

## 光纤激光阵列自组织相干合成的性能研究

赵思思,叶征宇,王智勇

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要:**研究了基于倏逝波耦合的自组织相干合成激光阵列。应用静态“本征模/超模”理论推导阵列模式;通过数值方法考察阵列激光系统的动态特性进而分析输出功率的稳定性、阵列的扩展能力和阵列模式;并对两种方法得到的阵列模式进行了比较分析。结果表明:输出功率的稳定性以及输出功率的大小受阵列的锁相性能和阵元间的相位差影响,随着激光单元数目的增加,阵列总输出功率会非线性增大。通过跟踪各个阵元的相位变化并考察阵列模式的近场和远场特性,初步验证了 37 单元阵列的相干合成,随着阵元数目的增加,中心阵元与其邻近层阵元的振幅差会逐渐减小。

**关键词:** 光纤激光阵列; 相干合成; 锁相; 倏逝波耦合

**中图分类号:** TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)01-0063-06

## Coherent combining of evanescent coupled fiber laser array

Zhao Sisi, Ye Zhengyu, Wang Zhiyong

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Evanescent coupled fiber laser array was described and studied. Array modes were derived by applying the static eigenmode/supermode theory. The stability of output power, the array scalability and the array mode were analyzed by numerically studying the dynamical characteristics of the laser array system. The array modes based on the above two methods were compared and analyzed. The results show that the output power level and the power stability are directly affected by the phase locking property and the relative phase errors respectively. With the increase of laser elements, the total output power of the array increases nonlinearly. By tracking the phases of array elements and examining the laser array property in both near and far fields, the evidence that at least 37 fibers can be coherently combined, is given. With the increase of fiber elements, the power differences between central element and its neighbors become smaller gradually.

**Key words:** fiber laser array; coherent combining; phase locking; evanescent coupling

收稿日期:2011-05-17; 修订日期:2011-06-05

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0002)

作者简介:赵思思(1985-),女,博士生,主要从事光纤激光器方面的研究工作。Email:ellan\_627@yahoo.com.cn

导师简介:王智勇(1970-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事大功率激光器方面的研究工作。Email:zywang@bjut.edu.cn

## 0 引言

光纤激光阵列相干合成<sup>[1-2]</sup>可以实现高光束质量、高亮度激光输出,能够有效地解决单个光纤激光器由于非线性效应等因素导致的功率极限问题,因此已成为当前研究的热点,是未来激光技术的重要发展方向,具有广阔的应用前景和重要的研究价值。

光纤激光阵列相干合成技术分为主动<sup>[3-4]</sup>和被动<sup>[5-6]</sup>两种方式。其中,AFRL采用主动的LOSET方法<sup>[4]</sup>对5路光纤激光进行相干合成,获得了725W的高功率输出。NGIT运用被动锁相方法<sup>[5]</sup>实现了4路激光的710W相干输出。虽然主动和被动方案均已获得了较大功率的相干激光输出,但是上述两种方法存在对准困难、机械稳定性低的问题,而且LOSET使用电反馈环路,成本较高。使用全光纤装置可以有效解决这些问题,例如光纤耦合器方法<sup>[6]</sup>和被动自组织多芯光纤装置<sup>[7]</sup>,但是光纤耦合器方法始终面临一个问题——相干合成的激光经由一根光纤输出,这依旧不能避免光纤非线性、热效应等问题,因此不能保证大功率、高扩展性激光输出。

熔融光纤器件倏逝波耦合光纤激光阵列相干合成技术采用全光纤装置。由于熔融光纤器件内的倏逝波耦合作用使得每个激光单元内的电场发生改变,这将产生两种效果:一是使阵列单元间的能量重新分布,二是改变各光纤内激光光场的相位,用以补偿初始相位差和各光纤长度差,从而使各单元实现同相位态激光输出。目前,HRL<sup>[8]</sup>已经对19单元激光阵列进行了探索性实验,实现了相干合成,但同时为了确定该方案是否具有可行性和实用性,相关理论和机理尚待研究。所涉及的研究问题包括:该方案是否能够实现稳定的激光输出,是否能够稳定锁相,能够被锁住的激光单元数目为多少,是否存在极限等。

