

doi:10.3788/gzxb20144303.0319001

## 太赫兹波合束技术的理论研究

徐德刚<sup>1</sup>, 于红<sup>1</sup>, 张昊<sup>1</sup>, 杨秀芹<sup>2</sup>, 刘鹏翔<sup>1</sup>, 王与焯<sup>1</sup>, 钟凯<sup>1</sup>, 李佳起<sup>1</sup>

(1 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所, 天津 300072)

(2 山东大学 晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)

**摘 要:** 设计了太赫兹合束的空间几何模型, 计算模拟出了单束、 $2 \times 1$  双束以及  $2 \times 2$  四束太赫兹束的空间合束图像, 并研究了接收距离、高斯光束峰值间距与太赫兹束干涉强度的关系, 以及束间相位差对合成的影响. 结果表明:  $2 \times 1$ 、 $2 \times 2$  合束模式的峰值强度增大倍数近于 4 倍和 16 倍;  $2 \times 1$  模式和  $2 \times 2$  模式对应的最优太赫兹合成的观测接收距离分别为 0.325 m 和 0.223 m; 光束间距与合成峰值光强成非线性反比关系, 不存在最大值或最小值临界点. 对  $2 \times 1$  模式进行了存在束间相位的合束模拟, 得到束间相位差与合成强度的关系, 并于相位差为  $\pi$  时达到最小值, 故束间相位差虽不可避免, 但可以减小.

**关键词:** 太赫兹; 高斯光束; 合束; 非线性; 光强; 相位; 距离

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)03-0319001-5

### Theoretical Study on Combining Model of Terahertz Beams

XU De-gang<sup>1</sup>, YU Hong<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, YANG Xiu-qin<sup>2</sup>, LIU Peng-xiang<sup>1</sup>,  
WANG Yu-ye<sup>1</sup>, ZHONG Kai<sup>1</sup>, LI Jia-qi<sup>1</sup>

(1 The Institute of Laser & Opto-electronics; School of Precision Instrument & Opto-electronics Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2 Shandong University, State Key laboratory of Crystal Material, Jinan 250100, China)

**Abstract:** Space combining beam of Terahertz was designed in the paper. The optical intensity of single THz beam, double THz beams ( $2 \times 1$ ) and four THz beams ( $2 \times 2$ ) were calculated in the condition of spatially combining images. Through the obtained images, the relationship between the receiving distance, the Gaussian beam peak separation distance and combining intensity were obtained, and the effect of phase difference on combining beam was analyzed. The results show that THz peak intensity is enhanced by near four and sixteen multiples in the conditions of  $2 \times 1$  and  $2 \times 2$  arrangements. The optimal THz beam receiving distances of  $2 \times 1$  and  $2 \times 2$  arrangements are found through calculation and images, and they are 0.325 m and 0.223 m. Gaussian beam peak separation distance and peak intensity are nonlinearly inverse relationship, which has no maximum or minimum points. The image of  $2 \times 1$  arrangement was achieved when there is phase difference between two THz beams, and the minimum point of THz intensity of  $\pi$  was attained in the image. So it can be concluded that the phase difference can be decreased but it can not be avoided.

**Key words:** Terahertz; Gaussian beam; Combining beam; Nonlinearity; Intensity; Phase; Distance

**OCIS Codes:** 030.1640; 110.6795; 190.0190; 190.4975

## 0 引言

太赫兹波 (THz-wave) 一般指波长处于  $30 \mu\text{m} \sim 3 \text{ mm}$ , 频率处于  $0.1 \sim 10 \text{ THz}$  ( $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$ ) 之间

的辐射源, 它在电磁波谱中处于红外波和微波波段之间, 对于电磁波谱中的其他频段, 如微波、红外、可见光、紫外和 X 射线的研究已经有很长的历史, 甚至有很多已经被广泛应用于基础研究以及光通信、安全检查、

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划 (No. 2011AA010205)、国家自然科学基金 (No. 61172010) 和天津市应用基础及前沿技术研究计划一般项目 (No. 11JCYBJC01100) 资助

