

# 0.14 THz 高功率太赫兹脉冲的频率测量\*

王光强<sup>1)†</sup> 王建国<sup>2)3)</sup> 李小泽<sup>2)</sup> 范如玉<sup>1)2)</sup> 王行舟<sup>2)</sup> 王雪峰<sup>2)</sup> 童长江<sup>2)</sup>

1) (清华大学工程物理系, 北京 100084)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

3) (西安交通大学电子信息工程学院, 西安 710049)

(2009 年 11 月 26 日收到; 2010 年 6 月 2 日收到修改稿)

提出了采用截止波导法与谐波混频法相结合的方式, 进行 0.14 THz 高功率短脉冲的频率测量. 首先将两个截止频率分别为 0.125 和 0.15 THz 的非标准矩形波导作为接收端, 通过截止波导滤波法获得了太赫兹辐射源的频率范围. 然后根据已知的频率范围, 将本振频率选择为 15—20 GHz, 则谐波混频的谐波次数确定为 8. 随后的 Ka 波段的脉冲测试和 0.14 THz 连续波测试表明, 该 8 次谐波混频器可用于 0.14 THz 脉冲的混频测量. 最后, 0.14 THz 脉冲频率测量实验给出了太赫兹辐射源的准确频率为 0.1465 THz. 该方法大大降低了对本振信号的频率要求, 且结果准确可信, 为长波段太赫兹脉冲的频率测量提供了一种新的思路.

**关键词:** 太赫兹脉冲, 截止波导, 谐波混频

**PACC:** 0762, 5270G

## 1. 引 言

太赫兹波是指频率在 0.1—10 THz 范围内的电磁波, 在长波段它与毫米波、亚毫米波相重合, 具有毫米波的特点. 由于在频带 0.1—0.7 THz 内具有若干个大气传输窗口 (例如 0.1, 0.14, 0.22 THz 等), 而且可以实现很高的功率输出, 因此在军事和民用领域 (如通信、遥感、雷达、成像、天体物理等方面) 有着极为广泛的应用需求和前景<sup>[1]</sup>. 在太赫兹技术及应用中, 太赫兹辐射源研究是太赫兹技术发展的重要环节, 国内外许多研究机构都在积极开展该波段的高功率太赫兹源的研制工作<sup>[2-6]</sup>. 其中, 西北核技术研究所近年来开展了基于表面波振荡器的 0.14 THz 高功率脉冲波源的模拟研究<sup>[7]</sup> 和设计工作. 最新设计的太赫兹脉冲波源的模拟结果显示, 在实验条件下脉冲波源的输出信号频率为 0.143 THz, 功率达 2 MW, 脉冲宽度约为 2 ns.

太赫兹波段处于微波波段与光波波段之间, 这种特殊性给它的信号测量带来了许多困难, 尤其是频率测量更为困难. 0.14 THz 波相对传统微波信号频率太高, 无法使用频谱仪或者示波器直接测量;

而它相对于光波信号频率又太低, 无法采用干涉的方法来测量频率. 目前太赫兹长波段频率测量普遍应用的是外差法, 它是将被测信号与频率相当的本地振荡信号差频, 通过分析输出的中频信号来获得被测太赫兹波的频率. 但是对于 0.14 THz 高功率脉冲波, 外差法仍存在以下两个困难: 一是国内稳定的 0.14 THz 本地振荡源很少, 而且价格昂贵; 二是被测 0.14 THz 脉冲波的脉冲宽度太短 (仅为 2 ns), 无法保证本地连续波信号与脉冲波混频的效果.

为了解决以上频率测量中存在的困难, 本文采用了截止波导滤波法和谐波混频法相结合的方式, 成功完成了 0.14 THz 高功率脉冲波频率的准确测量. 实验中首先采用截止波导滤波法获得了太赫兹脉冲的频率范围, 然后利用最高频率仅为 20 GHz 的本地振荡源和 8 次谐波混频器, 获得了被测信号理想的差频输出. 测量结果表明, 所设计的 0.14 THz 高功率脉冲辐射源的输出信号频率为 0.1465 THz, 达到了设计指标.

## 2. 截止波导法及实验结果

当频率为  $f$  的电磁波在金属波导中传输时, 其

\* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2009AA809403B) 资助的课题.