文中对倏逝波耦合光纤激光阵列进行了讨论,理论研究了该光纤激光阵列的阵列模式,数值分析了输出功率的稳定性、阵列扩展性和锁相能力,并考察了37单元光纤激光阵列的相干合成。

## 1 理论模型

### 1.1 腔模型

采用熔融光纤器件对光纤激光阵列进行相干合

成的物理模型如图1所示,包括多个子光纤激光器、近全反射的光纤光栅对、熔融光纤器件和耦合输出端。其中,子光纤激光器彼此独立,只在熔融光纤器件内进行能量耦合,以实现各子激光单元间的频率锁定(频谱压缩)、相位锁定。

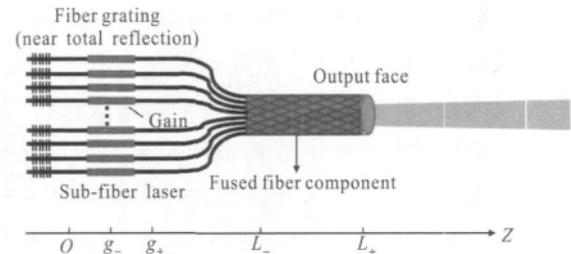


图1 腔模型

Fig.1 Cavity model

在腔模型中,每个激光单元的复振幅电场  $E_n$  和实增益  $G_n$  的动态方程可以用迭代映像表示为<sup>[9]</sup>:

$$E_n(t+T) = \sum_{m=1}^N A_{nm}(t) E_m(t) \quad (1)$$

$$G_n(t+T) = G_n(t) + \varepsilon [G_n^p(t) - G_n(t)] - \frac{2\varepsilon}{I_{\text{sat}}} (1 - e^{-G_n(t)}) I_n(t) \quad (2)$$

式中:往返场演化算符  $A_{nm} = r \sum_l S_{nl} e^{G_l + j\phi_l} S_{lm}$ ,  $r$  为耦合输出端的反射系数,  $\phi_l$  为第  $l$  根光纤往返谐振腔一周电场相位的变化,  $e^{G_l}$  为第  $l$  根光纤两次通过增益区的振幅放大,  $S_{nl}$  为熔融光纤器件所对应的耦合矩阵  $S$  的元素;  $G_n^p$  为激光单元  $n$  的泵浦参数;  $\varepsilon$  为往返一周的时间  $T$  与光纤激光荧光时间  $\tau_s$  的比;  $I_{\text{sat}}$  为饱和光强。

对于常用的镱掺杂光纤,  $\tau_s$  通常在 ms 量级,而实验室光纤通常为几米长,所以估算  $\varepsilon$  在  $10^{-4}$  量级。此外,模型假设在一个环形周期内,实增益场  $G_n$  是慢变的<sup>[9]</sup>,在一定程度上可理解为  $\varepsilon G_n^p \ll 1$ ,这也就限定了  $G_n^p$  的取值。当然,如果器件要在远大于阈值的泵浦下工作,也可以适当增加光纤长度。对于  $\phi_n$ ,  $1 \mu\text{m}$  的光纤长度变化都会导致  $\pi$  的相位变化,而且由于克尔效应、温度变化和压力都会改变光纤长度,从而产生附加的相位因子,对于每个阵列单元都可以用一个随机角度表示  $\phi_n$ 。

