文章编号：0258-7025(2009)09-2346-06

偏振光束相干合成的理论分析

董洪成[1,2] 刘 阳[3] 易 葵[1] 贺洪波[1] 邵建达[1]

([1] 中国科学院上海光学精密机械研究所，上海 201800；[2] 中国科学院研究生院，北京 100049
[3] 河北交通职业技术学院交通工程系，河北 石家庄 050091)

摘要 描述了偏振光束相干合成的原理和过程，分析了光束参数、相位差和振幅比变化、光束重合度以及平行度等参数对合成效率的影响，讨论了实施合成的实验参数及方法。结果表明，相对于强度变化，相位差的变化对合成效率的影响是主要的；重合度误差的影响相对较小，在实验的精度内(重合度＜2.5%)完全可以忽略；平行度使合成效率发生了最显著的降低。分析认为，大尺寸的光束合成可以有效减少平行度引起的合成损耗，光束直径为 8 mm 并通过等厚干涉判断光束重合时，受重合度影响的合成效率大于 95%。此外，等强度合成是获得最大合成强度、简化实验的最佳合成方式。

关键词 激光技术；合成效率；偏振合成；相干合成

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**：10.3788/CJL20093609.2346

Theory Analysis of Polarized Beam Coherent Combination

Dong Hongcheng[1,2] Liu Yang[3] Yi Kui[1] He Hongbo[1] Shao Jianda[1]

([1] *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 201800, *China*
[2] *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
[3] *Department of Traffic Engineerig, Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang, Hebei* 050091, *China*)

Abstract The principle and progress of polarized beam coherent combination is described. The influence factors, such as beam parameters, the change of amplitude-ratio and phase-difference, beam overlap-ratio and parallelism on the combining efficiency, are researched. The experimental parameters and methods of operating combining are also discussed. The results show that the influence of phase-difference variation on combining efficiency is much greater rather than the change of amplitude-ratio, and the effect of the overlap-ratio error is so small that it can be ignored when it is smaller than 2.5%. Moreover, the parallelism error makes the combining efficiency have a significant decrease. It is found that combining beams with large beam diameter have a benefit for the effective reduction of combining loss caused by the parallelism error, the combining efficiency is greater than 95% when the beam diameter is 8 mm and interference of equal thickness is used to test the coincidence. In addition, beam combination with identical intensity is the best method for getting the maximum intensity and simplifying operation.

Key words laser technology; combining efficiency; polarization combination; coherent combination

1 引 言

平均输出功率和光束质量是激光器在国防、科研及生产等行业应用中的主要技术参数，然而由于激光器本身的各种机制或条件的限制，其输出功率是有限的；而且光束质量随着输出功率的增加而降低，因此二者成为发展高能激光技术的关键问题。一个提高单束激光能量的可行方法是采用光束合成技术，即把多束低功率而且光束质量良好的激光束合成为一束，在获得高功率激光束的同时维持或提高光束质量。目前，光束合成技术已得到了广泛的

收稿日期：2008-10-16；**收到修改稿日期**：2009-01-15

基金项目：国家 863 计划(2008AA8040504)资助项目。

作者简介：董洪成(1980—)，男，博士研究生，主要从事偏振光束合成方面的研究。E-mail：hchdong1980@126.com。

导师简介：邵建达(1964—)，男，研究员，博士生导师，主要从事激光薄膜方面的研究。E-mail：jdshao@mail.shcnc.ac.cn

研究，也发展了各种各样的合成方法。根据光束的相干性可以分为相干合成[1,2]和非相干合成[3]，按照合成光束的空间结构可以分为阵列合成[4]和同轴合成[5]，依据合成过程与谐振腔的关系又可分为腔内合成[6]、腔耦合以及腔外合成[7]。偏振光束合成是光束合成的一个技术方案[8~10]，其合束元件是偏振分束镜，可以实现多束相干光的同轴合成。单就该方法而言，理论合成效率高，而且由于实现了同轴合成，光束质量好。关于该方案的实验研究结果，一些文献也有报道，如文献[8]在谐振腔内实现两束光的偏振合成，得到了非常理想的合成效率，并提出了将合成两束拓展到多束的实验方案。本文主要从理论上阐述了偏振光束合成的原理和过程，分析了可能的实验影响因素对合成效率的影响，讨论了实施合成的实验参数。

