

文章编号: 1001-3806(2008)01-0018-05

新型差分光调制器在空间光通信中的应用

王 程, 刘劲松*

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为了提高空间光通信的抗干扰能力, 采用了一种基于二波耦合基础的新型差分光调制器件。实验结果表明, 利用这种差分调制器实现的差分模式自由空间光通信, 能有效抑制云团、雾等干扰因素引起的共模干扰, 空间光通信的通信质量通过这种差分传输方式得到显著提高。

关键词: 非线性光学; 空间光通信; 二波耦合; 差分调制

中图分类号: TN929.12.0437 **文献标识码:** A

A novel differential optical modulator for the application of the spatial optic communication

WANG Cheng LIU Jin-song

(School of Optoelectronics Science and Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract In order to improve the anti-interference ability of spatial optic communication, a novel optic differential modulation device based on two-wave mixing was adopted. Experimental results proved that the common-mode noise caused by cloud cluster, fog, etc. could be eliminated effectively with the help of differential mode spatial optic communication. The quality of spatial optic communication can be markedly improved by taking differential method.

Key words nonlinear optics; space optic communication; two-wave mixing; differential modulation

引 言

空间光通信在一些不便架设光缆、电缆等传输介质的场合有着广泛的应用。虽然有时可用无线方式进行通信, 但无线通信的带宽是无法与空间光通信提供的带宽相比的。还有一些特殊场合, 譬如在战场, 为防止无线方式通信被敌方窃听或被敌方测出电台方位, 尽量少使用无线方式, 而在战场上的一些恶劣环境下, 尽快架设光缆、电缆等传输介质又比较麻烦, 而空间光通信这种方式则既能有很好的保密性能, 又能方便架设, 因此有着很大的应用前景。

目前的空间光通信主要采用单路光束传输, 信号光被调制到发射光中, 在接收端首先进行光电转换, 然后将信号从中解调出来。采用单路光束传输时受气候因素的影响比较大, 不妨假设在信号发射端调制信号

时, 信码“1”对应有光, “0”对应无光。譬如当发射光通过云团或雾等介质时, 光能量将被衰减一部分, 这时在接收端收到的光电转换信号将相应有所衰减, 这时进行信码再生时, 可能会将原来的“1”误判为“0”, 因此, 这种空间光通信在气候条件不好的情况下, 通信质量将受到很大影响, 增大了系统的误码率^[1]。

上面提到的单光束传输的通信模式与电接口信号的单极性通信传输模式非常类似, 譬如 RS232 接口信号传输, 在本文中, 不妨将这种单光束传输的通信模式称为单极模式空间光通信。众所周知, 在电信号的传输过程中, 有时为了提高信号的抗干扰能力, 通常采用差分模式的传输方式, 譬如通常使用的 RS485/RS422 接口信号。在高速电路板的设计过程中, 有时为了提高抗干扰能力, 通常也采用了类似差分模式的传输方式, 譬如采用发射极耦合逻辑 (emitter-coupled logic, ECL)、正向发射极耦合逻辑 (positive emitter coupled logic, PECL)、低电压差分信号 (low voltage differential signaling, LVDS) 等差分电平信号标准。由于单光束传输的通信模式抗干扰能力较低, 设想一下能否对空间自由光通信也采用差分的传输方式来传输呢? 正是从这个角度出发, 作者提出了一种新型差分模式空间光通信。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10574051; 10174025)

作者简介: 王 程 (1974), 男, 博士研究生, 主要从事非线性光学的实验研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: jsliu4508@vip.sina.com

收稿日期: 2006-11-29; 收到修改稿日期: 2007-01-04

1 差分通信模式的优点

在电接口的串行通信中,实践证明,差分模式 RS422/RS485 要比单极模式 RS232 具有更好的抗干扰能力。那么,能否将这种电接口的串行通信模式引入到空间光传输领域呢?如果能够将差分信号调制到两束发射光束中,在接收端采用差分接收判决电路,那么线路的抗干扰能力显然会有很大改善。问题的关键在于能否设计出这种差分调制光发送器件。

