

时域相干太赫兹源空间功率合成数值模拟研究

张阳¹ 王俊波¹ 邓琥¹ 尚丽平^{1,2*}

(¹西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010
²西南科技大学极端条件物质特性实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要 为了得到超宽带、大功率太赫兹波,提出了基于时域波形的超宽带太赫兹波空间功率合成的基本原理。利用标准数据进行了基于多路延迟和波形变换的空间功率合成数值模拟实验,得到了太赫兹波空间功率合成相关数据。结果表明,在超宽带太赫兹波空间功率合成物理实验中,飞秒激光辐射到各光导天线单元脉冲前沿可以存在一定的延迟;在光导天线优化设计和制备过程中,应特别注意减小太赫兹波上升沿的波形误差。

关键词 物理光学;空间功率合成;时域叠加;太赫兹;数值模拟

中图分类号 O43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.102602

Numerical Simulation Research on Time Domain Coherent Terahertz Sources Space Power Synthesis

Zhang Yang¹ Wang Junbo¹ Deng Hu¹ Shang Liping^{1,2}

¹School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang, Sichuan 621010, China

²Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang, Sichuan 621010, China

Abstract To get ultra-wideband and large power terahertz waves, ultra-wideband terahertz sources space power synthesis fundamental based on time domain waveform is put forward. Space power synthesis simulated experiment based on multi-channel latency and waveform transform is carried out with standard data, and related data of terahertz wave space power synthesis is obtained. The simulated experiment indicates in physical experiment of ultra-wideband terahertz sources space power synthesis there can be a certain delay from femtosecond laser to leading edge of every photoconductive antenna unit. During optimization design and the fabrication processing of photoconductive antenna, special attention should be paid to decrease the error of rising edge of terahertz.

Key words physical optics; space power synthesis; overlay in time domain; terahertz; numerical simulation

OCIS codes 260.2110; 260.5150; 260.3160

1 引言

太赫兹波通常是指频率在 0.1~10.0 THz 范围内的电磁辐射,它的独特性能使其在医学领域^[1]、生物领域^[2]、军事领域^[3,4]等有重要的应用前景。一般情况下,太赫兹技术应用于这些领域要求太赫兹源具有高功率、超宽带等特性。通过比较太赫兹源发现,采用光导天线作为发射源能够满足超宽带条件,但难以满足高功率的要求^[5]。而对光导天线产生太赫兹的机理进行分析可知:仅依靠光导天线结构的优化设计,难以提升单个光导天线的太赫兹辐射输出;单个器件功率容量有限,使得系统很难达到高功率。因此,需要进行超宽带光导天线阵列的空间功率合成来产生高功率、超宽带太赫兹波。

收稿日期: 2012-06-01; **收到修改稿日期**: 2012-07-06; **网络出版日期**: 2012-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(11176032)资助课题。

作者简介: 张阳(1987—),女,硕士研究生,主要从事太赫兹技术方面的研究。E-mail: 645655647@qq.com

导师简介: 王俊波(1956—),男,教授,主要从事光学、激光、光电子技术等方面的研究。E-mail: jbwang@swust.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: shangliping@swust.edu.cn

本文主要通过分析超宽带太赫兹功率空间合成的原理,对两路小孔径光导天线产生太赫兹时域光谱数据进行延迟和波形变换的空间功率合成模拟实验;分析了高精度同步触发生太赫兹辐射物理实验中飞秒激光器触发光导天线能否存在一定误差以及太赫兹波形对其空间功率合成效率的影响。