2 原　　理

偏振光束合成的原理及过程如图 1 所示。参与合成的 p 光和 s 光具有相同的频率以及固定的相位差 δ_0，两束光经过偏振分束镜(PBS)合为一束椭圆偏振光(或线偏振光)。将一个 $\lambda/4$ 波片插入该椭圆偏振光束中，光轴与椭圆偏振光的主轴平行，则经过 $\lambda/4$ 波片后椭圆偏振光变为线偏振光，该线偏振光经过 1 个 $\lambda/2$ 波片旋转成 p 光(或 s 光)。合成的 p(或 s)光可以和其他的 s(或 p)光重复上述合束及转换过程，如此实现多束偏振光的合成。

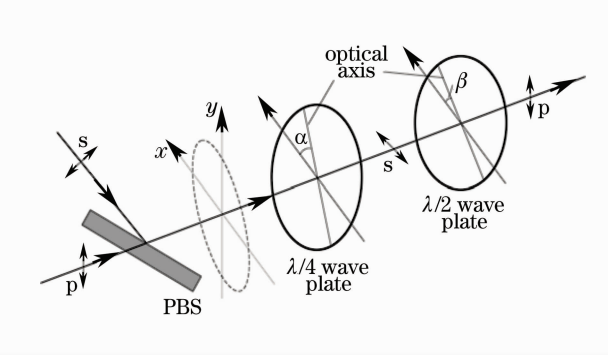

图 1　偏振光束合成原理

Fig. 1　Theory of polarized beam combination

椭圆偏振光的偏振态可由任意一组正交方向上的电场的相对振幅及相位差表示。建立 xy 坐标系如图 1 所示，x 轴和 y 轴分别平行于 s 光和 p 光的振动方向，并假设初始的 p 光和 s 光的振幅比为 k_0，则在与 x 轴夹角为 θ 和 $\theta+\pi/2$ 的两个方向上电场的相对振幅及相位差分别为

$$A(\theta,k_0,\delta_0)=\left[\cos^2\theta+k_0^2\sin^2\theta+k_0\sin(2\theta)\cos\delta_0\right]^{1/2},\tag{1}$$

$$A(\theta+\pi/2,k_0,\delta_0)=\left[\sin^2\theta+k_0^2\cos^2\theta-k_0\sin(2\theta)\cos\delta_0\right]^{1/2},\tag{2}$$

$$\delta'(\theta,k_0,\delta_0)=\arcsin\frac{k_0\cos\theta\sin\delta_0}{A(\theta+\pi/2,k_0,\delta_0)}-\arcsin\frac{k_0\sin\theta\sin\delta_0}{A(\theta,k_0,\delta_0)}。\tag{3}$$

在 xy 坐标系中，合成的椭圆偏振光的主长轴的方位角(相对于 x 轴)α，即 $\lambda/4$ 波片的光轴方向，由表示式

$$\tan 2\alpha=\frac{2k_0\cos\delta_0}{1-k_0^2}\tag{4}$$

决定，当 $\lambda/2$ 波片的光轴方位角为

$$\beta=\frac{1}{2}\left[\alpha+\arctan\sqrt{\frac{\tan^2\alpha+k_0^2-2k_0\tan\alpha\cos\delta_0}{1+k_0^2\tan^2\alpha+2k_0\tan\alpha\cos\delta_0}}\right]+\frac{\pi}{4}\tag{5}$$

时，经过 $\lambda/2$ 波片输出的是 p 光，若方位角为 $\beta\pm\pi/4$，则合成了 s 光。在实验中，α 和 β 通常由探测各个方向上的强度来决定。