**第一作者:** 徐德刚 (1974-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为全固态激光及非线性光学频率变换技术. Email: xudegang@tju.edu.cn

**收稿日期:** 2013-06-14; **录用日期:** 2013-09-13

<http://www.photon.ac.cn>

武器制导、生物医学成像和天文探测等领域<sup>[1]</sup>,并且已拥有成熟的产品.但是 THz 的研究仍然处在初期,许多特性尚未探明,被人们称为 THz 空隙(THz gap)<sup>[2-4]</sup>.与许多传统技术一样,THz 技术也是逐渐从初期的一些基础学科例如化学、生物、医学、物理等的研究向 THz 辐射源应用如空间通讯、机场安检、成像技术的开发过渡.在电磁波谱中,1 THz 电磁波对应的振荡周期是 1 ps(1 ps=10<sup>-12</sup> s),而单个光子的能量为 4.1 meV<sup>[5]</sup>,特征温度为 48 K,自然界中很多物体产生的热辐射源都处在 THz 波段<sup>[6]</sup>.由于 THz 波处在电磁波谱的特殊位置,这赋予了 THz 波与其它电磁波谱与众不同的特殊性质,也正是因为这些性质的存在,THz 技术才被认为是一门具有广泛应用的前景学科,被许多国家定性为能够成为将来改变世界的重要技术之一<sup>[7]</sup>.

THz 辐射本身所具有的特性和潜在价值吸引了许多科学家的目光,并为此发展了大量的技术,以填补 THz 空隙.在 THz 相干光源的发展历程上,太赫兹源的设计主要可以将其分为电子学方法和光学方法.传统的电子学方法主要有真空自由电子激光器<sup>[8]</sup>、返波振荡器(BWO)、行波管、耿氏振荡器、(纳米)速调管、等离子体前沿激光散射源、台式加速器、量子级联激光器等.光子学方法主要包括:光学整流、光电导、光学 Cherenkov 辐射、光学双波长差频、THz 参量振荡器<sup>[9]</sup>、光泵气体等<sup>[4]</sup>.天津大学姚建铨课题组主要是基于光学参量振荡产生 THz 源<sup>[8]</sup>,此 THz 源具有单色光特性,满足“单色光干涉理论”和“基于高斯光束相干叠加模式”,适用“THz 波合束”的条件;像其他产生 THz 方法,例如:光学整流、光电导、光学 Cherenkov 辐射、光学双波长差频产生的 THz 源并不适用“THz 合束”的条件.

虽然人们通过各种方法获得太赫兹源,但随着诸多应用领域的发展<sup>[9]</sup>,对于产生更高能量,更高功率太赫兹的要求也迫在眉睫.光纤激光器利用将多个光纤激光器的输出光束叠加起来的方法,来实现高功率、高质量的激光输出<sup>[10]</sup>.利用光纤马赫-曾德尔干涉仪以及光纤迈克尔逊干涉仪谐振方式,对 2 光纤进行合成,合成效率高达近乎 100%<sup>[11]</sup>.2002 年, Akira Shirakawa 等人对 2 光纤和 2×2 的 4 光纤进行合成,分别得到了 93.6% 和 95.6% 的合成效率<sup>[12]</sup>.2003 年, David Sabourdy 等人也成功得到了 2 光纤合成 99% 的合成效率,以及 4 光纤 95% 的合成效率<sup>[13]</sup>.与此同时, Hans Bruesselbach 等人报告了他们设计的稳定同相相干的 5 个光纤激光阵列,该方案不需要单光束间的频谱重合和偏振控制,对于激光器光束的合成方法起到了简化的作用<sup>[14]</sup>.随后,在科学家们的不断努力下,相继出现了 8 光纤<sup>[15]</sup>、10 光纤<sup>[16]</sup>、19 光纤<sup>[17]</sup> 等的合成方案.

不同数量及排列形式的激光光束合成,达到了良好的效果,大大提升了光纤激光器的应用价值.本文参照光纤激光阵列光束合成的方法,对太赫兹光束合成进行了研究,并进行了合成数值模拟,从理论上证明太赫兹束合成的可行性及其研究价值.

## 1 数学模型

电磁波相干叠加的条件为<sup>[18]</sup>:频率相同、相位差恒定、有平行分量.本文利用单色光干涉理论,基于高斯光束叠加模式分别对不同频率,不同分布的太赫兹阵列合成情况进行了研究分析.设计的太赫兹束阵列排列模式如图 1.