此外,模型中没有考虑增益的有限带宽,因此激光的纵模频率仅由光纤长度决定。对于实增益  $G_n$ ,其迭代映射方程(2)是基于 Rigrod Analysis 得到的。Rigrod 针对大输出耦合损耗条件下振荡的高增益激光器,提出更为精确的输出功率分析。此分析仅适用于均匀激光跃迁(假设对称饱和增益介质),也就是说在增益饱和和下线型不发生变化,而且该分析没有考虑空间烧孔效应,并且忽视了去波回波的干涉作用。鉴于文中的实增益(公式(2))是基于 Rigrod Analysis 推得,也就限制了此模型仅适用于大环形增益和大耦合输出,即对于一定的高增益范围的增益取值是有效的,比如稀土掺杂高增益光纤激光器。

1.2 阵列模分析

阵列电场等于各个单元电场的叠加,将阵列电场写成矢量形式:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,每个单元电场  $E_i$  可以由公式(1)表示,将公式(1)代入公式(3),得到:

$$\mathbf{E}(t+T) = r\mathbf{S}\mathbf{B}\mathbf{S}\mathbf{E}(t) \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{B} = [e^{G_1+j\phi_1} \quad e^{G_2+j\phi_2} \quad \dots \quad e^{G_N+j\phi_N}]^T$ 。

定义阵列的超模式为方程(4)的解。这些超模式矢量满足<sup>[10]</sup>:

$$\mathbf{E}(t+T) = e^{j\sigma T}\mathbf{E}(t) \quad (5)$$

式中:  $\sigma$  是阵列超模式的传输常数,将公式(5)代入公式(4),得到本征方程:

$$[r\mathbf{S}\mathbf{B}\mathbf{S} - e^{j\sigma T}\mathbf{I}]\mathbf{E}(t) = 0 \quad (6)$$

求解本征方程(6)就可以得到本征值和本征矢量。本征矢量  $\mathbf{E}$  表征了激光阵列超模式的近场分布。

以 7 单元阵列为例,令矩阵  $\mathbf{P} = r \cdot \mathbf{S}_i \mathbf{B}_i \mathbf{S}_i^T$ ,  $\lambda = e^{j\sigma T}$ , 得到:

$$[\mathbf{P} - \lambda \mathbf{I}]\mathbf{E}(t) = 0 \quad (7)$$

求解方程(7)可以得到本征值。求得本征值以后,可以进一步求出与本征值相对应的本征向量,即阵列超模式。将由  $\lambda_i$  决定的模式称为第  $\nu$  个超模式。

对于 7 单元阵列,设耦合区域长度  $L=3$  cm,激

光波长为 1 060 nm,反射率为 0.04,泵浦参数为 10,光纤纤芯直径为 20  $\mu\text{m}$ ,单元间距为 40  $\mu\text{m}$ ,可求得各阶超模的近场分布,如图 2 所示。其中, $x-y$  面表示阵列端面的空间分布, $z$  坐标表示各阶超模的光强分布。模式 1 为反相位模(out-phase),模式 2 为同相位模(in-phase),模式 3 和 6 具有相同的本征值,模式 5 和 7 具有相同的本征值。

