的放大器构造在大约扩展到 1650 纳米的带宽上提供放大作用。

采用本发明的方法的第一构造 800 表示在图 8 中。图 8 与图 1 相似, 但是在图 8 中, 传统掺铒光纤 110 被掺铒非晶 YAG 光纤 810 取代。为与上述图 1 相关联, 还包括一个第一光隔离器 820, 一个波分多路复用 (WDM) 耦合器 822, 一个第二光隔离器 824, 和一个光泵浦源 830。

图 8 中的本发明的方法的操作与图 1 中的 EDFA 100 的操作相似。但是, 与图 1 中的构造的操作方法相对照, 施加于图 8 中实施例的光信号包括大约 1610 纳米-1653 纳米的 L 带上部范围内的波长。由于掺

钇非晶 YAG 光纤 810 的带宽加宽, 波长为 1610-1653 的光信号在掺钇非晶 YAG 光纤 10 内得到放大。因此, 与以前构造的操作方法相比, 图 8 的构造的操作方法提供了一个加宽的增益带宽。换言之, 除了泵浦朝后输入或朝前后两个方向输入之外, 可以采用与图 8 相同的方案。

5 图 3 表示非晶 YAG 材料和非晶镱替代 YAG 材料的 C 带都极宽, 该 C 带加宽到大约 1481 纳米 (3-dB 点)。例如, 在 0.5 厘米和掺钇 8% 的非晶 YAG 光纤中, $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ 转换谱中主要也是含有更短波长部分的后荧光谱大约从 1482 纳米扩展到 1603 纳米 (3dB 点)。本发明的另一方面是一种操作采用图 8 的构造的 C 带放大器来放大波长大约为
10 1480 纳米或高于 1480 纳米到 1565 纳米或低于 1565 纳米多个信号的方法。该范围中较低的波长即约 1480 纳米大体低于其它公知基质内相同转换 Er^{3+} 报告的值。

图 9 表示使用本发明的方法的又一个构造 900。图 9 的构造 900 与图 2 的构造 200 相同, 并包括一个较低 C 带 EDFA 910 和一个较高的 L 带 EDFA 920。这些输入光信号通过一个 WDM 耦合器 930 与 EDFA
15 910 和 920 耦合。EDFA 910 和 920 的输出在耦合器 WDM 932 内结合, 这些组合输出提供给一个输出口。每个 EDFA 910 和 920 够有一个或多个各自的泵浦源 (未示出)。在图 9 中, 较高的 (L 带) EDFA 920 包括一个上述的掺钇非晶 YAG 光纤 940。较低的 (C 带) EDFA 910 也包
20 括一个掺钇的非晶 YAG 光纤 950, 但是, 较低 EDFA 910 和较高 EDFA 920 还可以是一种使用传统硅基或其他玻璃基光纤的传统 EDFA。第一光隔离器 60 防止从 EDFA 910、920 到输入口内的后反射。第二光隔离器 962 防止从输出口到 EDFA 910 和 920 内的后反射。

通过施加波长为约 1481 纳米或低于 1481 纳米到大约 1653 纳米或
25 高于 1653 纳米的输入光信号, 采用图 9 中的构造 900 操作。该 WDM 耦合器 930 分开输入光信号, 使波长小于约 1565 纳米的输入光信号与较低 EDFA 910 耦合, 使波长大于约 1565 的输入光信号与较高 EDFA 920 耦合。较低 EDFA 910 放大范围大约为 1481 纳米-1565 纳米的信号, 通过耦合器 932 给输出口提供放大后的输出信号。较高的 EDFA 920
30 放大大约 1565 纳米-1653 纳米范围内的信号, 通过耦合器 932 给输出口提供放大信号。本领域的普通技术人员可以理解, 光输入信号内的

静带可以在 1565 纳米附近提供, 排除通过 EDFA 910 和 920 在该波长下放大信号。如前所述, 在较高 EDFA 920 或较低 EDFA 920 或这两个 EDFA 内使用掺铒非晶 YAG 在比以前更大的带宽上提供放大作用。

图 9 中的较高 (L 带) EDFA 920 也可以如图 19-14 中所述实施例之一那样构成。

图 10 表示如上所述的那样具有一个单一长度 1010 的掺铒非晶 YAG 光纤的前 L 带放大器 1000。该光纤 1010 由一个光泵浦源 1020 通过一个第一 WDM 耦合器 1022 的一个输入泵浦。输入口 1030 的输入光信号通过一个第一光隔离器 1032 和一个第一 WDM 耦合器 1022 的第二输入提供给输出口 1034。光纤 1010 的输出通过一个第二光隔离器 1036 提供给输出口 1034。图 10 中的放大器 1000 的输入口 1030 与图 9 中的 WDM 耦合器 930 的上输出口耦合, 输出口 1034 与图 9 中的耦合器 932 的上述入口耦合。在图 10 中, 光泵浦源 1020 包括一个在第一光泵浦波长 λ_{p1} 下提供泵浦光的第一光泵浦 1050 和第二光泵浦波长 λ_{p2} 提供光泵浦波长的第二光泵浦 1052。两个泵浦 1050, 1052 的输出在第二 WDM 耦合器 1054 内耦合。第二 WDM 耦合器 1054 的输出作为复合泵浦信号提供给第一 WDM 耦合器 1022 的第一输入。这两个泵浦信号可以按其他公知的方法多路传输。在一种最佳操作方法中, 第一泵浦波长 λ_{p1} 为 980 纳米或 1480 纳米 (或为优选不受到泵浦激发状态吸收的另一 Er^{3+} 泵浦波长), 该第二泵浦波长 λ_{p2} 大约为 1555 纳米。这些泵浦信号可以用半导体激光器或用其它固态激光器产生。这两个波长 λ_{p1} , λ_{p2} 从第一 WDM 耦合器 1022 进入光纤 1010 内。第一泵浦波长 λ_{p1} 与 C 带 EDFA 内的泵浦波长的作用相同。尤其是, 第一泵浦波长 λ_{p1} 在光纤 1010 内产生了粒子数反转, 因此提供了增益。但是, 该增益谱在 C 带内最大, L 带内较弱。结果, 在 C 带内同时辐射被大大地放大了, 产生了一个很强 C 带放大的同时辐射 (amplified spontaneous emission, 即 ASE), 其在光纤 1010 的整个增益带宽上使增益衰减, 包括 L 带内的增益。因此, L 带内的增益减少, 通常 L 带内的增益太低而不具有实际使用价值。为了提高 L 带的增益, C 带 ASE 被减少。在采用图 10 构造的操作方法中, C 带 ASE 被波长 λ_{p2} 的第二泵浦减少。第二泵浦的波长选择为大约 1555 纳米, 与 C 带内的高增益区域一致。

在进入光纤 1010 内的波长 λ_{p2} 的泵浦得到很强地放大，导致 C 带和 L 带内增益衰减。当时波长为的 λ_{p2} 泵浦在 C 带 ASE 内也显著地减少了功率（例如见 J. F. Massicott, et al., Low noise operation of Er^{3+} doped silica fibre amplifier around $1.6\mu\text{m}$, Electronics Letters, Vol.28, No.20, Sept.1992, pp.1924-1925）。在 C 带 ASE 内减小的功率导致两个带内增益增加。在这两个相对立的效果中，后者占优势的，因此 L 带增益增加，甚至优于 C 带增益。这种类型 L 带放大器有良好的（低）噪音特征，但是其增益效率低（它需要一个高泵浦功率来产生一定的增益）。

图 11 表示一个与图 8 的构造类似的构造 1100。该构造 1100 包括一个前泵浦的掺铒非晶 YAG 光纤 1110。该光纤 1110 可以 980 纳米或 1480 纳米（另一个无 ESA 泵浦的铒波长）通过一个 WDM 耦合器 1130 从光泵浦源 1120 泵浦出。第一和第二光隔离器 1140 和 142 如上述那样操作。

图 11 中表示的构造是前泵浦构造。后泵浦和双向泵浦也是可能的。铒在 C 带内表现出很强的基态吸收（GSA），但是在 L 带内很少或没有 GSA。GSA 随着 L 带内波长的增加而减少。然后，随着光纤 1110 的增加，在某些点处，C 带波长的 GSA 变得如此大，以致于对于给定泵浦功率没有增益，在 C 带内反而是损失。另一方面，在 L 带内只有很少的 GSA，可以获得增益。因此，一种在 L 带内具有相当大的增益的常规放大器设计方法是选择足够长的光纤，例如，是相同类型光纤的 C 带放大器要求的两倍。该方法破坏了 C 带的增益，极大地减少了 C 带内 ASE。因此，图 11 的构造变成了一个可以与图 9 中构造的上边结合的 L 带放大器。

图 12 表示 L 带放大器的又一个构造，该构造与图 11 所示放大器的构造相似。该构造 1200 包括一个位于 WDM 耦合器 1220，1222 之间的掺铒非晶 YAG 光纤 1210。第一 WDM 耦合器 1222 通过一个第一光隔离器 1232 与输出口 1240 耦合。第二 WDM 耦合器 1222 通过一个第二光隔离器 1242 与输出口 1240 耦合。一个第一光泵浦源 1250 通过第一 WDM 耦合器 1220 与该光纤 1210 耦合，在光纤 1210 内沿从第一 WDM 耦合器 1220 朝第二 WDM 耦合器 1222 的方向传播泵浦光。一个第二光泵浦源 1252 通过该第二 WDM 耦合器 1222 与该光纤 1210 耦合，

在光纤 1210 内沿从第二 WDM 耦合器 1222 朝第一 WDM 耦合器 1220 的方向传播泵浦光。因此，来自这两个源的泵浦光在该光纤 1210 内双向传播。使用传统掺铒光纤的一种同样的双向构造例如公开在 H. Ono, et al., Gain-flattened Er^{3+} -doped fiber amplifier for a WDM signal in the 1.57-1.60- μm wavelength region, IEEE Photonics Technology Letters, Vol.9, No.5, May 1997, pp.596-598 中，其表示了一种使用常规的掺铒硅光纤的类似实施例。图 12 的构造与图 11 的构造操作方式相同。朝后向提供泵浦光第二泵浦源 1252 用于调节增益谱。尤其是，该增益谱可以通过适当地调节后泵浦功率而在很大 L 带带宽上被平稳。

10 图 13 表示一种 L 带放大器的另一种构造 1300。该构造 1300 包括两个掺铒的非晶 YAG 光纤 1310, 1312，它们通过一个 WDM 耦合器 1320 串联连接。尤其是，一个输入口 1330 通过一个第一光隔离器 1332 与第一光纤 1310 的一端耦合。第一光纤 1310 的另一端与 WDM 耦合器 1320 的一个输入连接。一个泵浦源 1340 与 WDM 耦合器 1320 的第二输入连接。WDM 耦合器 1320 的输出与第二光纤 1312 的一端连接。第二光纤 1312 的另一端通过一个第二光隔离器 1352 与输出口 1350 连接。泵浦源 1340 提供的泵浦光的波长优选为大约 980 纳米或约 1480 纳米。泵浦源 1340 泵浦第二光纤 1312，在第二光纤 1312 内产生增益。第二光纤 1312 在后向产生放大的同时辐射 (ASE)，即朝 WDM 耦合器 1320 辐射。来自第二光纤 1312 的 ASE 通过 WDM 耦合器 1320 耦合在第一光纤 1310 内。该 ASE 中心大约为 1550 纳米 (C 带)，该 ASE 被第一光纤 1310 吸收。该第一光纤 1310 因此被光泵浦出，并在 L 带区域内产生增益。例如见 J. Lee, et al., Enhancement of the power conversion efficiency for an L-band EDFA with a secondary pumping effect in the unpumped EDF section, IEEE Photonics Technology Letters, Vol.11, No. 1, Jan. 1999, pp.42-44，其中表示了一个使用传统掺铒硅光纤的类似实施例。

30 图 14 表示一个与图 13 的构造类似的构造 1400。该构造 1400 包括通过一个 WDM 多路复用器 1420 串联的一个第一掺铒非晶 YAG 光纤 1410 和一个第二掺铒非晶 YAG 光纤 1412。尤其是，一个输入口 1430 通过一个第一光隔离器 1432 与第一光纤 1410 的一端耦合。第一

光纤 1410 的另一端连接到 WDM 耦合器 1420 的输入上。泵浦源 1440 连接到 WDM 耦合器 1420 的第二输入上；但是，不象图 13 那样，泵浦源 1440 连接 WDM 耦合器 1420 的第二输入上，与 WDM 耦合器 1420 的第一输出相对。WDM 耦合器 1420 的输出连接第二光纤 1412 的一端。

5 第二光纤 1412 的另一端通过一个第二光隔离器 1452 连接到一个出口 1450。在构造 1400 中，来自泵浦源 1440 的泵浦光直接到第一光纤 1410 上，第一光纤 1410 在 1555 纳米周围的 ASE 为第二光纤 1412 提供了泵浦光。图 14 中向后泵浦出的双重 EDFA 比图 13 中向前泵浦出的双重 EDFA 效果稍微差一些。例如见 J.Lee, et al., Enhancement of the

10 power conversion efficiency for an L-band EDFA with a secondary pumping effect in the unpumped EDF section, IEEE Photonics Technology Letters, Vol.11, No. 1, Jan. 1999, pp.42-44, 其中表示了一个使用传统掺铒硅光纤的类似实施例。

显然，在本领域中，这些不同的构造提供了一定的优点，如效率

15 和噪音特性，另外还有尺寸、复杂性、成本、生产的重复性等。此外，在一定类型的应用中可以优选一种特定的构造，在另一种应用中可以优选另一种构造。

与公知的使用其它光纤或波导如包括硅、氟锆酸盐、亚碲酸盐等构成放大器的方法相比，本发明的方法有很多优点。例如，一个优点

20 是 C 带的带宽比其它公知材料中的铒的带宽宽。已经观察到在一些材料成分内荧光小到大约 1481 纳米（3-dB 点），表示 C 带短波长尾部上带宽加大。因此，在这些非晶 YAG 组分材料内，增益带宽大体在 C 带的短波长尾部都加宽了。

该方法的第二个特点是 L 带的带宽比其他公知宽带材料内铒的带宽更宽。已经观察到在一些材料组成内，荧光达到约 1653 纳米（3dB 点），这表明 L 带长波长尾部上带宽增加。L 带带宽约比任何其他公知的光纤材料内的铒的带宽宽 60%。

25

该方法的第三个特点是通过结合上述 L 带放大器和上述 C 带放大器，使用图 9 所示普通电路，或使用图 8 所示的电路，得到的放大器

30 在一个带宽上给的 C 带加 L 带增益比任何公知宽带材料内铒的增益更宽。例如，使用图 9 的电路，能够观察到大约为 1481 纳米到 1653 纳

米的荧光，或者一个大约 172 纳米的 3dB 带宽，它大约是用其他公知宽带材料内铒观察到的最宽荧光带宽的两倍。

该方法的第四个特点是可以使用非常短 L 带和 C 带光纤放大器实现，一个特点是有几个好处，例如更紧凑并减少了成本。在技术上的另一个重要的好处是该方法能够减少有害的非线性效应，它们是公知 L 带放大器关注的一个问题。在任何光纤内，当在传输信号的传输长度上传输信号强度的结果太大时，开始产生一些非线性效应，例如受激发的 Brillouin 散射 (stimulated Brillouin scattered, SBS) 和交相调制 (cross-phase modulation, XPM)。两种效应都对 EDFA 的操作有害。SBS 将向前传输的信号光转换成向后传输的信号光，其中带有一个相关的频移。向后传输光和频移的产生都是有害的。XPM 效应能够引起编码在一个信号上的信息部分地传给另一个信号，导致不必要的串话。该 SBS 效应和 XPM 效应在光纤连接的通信部分内和 EDFA 本身内发生。该通信光纤非常长 (几十公里)，但是通信光纤的方式字段比较大 (即对于给定泵浦功率强度低)，这就减少了通信光纤内的 XPM 和 SBS 效应。另一方面，一个 EDFA 涉及一个长度更短的光纤，但是其方式字段通常相当小 (即掺铒光纤携带的信号强度比通信光纤的更高)。因此，XPM 效应在一个 EDFA 内可能更强，尤其是在传统的 L 带 EDFA 内，它们涉及一个比传统 C 带 EDFA 更长的掺铒光纤。用在本发明的方法中的掺铒非晶 YAG 材料通过大体在铒浓度比值内减少光纤长度而避免了这些问题，它通常是 100 或更多个因数中的一个。因此，这些光纤内 XPM 效应和 SBS 效应的效率也由于光纤长度减少而得到降低。