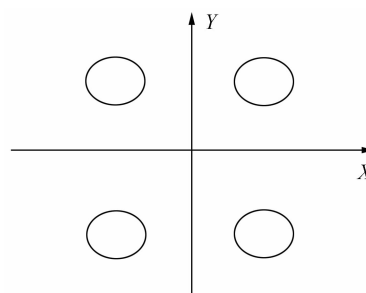


图 1 太赫兹阵列排列方式(以 2×2 为例)

Fig. 1 THz beams arrangement(the example of 2×2)

图 1 中,以 2×2 排列模式推算 M×N 模式的形式.假设单个太赫兹输出腰斑半径为  $\omega_0$  的基膜高斯光束,在 x 轴和 y 轴方向上各太赫兹光束中心点与 x 轴 y 轴间的间距分别为  $x_d$  和  $y_d$ ,且设定距离相等,各个光束在空间中分布均匀.由于各个太赫兹束偏振方向相互平行,所以就保证观察面上各太赫兹束中心点之间的间距  $x_d$  和  $y_d$  与发生面上保持一致,存在正整数 M 和 N,则  $[M/2]+1$  行,  $[N/2]+1$  列对应着分布在不同空间位置的太赫兹束,从而单元太赫兹观察面光场复振幅为

$$E(x, y, z) = \frac{c}{\omega(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega(z)^2}\right) \cdot \exp\left(-i\left(k\left(z + \frac{r^2}{2R}\right) - \arctan\left(\frac{z}{f}\right)\right)\right) \quad (1)$$

式中  $r^2 = X^2 + Y^2 = (x - (n-1 - [N/2])x_d)^2 + (y + (m-1 - [M/2])y_d)^2$  这里  $[M/2]$  和  $[N/2]$  表示取  $M/2$  和  $N/2$  的整数部分,  $n \in [1, N]$ ,  $m \in [1, M]$ ,

$$k = 2\pi/\lambda, \omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/f)^2}, R = R(z) = z + f^2/z, f = \pi\omega_0/\lambda, \omega_0 = \sqrt{\lambda f/\pi}.$$

光强  $I$  则为复振幅模的平方,即

$$I = |E|^2 \quad (2)$$

根据光波叠加原理,多列波同时存在时,在它们的交叠区域内每点的振动是各列波单独在该点产生的振动的合成,其数学表达式为

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^{\infty} E_i(x, y, z) \quad (3)$$

而总光强为

$$I_{\text{total}} = |E(x, y, z)|^2 = \left| \sum_{i=1}^{\infty} E_i(x, y, z) \right|^2 \quad (4)$$

将复振幅式(1)带入式(4)就可以得到叠加后的太赫兹光强.

## 2 数值模拟结果

### 2.1 太赫兹束合成结果

设太赫兹发生系统性能均相同,模拟计算中单个太赫兹输出腰斑半径为 2 mm,分别对 1.5 THz, 2 THz, 2.5 THz 频率段的太赫兹进行数值模拟,且太赫兹束相距为 4 mm,观察距离为 1 m. 根据前述的数学模型,模拟 1×1(单光束)、2×1(双光束)、2×2(四光束)太赫兹阵列的合成强度分布. 其中 2 THz 强度分布图像见图 2.