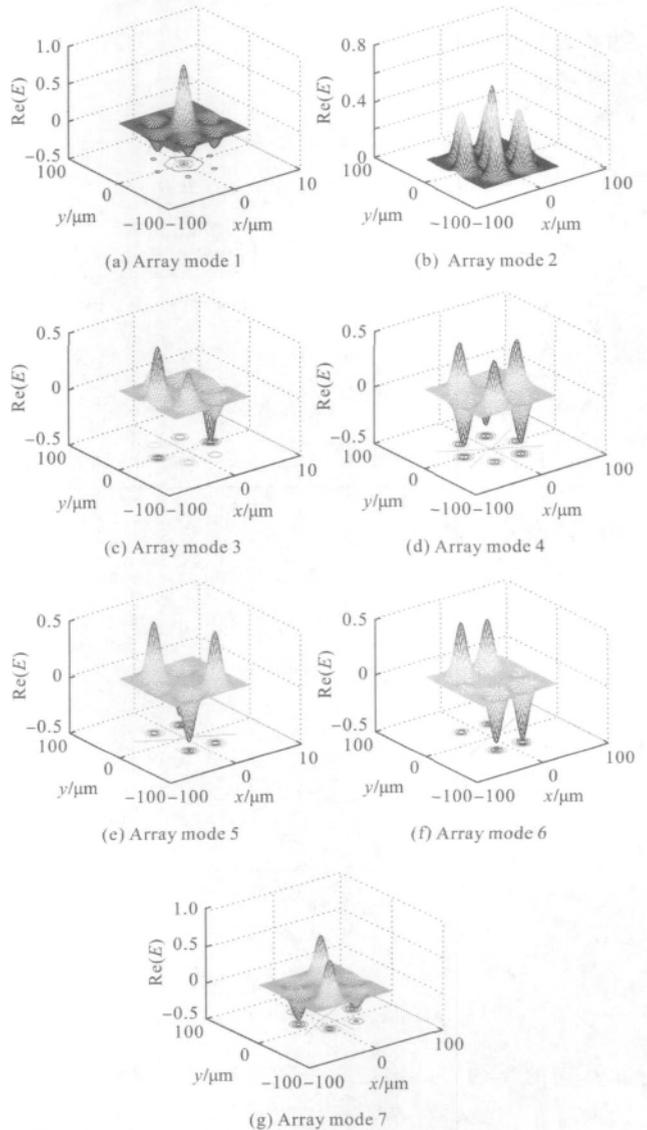


图 2 阵列模式近场分布

Fig.2 Array modes in near-field

2 数值结果与分析

输出功率稳定性和阵列扩展性是衡量光纤激光阵列自组织相干合成性能的两个重要因素。而制约这两个关键因素的是阵元之间的被动锁相性能和锁

相态。因此,通过数值解方程(1)和(2)得到每个阵元随时间变化的电场序列进而得到其相位序列。在此基础上,研究倏逝波耦合光纤激光阵列输出功率的稳定性,分析阵列模式并将其与理论分析得到的阵列模式进行对比,而且通过动态追踪阵列单元间的相位和相位差来讨论阵列的扩展性。模拟中采用的参数如表 1 所示。经计算,耦合系数为 0.024。并设定初始信号电场的相位随机,其电场的振幅设为 0.1,初始增益设为 0.1。熔融光纤器件长 3 cm,受激发射截面  $1 \times 10^{-25}$ 。

表 1 模拟参数

Tab.1 Numerical parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Wavelength/nm	1 060	Core reflectivity	1.467
NA for core	0.06	Cladding reflectivity	1.466
NA for cladding	0.46	Fluorescence time/ms	1
Core diameter/ $\mu\text{m}$	20	Saturation intensity/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	$1.87 \times 10^9$