对于空间光通信而言,通信质量主要受云、雾、气流等干扰因素影响。在目前常用的单极模式空间光通信中,在信号发射端调制信号时,信码“1”对应有光,“0”对应无光。譬如当发射光通过云团或雾等介质时,光能量将被衰减一部分,这时在接收端收到的光电转换信号将相应有所衰减,这时进行信码再生时,可能会将原来的“1”误判为“0”,增大了系统的误码率,因此,在气候比较恶劣的环境下,目前的这种单极空间光通信有很大的局限性,有时甚至不能通信。而采用本文中提出的差分空间光通信模式将会带来 3 个显著优点。

第 1 个优点,当调制了差分数据信号的两束光通过云团或雾等介质时,将会对两束光能量都有一定的衰减,而差分接收不关心单束光能量,而是这两束光的能量差值,由于云团或雾等介质引入的干扰是一种共模干扰,当将接收的两束光的能量相减时,这种共模干扰将被抑制。

第 2 个优点,由于差分空间光通信模式关心的是两束光的能量差值,因此可将两束发射光的能量调到很高,被调制的信号只占总能量的很小一部分。这么做的原因在于,光电转换及电光转换都有一个固有的响应时间,当信号幅度变化越大,这种响应造成的延时也就越大,这样将会影响通信的传输带宽。当被调制的信号只引起总能量的很小一部分波动时,接收端将会有很快的响应速度,这样将会极大地提高通信速率。由于两束发射光的能量可调得很高,穿透云团或雾等介质的能力有所增强,因此,传输的距离也比单极空间光通信远得多。

第 3 个优点,能极大改善飞鸟或大的漂浮物对光路阻挡而造成通信中断的情况。人们为克服飞鸟等阻挡物造成通信中断情况发生,有时采用两路独立收发空间光通信系统^[2],相当于是对系统的备份,可共模干扰还是无法克服。采用差分传输方式时,在接收端首先经过隔直处理电路提取出两路互为差分的交流信号,然后经过减法电路合成还原的数据信号,再经过判决电路进行信码再生。

图 1 所示为几种情况下的差分接收过程示意图。

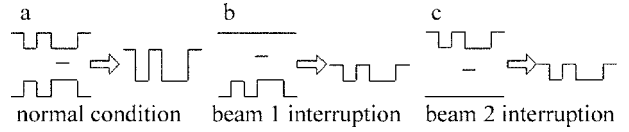


Fig 1 Scheme of differential receiving process under several conditions

其中图 1a 为正常情况时的差分接收过程,由于两路差分信号的相位反向,因此,两信号相减后的还原信号与光路 1 的信号相位相同,幅值增加,共模干扰消除。图 1b 与图 1c 所示是其中一路光路中断时的情况,光路信号中断时对应应该光路接收的交流信号变为 0 这时可看到经过减法电路后仍能还原原始数据信号,还原信号的幅值比正常情况下的要低,通过设置适当的判决电路门限便可进行信码再生,只不过此时由于不能消除共模干扰,通信线路的误码率将有所上升,但不会导致线路中断。

2 差分光调制原理

前面对单极空间光通信及差分空间光通信进行了比较分析,后者的优点是显而易见的,接下来介绍如何设计这种新型的基于二波耦合的差分调制光发送器件,图 2 所示为双光束耦合示意图, Λ 为光栅周期, φ

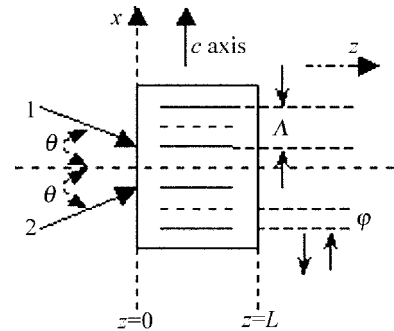


Fig 2 Schematic drawing of two-wave mixing

为体光栅(折射率强弱变化)与光强分布(干涉条纹明暗变化)在晶体光轴方向 c 存在的相移角。

双光束耦合是光折变材料所具有的基本特性^[3]。当光波的干涉条纹通过光折变效应写入调制的折射率相位栅时,光波又通过体相位栅发生衍射,在自衍射过程中,两束光的光强及相位分布将随传播距离发生变化,并发生相互转移。描述这种非线性光耦合理论首先由 KOEGLIN K 提出^[4]。