2 空间功率合成理论分析

经典功率合成思路是指在合成点对两路同频信号 $F_1 = A_1 \exp(j\omega_1 t + \phi_1)$ 和 $F_2 = A_2 \exp(j\omega_2 t + \phi_2)$ (A_1 和 A_2 表征了两路信号的强度, ω_1 和 ω_2 分别为两路信号各自的频率, ϕ_1 和 ϕ_2 分别为两路信号在空间点 P 的相位) 进行功率合成。若要进行功率合成则需满足同频的条件,即 $\omega_0 = \omega_1 = \omega_2$ 。由此推出合成信号的表达式为

$$F = F_1 + F_2 = F_1 [1 + m \exp(j\Delta\phi)] = A_1 \exp(j\omega_0 t + \phi_1) [1 + m \exp(j\Delta\phi)], \quad (1)$$

式中 m 表征了两路信号的幅值比, $\Delta\phi$ 表征了两路信号到空间点 P 的相位差,即 $m = A_2/A_1$ 、 $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$ 。取其模:

$$|F| = A_1 (1 + m^2 + 2m \cos \Delta\phi)^{1/2}. \quad (2)$$

可以看出在空间点 P 处合成的单频点信号 F 的强度取决于两路信号各自的幅值和在 P 点的相位差。从(2)式中可以算出:当 $\Delta\phi = \pm 2k\pi$ ($k = 0, 1, \dots$) 时, P 点振动强度最大,为 $A_1(1 + m)$;当 $\Delta\phi = \pm (2k + 1)\pi$ ($k = 0, 1, \dots$) 时, P 点振动强度取极小值,为 $A_1 |1 - m|$ 。在 P 点的功率正比于该点幅值的平方,因此叠加后的幅值越大,功率越强。综上所述,经典功率合成的实现依赖于相同传播方向、相同频率、恒相位差这三个假设的相干条件^[6]。

然而,太赫兹脉冲并不是一个单频正弦信号,其频谱表现为在太赫兹频段上的超宽带。对于这种超宽带信号的功率合成,需从时域波形进行分析。假设有两路太赫兹时域光谱信号 $x(t)$ 和 $y(t)$,两者的互相关函数为

$$\rho_{xy}(\tau) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x][y(t + \tau) - \mu_y] dt}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau) dt - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (3)$$

式中 μ_x 和 μ_y 分别为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的均值, σ_x 和 σ_y 分别为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的方差。假设二者的时域波形一致,则 ρ_{xy} 可取值为 +1。在满足狄里克利条件的前提下, $x(t)$ 和 $y(t)$ 可由傅里叶频率分解公式展开为

$$x(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \exp[j(k\omega t + \theta_k)], \quad y(t) = B_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \exp[j(k\omega t + \beta_k)]. \quad (4)$$

由时频等效变换的原理可知, $x(t)$ 和 $y(t)$ 时域的一致程度决定了它们在频域的一致程度。因此,当 A_0 和 B_0 、 A_k 和 B_k 、 θ_k 和 β_k 一致时, $x(t)$ 和 $y(t)$ 在整个超宽频谱内的各谐波分量 $A_k \exp[j(k\omega t + \theta_k)]$ 和 $B_k \exp[j(k\omega t + \beta_k)]$ ($k = 0, 1, \dots$) 也满足经典功率合成的相干条件。通过空间功率合成理论分析可知,只要满足时域波形一致,就能实现多路超宽带信号的功率合成。

3 超宽带太赫兹波空间功率合成数值模拟

超宽带光导天线阵列的空间功率合成的关键技术之一是尽量使触发光导天线的飞秒激光到达光导天线阵列中各光导天线时高精度同步。另一关键技术则是确保光导天线阵列中每个光导天线产生的太赫兹时域光谱波形一致。然而在实际太赫兹空间功率合成实验中,飞秒激光同步到达各光导天线即高精度同步触发不易实现。并且,实际工艺中也很难保证每个光导天线产生的太赫兹时域光谱波形完全一致。因此,可采用数值模拟实验仿真实际情况中飞秒激光不同时刻到达光导天线阵列时各光导天线产生的太赫兹时域光谱空间功率合成的情况和波形不一致的太赫兹时域光谱空间功率合成的情况^[7~14]。