3 合成效率分析

多束激光偏振合成是基于将两束线偏振光合成为一束 s 或 p 光这一基本过程实现的，因此可以以该过程为分析对象来探讨偏振合成的相关问题。定义合成效率为合成的 s 或 p 光与参与合成的 s 和 p 光的强度比。原则上，合成效率为 1。但是考虑到实际合成过程中的一些影响因素，如实验环境等因素引起两束光的相位差不断变化、激光输出不稳定导致的强度比值不恒定、实验操作上的光束重合以及平行误差等都会使合成效率下降。我们主要以将两束正交的基模高斯平行光合为一束 p 光为例来分析这些因素对合成结果的影响。

3.1 相位差和振幅比的变化对合成效率的影响

如图 1 所示，假设当两束光的初始相位差和振幅比分别为 δ_0 和 k_0 时确定了 λ/4 和 λ/2 波片的方位，那么当相位差 δ 变为 $\delta_0+\Delta\delta$，振幅比 k 为 $k_0(1+\Delta k)$ 时，经过 PBS 之后形成新的椭圆偏振光，则已经定位的波片不能有效地对该椭圆偏振光进行线偏振转换。此时的合成效率为

$$\eta(k,\delta)=\frac{\cos^2(\beta-\alpha/2)+k'^2\sin^2(\beta-\alpha/2)+k'\sin(2\beta-\alpha)\sin\delta'(\alpha,k,\delta)}{1+k'^2},\tag{6}$$

其中

$$k'(k,\delta)=A\left(\alpha+\frac{\pi}{2},k,\delta\right)/A(\alpha,k,\delta),\tag{7}$$

(6)和(7)式中的相关函数和参量如(1)～(5)式所示。

假设 $\Delta\delta$ 和 Δk 的变化范围分别是[$-\pi/4,\pi/4$]和[$-0.1,0.1$]，则两者对合成效率的影响如图 2 所示，其中(a)～(d)分别对应不同的 k_0 和 δ_0。可以看出，(a)与(b)相同，(c)与(d)相同，说明相位差的变化对合成效率的影响与初始相位差 δ_0 的取值无关。比较图 2(a)与(c)可以得出，在分析的变化范围内，相对于振幅比，相位差的变化对合成效率的影响更加显著。因此，在偏振光束合成实验中需对实验条件有一定的要求，如具有良好稳定性的机械器件、有效的隔震措施、稳定的实验环境等，以控制相位差的稳定，获得较高的合成效率。