光折变材料的二波耦合特性在许多领域得到广泛应用,如全息存储^[5],弱信号放大^[6]等。在大多应用中,有时为了实现弱信号的放大,往往需要采用外加电场或移动光栅技术^[7]使得干涉条纹与体相位栅之间存在一定相移角,当相移角达 $\pi/2$ 时存在最大能量转移。本文中的差分光调制器也要利用光折变材料的二波耦合特性,不过要满足以下两个条件:(1)为了使得该调制器具有高速调制能力,此时要使得在不加调制

信号时,干涉条纹与体相位栅之间夹角为 θ 通常将这种类型的体相位栅称为局域响应非相移型体相位栅,此时两束光之间将不存在稳态能量转移,但若两束入射光之间存在能量差时,将存在瞬态能量转移过程;(2)为了使得在不加调制信号时两者不存在瞬态能量转移,两入射光能量尽量相同,这可通过采用 Mach-Zehnder波导技术来实现。

根据光折变晶体的带导模型,对描述双光束耦合规律的 Kukhtarev方程采取载流子小量近似、准平衡近似、一阶光栅近似和慢变化包络近似,可得到描述双光束耦合中能量耦合方程的动态解^[8]及稳态解^[3],不管是稳态解还是动态解,两束输出光之间的能量波动都具有差分模式。

在不计介质吸收条件下,双光束耦合的动态能量耦合方程可表示为^[8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial I_1(z, t)}{\partial z} = \Gamma I_1(z, t) I_2(z, t) \\ \frac{\partial I_2(z, t)}{\partial z} = -\Gamma I_1(z, t) I_2(z, t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, Γ 为增益耦合系数。求解(1)式可得双光束耦合的动态解:

$$\begin{cases} I_1(z, t) = I_1(0) \frac{1+m^{-1}}{1+m^{-1} \exp(\Gamma z)} \\ I_2(z, t) = I_2(0) \frac{1+m}{1+m \exp(-\Gamma z)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $I_1(0)$ 与 $I_2(0)$ 为两束光的初始入射光强, m 为两输入光强比值:

$$m = \frac{I_1(0)}{I_2(0)} \quad (3)$$

在不考虑损耗的条件下,其中一束光增加的能量等于另一束光减少的能量。利用双光束耦合产生的体相位栅进行差分光调制时,主要是利用待调制信号改变体相位栅与干涉条纹之间的相移角 φ 从而导致两输出光信号能量随待调制信号变化而做差分波动。由于有信号调制时,两束光之间的能量耦合是一个动态过程,只能用动态解来分析两束光的能量波动。在文献[8]中虽然给出了(2)式中增益耦合系数 Γ 的具体表达式,但该表达式很复杂,并且没给出增益耦合系数 Γ 与相移角 $\varphi(t)$ 之间的具体对应关系。在两束入射光能量接近的条件下,通过实验发现增益耦合系数 Γ 满足经验公式:

$$\Gamma = B \sin[\varphi(t)] \quad (4)$$

式中, B 是与空间电荷场有关的比例系数。在双光束耦合过程中,空间电荷场与 $I_1(z, t) \times I_2(z, t)$ 成正比。由于两入射光能量接近,并且调制信号引起的两光束之间的能量波动较小,因此,在忽略损耗条件下, $[I_1^0(z, t) + \Delta I] \times [I_2^0(z, t) - \Delta I]$ 可近似认为与 $I_1(z, t) \times I_2(z, t)$

相等,因此,比例系数 B 在该条件下可近似看作常比例系数。为了数值模拟两输出光能量受调制信号的影响,不妨取调制信号为 $A \sin(\omega t)$, 在调制信号的作用下,两入射光的相位差会发生改变,引起干涉条纹发生变化,相位栅与干涉条纹之间的相移角 φ 变化满足:

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \zeta A \sin(\omega t) \quad (5)$$