从太赫兹时域信号的多路延迟、波形变换(上升沿、下降沿)等方面入手,进行超宽带太赫兹波空间功率合成数值模拟实验。分别采用处理后的和处理前的时域峰值比和频域峰值比评价空间功率合成效率。

3.1 数值模拟实验条件

数值模拟实验基础数据为 200 μm 孔径偶极子光导天线太赫兹时域光谱数据(用 Data 表示);测试设备

为太赫兹时域光谱系统(延迟线最小步进为 $10 \mu\text{m}$, 因此数据最小采样时间间隔为 66.7 fs); 数值模拟实验采用的软件为 Matlab。图 1 为小孔径光导天线太赫兹时域光谱图。从波形上可以看出, 其从左到右主要由三个沿以及尾部振荡组成, 将这三个沿从左到右分别命名为下降沿 1、上升沿、下降沿 2。

3.2 基于多路延迟的空间功率合成及实验

基于多路延迟的空间功率合成实验以两路输入为例, 数据为原始数据(即 Data), 其两路延迟规则见表 1 (其延迟时间为最小采样时间间隔 66.7 fs 的倍数)。两路延迟叠加时域光谱如图 2 所示(原始数据时域峰值点对应时刻为 5600 fs)。两路延迟叠加频域谱如图 3 所示(原始数据频域峰值对应频率为 0.996 THz)。令时域光谱数据 Data0、Data1、Data2、Data3 的傅里叶变换后获得的频域谱数据名称分别为 FData0、FData1、FData2、FData3。其两路延迟合成效率见表 2。

表 1 两路延迟规则

Table 1 Regulation of two groups delay

Time-domain spectroscopy data	Delay time /fs	
	First group	Second group
Data0	0	0
Data1	66.7×1	0
Data2	0	66.7×2
Data3	66.7×5	66.7×1

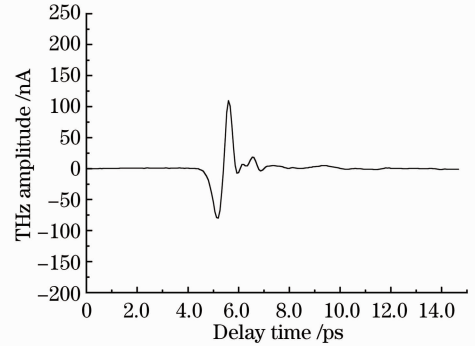


图 1 小孔径光导天线太赫兹时域光谱图
Fig. 1 Terahertz time domain spectrum of small-aperture photoconductive antenna