† E-mail: wqg02@mails.tsinghua.edu.cn

中的电磁场分布表达式为<sup>[8]</sup>

$$\begin{aligned} E &= E(x, y, z) e^{-i\beta z}, \\ H &= H(x, y, z) e^{-i\beta z}. \end{aligned} \quad (1)$$

这里  $\beta = 2\pi\sqrt{f^2 - f_c^2}/c$  为电磁波纵向传输系数, 其中  $f_c$  为波导截止频率,  $c$  为波导中的光速. 因此, 当电磁波频率低于  $f_c$  时, 只要金属波导的纵向长度足够长, 就可以认为该频率的电磁波在波导中完全衰减而无法传播, 即波导处于截止状态. 因此, 可以利用金属波导的截止特性搭建类似于电子学滤波器的高通滤波系统.

实验测量系统框图如图 1 所示. 由于所设计的太赫兹辐射源模拟频率为 0.143 THz, 因此实验中采用了两种尺寸的矩形波导, 其中波导 A 的尺寸为 1.2 mm×0.6 mm, 波导 B 的尺寸为 1.0 mm×0.5 mm, 两种波导的长度均为 50 mm, 它们的截止频率分别为 0.125 和 0.15 THz. 实验中分别将两个波导置于检波系统接收端, 通过检波器的输出来判定源输出的太赫兹脉冲信号的频率范围. 两种接收情况下检波器输出的信号波形如图 2 所示. 图中波形 1 为检波器输出的检波信号, 波形 2 是太赫兹驱动源的二极管电压. 对比图 2(a) 和 (b) 的输出结果可知: 采用波导 A 作为接收天线时检波器有较大幅度的信号输出, 说明被测脉冲信号频率大于该波导截止频率 0.125 THz; 而采用波导 B 作为接收天线时检波器无输出, 说明被测脉冲信号频率小于该接收波导的截止频率 0.15 THz. 综合以上分析可知, 被测脉冲信号频率应在 0.125—0.15 THz 之间, 这为下一步的混频法测量提供了基础.

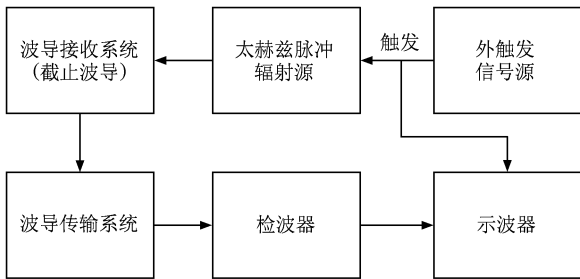


图 1 截止波导法测频实验系统框图

### 3. 谐波混频法及实验结果

谐波混频法主要是为了降低本振信号的频率要求而提出的, 它将本振信号的  $n$  次谐波与被测信号混频, 从而将本振信号的频率要求降低到被测信

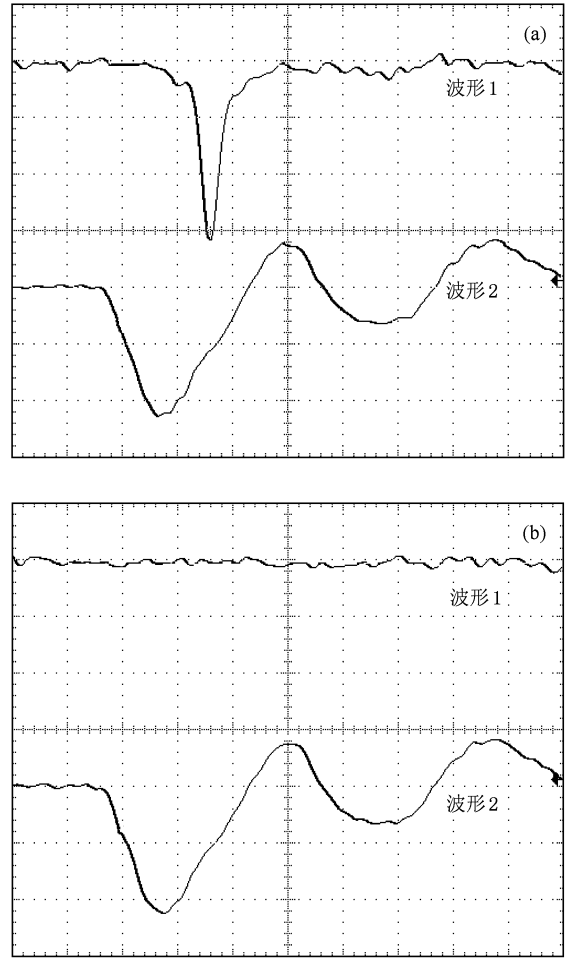


图 2 不同截止波导接收时检波器输出信号波形 (a) 0.125 THz 非标开口波导接收, (b) 0.15 THz 非标开口波导接收

号频率的  $1/n$  附近. 在本文的测量实验中, 根据截止波导法测频的初步结果, 结合最高频率为 20 GHz 的本振信号源和合适的滤波器, 成功实现了 0.14 THz 脉冲信号与本振信号的 8 次谐波混频, 给出了理想的中频输出, 准确地测定了太赫兹脉冲信号频率.