式中, ζ 为调制比例系数,对于局域响应非相移型体相位栅而言, φ_0 为 0 或 π ; 对于非局域响应相移型体相位栅而言, φ_0 为 $\pm\pi/2$ 。前面已介绍过,在利用二波耦合作差分光调制器时需要的体相位栅是局域响应非相移型体相位栅。此处不妨取为 0 则(5)式可写为:

$$\Gamma = B \sin[\zeta A \sin(\omega t)] \quad (6)$$

将(6)式代入(2)式,通过数值模拟可得到两输出光能量波动与调制信号的变化关系,如图3所示。由图

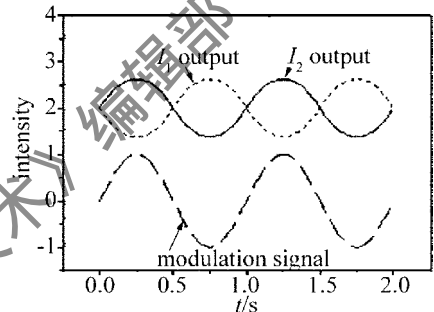
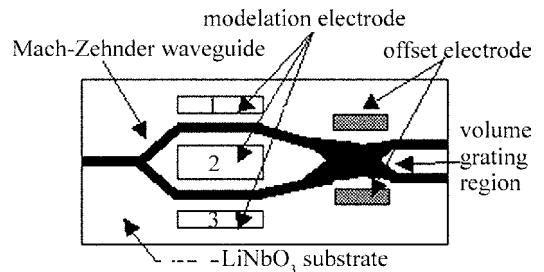


Fig 3 Two output signal intensity fluctuates with the turbulence

3中可看出,两输出信号具有差分特性,并且两输出信号与调制信号频率相同,由此可看出,利用双光束耦合作用的确能实现差分光调制功能。

以上是从理论上模拟了二波耦合作用中的差分调制过程,要利用这个特性制作差分光调制器件,必须将该技术与波导技术结合起来。为了满足上面所说的两个条件,可采用图4所示的波导结构^[9]。采用波导结



构很容易满足进入体光栅区域的两束光能量相同,图4中所示的偏置电极是为了调整在无调制信号时体相位栅与干涉条纹的相移角。

该差分光调制器的工作原理是:在第1个分支波导中将入射光分割成功率相等的两束光,确保了到达体光栅区域的两束光能量相同。在直波导中,这两个导模分别受到大小相等而符号相反的调制电场作用,导致进入第2个分支波导的两束光相位发生变化,从

而使得在体光栅区域的干涉条纹发生变化,对于高速信号调制而言,干涉条纹的变化速度是很快。高速数据信号的随机分布特性,将导致干涉条纹左右不停地移动,由于光折变效应的体相位栅建立时间要远大于干涉条纹的变化时间,从统计平均角度可以认为空间电荷场基本保持不变,从而认为体相位栅基本是稳定不变的,所以体光栅与光强分布之间的相移角 φ 将跟随调制信号做快速变化。这时两束光之间将发生瞬态能量转移过程,从而导致两输出光能量随调制信号变化而做差分变化。由于 φ 的变化很快,因此,在输出光中的能量波动很小,接收端经过光电转换后的信号是一个直流分量加上交流被调制的信号分量,通过差分接收处理电路便可提取出被调制的数据信号。这时施加调制信号,便可实现高速差分光调制功能。

有关利用光折变材料的二波耦合特性研制光调制器的研究很早就有报道,不过由于光折变材料的响应时间比较慢,对于响应时间为数十秒的 LiNbO_3 晶体,几十赫兹的调制光便视为高速调制光^[10,11],文献中采用的调制机制是体相位栅的响应机制,由于受到响应时间的限制,因此,调制速度不能太高。而本文中采用的调制机制是干涉条纹相对体相位栅的变化机制,故可获得很高的调制速度。

3 实验研究

由于受条件限制,目前还未能做出图 4 所示的波导器件,不过还是可以通过以下办法来验证。实验原理图如图 5 所示。将 He-Ne 激光经分束镜分成两束

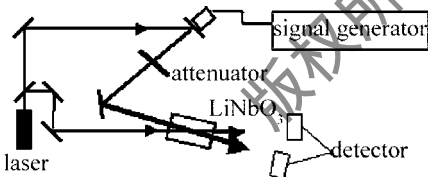


Fig 5 Experimental schematic diagram of optical differential signal modulation

光,中性衰减片的目的是用来调整入射到 LiNbO_3 晶体的两束光能量尽量相同,信号发生器接到喇叭或压电陶瓷等位移振动器上,这样当信号发生器有信号时,将会引起位移振动器变化,继而导致入射到晶体的相位差发生变化,从而使得在体光栅区域的干涉条纹发生变化。通过前面对动态耦合特性的分析可知,增益耦合系数主要受体光栅与光强分布之间的相移角 φ 影响, φ 的变化将引起两束输出光之间的能量随即跟随变化,从而达到快速调制目的。