对于这里所述的每一个构造，各种掺铒光纤的长度，各种泵浦内的功率，以及其他参数也可以使用文献和公知技术中描述的理论模型和实验技术，通过理论和实验进行评估，来优化一定的 EDFA 参数，例如增益，增益曲线，噪音特性，泵浦效率等。

尽管上面结合掺铒非晶 YAG 光纤描述了本发明的方法，但是应该可以理解，该方法还能够利用平面波导技术实现。特别地，在这种波导使用掺铒非晶 YAG 材料构成时，该方法也可以用平面通道波导实现。

本发明的方法部分源于该发现，即在非晶 YAG 内 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 转变提供了极宽的荧光带宽，即在掺有 8% 的铒时约为 121 纳米，部分

源于该发现，即更高浓度的 Er^{3+} （也许为其他稀土元素氧化物离子）导致更宽的荧光带宽和更宽的光增益谱。

申请人已经描述了一种 L 带掺铒光纤放大器的放大方法，其中使用了一族新材料来产生对于 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 转变来说比其他任何公知材料更宽的 L 带谱。申请人已经描述了一种 C 带掺铒光纤放大器的放大方法，其中使用了一族新材料来产生对于 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 转变来说比其他任何公知材料更宽的 C 带谱。

国际公开出版物 WO97/25284 的描述

10 Paul C. Nordine, et al., in Fiber Drawing from Undercooled Molten Materials, WIPO International Publication No. WO97/25284 公开于 1997 年 7 月 17 日，其中披露了一例制造光纤的方法，可以很好的用于完成本发明。其说明书在此全部引入作为参考。对于它的详细描述下面将结合图 16-23 给出，它们对应于 WO97/25284 的图 1-8。

15 根据国际专利申请 WO97/25284，Paul C.Nordine 等令人惊奇地发现了在控制状态下将一定的液体融化物过冷能够形成具有足够粘性的融化物，能够无大量液体再结晶地拉制光纤，包括熔点粘性太低而允许如此操作的融化物。这里描述的是从几种氧化材料的过冷融化物中拉制的几例光纤，为此光纤能够在熔点下或高于熔点的情况下从融化物中拉制出来。利用 WO97/25284 的方法，能够在过冷温度状态下和低于均衡融化温度超过 20%的状态下从这种融化物中迅速拉制光纤。还令人惊奇的是，玻璃光纤也可以从化学成分的过冷融化物中拉制出来，其含有的添加剂比现有技术光纤的添加剂浓度更高。此外，可以注意到根据 WO97/25284 的方法拉制的光纤有极高的抗张强度，假定
25 是由于 WO97/25284 光纤的表面比较完美无暇。

WO97/25284 的方法利用一个“插入管”开始拉制。生长光纤的能力受到插入管物理性能、使用插入管的几个条件如材料、尺寸、表面抛光和内插入的插入管尖的插入深度以及开始拉制之前液体内插入管的停留时间的重要影响。这些性能和过程的控制影响表面润湿和黏附性，允许在光纤拉制过程中进行有意义的控制。
30

简单地说，WO97/25284 中的方法包括步骤：（1）在无容器条件下

融化选出材料的样品，产生悬浮液滴，或者在有容器的状态下如在一个坩埚内，(2) 将液体冷却到融化温度以下，即使该液体过冷，及(3) 使过冷液体与插入管探针接触，在要求的状态下拉出探针，从液体中拉制光纤。

- 5 在所有情况下，可以通过控制(1) 液体粘度(通过改变融化温度和/或气体环境)，及(2) 光纤拉制率来达到光纤直径的控制。下述试验中使用的气体包括例如氧气、空气和氩气，尽管也可以使用其它气体如氮气、氦气、一氧化碳、二氧化碳、氢气和水蒸气。快拉制速度和/或慢拉制速度通常有利于小直径光纤。光纤直径上限由可以使用但是不会在大量过冷融化物中引起结晶的最小拉制速度决定。光纤直径的下限由可以获得的不会折断光纤或从融化物中拉制光纤的最大拉制速度决定。
- 10

此外，根据 WO97/25284 的方法拉制的光纤可以通过将玻璃光纤加热到出现特别的玻璃结晶的温度而转变为结晶光纤。

- 15 在 WO97/25284 中描述的方法能够从数种材料中生产高纯度光纤，人们都知道在高温下具有这些复合材料的组分强度高、坚硬、蠕变速度慢、抗氧化能力强、或者化学兼容性好。可以允许光纤由电磁辐射吸收性能低的材料构成，例如但是不限于远程通信领域使用的材料。WO97/25284 中公开的方法还能够合成同质玻璃光纤，包括例如使用光纤激光器和光纤激光器放大器领域但不限于这些领域的高浓度支配元件。根据 WO97/25284，这些光纤可以迅速地拉制出，能够降低生产成本，可以被结晶化，形成稳定的材料，可以用在具有很高温度结构的领域的抗氧化化合物材料内，例如透平燃烧室衬垫和射流偏向器内。WO97/25284 的方法能够允许合成聚合母体化合物材料领域中使用的抗张强度和硬度提高的光纤。此外，WO97/25284 的方法允许由有机活体领域使用的生物相容材料构成。因此，WO97/25284 的方法大大地拓展了能够利用液体融化物拉制的光纤的材料范围。
- 20
- 25

实例 1-光纤拉制装置

- 30 图 16 表示一种在有容器或无容器的融化条件下，利用 WO97/25284 中公开的原理，从过冷融化物中拉制光纤的最佳方案。应该注意的是

WO97/25284 中插入管的一种新的重要特点是光纤不是通过一个模具或类似的成型装置控制。在该实例中，描绘了一种无容器状态，尽管这些原理和光纤拉制方法可以使用任何融化物来控制所需的光纤，包括有容器的融化物。

5 图 16 所述的无容器状态也可以利用空气声学插入管（AAL）插入来自控制光纤的液滴获得。该方法利用来自气体喷射器的 32 的空气动力，通过使用来自一个三轴声学定位系统 33 的声学影响进行稳定。根据 WO97/25284，插入样品的该装置和其他装置是现有技术描述的装置，插入过冷样品的任何方法的使用都在 WO97/25284 的范围内。这
10 些方法包括如电磁悬浮和静电悬浮。这些方法涉及在高真空状态下融化物的悬浮和保持，它能够将 WO97/25284 的光纤拉制方法容易地应用于金属、合金，以及对与空气和气体环境中出现的气体反应敏感的材料。

一种悬浮液滴通过利用二氧化碳激光器发出的光束加热和融化样品来形成，尽管可以认为任何加热方法都在 WO97/25284 的范围内，
15 例如白炽灯或弧光灯，微波加热，感应加热，炉具或悬浮在热气流中。此外，任何能够给样品提供足够热量的激光束都可以用于 WO97/25284 的方法。在该具体的实例中，二氧化碳激光光束分成两束 34，它们聚焦在悬浮样品的相反侧，使样品融化。融化物保持在高温
20 下，直到全部被融化，接着通过切断或减少提供的加热功率使熔融液滴过冷并保持其过冷。

插入管（stinger）和光纤拉制装置 31 由连接到一个杆 3 的直径为 0.01cm 的钨丝插入管构成，由螺线管执行机构 4 操纵，定位成能够在螺线管被激发时使钨丝插入管尖端插入悬浮液滴 1 内。钨丝插入管和
25 过冷融化物之间的接触必须得到认真控制，以避免由于接触插入管而在过冷融化物中出现异相晶核。虽然该核通常并不是通过 WO97/25284 的光纤拉制操作引起的，但是如果以前形成的玻璃光纤用作插入管材料，那么可以减轻异相核的问题。尽管钨丝用做本实施例的插入管，但是预计利用各种材料和尺寸的插入管要取决于粘性和要求的光纤特性，这样的另外一些插入管也包括在 WO97/25284 的范围内。
30

在该实例中，弹簧操纵的拉制机构 5 为确定长度的光纤拉制提供

了拉制力，尽管任何拉制光纤的方法都包括在 WO97/25284 的范围内。可以调节弹簧的拉制力，以便其力常数在 $k+0.1-0.25\text{lb/in}$ 的范围内。光纤拉制速度受到摩擦阻尼器 6 的进一步控制。电子控制电路 7 用于初始化螺线管执行机构，在螺线管执行机构释放而进行光纤拉制操作时的预定时间内将插入管保持在液滴内。高速高温计 35 用于监测悬浮样品的温度，该温度可以实时显示在计算机屏幕上，作为温度与时间的图象。通过增加或减少激光光束的曝光强度和时间将融化液滴的温度保持在要求的过冷温度。

当然，为了获得要求尺寸的光纤，应该根据需要调节弹簧的力常数以及光纤的拉制速度。此外，光纤拉制装置可以是任何适当的装置，例如电机和轮组件，拉制力可以根据所需光纤的物理性能以及光纤拉制方法进行调节。

在第一次阻挡激光束加热和检测冷却的液滴的温度时启动光纤拉制（在计算机屏幕上显示为温度与时间图）。在温度达到预选值时，螺线管执行器通过手动启动，预选值优选在最佳拉制温度范围内。在该具体的实施例中，螺线管设计成能够在插入样品之后自动切断。接着通过拉制机构的动作将插入器抽出，从液滴中拉制光纤。液滴温度控制是 WO97/25284 中的方法的关键部分。在温度高于拉制光纤的最佳温度范围时，可以将插入管从液滴中拉出而不拉制光纤。在温度低于拉制光纤的最佳温度范围时，液体的粘性很高，以致必须将插入管施加于液滴上的力增加到超过悬浮装置恢复力，插入管的运动用于推动或从悬浮位置拉出液滴，而不是从液滴中拉制光纤。此外，如果融化温度太低，那么得到的光纤将比需要的短。在中间过冷温度下，可以形成各种长度的光纤，直径为小于 1 毫米到超过 60 毫米。

虽然在本实例中报道了一定范围的光纤尺寸，但是也可以理解，可以生产尺寸范围很宽的光纤，这取决于拉制条件。光纤的直径在低速拉制时比较大。光纤的直径在高速拉制时比较小。光纤的宽度受到两个效应的限制。首先，在较低的温度下，液滴上的力最终将从其悬浮位牵引液滴。其次，在较高温度下，光纤直径随牵引速度增加，以致张力不再能够克服表面张力，从液体中牵引光纤被中断。在适当的拉制温度范围内，可以拉制极长的光纤。例如，拉制 10 毫米直径的光

纤直到 0.35 厘米直径的液滴减少到 0.25 厘米的直径,可以产生比 18000 厘米还长的光纤。

图 17 表示根据 WO97/25284 的原理的一个最佳方法,其中可以沿一个以上的方向从处于无容器条件的悬浮液滴中拉制光纤。在该方法中,悬浮液滴 15 开始在悬浮喷嘴 16 中或使用另一种悬浮融化技术形成。通过电机和轮 18 或其他能够控制插入管操作和光纤拉制速度的拉制装置,光纤 17 同时沿相反的方向从液滴相反侧拉制。拉制力相对并能够受到控制,使它们几乎相等或相对,从而使液滴上产生的力减少,液滴不能够从其初始位置拉制出。该图还表示通过激光光束 19 或其他辐射热源的加热由一个透镜 20 聚焦在悬浮液滴顶表面上。受热区域内的温度保持高于融化点,而该温度在液滴其他区域将下降,并能够在液滴侧面被足够地过冷,允许拉制光纤。从液滴中拉出的光纤材料可以通过在辐射受热区域增加和融化固体材料 21 来补充,这些材料可以以可控速度随固体材料的粉末流和一个或一个以上的小杆增加到悬浮液体中。通过控制光纤拉制速度,在辐射受热区域增加和融化材料,保持拉制光纤的过冷区域,可以得到一种生产长而连续的光纤的连续工艺, WO97/25284 公开的该方法设想沿多个方向从没有相对于悬浮位置发生显著位移的位置拉制多个光纤。

插入管状态和操作包括通过在从过冷融化物拉制光纤之前以高于融化点的温度接触融化物而启动该插入管,及允许插入管接触融化液滴的时间(通常为 1-50 毫秒),尽管启动时间可以根据该插入管、容融化物的成分和融化物的粘性变化,插入管插入融化物内的距离和插入管的插入和从融化物的拔出速度。如果温度太高,通过插入管的成核现象可以通过快速插入和拔出插入管而避免,但是拔出速度不必太高而不从融化物中拉制光纤。在适当的过冷温度下,融化物的过冷温度,融化物的粘性增加,光纤可以被拉制,结晶速度降低,低于接近材料融化点时观察的速度。

实例 2 使用锥形喷嘴悬浮器拉制光纤

图 18 表示使用电机和轮组件和一个锥形喷嘴悬浮器(CNL)拉制光纤的方案,可以拉制和悬浮直径为 0.25-0.40 厘米的光纤,尽管悬浮

大样品取决于他们的表面张力和密度。一种悬浮气流 8 通过一个充气室 9, 通过该喷嘴 10 和在悬浮样品 11 上。该悬浮样品用由 ZnSe 透镜 13 将二氧化碳激光束聚焦在样品顶表面上加热和融化。该样品的温度通过利用任何信号阻挡装置阻挡激光加热光束和改变激光功率来控制。使用一个通过喷嘴输入和由一个可逆步进电机和轮组件 14 驱动的钨丝插入管 77 从过冷融化物底表面拉制光纤。该插入管包括一个连接该轮的长钨丝, 当牵引光纤时长钨丝卷绕在轮上。当然, 也可以想到使用其他激光器加热样品, 例如连续波的 Nd-钇-铝-石榴石 (Nd-YAG) 激光器。当然, 除了激光器外, 也可以使用能够有效融化这些材料和不干扰拉制操作的任何加热方法。除了上述实例 1 的插入管方法和步进电机和轮组件之外, 还可以想到利用能够给拉制工艺提供电力的任何装置。

可以用计算机控制电机和轮组件 14 的方向和加速度, 操纵插入管, 改变光纤牵引速度的加速度, 得到恒定的光纤牵引速度。高速高温计用于监测样品温度和观察冷却行为。插入管和得到的光纤缠绕在连接电机 14 的轮上, 不进行进一步的机械处理, 例如通过模具拉制。在该实施例中, 光纤拉制速度达到 120 厘米/秒, 尽管光纤拉制速度取决于用于给拉制提供动力的个别装置 (这里是电机和轮)。插入管的加速度由计算机控制, 使用的一个加速度等于 1200 厘米/秒^2 , 尽管 WO97/25284 设想可以根据具体拉制材料和所需的光纤特性使用其他加速度。用该装置可以拉制长达 60 厘米和同一直径为 5-20 毫米的光纤, 尽管使用不同的拉制条件也可以得到其他长度和直径的光纤。插入操作和光纤拉制操作通常是在少于 0.6 秒的周期内完成, 尽管该时间可以根据融化物的粘性、牵引光纤的速度和结晶速度变化。必须以一定的牵引光纤速度开始牵引光纤。

用 CNL 装置开始和连续拉制光纤的速度可以低于用上述实例 1 中 AAL 装置拉制光纤的速度, 因为在拉制力大时液体样品并不由光纤拉制开。在低温下, 当融化物粘性大时, 和在光纤拉制力大拉制速度较快时, 拉制力足以使融化物位移, 从而使融化物接触悬浮喷嘴侧面。通过于喷嘴接触使融化物结晶, 但是光纤拉制一直持续到融化物结晶达到光纤拉制点。在拉制力大的足以使融化物接触喷嘴的温度下, 警