#### 3.1. 谐波混频原理及混频器结构

一般混频器均采用二极管作为非线性器件进行混频, 具有结构简单、便于集成化、工作稳定而且性能良好等优点. 这里以广泛使用的肖特基势垒二极管为例, 阐述谐波混频器的工作原理<sup>[9]</sup>. 如果将两个极性相反的不同二极管并联组成混频管对, 则其具有偶数次谐波混频的效果, 如图 3 所示. 设加到二极管对两端的电压为

$$V = V_s \cos\omega_s t + V_c \cos\omega_c t,$$

其中  $V_s \cos\omega_s t$  为输入信号,  $V_c \cos\omega_c t$  为本振信号. 把混频管对看作是外加电压控制的时变电导  $g(t)$ , 则

流经混频管对的电流  $i$  与电压  $V$  满足下列关系:

$$\begin{aligned} i &= g(t)V \\ &= f(V) \\ &= f(V_s \cos \omega_s t + V_c \cos \omega_c t). \end{aligned} \quad (2)$$

当输入太赫兹波信号功率较小时,即满足  $V_s \leq V_c$ , 可将(2)式在  $V_c \cos \omega_c t$  处进行泰勒展开,忽略其二次项及更高次项后可得

$$\begin{aligned} i &= V_s \cos \omega_s t \left. \frac{di}{dV} \right|_{V=V_c \cos \omega_c t} \\ &= g(t) \Big|_{V=V_c \cos \omega_c t} V_s \cos \omega_s t. \end{aligned} \quad (3)$$

根据肖特基混频二极管的伏安特性可知,流经单个二极管的电流为

$$i_{1,2} = I_s (e^{\alpha V} - 1), \quad (4)$$

式中  $I_s$  为二极管饱和电流,  $\alpha$  为二极管的特性参数. 因此,混频管对总电流为

$$\begin{aligned} i &= i_1 - i_2 \\ &= I_s (e^{\alpha V} - e^{-\alpha V}), \end{aligned} \quad (5)$$

则混频管对的总电导为

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{di}{dV} \\ &= I_s \alpha (e^{\alpha V} + e^{-\alpha V}). \end{aligned} \quad (6)$$

将  $g(t)$  在  $V_c \cos \omega_c t$  处展开成傅里叶级数,得

$$g(t) = 2\alpha I_s I_0(\alpha V_c) + 4\alpha I_s \sum_{m=2}^{\infty} I_m(\alpha V_c) \cos m\omega_c t, \quad (7)$$

式中  $I_m$  是  $m$  阶第一类修正贝塞尔函数,  $m$  为偶数.

将(7)式代入(3)式后得

$$\begin{aligned} i &= 2\alpha I_s I_0(\alpha V_c) V_s \cos \omega_s t \\ &+ 2\alpha I_s V_s \sum_{m=2}^{\infty} I_m(\alpha V_c) [\cos(m\omega_c - \omega_s)t \\ &+ \cos(m\omega_c + \omega_s)t]. \end{aligned} \quad (8)$$

由此可见,被测太赫兹波小信号和本振信号经混频管对混频后输出多个频谱成分,均是被测信号与本振信号的偶次谐波的差频或者和频输出. 如果加以适当的低通滤波器就能获得有用的中频信号,从而分析得到被测信号的频率.