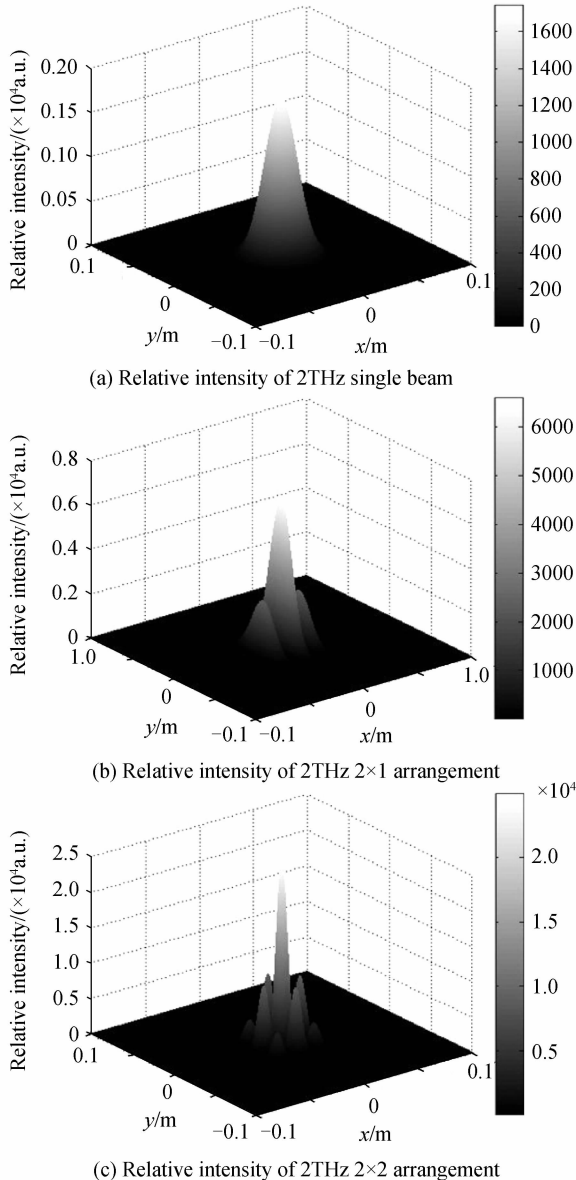


图 2 2 THz 时不同排列方式太赫兹束相对强度  
Fig. 2 Relative intensity of 2 THz different beams

将 1.5 THz, 2 THz, 2.5 THz 在不同排列模式中的合成强度模拟成曲线如图 3.

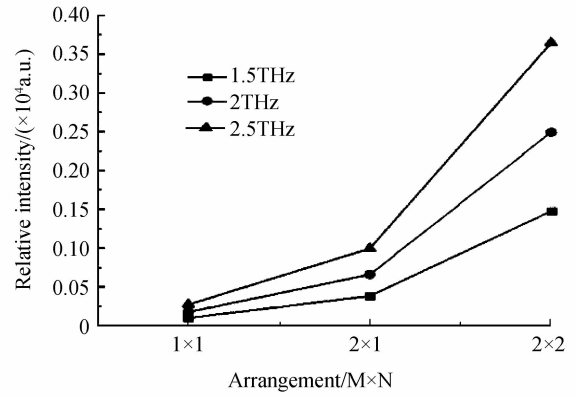


图 3 不同频率太赫兹峰值强度在不同排列方式时的拟合曲线

Fig. 3 Relative peak intensity of different frequency beams in different arrangements

由图 1 至图 4 图像拟合可知:在同一观察距离处,线宽一致,相位差不变等各个其他参量均相同的情况下,参与叠加的阵列太赫兹束越多,合成后峰值越大、主峰越窄、能量越集中. 并通过与单太赫兹束的峰值相比较,合成后的峰值强度与参与合成的太赫兹束数量  $N$  之间虽然没有达到  $N^2$  倍的关系,但也得到了放大成倍增长的结果. 并且峰值强度随着太赫兹频率的增加而增大,主峰则越来越窄,即能量越大越集中.

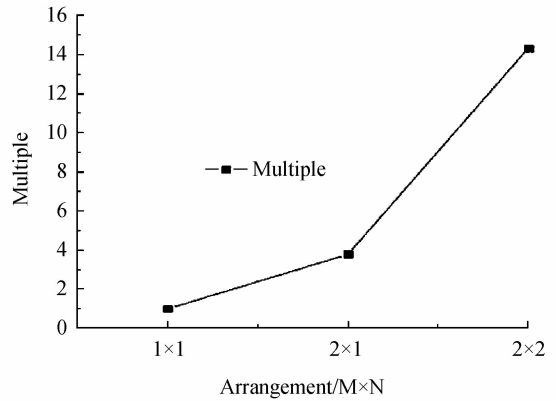


图 4 2 THz 不同排列方式太赫兹峰值强度相对于单束情况的增强倍数

Fig. 4 The enhancement of relative intensity multiples caused by different arrangements of 2 THz

### 2.2 改变观测距离,光斑间隔的数值模拟

不同光束阵列的相干合成对太赫兹的能量进行了放大,但大量实验表明,光束接收距离和阵列光斑间隔的不同同样会影响到太赫兹合成强度. 故本文以 2 THz 波段为例,对其 2×2 阵列合束后的观测距离和发射时的光斑间隔长度进行了变量改变,以找出能够获得最大能量的观测距离和光斑间隔指数. 模拟图像如图 5 和图 6.