惕生长速度通常很低，足以在一定的周期内使样品中心保持为液态，足以连续拉制长度大于 60 厘米的光纤。

例如，在拉制速度为 120 厘米/秒的速度下接触喷嘴时，在富铝红柱石或钇-铝石榴石（YAG）成分的液滴成分发生位移的温度下，晶体生长速度通常小于 1 厘米/秒。液体和喷嘴之间的接触点距离光纤拉制点大约 0.2 厘米。因此，在与喷嘴接触之后光纤拉制持续大于 0.2 秒，拉制长度为 24-60 厘米的光纤。作为光纤拉制力位移的结果，允许与过冷液体接触机械限制装置的方法因此可以用于牵引有用长度的光纤。令人吃惊的是，通过接触机械限制装置的晶体成核以限定的速度传播，不干扰光纤的连续拉制，直到这些晶体达到县委从液体中拉制的拉制点。

也可以评估拉制线的冷却速度。例如，对于直径为 10 毫米和在空气中使用 CNL 装置以 100 厘米/秒的速度拉制的光纤，冷却速度可以如下面那样计算

例如，假定液体氧化物液滴的温度是 1500 摄氏度。液滴热边界层的厚度大大小于悬浮气流驻点处的样品直径，该点是与从液体中拉制光纤相同的点。对于直径通常为 0.3 厘米，和 100 厘米/秒的拉制速度，光纤材料通过边界层在少于 0.003 秒的时间内拉制出来。假定光纤材料与气体保持热平衡，冷却速度的数量级为 500000 摄氏度/秒。如果如同根据氧化铝热性能和从每单位表面面积 10 毫米直径光纤的焓变化速度计算的那样，光纤表面的热流量大约为 700 瓦/厘米²，那么将出现该冷却速度。

现在假定光纤保持较热。在冷到 1500 摄氏度的环境气体温度下，光纤的对流热流量 q'' 由下面的公式给出：

$$q'' = \frac{Nu_h k_f (T_f - T_a)}{d}$$

其中 T_f 和 T_a 是光纤和环境温度，

k_f 是平均气体“薄膜”温度 $(T_f + T_a) / 2$ 下气体导热系数，

d 是光纤直径，及

Nu_h 是传热的努谢尔特数（Nusselt number）。

对于假定的条件, k_f 大约为 4×10^{-4} 瓦/(厘米摄氏度), Nu_h 大约为 1, q'' 大约为 600 瓦/厘米。因此, 光纤没有冷却的假定导致热流量可以与要求维持与环境气体热平衡的热流量相比。因此可以推断 CNL 光纤拉制方法对于 10 厘米直径的光纤获得了每秒几十万摄氏度的拉制光纤的冷却速度。对于更大直径的光纤, 冷却速度较小, 大体与光纤直径的平方成正比。因此, 对于直径 50 厘米的光纤将产生超过每秒 4000 摄氏度的冷却速度。

实例 3 - 从富铝红柱石融化物中拉制光纤

图 19 表示从富铝红柱石成分的过冷融化物中拉制光纤的时间和温度条件, 其中 $Al_2O_3: SiO_2$ 的摩尔比为 60: 40, 使用 WO97/25284 的光纤拉制方法。

图 19 表示光纤拉制试验中悬浮样品的典型温度-时间过程, 作为用光学高温计测量的温度与时间的函数图。在所述时间周期之前, 用二氧化碳激光光束融化样品, 同时将其悬浮在在氩气流内的 AAL 装置内, 并保持在恒定温度下。拉制光纤的温度范围通过在各种温度下使用图 16 和实例 1 所述的插入和拉制装置拉制光纤来确定。温度随 0-2.0 秒的记录时间间隔的降低表明一旦阻挡激光加热光束液体就冷却。在冷却周期内从过冷液体中成功拉制光纤的温度范围显示在图上。在大约 2.0-2.2 秒的时间周期内, 表明温度上升到样品的融化点。当过冷液体自发结晶时出现该温度上升。结晶释放的能量足以将样品加热到融化点, 其中温度保持恒定, 同时继续结晶。最后, 在所有气体都被消耗完之后, 由于固体样品的热损失使温度下降。

如图 22 所示, 晶体富铝红柱石的成分与高温液体平衡, 不包含在低温富铝红柱石相域内。因此该图表明与最高温时与液体平衡时形成的富铝红柱石在低温下是热动力学不稳定的。相反, 根据 WO97/25284 的原理形成的玻璃光纤组分可以在打算应用的温度下从富铝红柱石相域中独立选择。这些玻璃光纤可以被加热, 转变成纯结晶富铝红柱石光纤, 这些光纤关于应用温度下第二相的沉淀是稳定的。

在观察到再辉 (recalescence) (通过结晶释放的热量致使温度上升到融化点) 的很多情况下也能够拉制玻璃光纤。例如, 即使在观察到

再辉的情况下，也可以得到如该实例所述的富铝红柱石成分的玻璃光纤。

实例 4-使用有容器系统从过冷融化物中拉制光纤

5 WO97/25284 中的描述还设想在有容器的系统中拉制光纤。图 21 表示指出使用液体容器的一种方法的一个最佳实施例，它便于从过冷融化物中无再结晶地拉制光纤。该方法的一个重要特点包括在容器内建立和维持温度梯度，以便部分融化量得到过冷。在该方法中，所关心的材料 30 放置在一个开口容器 2 内，如一个坩埚内，该容器的温度保持高于融化点的温度。盖子 25 也保持在高于融化点的温度上，盖子
10 开始可被放置在容器上，在容器内部获得热平衡，实现材料的融化。然后盖子可以被抬起或移开，使热量损失和冷却融化表面。可以控制融化表面 23 的传热状态，使曝露的融化表面中央区域得到过冷，从而从过冷液体中拉制光纤。容器 28 的内壁和接近容器这些内壁的少部分液体 27 可以保持在高于融化温度的温度下，使异相成核不能够出现在
15 这些壁上。

图 21 表示加热坩埚 22 和融化材料 30，可以通过抬升的盖子 25 内的比光纤大的开口拉制光纤 24，也可以利用如电机和轮 26 或其他拉制装置的作用通过独立导向器的开口拉制光纤。从融化物中取出的光
20 纤材料可以通过在融化温度超过融化点的区域内增加和融化固体材料得到补充。利用实例 1 所述的一个或一个以上的插入管（未示出），或者通过电机和轮组件或其他拉制装置的作用启动光纤拉制。

液体和坩埚顶表面的温度图示表示在图 21 的底部内，作为坩埚和所含液体顶表面上横向位置的函数。平衡融化温度由图 21 该部分坐标
25 上 T_m 表示。靠近坩埚壁的那部分液体和坩埚的温度高于 T_m ，而远离容器壁的液体表面温度下降到小于 T_m 。曝露液体表面的中心温度可以如下面那样估算，假定容器的直径远远大于液体深度，使热量从底部传递到表面。为了估算温度梯度的大小，还假定对流热损失可以忽略，热量只通过辐射从液体表面损失，辐射热量不再反射回到液体表面上。
30 液体温度下降接近下面的方程，其中右侧给出了从底表面到液体顶表面的热流量，温度保持在坩埚温度下，其中左侧给出了液体表面的

辐射热损失:

$$\sigma \varepsilon T_s^4 = k \frac{T_c - T_s}{h}$$

其中 $\sigma=5.67 \times 10^{-12}$ 瓦/(cm^2 度 K^4), 对液体氧化物的斯蒂芬波尔茨曼常数 ε 为 0.8, 液体表面的发射率 T_s 是液体表面的温度, T_o 是坩埚的温度, h 是液体层的深度。

高温下氧化物的平均导热率 k 为 0.02-0.2 瓦/(厘米摄氏度)。

使用富铝红柱石作为一个实例, $T_c=1900$ 摄氏度(稍微高于融化点), $T_s=1670$ 摄氏度(大约 200 摄氏度的过冷度), Nordine 等依据实际 k 值得到 $h=0.045$ 厘米。

上述计算表明估算的液体深度小于 0.5 厘米, 足以在保持在融化点以上的在容器内的液体表面上获得深冷。该深度足够小, 足以迅速满足液体深度比容器直径小很多的假定。

实例 5-气体环境和再辉效应

人们已经发现过冷度、玻璃块的形成和光纤拉制条件取决于气体环境。在该实例中, 已经报道了在三个不同的气体环境下拉制光纤: 空气, 纯氧, 和纯氩气。但是也可以想到利用其他气体, 如氮气、氦气、一氧化碳、二氧化碳、氢气和水蒸气。

例如, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 成分的玻璃块可以在氩气中无结晶地形成。在空气或氧气中, 液体 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 成分在过冷时自发结晶。第二个实例利用纯氧化铝提供, 为此在自发结晶之前, 液体可以冷却到氩气内融化点 450 摄氏度以下。可以在形成大量玻璃样品的所有情况下拉制光纤, 在融化物冷却时结晶不会发生。通常能够在观察到再辉的很多情况下拉制玻璃光纤。例如, 在氧气环境下, 可以得到富铝红柱石成分的玻璃光纤, 其中也可以观察到再辉。这些光纤可以在高于晶体成核和发生融化物自发结晶的温度下拉制这些光纤。

在用再辉使过冷融化物自发结晶的条件下, 通常大量液体的冷却速度为每秒 100-500 摄氏度。已经知道如果冷却温度超过玻璃形成的临界冷却速度, 那么将由融化物形成玻璃光纤; 因此, 再辉的观察表明在大量液体中不能够得到临界冷却速度。但是, 在液体温度高于自发

结晶温度时还可以通过拉制光纤获得玻璃光纤。这些结果表明光纤拉制工艺导致光纤内的冷却速度超过液滴自由冷却速度。

实例 6-新光纤成分

- 5 表II列出了一些能够使用 WO97/25284 的方法获得的一些新光纤成分。表II列出这些光纤可以使用很多种方法拉制，包括插入管，和实例 1 所述的拉制装置，以及表示在图 18 中和实例所述的插入管和电机轮组件。融化物可以使用任何悬浮装置悬浮，包括上述 AAL 和 CNL 装置，或者融化物也可以包含在如上述实例 4 内。固体样品通过激光
- 10 器炉融化由基本的纯氧化物形成。使用钼或铟和其他材料作为添加剂，其中 Al_2O_3 : SiO_2 为 50: 50, Al_2O_3 : Y_2O_3 为 63: 37。

- 对于等于或高于融化点的温度，在悬浮融化物内观察到的震荡和流体流表明融化物粘性低，可以与液体氧化铝的粘性相比，大大小于典型玻璃形成材料如纯氧化硅或富硅融化物的粘性。这些融化物的低
- 15 粘性也表明了在于融化点的温度下不能够从融化物中拉制光纤的事实。但是，在这里所述的所有情况下，可以 WO97/25284 的方法从过冷融化物中拉制玻璃光纤。在所有情况下从这些融化物中拉制出的玻璃光纤在外观上是均匀的。在显微镜下的可视检查表明光纤内没有第二相沉淀的迹象。

- 20 旋光掺杂剂浓度高的玻璃光纤的合成可以通过在 50: 50 的 Al_2O_3 : SiO_2 和 63: 37 的 Al_2O_3 : Y_2O_3 材料内添加 Nd_2O_3 和 Er_2O_3 。使用的添加剂浓度比现有技术的光纤的典型浓度高 1%左右。WO97/25284 的方法通过首先将材料加热到所有成分都形成完全融化液体的温度而获得了这些添加剂浓度高的光纤。由于过冷融化物不结晶，它保持为同质的，能够形成添加剂浓度高的玻璃光纤。
- 25

- 此外，纯度很高的光纤和添加剂浓度很小的光纤的合成也是可能的。使用无容器条件保持融化物能够使融化物纯化，纯化方法是（1）杂质蒸发及（2）杂质的反应汽化。例如，开始含有约 0.0005 摩尔%铬（百万分之五的铬）的氧化铝可以通过无容器地将液体融化和加热到
- 30 2400 摄氏度来进行纯化。分析的铬浓度在几分钟的处理时间内减少到百万分之一。同样，可以通过现有技术中公知的装置利用蒸发来纯化

很多氧化物。当在非常高的温度下在容器内处理材料时，融化物内容器材料的溶解将防止液体的纯化。因此，通过无容器的条件下纯化液体，可以形成含有的杂质量少于 0.0001 摩尔百分数（百万分之一）的光纤。同样，通过首先纯化该液体，可以使用添加剂来将从液体中牵引的光纤内添加剂的浓度控制在少于 0.0001 摩尔百分数到 50 摩尔百分数的范围内。

具有化学成分 CaAl_2O_4 的玻璃光纤的合成方法是可以在无容器的条件下，使用 WO97/25284 的方法，使融化物充分过冷以便拉制光纤。光纤牵引方法描述在图 18 中，悬浮是在氧气中。这些光纤从过冷到大约低于材料的融化温度 200 摄氏度的温度的融化物中牵引。一旦进一步过冷，不会出现结晶，能够得到大量的 CaAl_2O_4 玻璃光纤样品。希望可以使用其他光纤牵引方法，例如图 16 的插入管（stinger）拉制装置，能够牵引光纤的任何方法也包括在 WO97/25284 的范围内。

使用 WO97/25284 的方法，可以从 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 融化物中合成玻璃光纤，这些光纤可以用做生物相容的结构材料，如果它们被吸入也不会引起矽肺病，如美国专利 5552213 所公开的那样，其全部说明书在此引入作为参考。

使用 WO97/25284 的方法，还可以形成有化学成分矿物镁橄榄石 Mg_2SiO_4 的玻璃光纤。该矿物是与矿物顽辉石 $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ 热动力学相容的，这在现有技术中是公知的， Mg_2SiO_4 在现有技术中是公知的，是相间削弱涂层（interphase weakening coating），用于韧化复合材料。镁橄榄石光纤是使用图 16 所示的光纤插入管装置和由悬浮和在锥形喷嘴悬浮装置内过冷的融化物形成的。

图 20 表明铝-硅系统的相平衡图，表示纯氧化硅和氧化铝之间的全部组分。在表II中可以看到 WO97/25284 公开的工作，在很大范围的成分中获得玻璃光纤，这些成分包括低温下稳定的纯富铝红柱石成分。

实例 7-光纤结晶

根据 WO97/25284 的方法获得的光纤也可以被结晶。表III报告了在 1100 和 1200 摄氏度的温度下富铝红柱石成分玻璃光纤如 60: 40 的 $\text{Al}_2\text{O}_3: \text{SiO}_2$ 。这些结果表明，从过冷融化物中拉制玻璃光纤然后加热

到中间温度的方法能够生产化学成分可以控制的结晶光纤，这些成分在中间温度下是稳定的。

光纤拉制速度受到控制，通常超过过冷融化物的结晶速度，在光纤内得到的冷却速度通常大于拉制光纤的材料内形成玻璃的临界冷却速度。玻璃形成的结晶速度或临界冷却速度不能严格地作为温度的函数。对于富铝红柱石而言，30 厘米/秒的拉制速度足以避免融化物结晶。富铝红柱石的结晶速度在低于融化点 200K 的温度下大约是 3 厘米/秒。

液体氧化钇-铝结晶速度大于液体富铝红柱石成分的结晶速度。使用图 18 所述电机和轮组件在纯氩气流中以 30 厘米/秒的速度拉制长度为几个毫米的氧化钇-铝玻璃光纤，以 100 厘米/秒的速度拉制长 60 厘米的光纤。该液体被冷却到低于融化点 200 摄氏度左右。

如实例 2 中所示，在光纤中的冷却速度随光纤直径增加而减少。用于获得具有给定直径光纤的拉制速度也随光纤直径的增加而减少。因此，在大直径光纤的附图中，可能出现在光纤中获得的冷却速度小于玻璃成型临界冷却速度的状态。在该状态下获得的光纤至少包含一些结晶材料。此外，如果在光纤拉制状态下结晶速度超过光纤拉制速度，那么在光纤内形成的结晶将在光纤内传播，引起形成光纤的过冷液体结晶，因此结束光纤拉制过程。

表 III 提供了从过冷融化物中拉制的玻璃光纤和通过在空气中加热拉制光纤形成的结晶光纤的张力实验数据。应该注意到如此牵引的光纤后很高的抗张强度。与根据 WO97/25284 的原理获得的富铝红柱石成分光纤内抗张强度值达到 6.4Gpa 相比，在具有相同成分的现有技术光纤中可以获得的抗张强度被限制到少于 3Gpa。