根据以上的原理分析,为了测量频率范围在 0.125—0.15 THz 内的脉冲信号,如果采用频率为 15—20 GHz 的本振信号,则最佳谐波次数应取为 8. 此时通过改变本振频率并结合适当的低通滤波器,可将中频输出控制在 7 GHz 以内,降低了对示波器的性能要求. 图 4 给出了实验中所用的 8 次谐波混频器的结构简图,主要由 BJ1400 型标准波导、混频二极管对组成的混频模块、本振放大器、滤波器、微

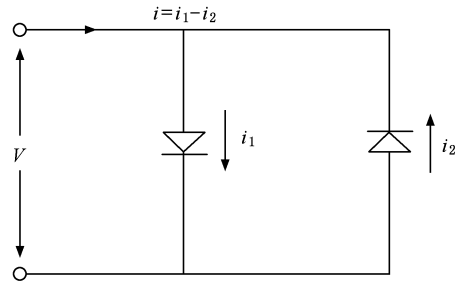


图3 肖特基势垒混频管对电路图

带线和匹配电路等组成. 本振信号输入和中频输出均采用同轴接头方式,而被测太赫兹信号则采用波导输入,方便与传输系统的连接. 为了保证被测信号相对于本振信号属于小信号,即保证(3)式的成立,以达到理想的混频效果,这里采用了将本振信号放大再进行混频的方式,有效地减少了被测兆瓦级太赫兹信号的衰减. 同时对混频模块进行了电路改进,以保证混频器对纳秒级的脉冲有良好的响应. 整个混频器采用了三端口结构,其优点是本振信号、输入信号和中频信号相互隔离,不会产生相互干扰.

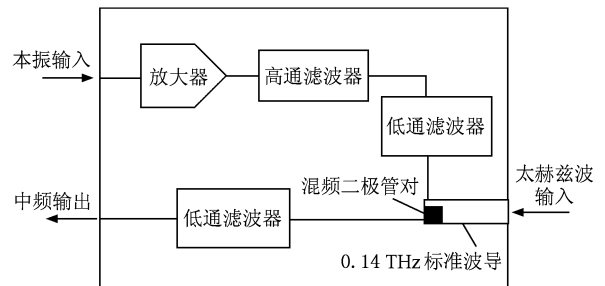


图4 8次谐波混频器结构示意图

### 3.2.8 次谐波混频器的测试

由于目前国内尚缺少 0.14 THz 波段的脉冲源,为了验证谐波混频器具有足够的脉冲响应,实验中在 Ka 波段对混频器的混频模块进行了脉冲测试. 测试脉冲宽度为 10 ns—10  $\mu$ s. 大量的测试结果表明,脉冲经 8 次谐波混频后,其输出中频脉冲的上升沿和下降沿均无展宽现象,说明该混频模块对脉冲有足够的响应时间,可以用来进行太赫兹脉冲的频率测量.

此外,为了验证谐波混频器工作在 8 次谐波状态,实验中利用混频器进行了 0.14 THz 连续波频率测量,中频输出结果如图 5 所示. 输入被测太赫兹

信号频率为 0.1465 THz, 本振信号为 18 GHz, 输出中频信号频率为 2.5 GHz. 测试中, 本振信号频率每减小 0.125 GHz, 中频信号输出增加 1 GHz, 因

此可以确定被测信号频率为 0.1465 THz, 且混频器工作在 8 次谐波混频状态, 可见混频器测量结果准确可信.