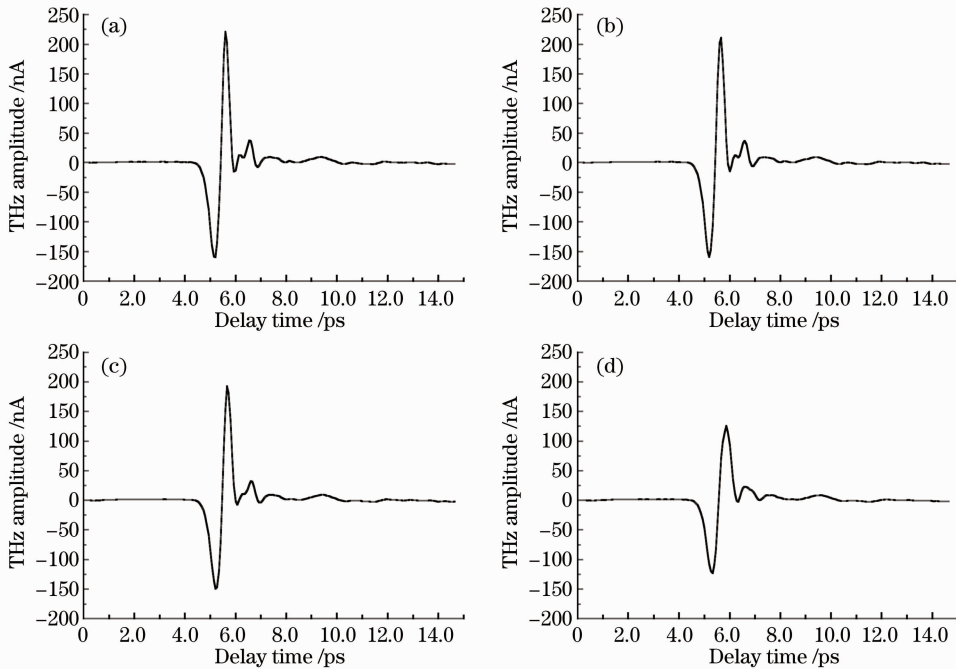


图 2 两路延迟叠加时域光谱。(a) Data0; (b) Data1; (c) Data2; (d) Data3

Fig. 2 Time domain spectra of two groups delay and overlay. (a) Data0; (b) Data1; (c) Data2; (d) Data3

表 2 两路延迟叠加合成效率

Table 2 Synthetic efficiency of two groups delay and overlay

Time-domain spectroscopy data	Time-domain peak ratio /% with delay time 5.600 ps	Frequency-domain peak ratio /% with frequency 0.996 THz
Data0	100	100
Data1	91.4	97.9
Data2	69.7	91.6
Data3	10.6	67.5

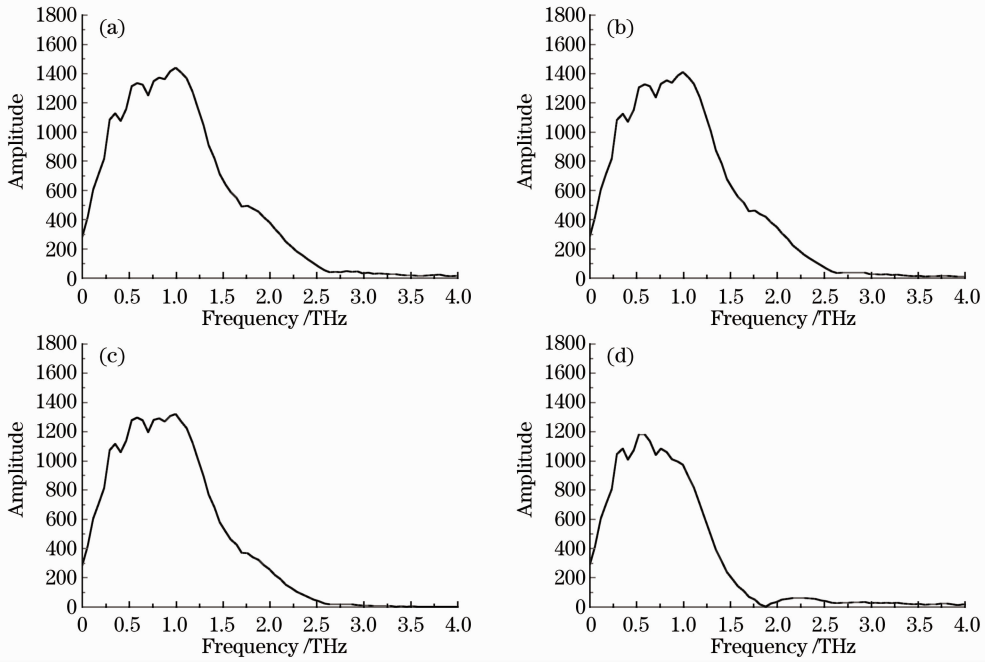


图3 两路延迟叠加频域图。(a) FData0;(b) FData1;(c) FData2;(d) FData3

Fig. 3 Frequency domain spectra of two groups delay and overlay. (a) FData0;(b) FData1;(c) FData2;(d) FData3