## 2.1 稳定性和阵列模式

以 7 单元阵列为例,研究阵列输出功率的稳定性。当泵浦增益为 10,光纤长度为 9 m,图 3 描述了

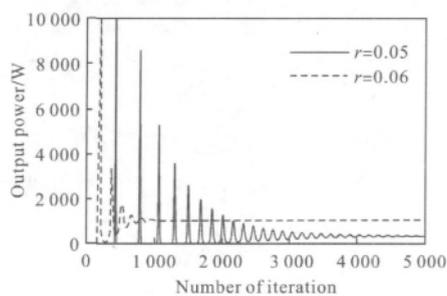


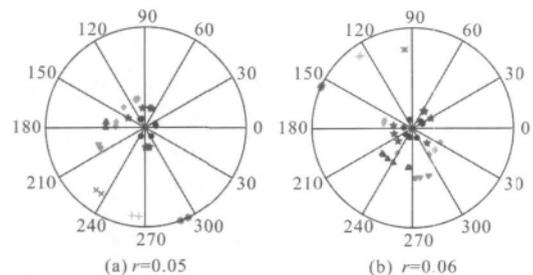
图 3 输出功率随时间的变化

Fig.3 Output power with time series

在不同的反射率下输出功率随时间的动态变化。在这两种反射率条件下,激光阵列输出功率都是由最初的不稳定趋于最终的稳定态,反射率为 0.06 时实现稳定输出所用的迭代次数少,且输出功率大于反射率为 0.05 时的输出功率。显然,对于光纤激光阵列,简单用最佳反射率解释最大稳定输出功率既不深入也不透彻。因为光纤激光阵列的行为比单个激光器要复杂得多,光纤激光阵列实现稳定高功率输出是各个阵元集体作用的结果。

事实上,倏逝波耦合光纤激光阵列是通过被动自组织方式实现相干合成,阵元之间能否实现相位锁定以及相位相互锁定的过程和阵元之间的(恒定)相差大小将直接决定输出功率的稳定性和输出功率大小,此外,该相位特性还会限制阵列极限。因此,文中对上述 7 单元阵列在两种反射率情况下的阵元相位进行动态追踪,研究其锁相特性对输出功率的影响,并对其阵列模式进行讨论。

假设 7 单元阵列各阵元的初始相位随机分布,图 4 描述了在 0.06 和 0.05 两种反射率下阵元相位的动态变化过程,同一圆环上的标点代表同一时刻下 7 个阵元的相位,且圆环半径的增大对应阵列振荡时间的增加。图中,圆点为阵元初始时刻随机相位,随着时间的增加,即迭代次数增多、互耦合次数增加,阵元相位关系趋于稳定,即相位相互锁定;米字为输出功率稳定时阵元相位的最终状态。可见,虽然初始相位都是随机分布,但是随着时间的增加,各个阵元相位在不断地向一起靠拢,最终在这两种反射率下,阵元间都可以实现稳定锁相,这恰好反映出输出功率由不稳定趋于稳定的变化过程。同时也可以看出,在这两种反射率下(图 4(a)和 4(b)),最终的相位锁定状态不一样,反射率为 0.06 时,锁相效果更好,相位差更小,且输出功率较大(图 3)。也就是说,反射率影响最终的锁相效果,而最终的锁相效果(相位差)直接影响输出功率的稳定性和强弱。

图 4 7 单元阵列相位变化( $l=9 \text{ m}$ ,  $G^p=10$ )Fig.4 Phase dynamics of 7-fiber array ( $l=9 \text{ m}$ ,  $G^p=10$ )

## 2.2 扩展性

文中对光纤激光阵列的功率扩展能力进行简单的考察。在相同泵浦条件下( $G^p=5$ ),变换激光阵列的参数(光纤长度和反射率)以期找到最优的光束合成条件,使得该阵列的稳定输出功率最大。模拟中选用 6 种光纤长度(4.5 m、6 m、7.5 m、9 m、10.5 m、12 m)和

范围在 0.02~0.3 的反射率。对于 7 单元激光阵列, 当反射率为 0.06、光纤长度为 6 m 时可获得最大输出功率。对于 19 单元激光阵列, 当反射率为 0.04、光纤长度为 7.5 m 时可获得最大输出功率。对于 37 单元激光阵列, 当反射率为 0.03、光纤长度为 4.5 m 时可获得最大输出功率。在此基础上, 将 7、19、37 阵列在各自的最优组合参数条件下的动态输出功率进行比较, 如图 5 所示。随着光纤激光单元数目的增加, 输出功率非线性增加。在调试中, 还发现反射率对稳定输出功率的影响大于光纤长度对其的影响, 而且在泵浦参数相同的条件下, 随着阵列单元数目的增加, 激光系统若要实现稳定的输出, 就需要减小各单元的反射率。此外, 从上面的数值结果还可以看出, 37 单元光纤激光可以实现稳定输出。