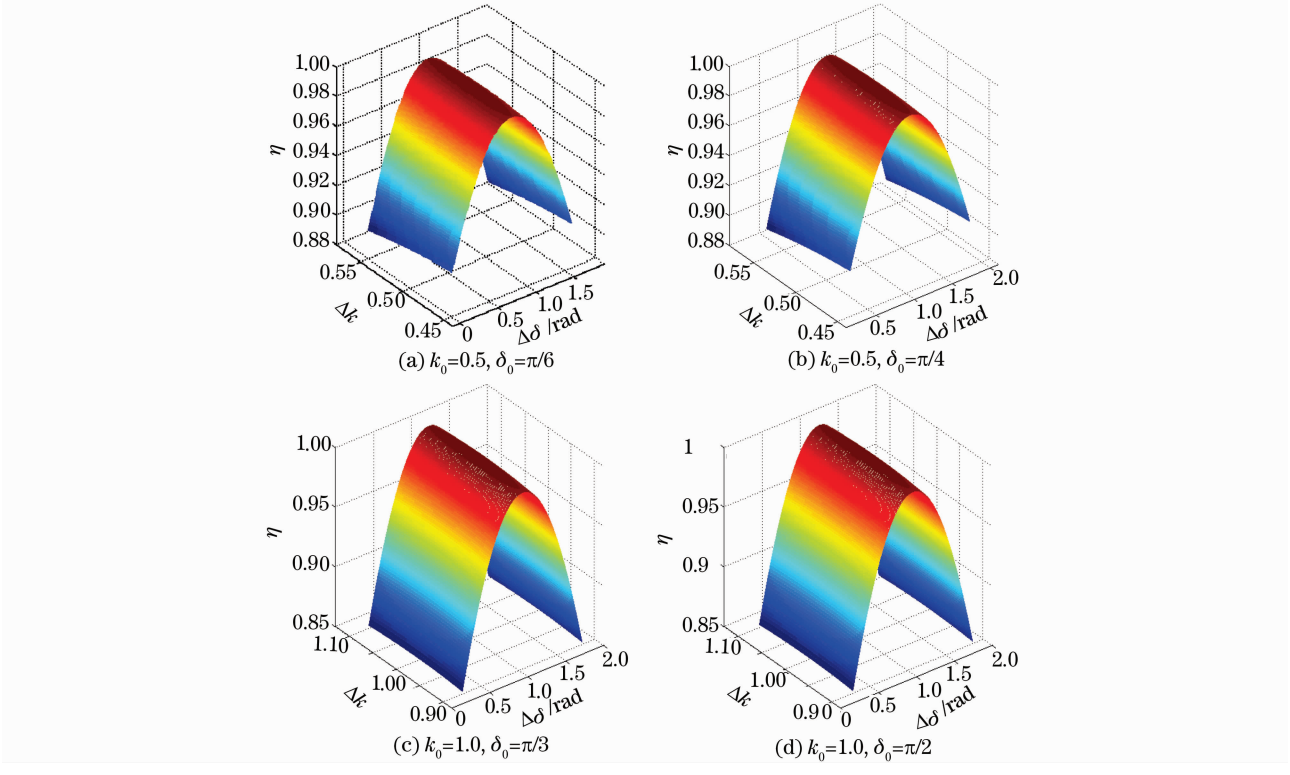

图 2 振幅比和相位差的变化对合成效率的影响。

Fig. 2 Influences of the change of amplitude-ratio and phase-difference on the combining efficiency

图 3 是初始振幅比不同时，相位差的变化对合成效率的影响。当参与合成的 p 光和 s 光的强度相差较大时，相位差的不稳定性对合成效率的影响较小，而当两束光等强度时，合成效率对相位差的变化最为敏感。

3.2 重合度对合成效率的影响

上述的偏振光束合成属于光束的同轴合成。理论上，经过 PBS 平行射出的 p 光和 s 光在空间上是完全重合的，但实际上不可避免地存在重合误差。由于重合误差的存在，p 光和 s 光的一小部分光束

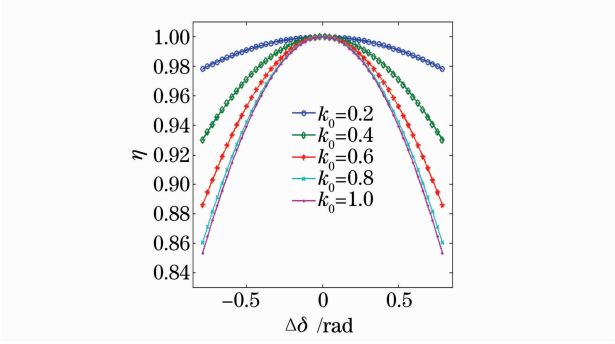

图 3　初始振幅比不同时合成效率与相位差变化的关系

Fig. 3　Relationship between the combining efficiency and the change of phase-difference for different initial amplitude-ratio

因没有发生偏振叠加而损失；而在叠加区域 S 内，光束横截面上各点处的振幅比 $k(x,y)$ 不同，因此合成光束在横截面上各点处的偏振态不同，这种非均匀偏振的效果使偏振合成损耗增大。一般来说，后一种损耗是光斑重合误差引起的主要影响。定义重合度 ε 为两光束中心距离与光束直径 D 的比值，其光束直径是强度降低为峰值的 e^{-2} 时的光斑尺寸，因此，在重合度影响下的偏振合成效率为

$$\eta_m = \frac{\int I_p \mathrm{d}x\mathrm{d}y + \int_S [(1+1/k^2) I_p \eta(k,\delta_0) - I_p]\mathrm{d}x\mathrm{d}y}{\int (1+1/k^2) I_p \mathrm{d}x\mathrm{d}y}, \tag{8}$$