分析时域延迟模拟实验发现,相对延迟达 133.4 fs 时,其合成效率降至 69.7%,而相对延迟为 266.8 fs 时,效率远低于 50%。这表明在做高精度触发产生太赫兹物理实验时,触发相对误差必须控制在 133 fs 内。另外,对于太赫兹时域延迟,其时域峰值比能更好地反应其变化,更适合作为多路延迟的空间功率合成效率的判据。

3.3 基于波形处理的空间功率合成及实验

基于波形处理的空间功率合成实验以两路输入为例,数据为原始数据(即 Data),其两路波形处理规则见表 3,两路波形处理叠加时域光谱如图 4 所示,两路波形处理叠加频域谱如图 5 所示。令时域光谱数据

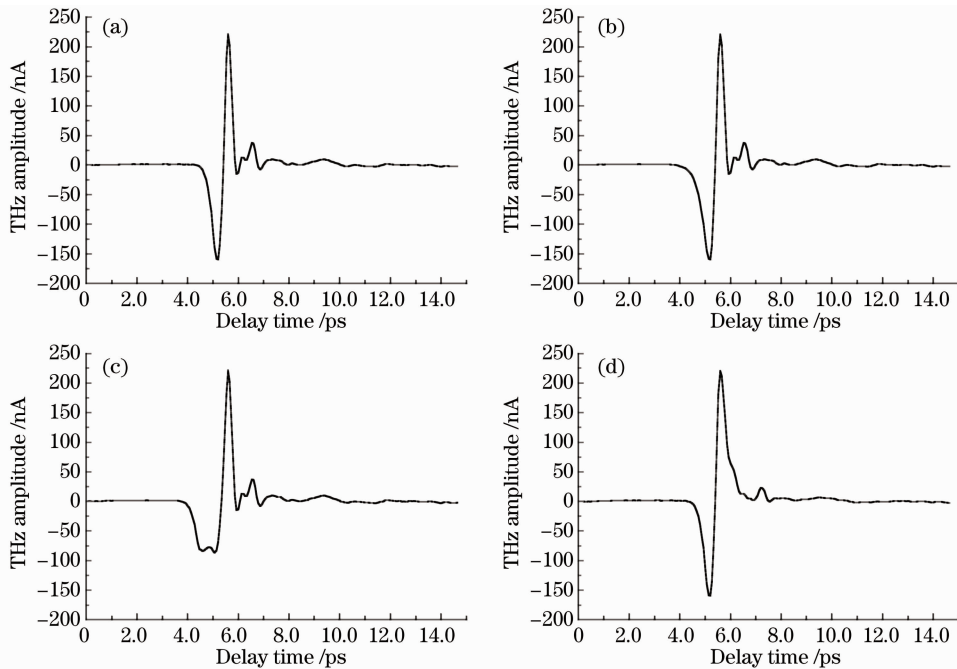


图4 两路波形处理叠加时域光谱。(a) Data0;(b) Data1;(c) Data2;(d) Data3

Fig. 4 Time domain spectra of two groups' waveform transforms and overlay.

(a) Data0;(b) Data1;(c) Data2;(d) Data3

Data0、Data1、Data2、Data3 的傅里叶变换后获得的频域谱数据名称分别为 FData0、FData1、FData2、FData3,其两路波形处理合成效率见表 4。基于波形处理模拟实验原理是对选中波形中的上升或下降沿(x 个点)进行曲线拟合,得到拟合函数后将起、终点间分成 $x+n$ 份(n 为插入点个数),求出相应幅值,并将其与时间轴对应。