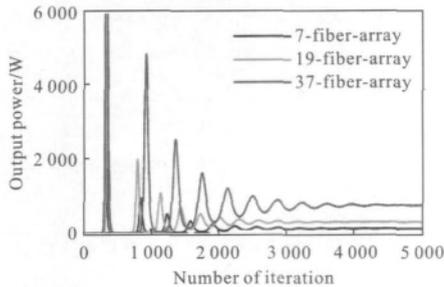


图 5 倏逝波耦合激光阵列扩展性

Fig.5 Scalability of evanescent fiber laser array

### 2.3 阵列模式

当给定光纤激光阵列和熔融光纤器件的相关参数后, 就可以利用公式(1)和(2)进行数值求解, 得出任意时刻阵列单元的场。

7 单元阵列在不同反射率下(0.05 和 0.06)都实现同相模, 图 6 描述了其三维阵列模式图的侧视图(振幅已归一化)。可以看出, 与 1.2 理论推导的同相模相比, 数值求得的阵列模式的中间阵元输出功率更大。这是因为 1.2 节的推导中未考虑相位因素, 而在数值计算中考虑了由于阵元间的互耦合导致的相位变化, 这说明相位信息也会进一步影响阵元间振幅的重新分布。

图 7(a)为 37 单元光纤激光阵列稳定输出时的阵列模式的近场分布。由图可见, 最内层输出功率最大, 并且逐层递减; 而且与 7 单元阵列模式近场相比(图 6), 37 单元阵列模式中心阵元与其最邻近层阵元振幅差小于 7 单元阵列。图 7(b)为 37 单元激

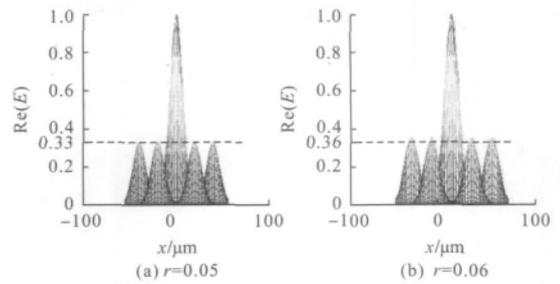


图 6 7 单元阵列在不同反射率下的阵列模式( $l=9$  m,  $G^p=10$ )

Fig.6 Array modes of 7-element fiber arrays ( $l=9$  m,  $G^p=10$ )

光阵列实现稳定输出相位相互锁定时相应的远场分布, 图 7(c)为 37 单元激光阵列初始时刻没有进行倏逝波耦合时初始相位随机分布所对应的远场分布, 可以看出, 37 单元阵列最终可以实现相干合成。

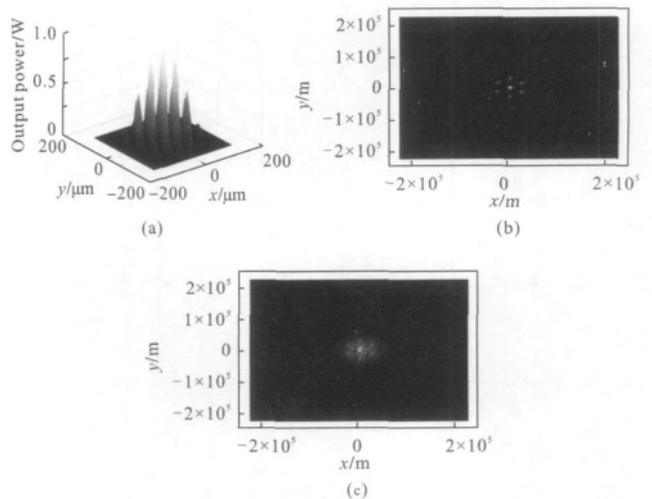


图 7 37 单元阵列稳定输出时的近场、远场分布

及其初始时刻的远场分布

Fig.7 Near and far field distribution of 37-fiber array at stable state and far field distribution at initial state