表 II 从过冷融化物中拉制玻璃光纤的化学成分

化学成分，摩尔分数	添加剂
<u>氧化铝-氧化硅材料：</u>	
0.50Al ₂ O ₃ +0.50SiO ₂	
0.50Al ₂ O ₃ +0.50SiO ₂	Nd ₂ O ₃ ， 1%到 20%重量
0.50Al ₂ O ₃ +0.50SiO ₂	Er ₂ O ₃ ， 1%到 20%重量
0.60Al ₂ O ₃ +0.40SiO ₂	

0.67Al₂O₃+0.33SiO₂
0.69Al₂O₃+0.31SiO₂
0.70Al₂O₃+0.30SiO₂
0.71Al₂O₃+0.29SiO₂

氧化铝-氧化钇材料

0.63Al₂O₃+0.37Y₂O₃
0.63Al₂O₃+0.37Y₂O₃ Nd₂O₃, 5mol%替代 Y₂O₃

其它材料

0.50Al₂O₃+0.50CaO
0.30 Al₂O₃+0.70CaO
0.67MgO+0.33SiO₂ (镁橄榄石)
0.50 Al₂O₃+0.50La₂O₃
0.35 Al₂O₃+0.35LiO+SiO₂

表 III 富铝红柱石成分光纤特性

光纤状态	光纤直径, _m	拉断强度, Gpa
如拉制	32.0	6.45
如拉制	20.5	4.68
如拉制	32.7	5.21
如拉制	30.5	6.14
如拉制	33.0	5.55
在 1100℃ 结晶	19.0	0.78
在 1200℃ 结晶	8.0	1.00
在 1200℃ 结晶	28.0	0.66

其他基质光纤材料的描述

5 大多数结晶氧化物激光基质都没有生产出非晶产品，因此还没有试验过个非晶形态的光学性能。因此在目前的文献中还没有关于这种基质光学性能的资料。尤其是，该文献没有推荐非晶形态的荧光带宽。申请人已经研究了报道的很多掺铒激光晶体的荧光光谱，申请人已经

使用了给定晶体内荧光光谱作为信息来开始推算个材料的相应非晶荧光带宽，希望非晶结晶材料也能够具有宽的荧光带宽。

例如，掺铒结晶镨铝石榴石（LuAG）的荧光光谱表示在图 24 中，如 A. A. Kaminsky, et al., Investigation of stimulated emission from $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ crystals with Ho^{3+} , Er^{3+} and Tm^{3+} ions, phys. stat, sol.(a), Vol.18, K31, 1973 所述。LuAG 光谱表现出一系列的不连贯的峰。因为在任何晶体中，每个峰都对应 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级和 $^4\text{I}_{15/2}$ 能级的斯塔克子能级（Stark sub-level）之间的一个或一个以上的不同辐射弛豫转变。材料内 Er^{3+} 的总荧光带宽 $\Delta\lambda$ 被确定为是荧光光谱中最长和最短荧光波长之间的距离。从图 24 中可以看出，对于掺铒 LuAG，这些波长是 1520 纳米和 1670 纳米，带宽是 150 纳米。接着，推定非晶 LuAG 内铒荧光带宽接近测量的晶体带宽 $\Delta\lambda$ 。换句话说，推定在 LuAG 晶体中铒的大约 1550 纳米的离散荧光光谱转变成非晶 LuAG 的总的连续光谱，这与将掺铒结晶 YAG 的特性与掺铒非晶 YAG 的特性进行比较而发现的转变方式是相似的。

前述研究已经应用大量的掺铒晶体来确定多种具有潜在的大荧光带宽的材料。尤其是，这些研究用于 YAG 的改进，因为期望 YAG 基质的小化学改进（例如用钇代替镨）基本上将不会改变掺铒非晶 YAG 的有利带宽荧光和增益性能。

表 IV 列出了这样确定的最大的带宽。表 IV 第一栏列出了基质光纤材料的化学式，表 IV 第二栏列出了包含在基质光纤材料内的掺杂剂和共掺杂质。表 IV 内的第三栏列出了使用上述方法从公开的荧光光谱推断的荧光带宽 $\Delta\lambda$ 。表 IV 第四栏表示 ESA 是否是在该晶体中在 980 纳米中观察到的。表 IV 列出了非晶材料，这些非晶材料在 1550 纳米左右具有较宽的荧光带宽。

表 IV 潜在宽带氧化物

Er 3+掺杂晶体	掺杂剂	荧光带宽
YAG	Er	160 nm
Y_2SiO_5	Er	160 nm
Y_2SiO_5	Er, Yb	
$\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Er	160 nm

$\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$	Er	140 nm
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	Er	130 nm
$\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$	Er, (Yb, Cr)	130 nm
$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$	Er	125 nm
GdAlO_3	Er	125 nm
$\text{SrY}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$	Er	125 nm
LiYF_4	Er	110 nm
$\text{CaF}_2\text{-YF}_3$	Er	110 nm
YVO_4	Er	90 nm
$\text{LiErYP}_4\text{O}_{12}$	Er	90 nm

尽管表 IV 现在提供了很少有关研究的泵浦 ESA 性能的信息，表 IV 为研究 EDFA 宽带非晶基质提供起始点。

5 尽管这里已经结合光纤放大器进行了描述，但是本发明的放大光信号的方法能够使用集成光放大器实现，这些放大器是通过使用现有技术公知的几种技术之一用非晶 YAG 大块样品制成的。