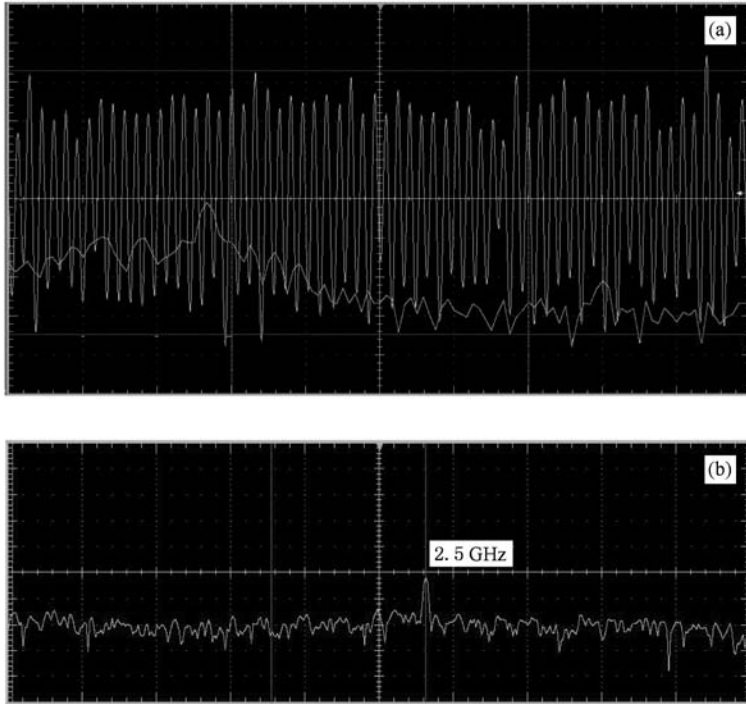


图 5 0.1465 THz 连续波输入后测得的中频输出信号 (a) 波形, (b) 频谱

### 3.3. 谐波混频实验及结果

0.14 THz 高功率脉冲谐波混频实验系统如图 6 所示, 整个测量的核心部件就是 8 次谐波混频器. 本振信号采用的是安捷伦信号源, 最高输出频率为 20 GHz, 最大输出功率为 14 dBm. 使用泰克

DPO/DSA71254B 型示波器, 其带宽达 12.5 GHz, 可以较为准确地测量高达 6 GHz 的中频信号.

测频前首先测量了被测太赫兹脉冲信号的功率大小, 以选择合适的衰减量, 使得脉冲功率远小于本振信号功率且能有效地触发示波器, 获得理想的中频输出信号. 实验中, 在本振频率 15—20 GHz 范围内不断改变本振频率, 直到示波器上输出规整的中频信号. 然后在理想的本振频率附近以 0.125 GHz 微调本振信号频率, 获取中频输出, 用以确定混频的谐波次数和被测脉冲信号的频率, 谐波混频结果如图 7 所示. 最终得到的中频信号比较规整, 持续时间大约为 4 ns, 与脉冲信号底宽相同, 证明了纳秒级脉冲谐波混频的可行性. 由于中频输出太短, 无法采用快速傅里叶变换进行分析, 因此这里采用读取中频周期再推算其频率的方法获得中频输出频率. 在本振信号频率为 18.875 GHz 时, 中频信号频率约为 4.5 GHz, 如图 7(a) 所示; 而在本振信号频率为 19 GHz 时, 中频信号约为 5.5 GHz, 如图 7(b) 所示. 因此, 实验中混频器工作在 8 次谐波混频状态, 且被测太赫兹脉冲信号的频

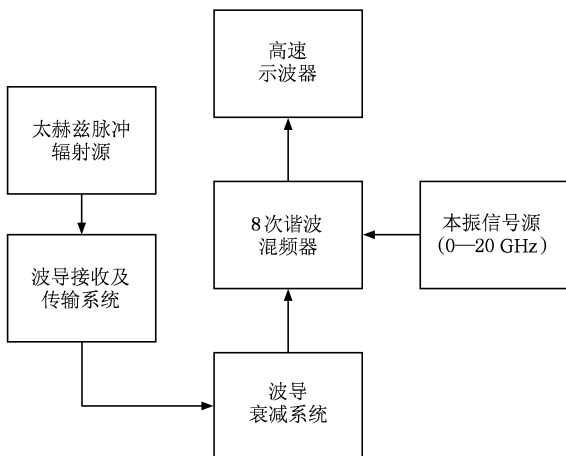


图 6 谐波混频法测频实验系统框图

率  $f_s = 19 \times 8 - 5.5 = 18.875 \times 8 - 4.5 = 0.1465$  THz. 这与截止波导法获得的结果相符合. 由于中频频率读取带来的误差在 2 GHz 以内, 最终确

定被测太赫兹脉冲信号的频率  $f_s = 0.1465$  THz  $\pm 2$  GHz, 精度高于高功率脉冲测频常用的色散线法.

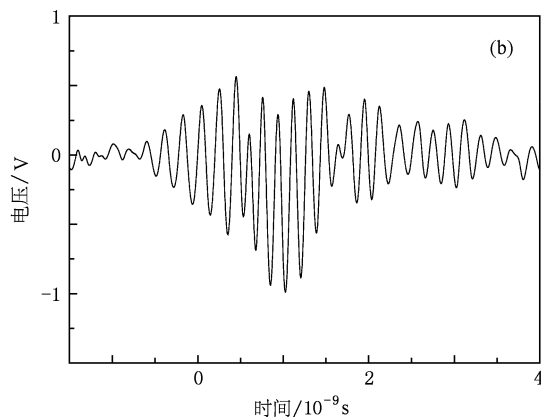
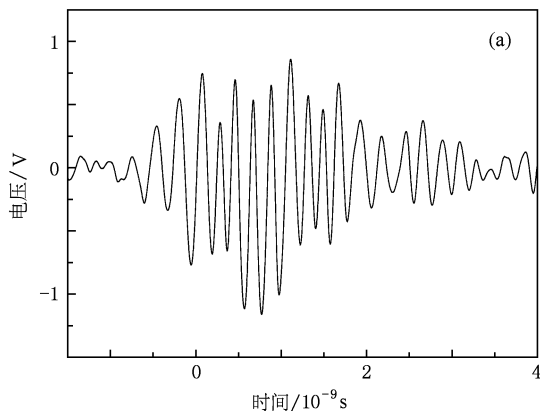