此外, 从上述数值模拟与理论相比较可以看出, 阵列本征模/超模理论讨论的是阵列的最终状态, 是静态分析; 迭代映射数值模拟讨论的是激光阵列的动态特性, 是过程分析。文中从过程和结果两方面一并对阵列模式进行研究, 分析了阵列的模式特性。在 1.2 节中, 对于  $N$  单元激光阵列, 存在  $N$  种可能的阵列模式。同时, 在 2.3 节中数值求解公式(1)和(2), 即实时跟踪电场的动态变化, 当输出功率稳定时, 描绘出 7 和 37 单元阵列电场(阵列模式)。将 1.2 节与 2.3 节的结果对比不难发现, 当阵列稳定时, 实现的阵列

超模式是同相模式,具有高效的鉴模能力。

### 3 结 论

文中对倏逝波耦合相干合成激光系统的稳定性、扩展性进行研究,对基于“超模式”理论推导的阵列模式和依据“阵列激光动态特性”数值解得到的阵列模式进行了比较和分析。结果表明:影响相干合成输出功率稳定性和输出功率大小的主要因素是锁相特性和相位差;随着激光单元数目的增加,阵列总输出功率非线性增大;37 单元阵列可以实现相干合成被探索性验证。此外,鉴于模型基于 Rigrod Analysis,因此上述结论对高输出耦合、高增益激光器具有参考价值,下一步工作将会考虑有限增益带宽。

#### 参考文献:

- [1] Lou Qihong, He Bing, Zhou Jun. Fiber lasers and its coherent beam combination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 155-159. (in Chinese)  
楼祺洪, 何兵, 周军. 光纤激光器及其相干组束 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 155-159.
- [2] Cao Jianqiu, Xu Xiaojun, Hou Jing, et al. Coherent combining technology of fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 456-460. (in Chinese)  
曹涧秋, 徐晓军, 侯静, 等. 光纤激光器的相干合成技术 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 456-460.
- [3] Anderegg J, Brosnan S, Cheung E, et al. Coherently coupled high-power fiber arrays [C]//SPIE, 2006: 6102: 202-206.
- [4] Shay T, Baker J, Sanchez A D, et al. High-power phase locking of a fiber amplifier array[C]//SPIE, 2009, 7195: 71951M.
- [5] Loftus T H, Thomas A M, Norsen M, et al. Four-channel, high power, passively phase locked fiber array [C]//ASSP, 2008: WA4.
- [6] Sabourdy D, Kermene V, Desfarges-Berthelemot A, et al. Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers [J]. *Opt Express*, 2003, 11(2): 87-97.
- [7] Cheo P, Liu A, King G. A high-brightness laser beam from a phase-locked multicore Yb-doped fiber laser array [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(5): 439-441.
- [8] Brucesselbach H, Jones D C, Mangir M S, et al. Self-organized coherence in fiber laser arrays [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(11): 1339-1341.
- [9] Rogers J L, Peles S, Wiesenfeld K. Model for high-gain fiber laser arrays [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, 41(6): 767-773.
- [10] Huang W P. Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview [J]. *JOSA A*, 1994, 11(3): 963-983.

### 下期预览

## 基于 SOA 偏振旋转效应的双极性乘法器

高凯强, 盛新志, 吴重庆, 冯震, 石茵汀

(北京交通大学 理学院 光信息研究所 发光与光信息科学技术教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 为了在光信号处理中引入正负的概念,提出了偏振态旋转现象描述的光信号双极性乘法。以偏振光学的斯托克斯矢量法理论为基础,分析了半导体光放大器(SOA)的偏振旋转现象,从理论上提出了偏振旋转双极性乘法的概念。为了验证该理论,提出了一种实现双极性乘法器的实验方案,在实验系统中实现了两级 SOA 偏振旋转,其中第一级对光信号进行偏振编码,第二级完成双极性乘法。通过对乘法器输入不同排列组合的数据,验证了双极性乘法的 4 种情况,并给出了相关实验结果与分析。