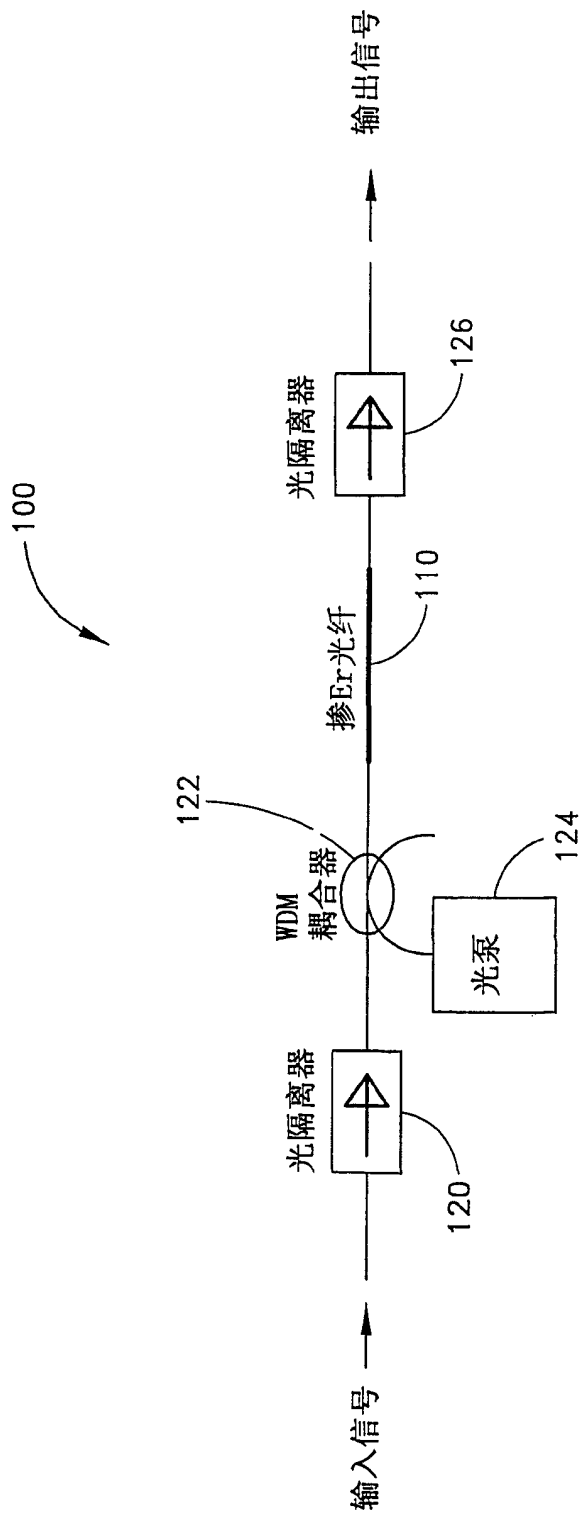


图1

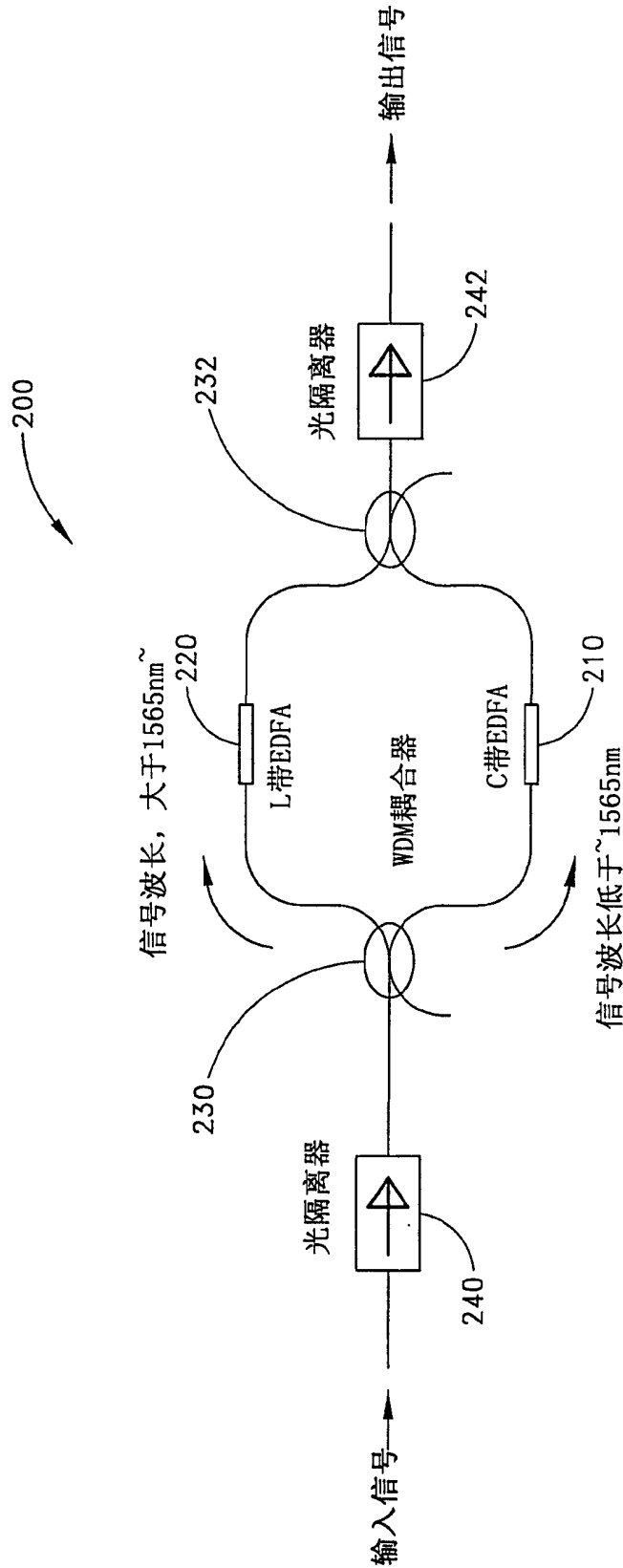


图2

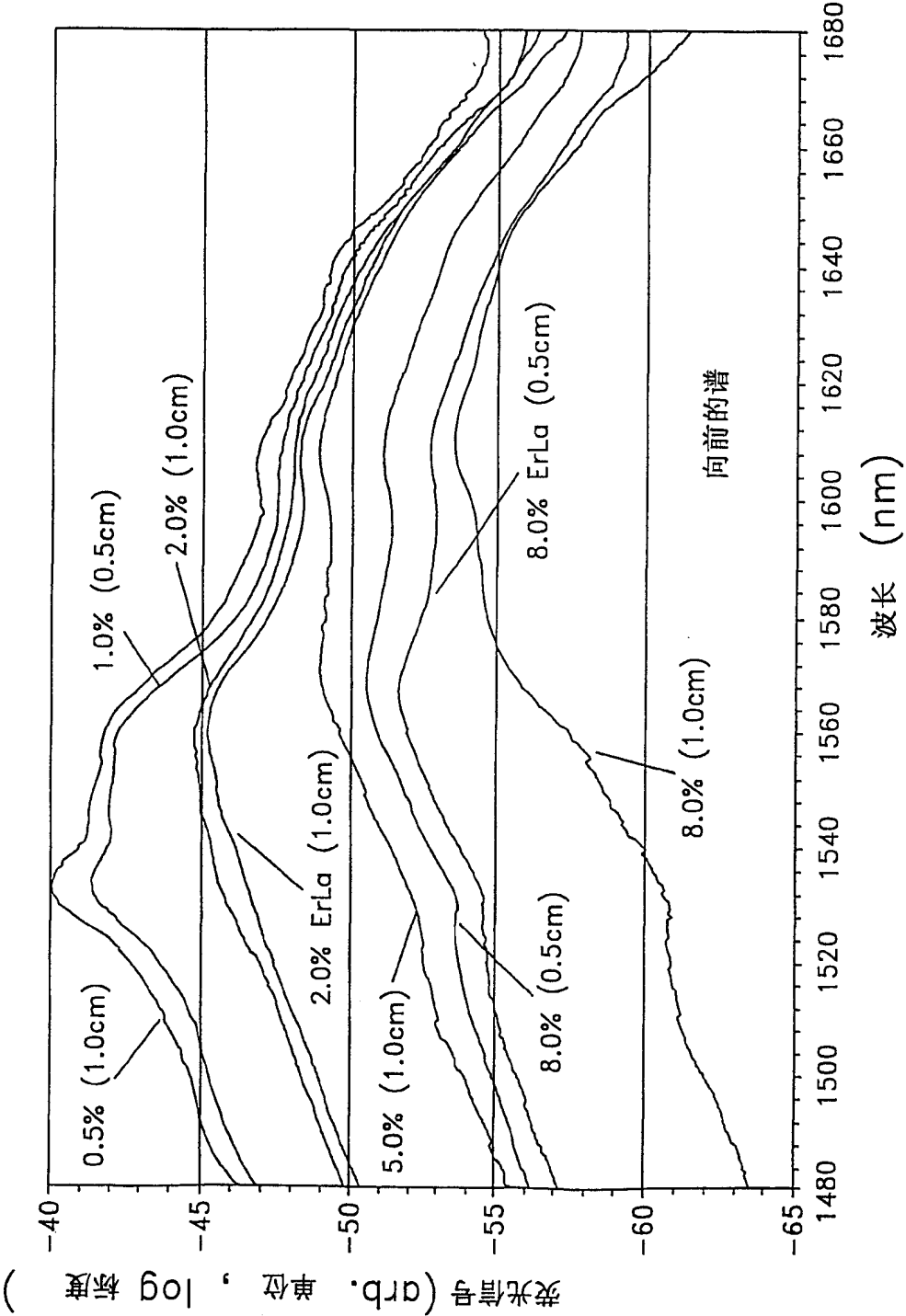


图3

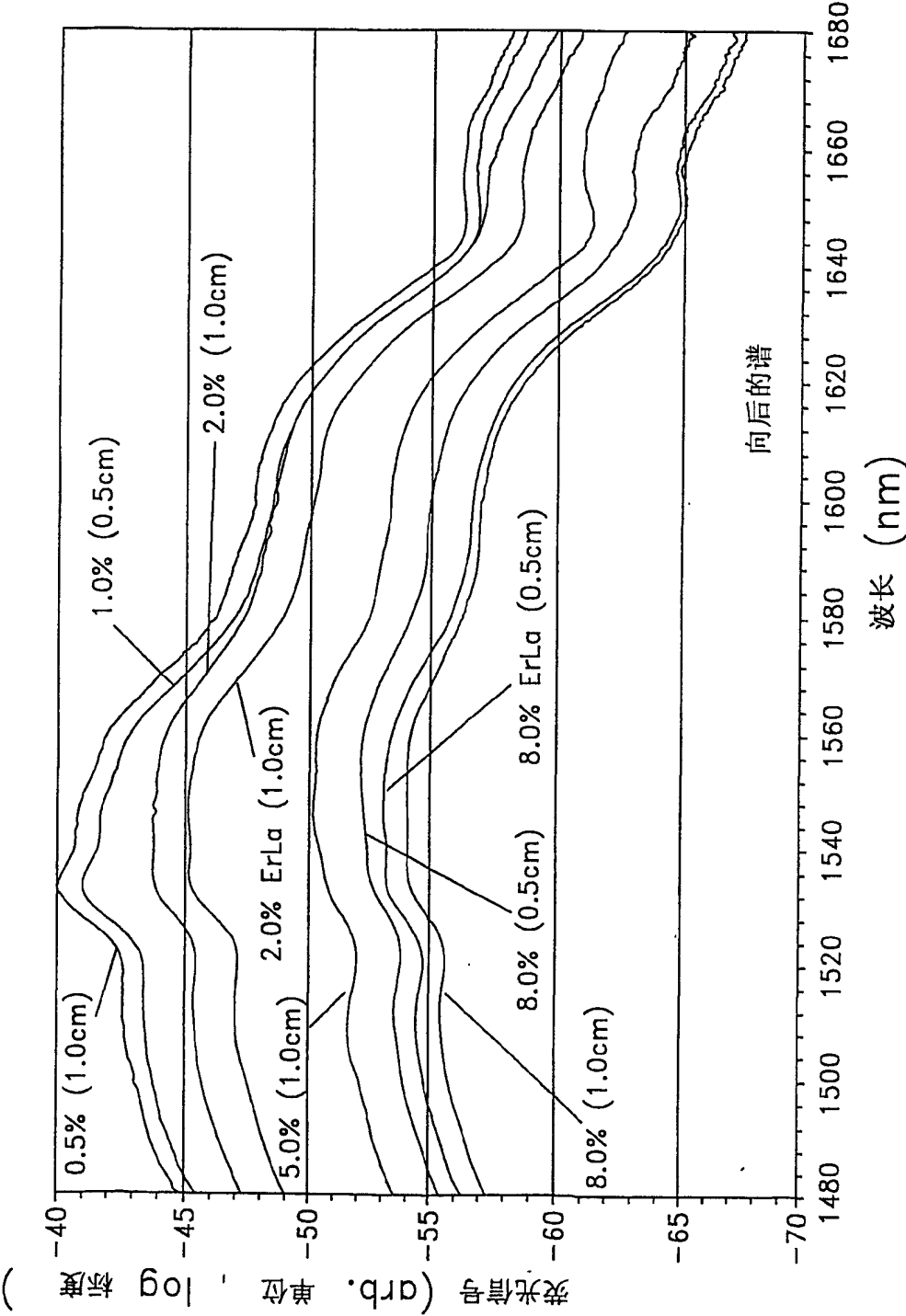


图4

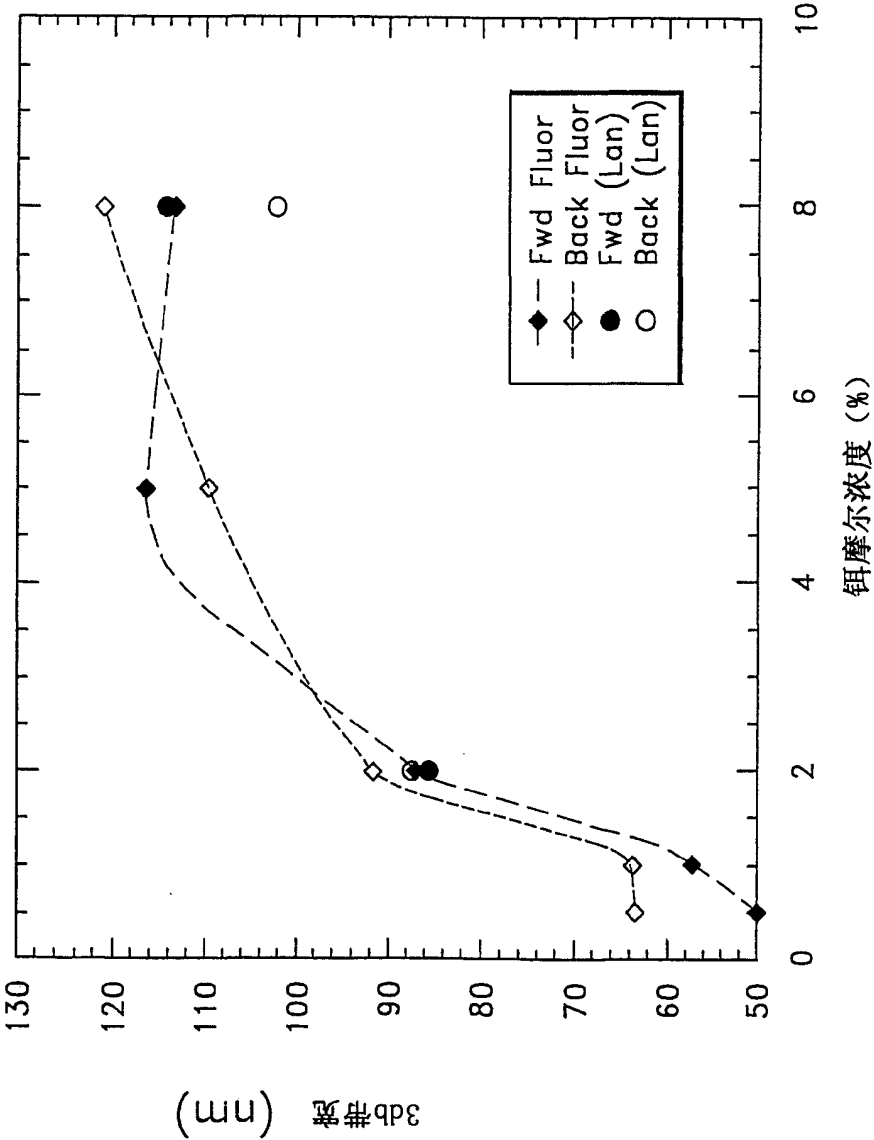


图5

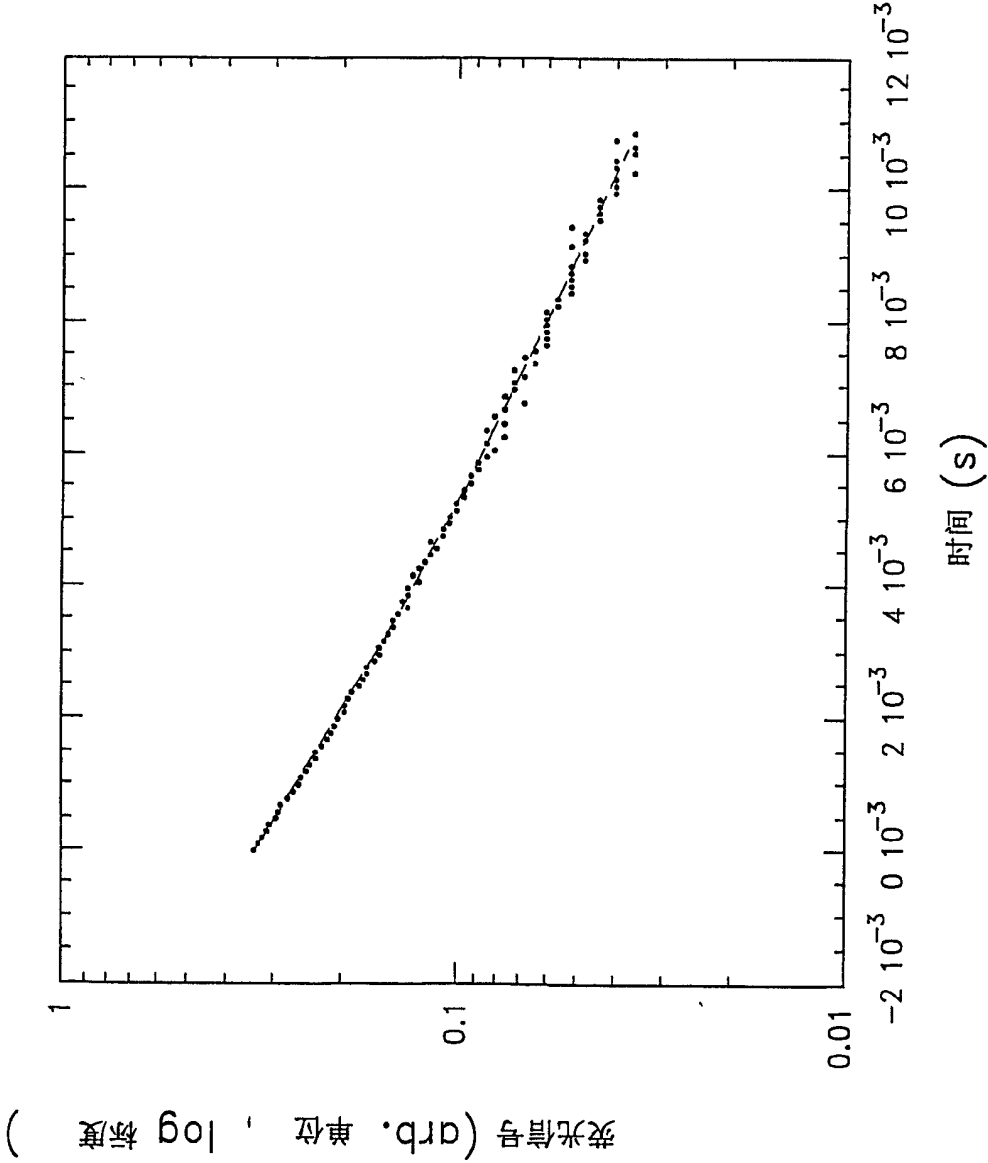


图6A

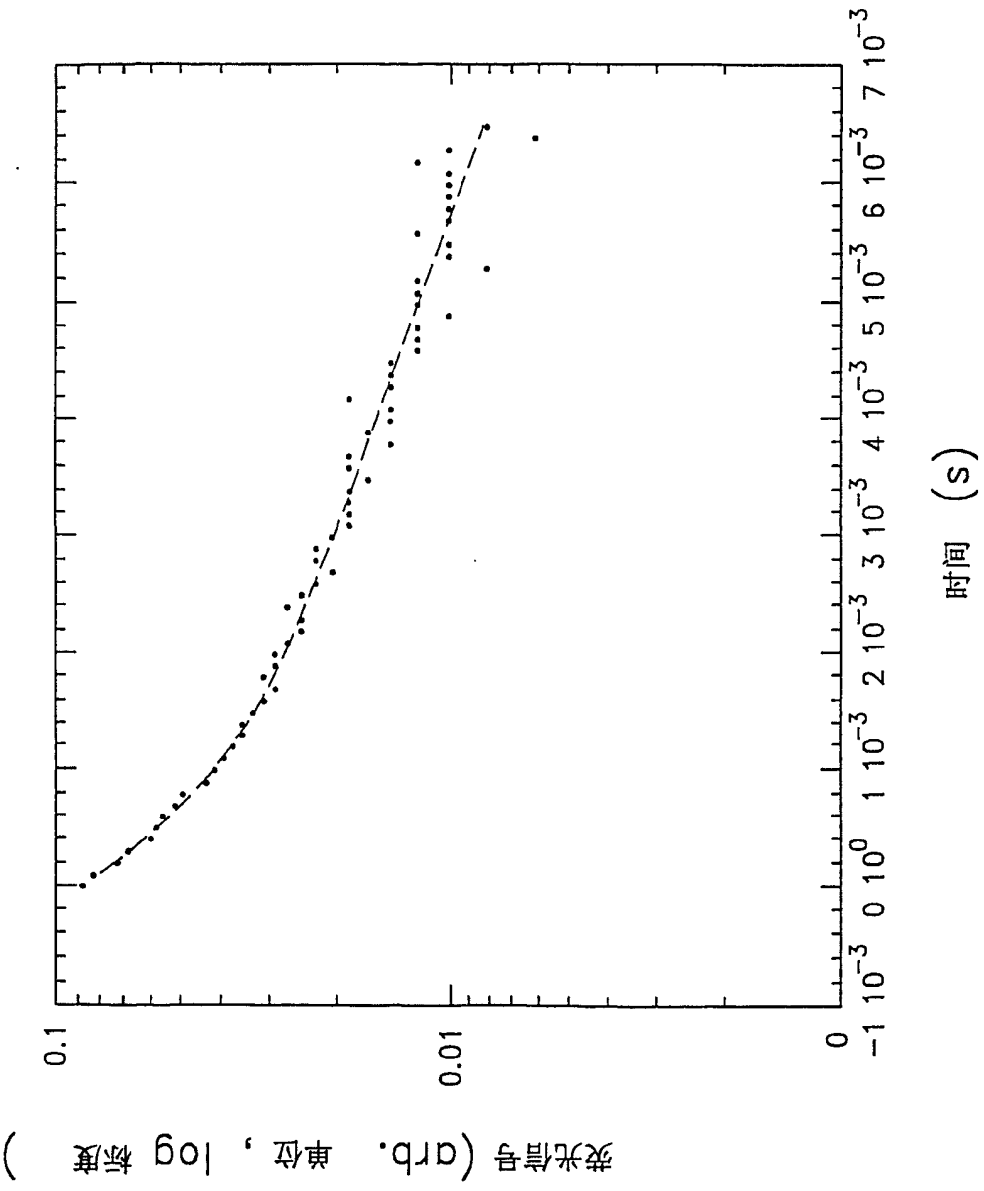