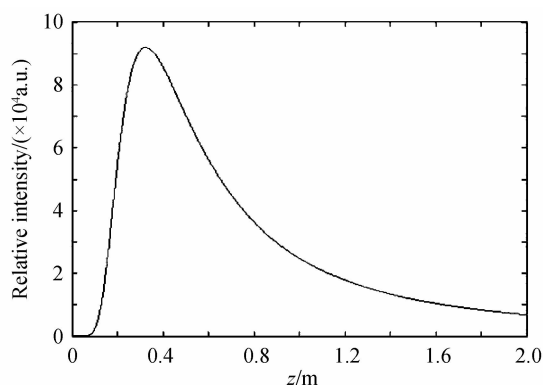


图5 不同接收距离处对应峰值强度值的图像  
(2 THz  $2 \times 2$ )

Fig. 5 Peak coherent intensity in different collecting distance(2 THz  $2 \times 2$ )

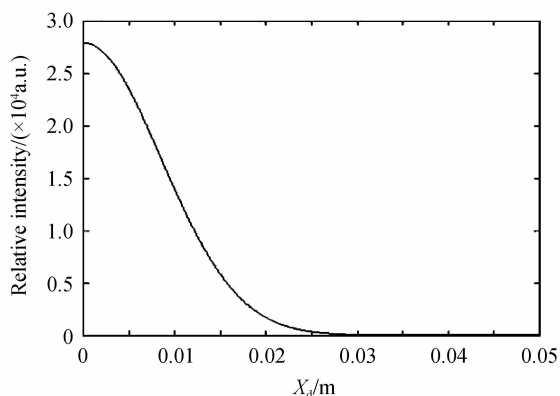


图6 相对强度峰值随着束间距  $x_a$  改变的图像  
(2 THz  $2 \times 2$ )

Fig. 6 Peak relative intensity changed with beam separation distance

从图5中可看出,并不是观测距离越近合成强度越大,异或观测距离越远,合成强度越小,而是存在一个最大值所对应的距离。

在图像中可以求得,峰值光强所对应的观测距离  $z$  为 0.325 m,故在 2 THz,  $2 \times 2$  阵列的情况下,于距离太赫兹发生处 0.325 m 处对其进行接收,就能得到合成最大值.同理,也可计算处  $2 \times 1$  阵列最佳观测距离为 0.223 m.

在 THz 光束未经合束(即  $1 \times 1$  的情况)单束输出时,在 1 m 处的相对强度为 1742.4,从图5中可求得与 1742.4 相对应的横坐标在 4 m 左右,故  $2 \times 2$  阵列太赫兹合成不但在相同接收长度处相比于单束输出强度增长了数倍,换句话说,在要求为单束强度的情况下,可以将探测长度扩充到 4 m.

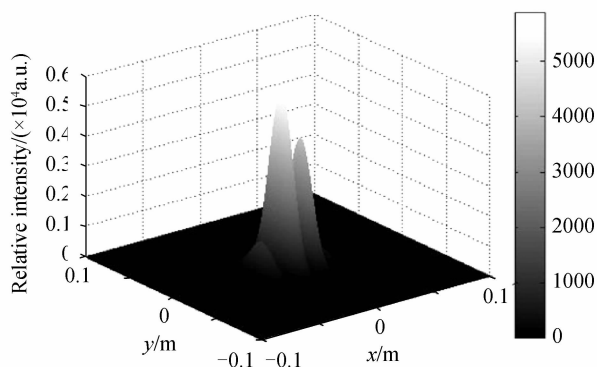
从图6可以看出,随着距离增大,强度的减少方式并非线性,并且也不存在峰值临界点,所以在太赫兹合成过程中,应令光束间距尽可能的小,而得到更强的合成强度.  $2 \times 1$  阵列改变间距的情况与  $2 \times 2$  阵列类似,在此不再叙述.

### 2.3 存在相位差的情况下的数值模拟

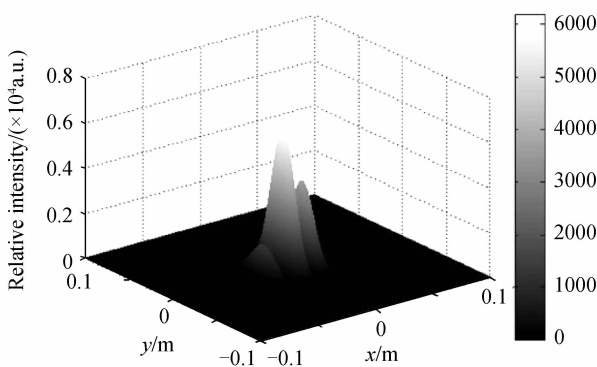
在实际太赫兹合束实验中,难免各个太赫兹束会有相位差的存在,由以往激光相干合成的例子可知,相位差对合成的效果也会有相应的影响.在本文中,模拟了一种存在相位差的理想情况,即  $2 \times 1$  阵列中,左右两光束之间的相位差恒定,在保证其他重要参量不变的情况下,绘出合成的图像如图7.