图 6 所示为泰克示波器所观测到的两路原始光电转换信号,从图中看到两束信号的幅值基本相同,并且变化很平稳,主要原因是调制信号引起的能量波动很

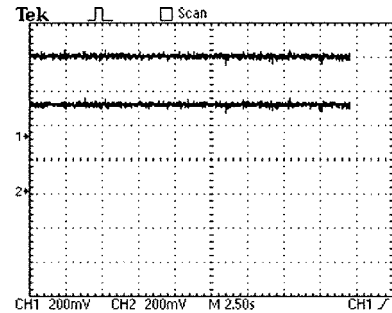


Fig 6 Unprocessed detecting signals

小,只占总能量的很小一部分。如果不通过特殊处理电路很难发现其中加载有差分数据信号,对此原始信号首先经过一个隔直处理电路,去掉直流成分,并对得到的交流信号进行放大。图 7 是将原始的信号发生器

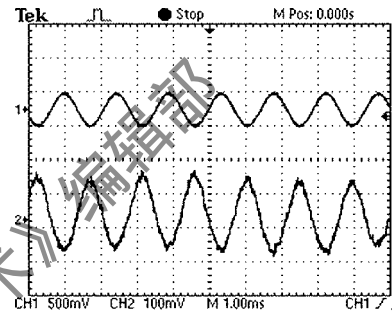


Fig 7 The output of the signal generator and the amplified AC signal of the pump beam

信号与其中一路交流放大信号做对比,通道 1 (CH 1) 对应信号发生器信号,信号频率为 1.617kHz 通道 2 (CH 2) 对应其中一路交流放大信号,由此图可发现,探测到的信号基本能实现对原始信号的再现。

图 8 是观测到的两路交流放大信号,不难发现两

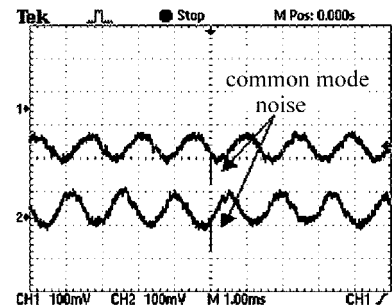


Fig 8 Two amplified AC signals

者具有差分信号特性,图中还捕捉到共模干扰信号,这种干扰对两路信号的影响是同等。将两路差分放大信号再经过差分接收处理电路,可得到图 9 通道 1 所示的再现信号,图 9 中通道 2 显示的是一路交流放大信号,对比发现,这种再现信号消除了共模干扰信号。通过以上对实验数据的分析,可以看到利用干涉条纹相对体相位栅的变化机制进行调制的差分光调制方法切实可行,并且可获得很高的调制速度,理论上应该可接近目前 Mach-Zehnder 干涉仪强度调制器所达的调制速度^[12]。

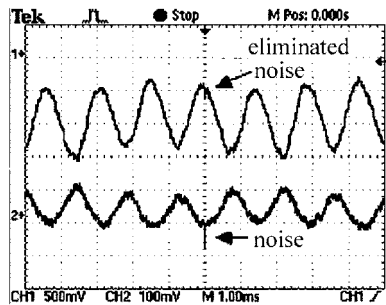


Fig 9 The regenerated signal and the amplified AC signal of pump beam

4 结 论

将电信号差分传输的优点引入到光信号的差分传输中,提出了一种新型的差分光调制器件,将这种器件应用到空间光通信中,不仅会极大提高系统的抗干扰能力,而且还可使得空间光通信距离得到延伸。这将在空间光传输中有着广泛的应用前景,这种新型差分光调制器件不仅可应用在光传输,还可应用在光互连,全光网络等方面。

参 考 文 献

- [1] REKLN J C, DAV IDSON F M. Bit error rate in a free-space laser communication system with a partially coherent signal beam [J]. SPE, 2003, 4884 95-102
- [2] ZUO F, XIE F Z. Two transmitter two receiver free space optical communication system [J]. Laser & Infrared 2004, 34(6): 419-421(in