图6B

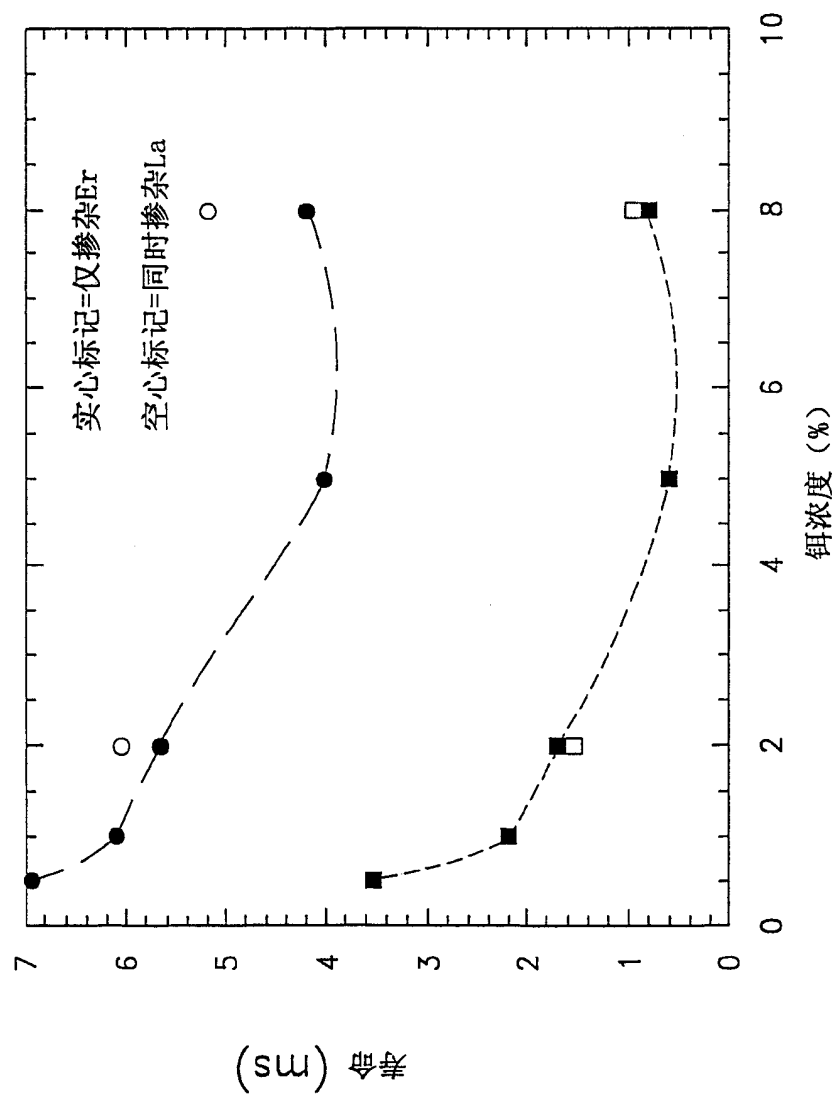


图7

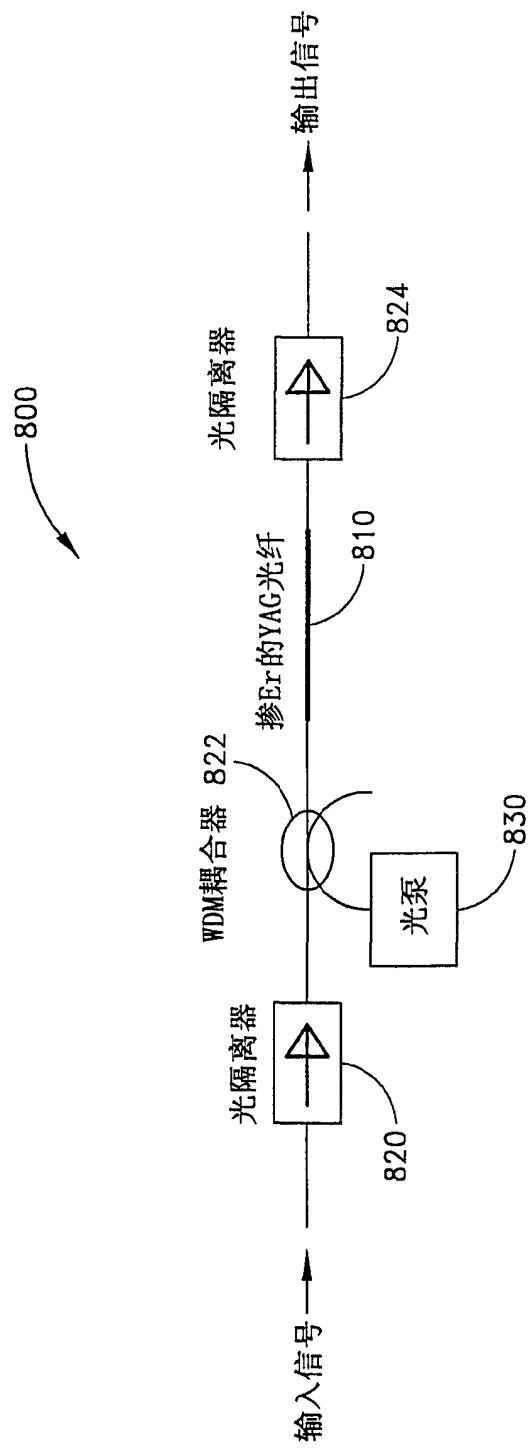


图8

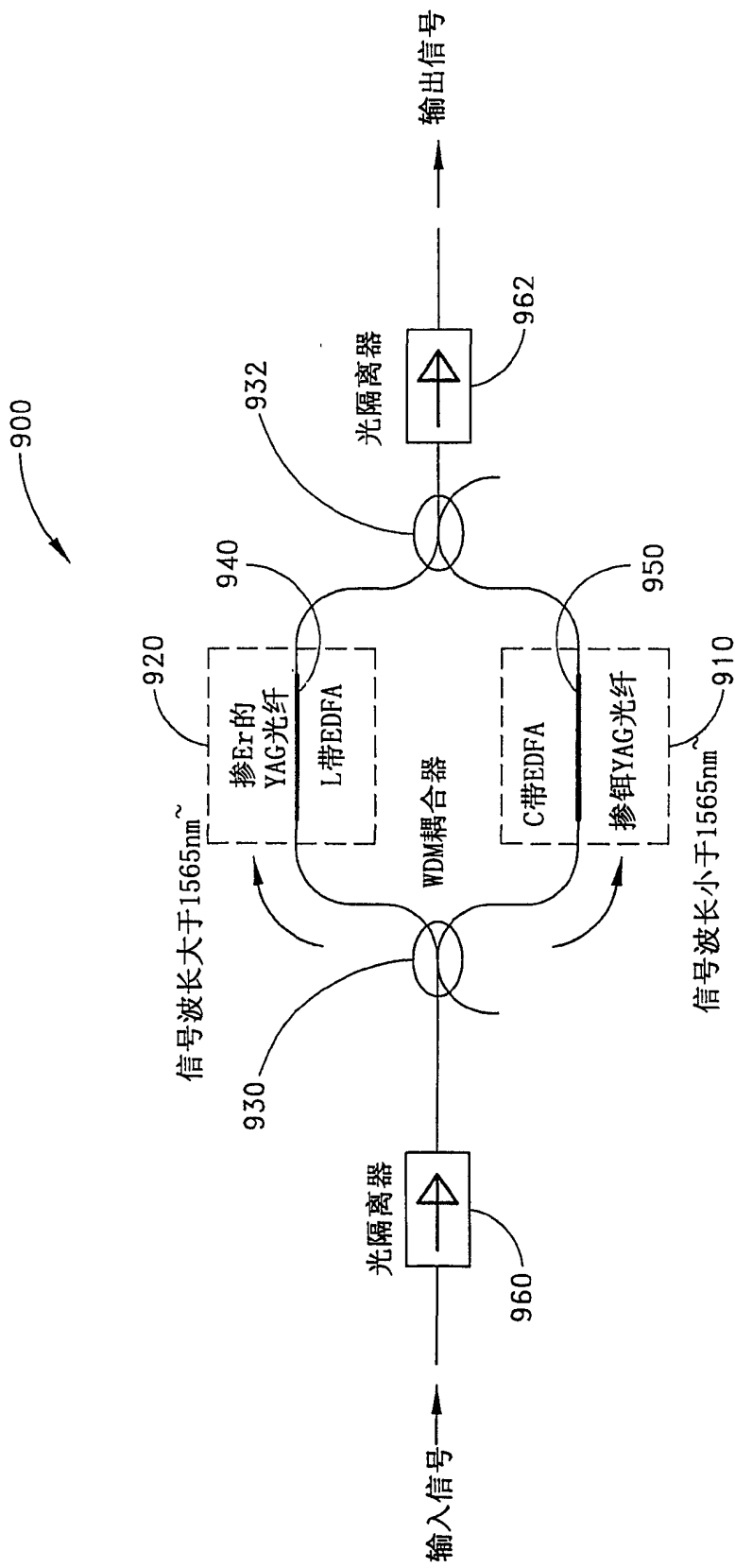


图9

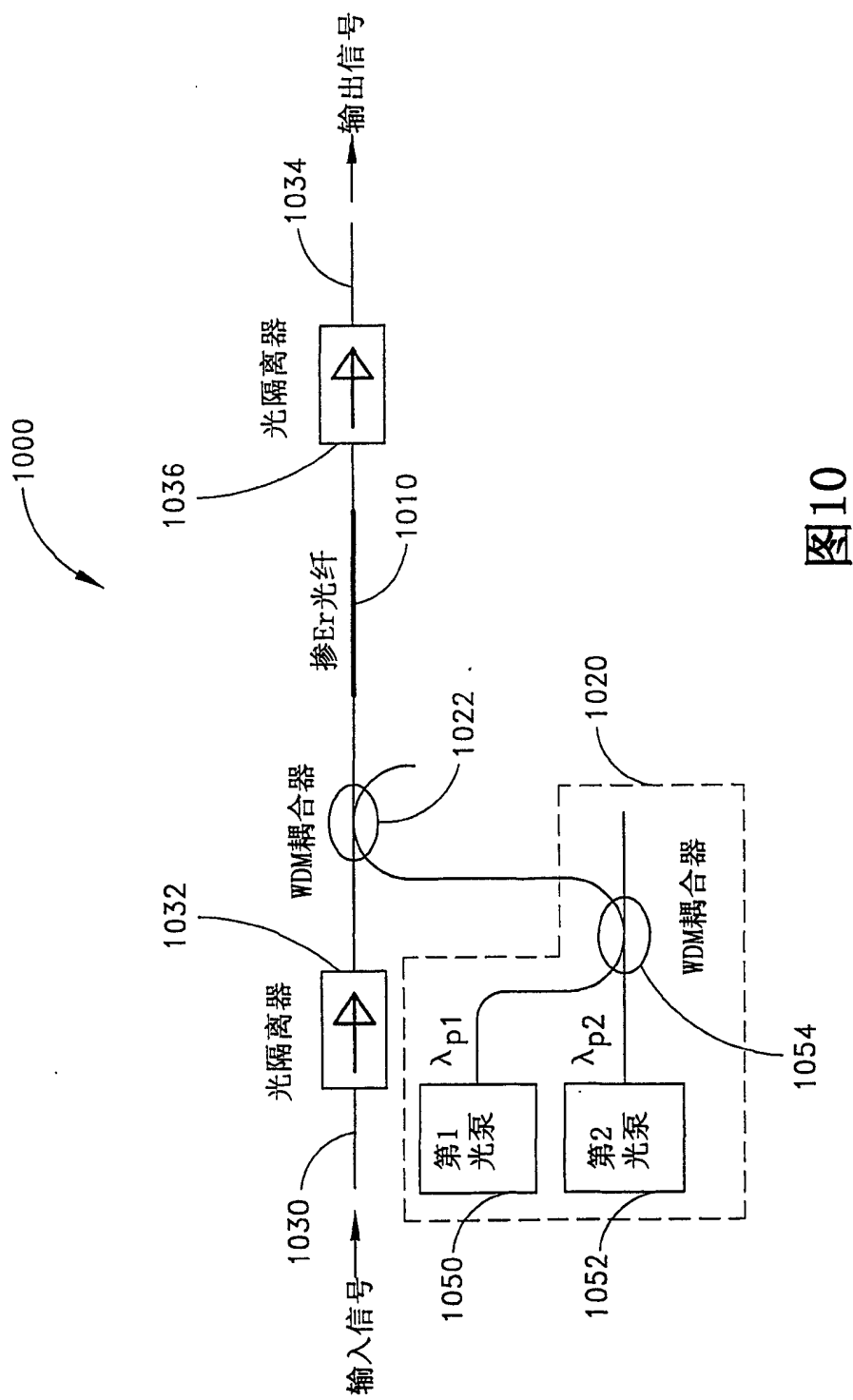


图10

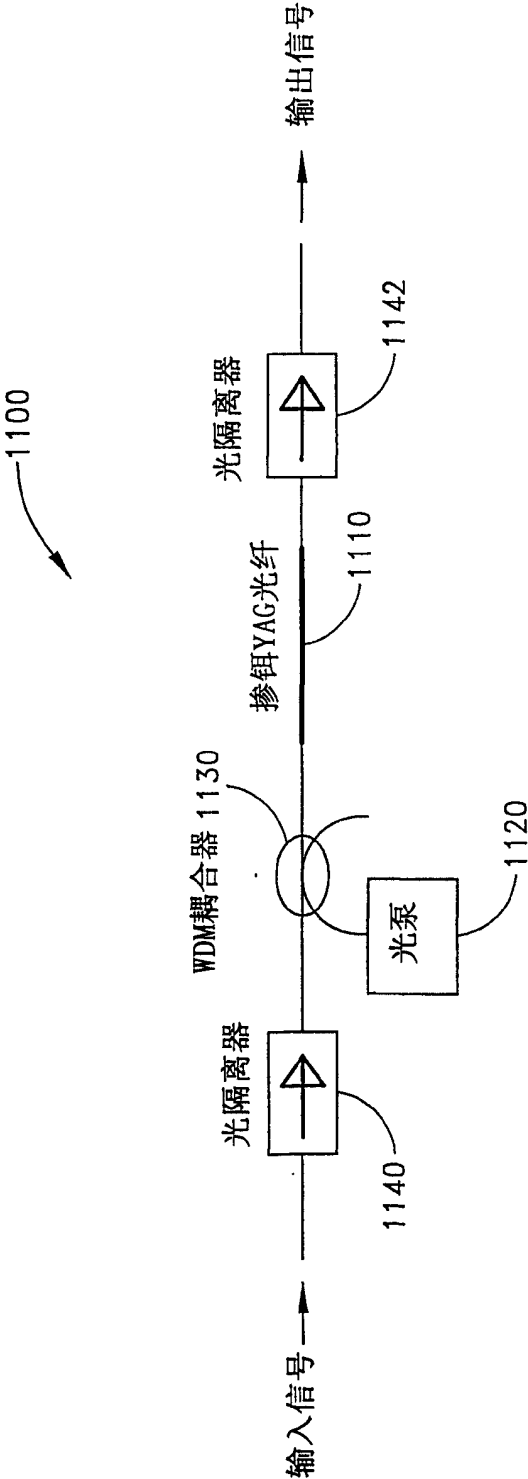


图11

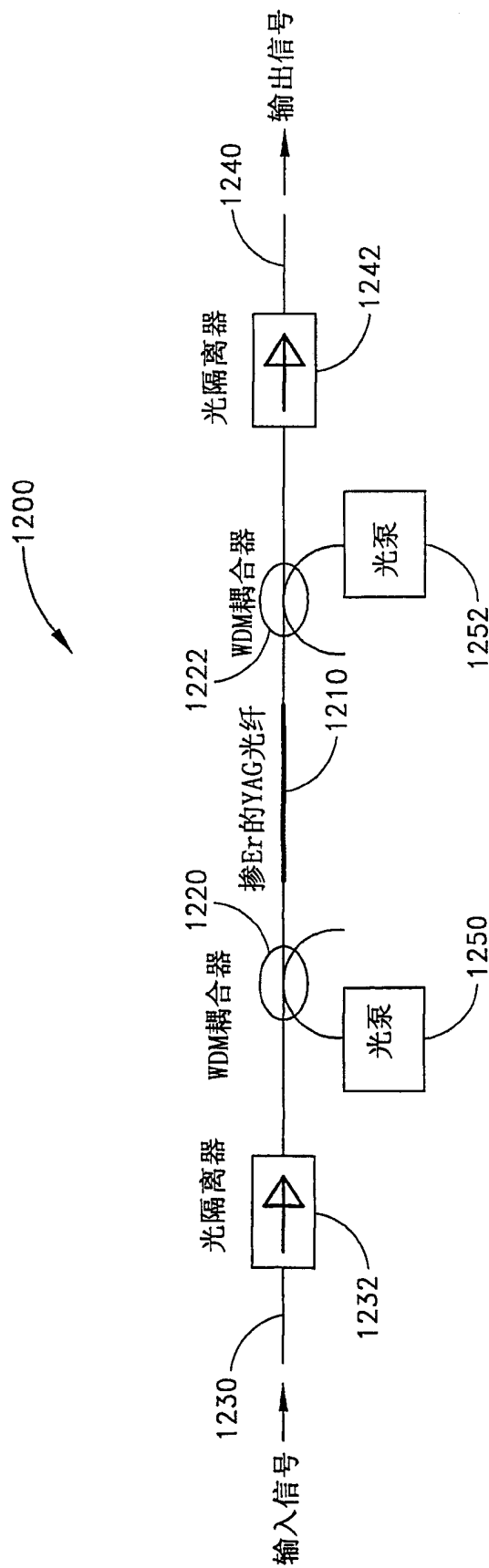


图12