图7 0.14 THz 脉冲谐波混频信号输出 (a) 本振 18.875 GHz, (b) 本振 19 GHz

## 4. 结 论

本文针对高功率短脉冲太赫兹波频率测量遇到的困难, 采用截止波导法与谐波混频法相结合的

方式, 准确测量了 0.14 THz 辐射源的输出脉冲频率. 该方法大大降低了外差法对本振信号源频率的要求, 对长波段太赫兹辐射的频率测量有着积极的参考意义.

- [1] Wang M H, Xue Q Z, Liu P K 2008 *J. Electron. Inform. Technol.* **30** 1766 (in Chinese) [王明红、薛谦忠、刘濮鲲 2008 电子与信息学报 **30** 1766]
- [2] Carr G L, Martin M C, McKinney W R, Jordan K, Neil G R, Williams G P 2002 *Nature* **420** 153
- [3] Lai G J, Liu P K 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4515 (in Chinese) [来国军、刘濮鲲 2007 物理学报 **56** 4515]
- [4] Li W P, Zhang Y X, Liu S G, Liu D G 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2875 (in Chinese) [李文平、张雅鑫、刘盛刚、刘大刚 2008 物理学报 **57** 2875]
- [5] Zhang K C, Wu Z H, Liu S G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3402
- [6] Liu D W, Liu S G, Yan Y, Yuan X S 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3049

- [7] Zhang H, Wang J G, Tong C J 2007 *J. Xi'an Jiaotong Univ.* **41** 1446 (in Chinese) [张海、王建国、童长江 2007 西安交通大学学报 **41** 1446]
- [8] Zhang K Q, Li D J 2001 *Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp193—303 (in Chinese) [张克潜、李德杰 2001 微波与光电子学中的电磁理论 (北京: 电子工业出版社) 第 193—303 页]
- [9] Zhang B Y, Liu C G 1981 *Microwave Mixer* (Beijing: National Defense Industry Press) pp14—18 (in Chinese) [张秉一、刘重光 1981 微波混频器 (北京: 国防工业出版社) 第 14—18 页]

# Frequency measurement of 0.14 THz high-power terahertz pulse<sup>\*</sup>

Wang Guang-Qiang<sup>1)†</sup> Wang Jian-Guo<sup>2)3)</sup> Li Xiao-Ze<sup>2)</sup> Fan Ru-Yu<sup>1)2)</sup> Wang Xing-Zhou<sup>2)</sup>  
Wang Xue-Feng<sup>2)</sup> Tong Chang-Jiang<sup>2)</sup>

1) (*Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

2) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

3) (*School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 26 November 2009; revised manuscript received 2 June 2010)

## Abstract

The subharmonic heterodyne combined with cut-off waveguide method is proposed to measure the frequency of 0.14 THz high-power nanosecond pulse in this paper. Using the cut-off waveguide method, the frequency range of the terahertz pulse is determined, in which two non-standard rectangular waveguides with cut-off frequencies of 0.125 and 0.15 THz are separately used as a receiver. According to the preliminary result, the subharmonic order is chosen to be 8, while the frequency of local oscillator is set to be in a range of 15—20 GHz. A series of tests on the 8th harmonic mixer is done using the pulses in Ka-band and the 0.14 THz continuous wave source, separately. Experimental results indicate that the mixer can be used in the heterodyne measurement of 0.14 THz nanosecond pulse. Finally, the heterodyne measurement is carried out on the high-power terahertz pulse source, and an accurate frequency of 0.1465 THz is determined in this experiment. This novel method, which greatly reduces the frequency requirement of the local oscillator, is proved to have a good performance in the frequency measurement of 0.14 THz nanosecond pulse, and probably provides a new idea for frequency measurement of pulses in the long-wavelength terahertz-band.

**Keywords:** terahertz pulse, cut-off waveguide, subharmonic heterodyne

**PACC:** 0762, 5270G

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA809403B).

<sup>†</sup> E-mail: wqg02@mails.tsinghua.edu.cn