由于太赫兹能量接收处一般都是位于光束叠加中心点位置,所以对光束叠加中心合成加强点进行二维模拟,得出如图8.

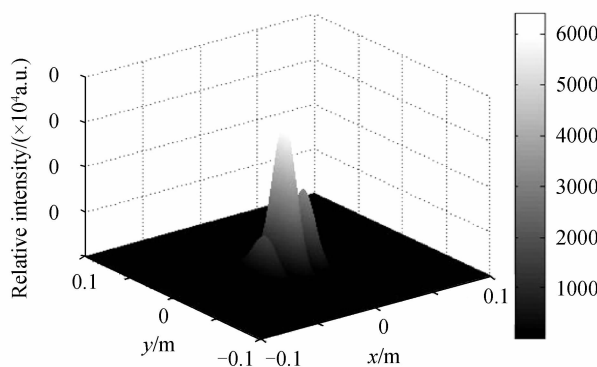
从图8中可以看出,当相位差达到近似  $\pi$  时确实达到波谷处,此时已经出现双峰,不再是光束叠加加强的情况,故中心点光强达到最低值.所以在合成过程



(a) The image in  $\frac{2}{3}\pi$  phase difference( $2 \times 1$ )



(b) The image in  $\frac{1}{2}\pi$  phase difference( $2 \times 1$ )



(c) The image in  $\frac{1}{3}\pi$  phase difference( $2 \times 1$ )

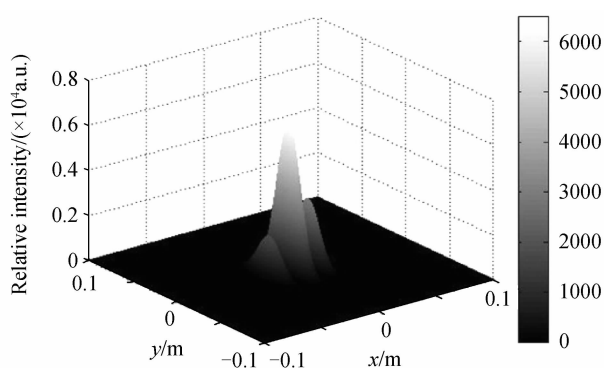
(d) The image in  $\frac{1}{4}\pi$  phase difference(2×1)

图 7 不同相位差时的图像(2×1)

Fig. 7 The image in different phase difference(2×1)

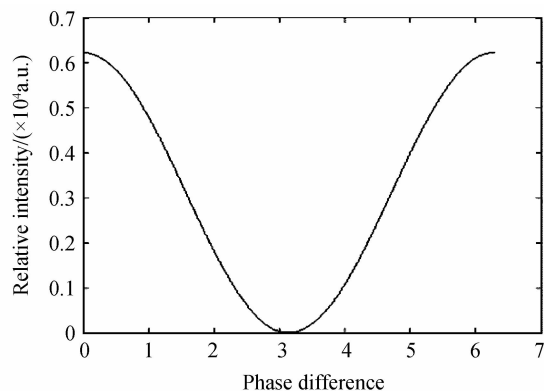


图 8 相位差与光强峰值关系

Fig. 8 The relationship between phase difference and peak relative intensity

中,应在尽量减小相位差的产生,当大于  $\pi$  左右时,在不能大幅度调制减小相位差的情况下,可尝试稍微加大相位差的方法来获取更大的峰值。

### 3 结论

本文以光纤激光束合成的理论为依据,设计了太赫兹束的合成阵列模式.并利用 Matlab 等数值模拟软件对  $2\times 1$ 、 $2\times 2$  阵列模式进行了数值模拟和分析.结果显示,合成后的光束峰值强度与单太赫兹束相比扩大了近似于 4 倍和 16 倍.同时,本文找出了合成后太赫兹束在前向空间中能够接受到最大强度的距离,以及太赫兹束间间距对合成强度的影响.最后,以  $2\times 1$  阵列模式为基础,研究了相位差对合成的影响,并得到了相位差对合成强度影响的趋势.本文的研究将为产生高强度的太赫兹波以及高强度太赫兹源的设计提供理论依据和探索思路。

#### 参考文献

- [1] KONG Hui, LI Gao-fang, MA Guo-hong, *et al.* Terahertz wave transmission in subwavelength metal stripe[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(8): 888-892.  
孔辉,李高芳,马国宏,等.亚波长金属块阵列中太赫兹波的传输特性研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(8): 888-892.
- [2] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. *IEEE Transactions on*

*Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3): 910-928.