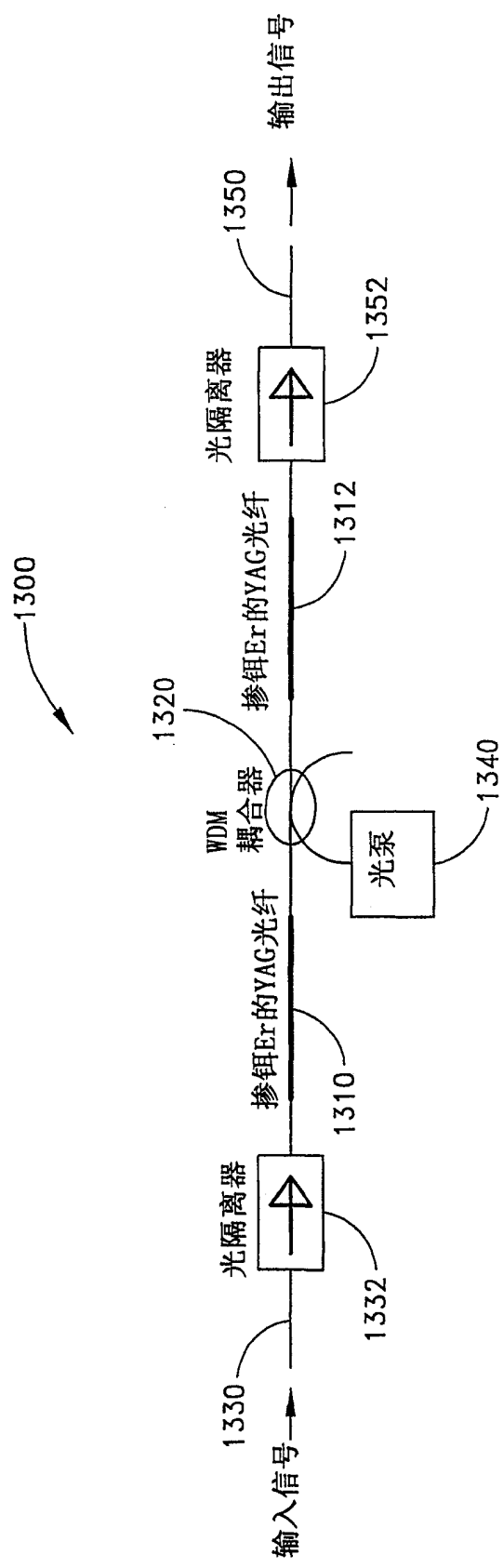


图13

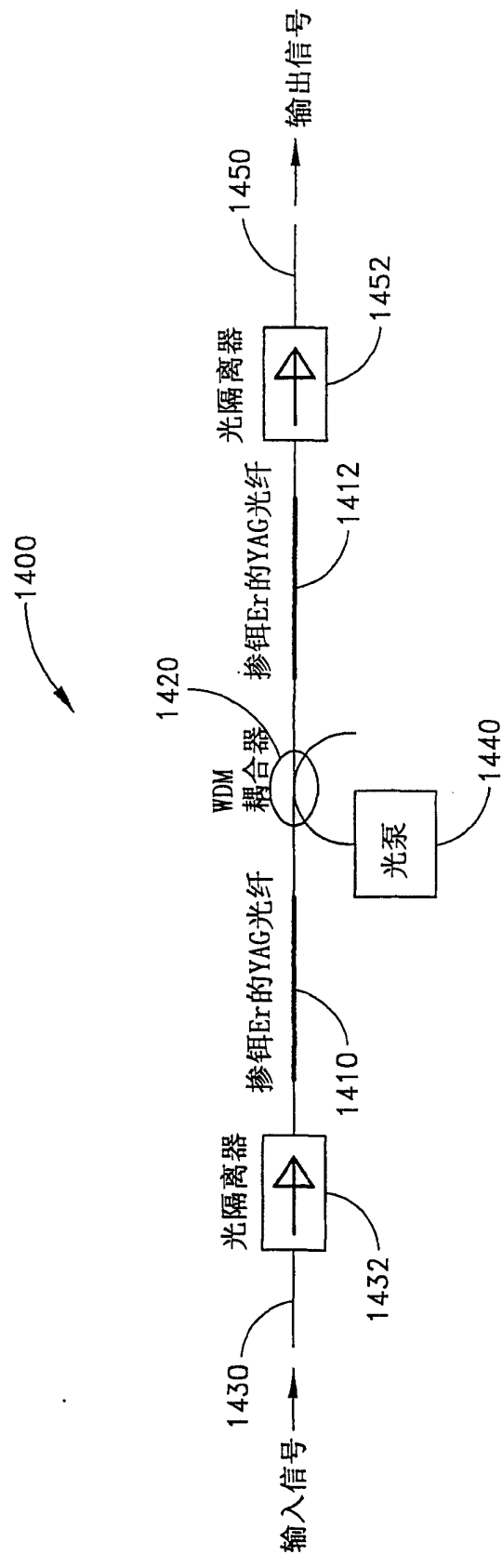


图14

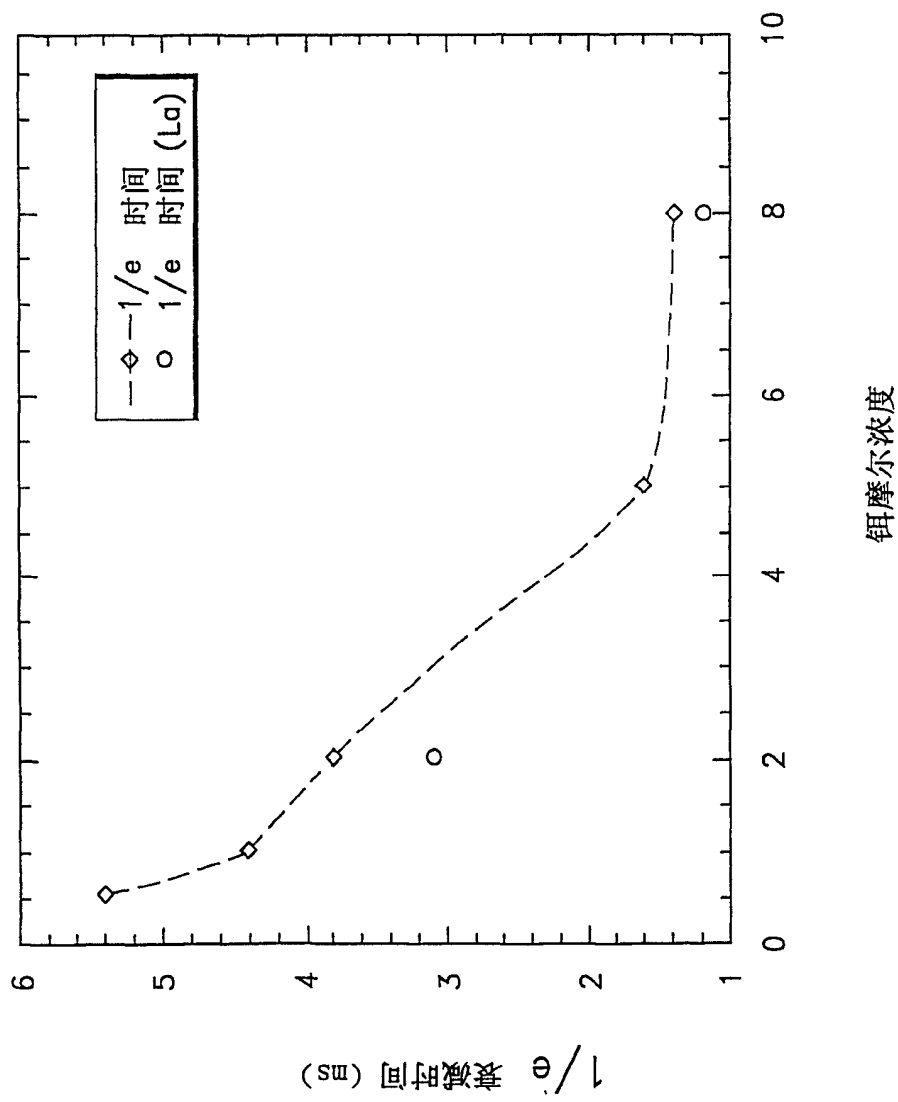


图15

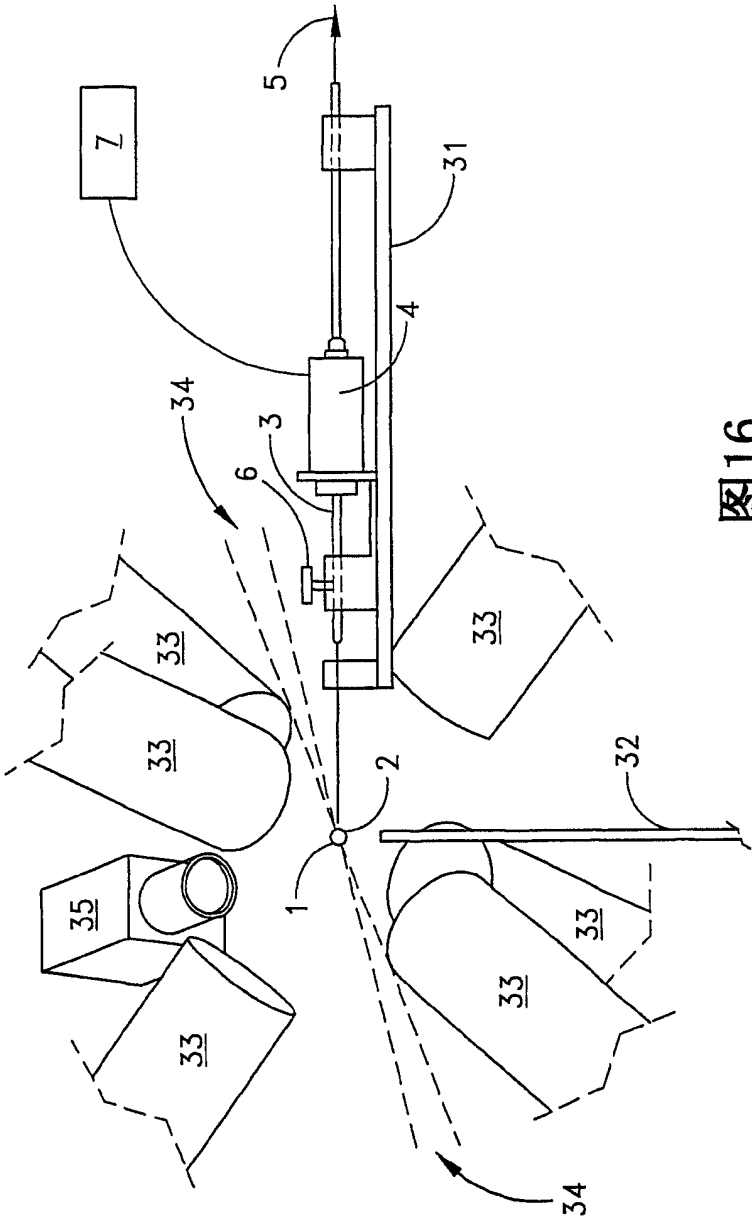


图16

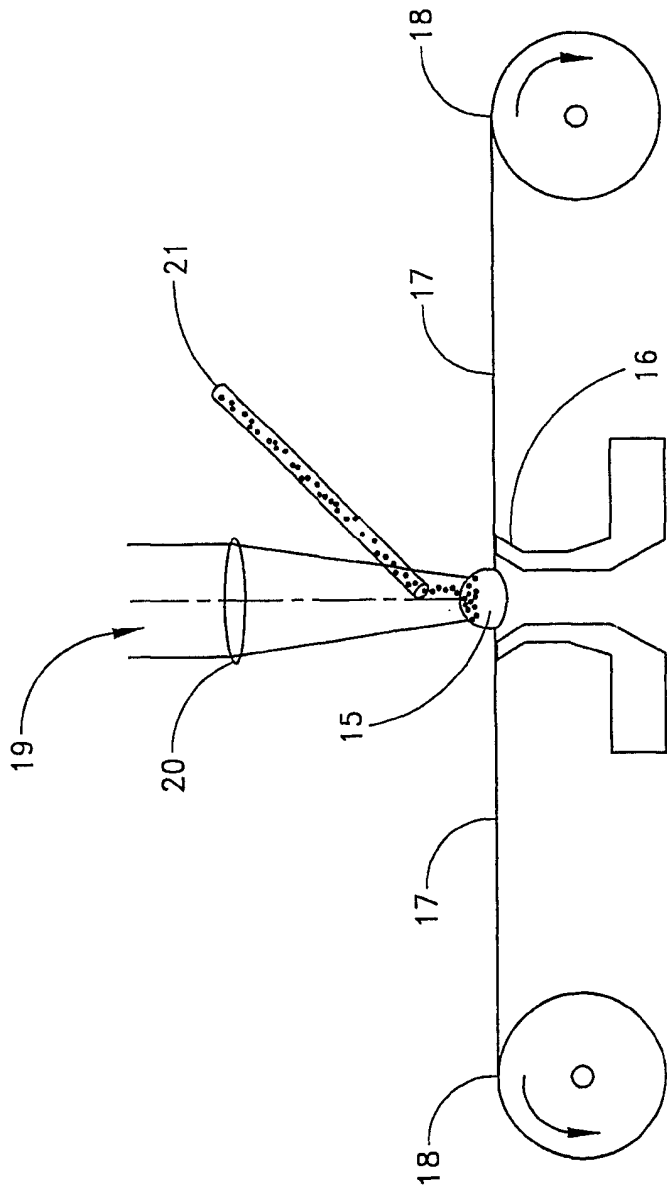


图17

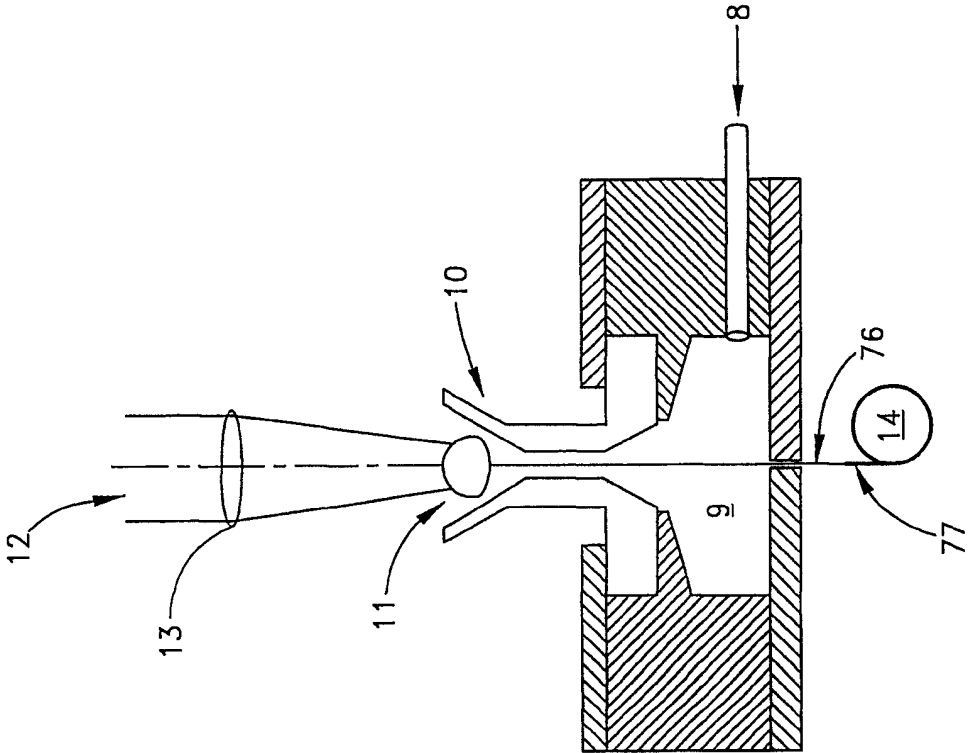


图18

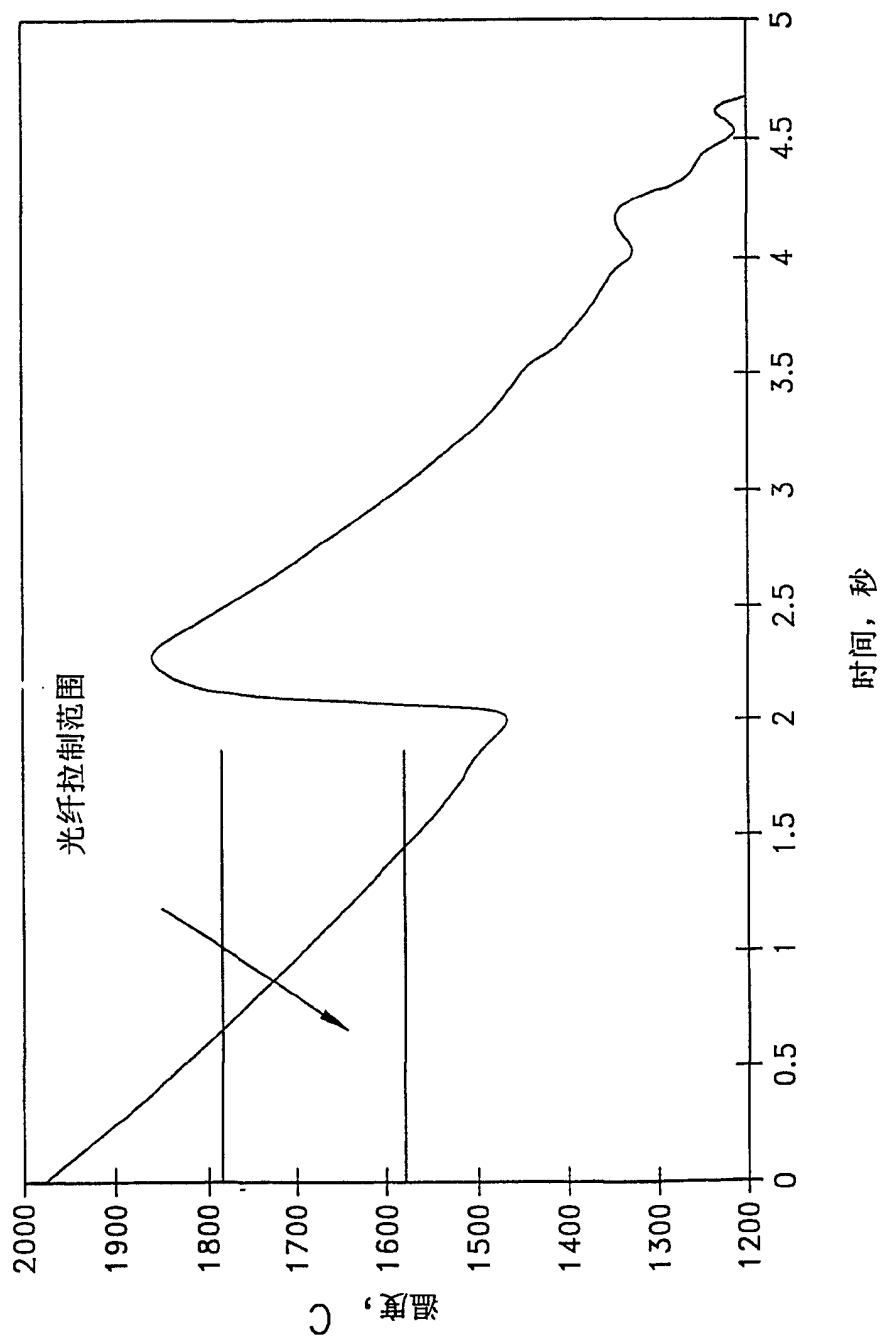