- Chinese).
- [3] YEH P. Two wave mixing in nonlinear media [J]. IEEE J Q E, 1989 25(3): 484-519.
- [4] KOEGLN K H. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. Bell System Technical Journal 1968, 48(9): 2909-2945
- [5] MOK F H, TACK I T M C, STOLLH M. Storage of 500 high resolution holograms in a LiNbO_3 crystal [J]. Opt Lett 1991, 16(8): 605-607
- [6] WEBB D J, SOLYMAR L. Amplification of temporally modulated signal beams by two wave mixing in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ [J]. J O S A, 1990 B7(12): 2369-2373.
- [7] REFREGIER P, SOLYMAR L, RAJENBACH H, *et al* Two beam coupling in photorefractive $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal with moving grating theory and experiments [J]. J A P, 1985, 58(1): 45-57
- [8] SHI S X, GUAN Y C, AN Y Y, *et al* Study of dynamical properties of TWM in photorefractive crystals [J]. Chinese Journal of Lasers 1989 16(8): 462-467(in Chinese).
- [9] WANG Ch, LIU J S, WU K N, *et al* A novel free-space optical communication [J]. SPE, 2005, 6021 1-9
- [10] GUO S J, SHI S X, GUAN Y C, *et al* Theory of transmission and amplification of high speed amplitude modulated beam in photorefractive crystal [J]. Acta Optica Sinica 1990, 10(4): 299-305(in Chinese).
- [11] SHI S X, GUAN Y C, LIU J *et al* Amplification properties of high speed amplitude modulated beams in photorefractive crystal [J]. Acta Optica Sinica 1991, 11(9): 805-809(in Chinese).
- [12] QIU Q, LONG Z L, TAN J *et al* Microwave signal transmission over space optical communication system [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 43-45(in Chinese).

(上接第 10页)

制作的实验原理、装置和及其高功率耦合实验。由于熔接型侧面耦合器无须用光学胶作为折射率匹配介质,因此能够承受很高的抽运光功率密度。在该熔接型侧面耦合器高功率耦合实验中,获得了输出功率达到 7.23W 的光纤激光输出,耦合效率优于 70.5%。所研制的熔接型侧面耦合器在侧面抽运的高功率双包层光纤激光器中具有很好的实用前景。

参 考 文 献

- [1] GOLDBERG L, COLE B, SNITZER E V-groove side pumped $1.5\mu\text{m}$ fibre amplifier [J]. Electron Lett 1997, 33(25): 2127-2129
- [2] KOPLOW J P, MOORE S W, KLNER D A V. A new method for side pumping of double clad fiber sources [J]. IEEE J Q E, 2003 39(4): 529-540.
- [3] OU P, YAN P, GONG M L, *et al* Multi-coupler side pumped Yb-doped double clad fiber laser [J]. Chinese Optics Letters 2004 2(5): 285-287
- [4] YAN P, GONG M L, LI Ch *et al* Distributed pumping multi-fiber

- series fiber laser [J]. Optics Express 2005 13(7): 2699-2706
- [5] OU P, YAN P, GONG M L, *et al* Optimum design on three-position-pumped high-power double clad fiber laser [J]. Laser Technology 2007, 31(1): 57-60(in Chinese).
- [6] WEI W L, OU P, YAN P, *et al* Side pumping coupler technology for double clad fiber [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 116-121(in Chinese).
- [7] XU J Q, LIU J H, KUMAR G, *et al* A non-fused fiber coupler for side-pumping of double clad fiber lasers [J]. Opt Commun 2003, 220 389-395.
- [8] OU P, YAN P, GONG M L, *et al* Studies of pump light leakage out of couplers for multi-coupler side-pumped Yb-doped double clad fiber lasers [J]. Opt Commun 2004 239: 421-428
- [9] OU P, YAN P, GONG M L, *et al* Coupling efficiency of angle-polished method for side-pumping technology [J]. Opt Engng 2004 43(4): 816-821.
- [10] FU JI F A H, SUZAKI Y, TACHIBANA A. Optical fiber splicing technique with a CO_2 laser [J]. Appl Opt 1976 15(2): 320-321
- [11] EGASHIRA K, KOBAYASHI M. Optical fiber splicing with a low-power CO_2 laser [J]. Appl Opt 1977, 16(6): 1636-1638