式中 I_p 表示 p 光在 $x-y$ 面上的强度分布，$\eta(k,\delta_0)$ 由公式(6)和(7)定义，其中 k 表示为

$$k(x,y) = \exp(8\varepsilon x/D - 4\varepsilon^2). \tag{9}$$

由(7)式和(8)式可知，受重合误差影响的合成效率 η_m 与重合度 ε 有关，同时也因初始振幅比 k_0，初始相位差 δ_0 及光束直径 D 等光束参数的不同而有差别。图 4 是 k_0 取不同值时 p 光的合成效率与重合度的关系。可以看出，η_m 随着 ε 的增大而降低；但是对于不同的 k_0，η_m 的降低过程不同。当参与合成的两束光的强度相差很大时，ε 对 η_m 的影响相对较小；而当两束光强度相等时，相同的重合度能导致最大的合成损耗。还可看出，当 $\varepsilon < 9\%$ 时，$\eta_m > 99\%$；而当 $\varepsilon < 2.5\%$ 时，光斑重合问题对偏振合成效率的影响很小，可以忽略，如果 D 不是很小(大于 1 mm)，这一条件在实验上可以满足。图 5 和图 6 分别为 δ_0 与 D 为变量时 η_m 与 ε 的关系。图 5 说明对于相同的 ε，η_m 在 $\delta_0 = \pi/2$ 时最大，而在 $\delta_0 = 0$ 或 π 时最小，但是当 ε 较小时，其差别并不大。图 6 表明，对于不同的 D，η_m 随 ε 的变化关系是一样的，即重合度对偏振合成效率的影响与光束直径无关。

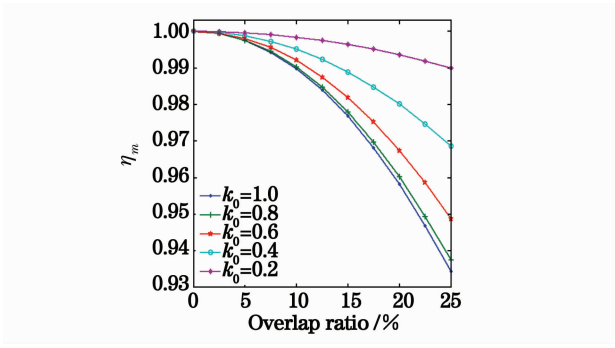

图 4　初始振幅比不同时合成效率与重合度的关系

Fig. 4　Relationship between the combining efficiency and the overlap-ratio for different initial amplitude-ratio

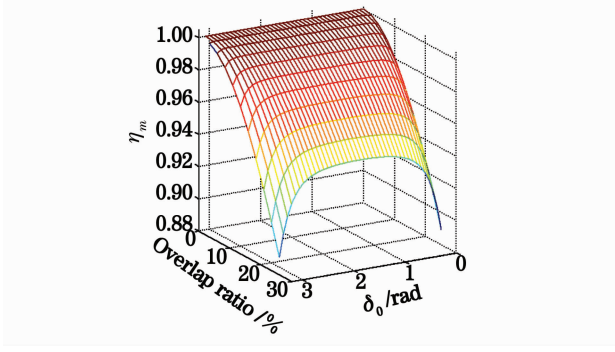

图 5　合成效率与初始相位差及重合度的变化关系

Fig. 5　Combining efficiency as a function of the initial phase-difference and the overlap-ratio

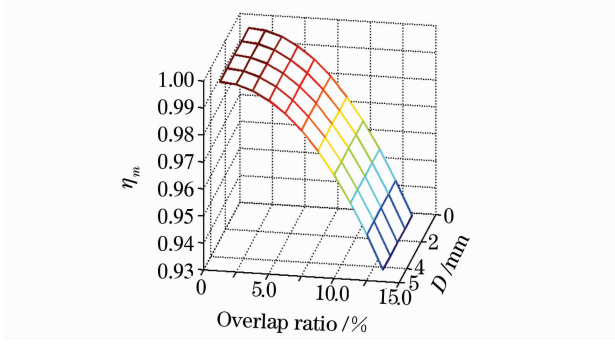

图 6　合成效率与光束直径及重合度的变化关系

Fig. 6　Combining efficiency as a function of the beam diameter and the overlap-ratio