图19

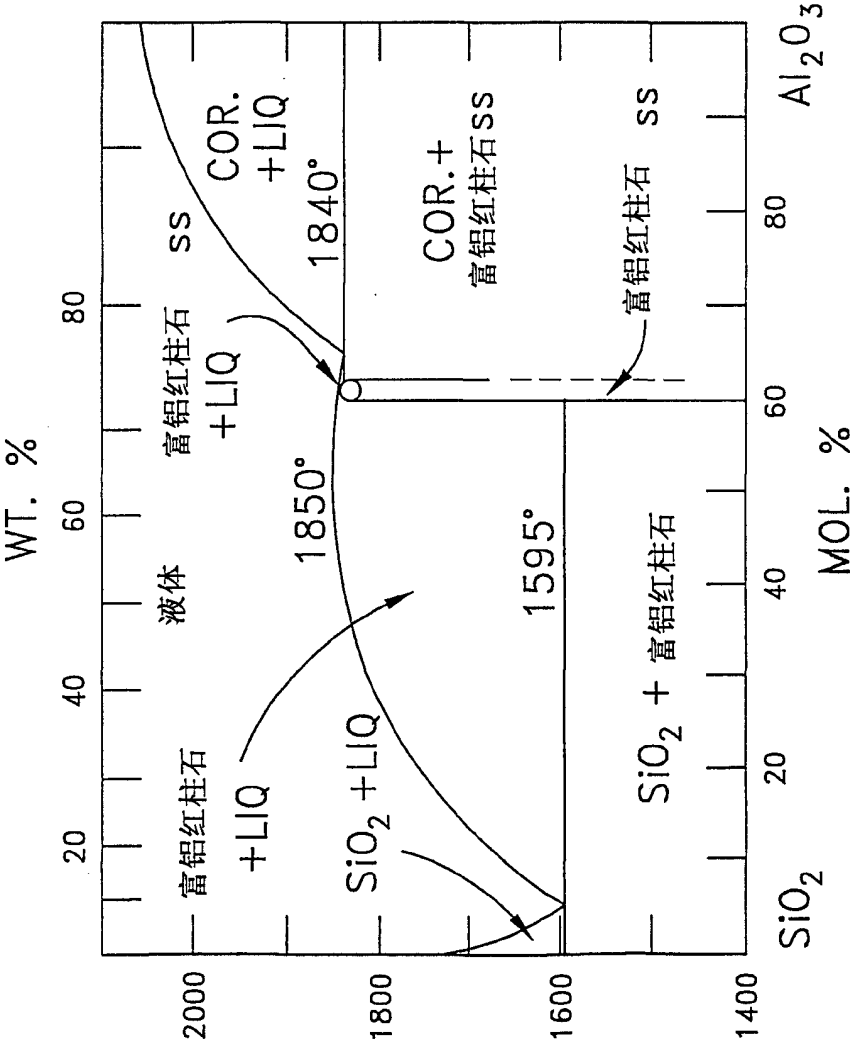


图20

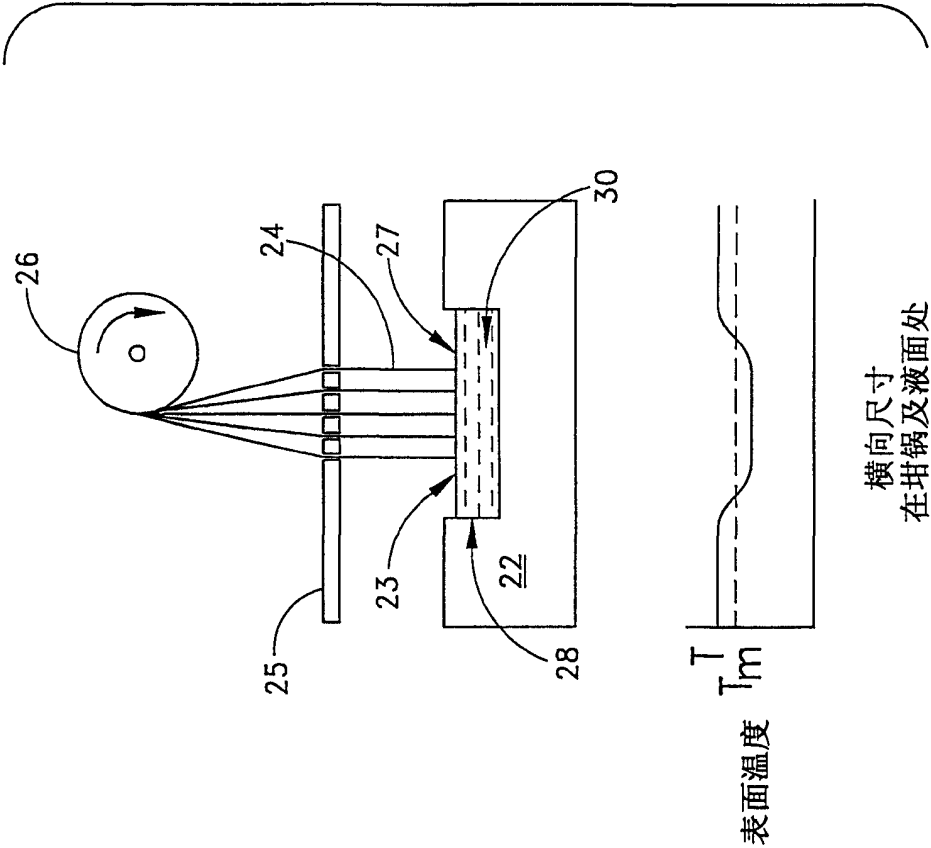


图21

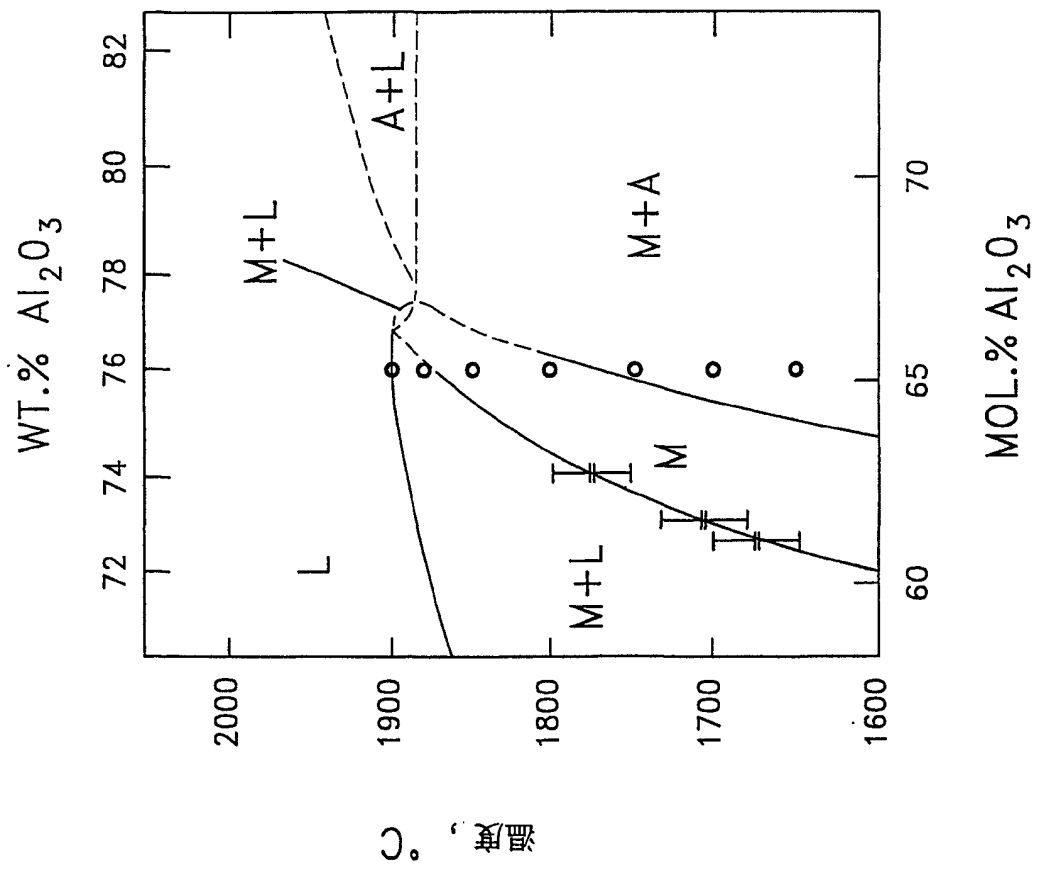


图22

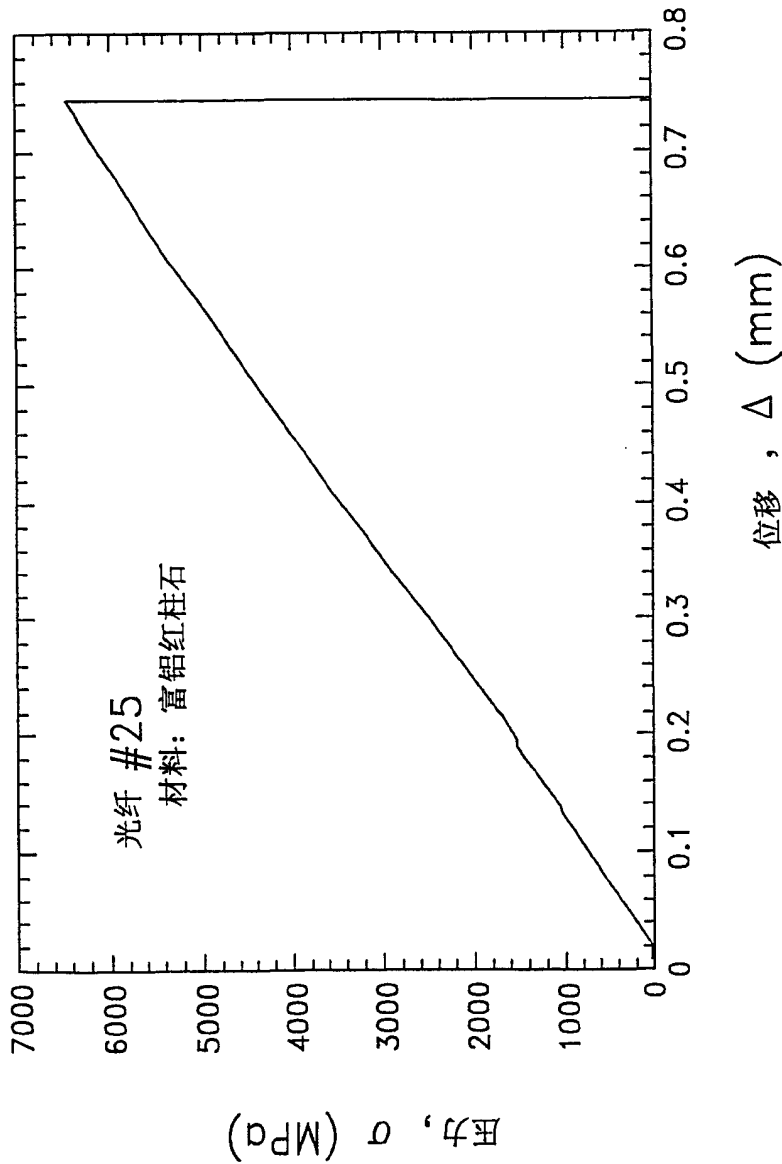


图23

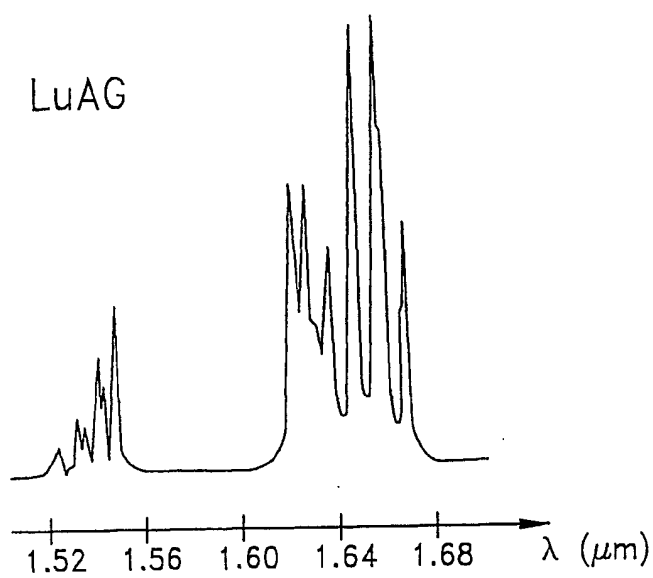


图24A

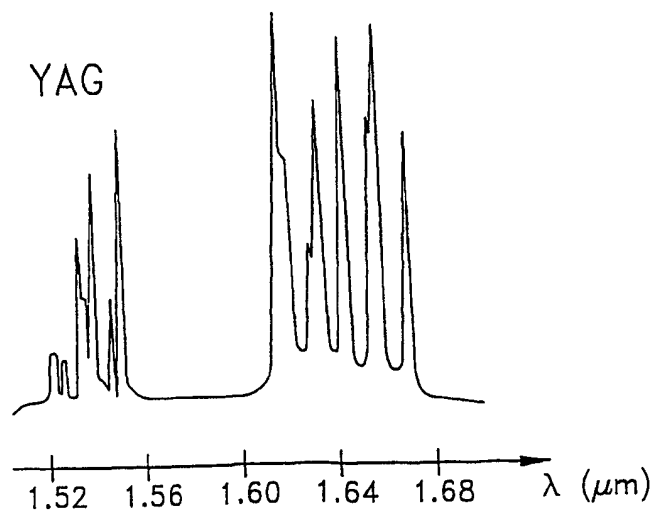


图24B