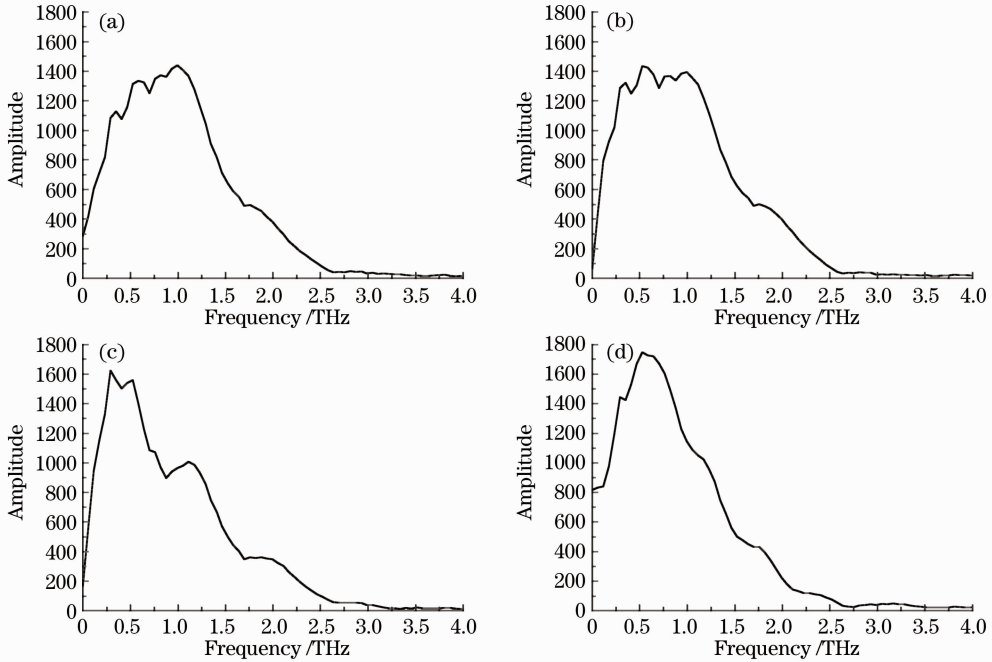


图 5 两路波形处理叠加频域谱。(a) FData0;(b) FData1;(c) FData2;(d) FData3

Fig. 5 Frequency domain spectra of two groups' waveform transforms and overlay. (a) FData0;(b) FData1;
(c) FData2;(d) FData3

表 3 两路波形处理规则

Table 3 Regulation of wave treatment

Time-domain spectroscopy data	Wave treatment /fs		
	Falling edge 1	Rising edge	Falling edge 2
Data0	0	0	0
Data1	66.7×10	0	0
Data2	0	66.7×10	0
Data3	0	0	66.7×10

表 4 两路波形处理合成效率

Table 4 Synthetic efficiency of two groups' waveform transforms

Time-domain spectroscopy data	Time-domain peak ratio /%	Frequency-domain peak ratio /%
	with delay time 5.600 ps	with frequency 0.996 THz
Data0	100	100
Data1	100	96.8
Data2	100	67
Data3	100	79.6

分析波形处理模拟实验发现:太赫兹波的上升沿对合成效率起关键作用。以频域峰值比为合成效率判断依据时可以看出,当上升沿插入 10 个数据后,其效率在 70% 以下,而下降沿在这种情况下效率全部在 75% 以上。可以看出相较于上升沿,两个下降沿对合成效率影响相对较小。因此,在光导天线优化设计和制备过程中,应特别注意减小太赫兹波上升沿的波形误差。另外,由于模拟过程中将处理后波形均以时域峰值点为基准进行对齐,所以时域峰值比不能再作为合成效率评判依据。相对而言,频域峰值比更适合作为波形处理空间功率合成的判据。

4 结 论

通过对空间功率合成理论分析,提出了超宽带太赫兹功率空间合成的原理。进行了两路延迟和波形变换的空间功率合成模拟实验。由分析可知,高精度同步触发产生太赫兹物理实验中飞秒激光器触发光导天线可以存在一定误差,两路空间功率合成时,触发相对误差必须控制在 133 fs 内。另外,太赫兹波的上升沿相较于下降沿对合成效率影响相对较大,在制备天线过程中需尽量减小其相关误差。超宽带太赫兹波空间功率合成数值模拟实验为光导天线阵列的高精度同步触发产生太赫兹物理实验以及光导天线制备技术提供了一定的数值依据。