3.3　平行度对合成效率的影响

实际中，经过 PBS 输出的 s 光和 p 光的光轴不可能是完全平行的。所谓平行度，指两束光的传播夹角 θ。平行误差主要从两个方面影响合成效率：一是 s 光和 p 光的波前不再平行，使得合成区域内各点

的相位差不同，同样形成非均匀偏振的横截面，降低合成效率；二是在合成光束的传播平面上两光斑不重合，因此产生了 3.2 节中讨论的重合度误差。假设两光束相交于 $z=0$ 处，即角 θ 的顶点，则在 $z=z_0$ 平面上的光束重合度 $\varepsilon_0=z_0\theta/D$，考虑到实验中通常是在近场的两点观察光斑的叠加效果并测量合成强度，因此 ε_0 通常不会很大，上述第二个方面的影响可以忽略，下面的分析结果也证明这个忽略是合理的。则平行度误差影响的合成效率为

$$\eta_m=\frac{\int(1+1/k_0^2)I_p\eta(k_0,\delta)\mathrm{d}x\mathrm{d}y}{\int(1+1/k_0^2)I_p\mathrm{d}x\mathrm{d}y},\qquad(10)$$

式中 $\eta(k_0,\delta)$ 仍由公式(6)和(7)定义，注意(7)式中的自变量为 k_0 和 δ，δ 表示为

$$\delta(x,y)=\frac{2\pi}{\lambda}[x\sin\theta+z_0(\cos\theta-1)+\delta_0]。\qquad(11)$$

在模拟计算中，取 $\lambda=632.8$ nm，$\delta_0=\pi/6$，$z_0=1$ m，$D=4$ mm，则平行度误差影响的合成效率 η_m 与两束光的传播夹角 θ 的关系如图 7 所示。可见，当 $\theta<2\times10^{-4}$ rad 时，η_m 随着 θ 的增加迅速下降；而当 $\theta>3\times10^{-4}$ rad 时，由于相位差接近均匀分布，以及振幅比在偏振转换过程中的作用，不同的 η_m 趋于不同的常数。图 7 中 $k_0=1$ 的曲线，由平行度引起的光束重合度 ε_0 最大值为 10%，此时对应于 $\eta_m=50\%$。而从图 4 可知该重合度值对合成效率的影响只有 1% 左右，因此如上所述的忽略光束重合度的影响是可行的。当然，η_m 同样与 δ_0，D，z_0 等参数有关。但是分析认为，这些参数产生的 η_m 差异不是很大，而且远没有 θ 的影响显著，因此不罗列相应的数值分析结果。

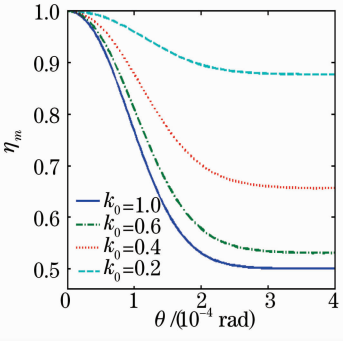

图 7 不同初始振幅比时，合成效率与光束平行度的关系

Fig. 7 Relationship between the combining efficiency and the parallelism for different initial amplitude-ratioo

实验上判定光束平行性的一个方法是：在 PBS 后插入一个检偏器，其通光轴异于 s 光或 p 光振动方向，当经过检偏器后观察不到明显的等厚干涉条纹时，认为两束光在一定程度上平行。该方法可将 θ 控制在 $\frac{\lambda}{2D}$ 以内。设 $\lambda=632.8$ nm，$k_0=1$，结合图 7，当 $D=4$ mm 时 θ 为 8×10^{-5} rad，对应的 η_m 约 84%；而当 $D=8$ mm 时，η_m 为 95%（忽略了 D 对 η_m 的影响）。可见，采取大光斑光束进行合成是降低平行性误差对合成效率影响的有效方法，同时也对光束传播方向的调控精度提出了更高的要求。