- [3] XUE Ting, HUA Yong, YANG De-wei, *et al.* Theoretical analysis of terahertz radiation generated in periodically poled lithium niobate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10): 1180-1186.  
薛挺,华勇,杨德伟,等.周期极化铌酸锂太赫兹波产生的理论分析[J]. *光子学报*, 2004, **33**(10): 1180-1186.
- [4] BRADLEY F, ZHANG Xi-cheng. Materials for terahertz science and technology[J]. *Physics*, 2003, **32**(5): 286-293.  
BRADLEY F,张希成.太赫兹科学与技术研究回顾[J]. *物理*, 2003, **32**(5): 286-293.
- [5] BU Fan-liang, WANG Rong, LI Li-hua, *et al.* Science technology and application of terahertz[J]. *Chinese People's Public Security University Journal (Nature Science edition)*, 2008, **4**(4): 74-77.  
卜凡亮,王蓉,李丽华,等.太赫兹科学技术及其应用研究[J]. *中国人民公安大学学报(自然科学版)*, 2008, **4**(4): 74-77.
- [6] MARKELZ A G, ROITBERG A, HEILWEIL E J, *et al.* Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 2.0 THz[J]. *Chinese Physics Letters*, 2000, **3**(20): 42-48.
- [7] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [8] LI Zhong-yang, YAO Jian-quan, XU De-gang, *et al.* High-power terahertz radiation from surface-emitted THz-wave parametric oscillator[J]. *Chinese Physics B*, 2011, **20**(5): 1056-1088.  
李忠洋,姚建铨,徐德刚,等.基于太赫兹参量振的表面辐射高功率太赫兹[J]. *Chinese Physics B*, 2011, **20**(5): 1056-1088.
- [9] HU Yong-sheng, CHEN Qian. Recent development of terahertz technology and its applications[J]. *Infrared*, 2006, **27**(1): 11-15.  
胡永生,陈钱.太赫兹技术及其研究的进展[J]. *红外*, 2006, **27**(1): 11-15.
- [10] SUN Bo, YAO Jian-quan. Generation of terahertz wave based on optical methods[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(10): 1350-1358.  
孙博,姚建铨.基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1350-1358.
- [11] CAO Jian-qiu, XU Xiao-jun, HOU Jing, *et al.* Coherent combining technology of fiber laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(3): 456-460.  
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.
- [12] SABOURDY D, KERMENE V, DESFARGES-BERTHELEMOTA, *et al.* Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(2): 87-97.
- [13] SHIRAKAWA A, SAITOU T, SEKIGUCHI T, *et al.* Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler[J]. *Optics Express*, 2002, **10**(21): 1167-1172.
- [14] BRUESSELBACH H, JONES D C, MANGIR M S, *et al.* Self-organized coherence in fiber laser arrays[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(11): 1339-1341.
- [15] SHIRAKAWA A, MATSUI K, UEDA K, *et al.* Fiber laser coherent array for power scaling, bandwidth narrowing, and coherent beam direction control[C]. *SPIE*, 2005, **5709**: 165-174.
- [16] BRUESSELBACH H, MINDEN M, ROGERS J L, *et al.* 200W self-organized coherent fiber arrays[C]. *CLEO*, 2005, **1109**: 532-534.
- [17] BRUESSELBACH H, CRIS J D, MANGIR M S, *et al.* Self-organized coherence in fiber laser arrays[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(11): 1339-1341.
- [18] JI Wen, GUO Zhen, WANG Shi-yu, *et al.* Numerical simulation of coherent combination of multi-beam laser[J]. *Electronic Science and Technology*, 2009, **22**(3): 72-74.  
纪雯,过振,王石语,等.多束激光相干合成的数值模拟[J]. *电子科技*, 2009, **22**(3): 72-74.