参 考 文 献

- Liu Qiao, Li Zeren, Meng Kun. Medicine inspection by the terahertz time-domain spectroscopy technique[J]. *Information and Electronic Engineering*, 2011, **9**(3): 283~286
刘 乔, 李泽仁, 孟 坤. 太赫兹时域光谱技术用于药品检测[J]. 信息与电子工程, 2011, **9**(3):283~286
- Liu Xiaming, Li Na, Liu Hongli *et al.*. Feasibility study on detection of porphyrin's amount in human blood based on THz spectrum[J]. *Laboratory Medicine and Clinic*, 2011, **8**(5): 528~529
刘夏铭, 李 娜, 刘红利 等. 基于太赫兹谱检测血液卟啉的可行性研究[J]. 检验医学与临床, 2011, **8**(5): 528~529
- Wang Gao, Zhou Hanchang, Yao Baodai *et al.*. Progress of terahertz spectroscopy detection technique of explosives[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 013001
王 高, 周汉昌, 姚宝岱 等. 爆炸物太赫兹光谱探测技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(1): 013001
- Yang Guangkun, Yuan Bin, Xie Dongyan *et al.*. Analysis on the use of THz technology in the military application[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(4): 376~380
杨光鲲, 袁 斌, 谢东彦 等. 太赫兹技术在军事领域的应用[J]. 激光与红外, 2011, **41**(4): 376~380
- J. J. Sanz-Fernandez, R. Cheung, G. Goussetis *et al.*. Power stored and quality factors in frequency selective surfaces at THz frequencies[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, **59**(6): 2205~2216
- Xie Changde. Discussion about coherent condition and coherency of photosource[J]. *Journal of Shanxi University*, 1981, (2): 47~58
谢常德. 关于相干条件及光源相干性的讨论[J]. 山西大学学报, 1981, (2): 47~58
- D. T. Nguyen, F. Simoens, J. Ouvrier-Buffet *et al.*. Broadband THz uncooled antenna-coupled microbolometer array-electromagnetic design, simulations and measurements[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, **2**(3): 299~305
- Huang Zhen, Yu Bin, Zhao Guozhong. The THz emission properties of small-aperture photoconductive antenna[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 110~114
黄 振, 于 斌, 赵国忠. 小孔径光电导天线产生太赫兹波的辐射特性[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 110~114
- H. F. Tiedje, D. Saeedkia, M. Nagel *et al.*. Optical scanning techniques for characterization of terahertz photoconductive antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, **58**(7): 2040~2045
- Zhang Cunlin, Mu Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 023001
张存林, 牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(2): 023001
- Yang Pengfei, Yao Jianquan, Bing Pibin *et al.*. Source and characteristics of THz wave[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(2): 125~131
杨鹏飞, 姚建铨, 邴丕彬 等. 太赫兹波及其常用源[J]. 激光与红外, 2011, **41**(2): 125~131
- Shao Li, Lu Gang, Cheng Dongming. Generation and recent advances in optical rectification THz sources[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(9): 872~875
邵 立, 路 纲, 程东明. 光整流太赫兹源及其研究进展[J]. 激光与红外, 2008, **38**(9): 872~875
- Ma Pengfei, Zhou Pu, Ma Yanxing *et al.*. Development of the polarization beam combining technique of lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(7): 070005
马鹏飞, 周 朴, 马阎星 等. 激光相干偏振光束合成技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(7): 070005
- Ma Jianjun, Li Dehua, Zhou Wei *et al.*. Progress of terahertz pulse shaping techniques[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(9): 090004
马建军, 李德华, 周 薇 等. 太赫兹脉冲整形技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(9): 090004