3.4 讨 论

分析表明，两束光的强度差值越大，各种因素对合成效率的影响越小。然而，考虑到实际情况中通常将单元光束放大至合理的强度之后再进行合成，而如果其中一束的强度相对很小，尽管合成效率高了，但其合成强度未必最大。假设以 s 光的强度为单位强度，则在相位差影响下，不同振幅比对应的相对合成强度如图 8 所示。很明显，$k_0=1$ 时的合成强度最大。如果将图 7 的纵坐标换成相对合成强度，仍有此结论。因此，等强度偏振光束合成是一个可采取的实验方式，而且此时，$\lambda/4$ 波片的方位角固定为 45°，也简化了实验过程。补充说明的是，偏振合成效率在一定程度上表征了系统的合成能力，尤其是用于单一振幅比的分析中等效于合成强度，因此，在上述分析中以偏振合成效率为参数衡量偏振合成是有意义的。

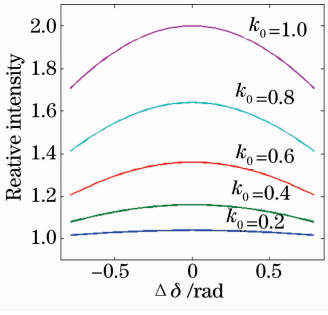

图 8 不同初始振幅比时，相对合成强度与相位差的变化关系

Fig. 8 Relative combining intensity as a function of the change of phase-difference for different initial amplitude-ratio

4 结 论

从理论上描述了相干光束偏振合成的方法，分析了实验因素对合成效率的影响，讨论了提高合成效率的实验手段及最佳的合成方式。分析表明：实验稳定性和光束平行度等因素引起的相位差能显著

降低合成效率。改善方法是：提高实验环境稳定性，稳定相位差；尽可能采用大尺寸的光束进行合成；提高光束传播方向的控制精度。结果表明，偏振合成可以获得较高的合成效率，但是合成效率的高低完全依赖于对实验因素的控制程度。此外，等强度合成能得到最大的合成强度，并可简化实验操作，是值得采用的合成方式。

参　考　文　献

1 R A. Chodzko, J. M. Bernard, H. Mirels. Coherent combination of multiline lasers [C]. *SPIE*, 1990, **1224**: 239～253

2 Cao Jianqiu, Lu Qisheng, Hou Jing *et al*.. Influence of combining errors in the system for coherent combining of fiber lasers on the far field of output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 351～358
曹涧秋，陆启生，侯　静 等. 光纤激光器相干合成系统中组束误差对远场光场的影响[J]. 中国激光，2008，**35**(3)：351～358

3 E. J. Bochove. Theory of spectral beam combining of fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(5): 432～445

4 G. D. Goodno, H. Komine, S. J. McNaught *et al*.. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1247～1249

5 V. Eckhouse, A. A. Ishaaya, L. Shimshi *et al*.. Intra-cavity coherent addition of 16 laser distributions [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(3): 350～352

6 J. Anderegg, S. Brosnan, E. Cheung *et al*.. Coherently coupled high power fiber arrays[C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U

7 Gerald T. Moore . Binary coherent beam combination with mirror pairs [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**: 6399～6409

8 P. B. Phua Y. L. Lim. Coherent polarization locking with near-perfect combining efficiency [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(14): 2148～2150

9 Wang Keqiang, Han Long, Tang Xiaojun *et al*.. Single pulse energy 8.5 J high peak power solid state laser using polarized combination [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(sl): 34～36
王克强，韩　隆，唐晓军 等. 采用偏振合成技术单脉冲能量达8.5 J的高峰值功率固体激光器[J]. 中国激光，2006，**33**(sl)：34～36

10 Gao Xin, Bo Baoxue, Zhang Jing *et al*.. High brightness operation of fiber coupling multiplex diode lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1472～1475
高　欣，薄报学，张　晶 等. 多单元半导体激光器的高亮度光纤耦合输出[J]. 中国激光，2007，**34**(11)：1472～1475