

文章编号: 2095-4980(2016)01-0013-05

太赫兹双通道行波管高频系统

李浩光^{a,b}, 杨 军^{a,c}, 邓光晟^{a,c}, 黄小玲^{a,c}

(合肥工业大学 a.省部共建现代显示技术国家重点实验室; b.仪器科学与光电工程学院; c.光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 设计了一个基于交错双光栅的双路并联慢波结构, 该结构采用两注电子及均匀恒磁场聚焦系统, 具有平面二维结构。对该慢波结构的色散等冷测特性进行了详细研究, 采用功分器和传输变换结构构成高频互作用电路, 出口为 WR-2.8 标准波导口, 在 305 GHz~335 GHz 获得较好的传输特性, 反射系数 $S_{11} < -15$ dB, 传输系数 $S_{21} > -4.4$ dB。利用三维粒子模拟计算的方法, 分析比较了单路及双路行波管放大特性。在电流密度 53.57 A/cm² 情况下增益达到 14.586 dB, 是一种极具发展潜力的大赫兹器件。

关键词: 太赫兹; 慢波结构; 色散; 带状电子注; 行波管

中图分类号: TN124

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201601.0013

Terahertz high frequency structure with double channels

LI Haoguang^{a,b}, YANG Jun^{a,c}, DENG Guangsheng^{a,c}, HUANG Xiaoling^{a,c}

(a.National Key Laboratory of Advanced Display Technology; b.School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering; c.Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract: A novel slow wave structure with dual-gratings in parallel based on staggered double channels is proposed. The structure formed by double beams and a focusing system has a two-dimensional structure. Dispersion characteristics of slow-wave structure are simulated and analyzed in detail. The high frequency structure consists of power dividers and transmissions, and its output ports are standard waveguide named WR-2.8. The transmission losses of the whole RF structure $S_{21} > -4.4$ dB and the reflection parameter $S_{11} < -15$ dB are achieved. The beam-wave interaction properties of single channel and double channels are also simulated, and the gain can reach 14.586 dB with a current density of 53.57 A/cm². Because of lower current density and simple structure, the RF system shows the application potential for terahertz Traveling Wave Tube(TWT).

Key words: terahertz; slow wave; dispersion; sheet beam; Traveling Wave Tube

太赫兹(Terahertz, THz)波是一种波长在 3 mm~30 μ m, 介于微波与红外线之间的波。由于波长的独特性, 太赫兹波在军事、生物、通信、医药等领域有着无可比拟的优势^[1]。目前, 太赫兹技术的应用与发展主要受太赫兹源的制约^[2], 如何高效率、低成本、且在室温下获得大功率太赫兹源成为国内外学者关注的重要问题^[3]。

基于真空电子学的太赫兹器件如行波管、回旋管、返波振荡器、纳米速调管及 SP 超辐射器等是产生大功率 THz 波的主要器件, 因而受到国内外研究机构和学者高度重视^[4]。慢波结构则是真空电子器件的核心部分, 慢波结构的优劣决定着器件的性能。与传统慢波结构相比, 交错双栅矩形慢波结构^[5]具有结构简单、传输特性好、耦合阻抗高、散热性好等优点, 因此也越来越受到国内外学者的重视^[6]。

在交错双栅慢波结构的基础上提出了一种 THz 双通道行波管高频系统, 即在平面双路并联交错双光栅慢波电路中, 采用双电子注和共用一个聚焦系统。该高频系统可以降低工作电流密度, 具有散热性好、耦合阻抗高、结构简单且与微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)技术兼容等优点, 是一种极具发展潜力的 THz 高频结构, 可用于发展大功率集成 THz 放大器。

1 交错双栅矩形慢波结构色散

交错双栅矩形慢波结构是一种全金属的慢波结构, 如图 1 所示, $d, b, 2a, h, w$ 分别代表结构周期、齿槽宽度、

电子通道、齿高和慢波宽度，定义 k 为 b/d 。色散特性是慢波结构的基本冷测特性，它可以直接表示出信号在慢波结构内部的传输特性。为设计行波管放大器，因此采用+1 次谐波作为工作模式，该慢波结构的色散特性如图 1 所示，结构参数为： $d=300\ \mu\text{m}$, $k=0.7$, $a=50\ \mu\text{m}$, $h=210\ \mu\text{m}$, $w=520\ \mu\text{m}$ 。

2 高频结构

双路慢波结构如图 2 所示，由 T 型功分器、波导变换、过渡以及正常交错光栅慢波结构组成。传输特性是器件的另一个重要特性，它表征信号在结构里面传输性能的好坏。好的传输特性需要信号在整个电路的工作频带内有较低的衰减和反射，同时使电子束能够顺利地进入流出慢波电路，还要避免结构过于复杂造成加工困难、成本过高以及散热性差等一系列问题，所以首先要设计各变换结构，降低传输损耗及反射。

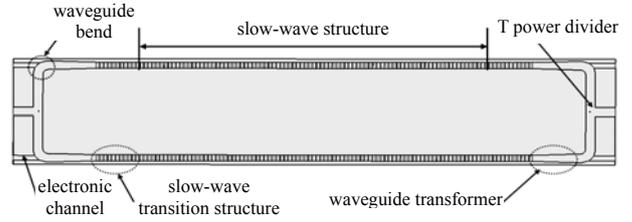


Fig.2 Schematic diagram of the whole structure
图 2 整体结构示意图

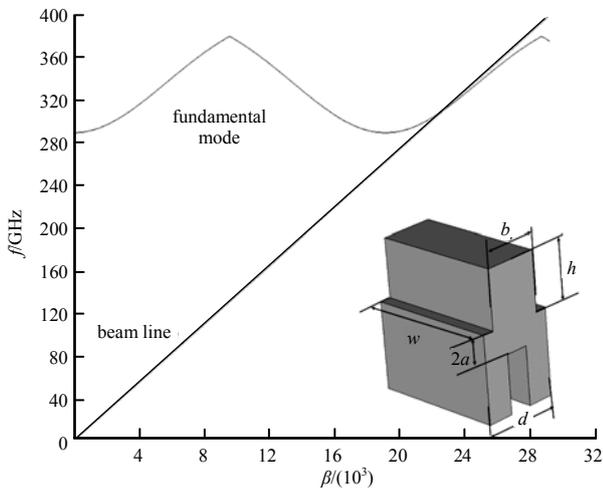


Fig.1 Diagram of the single period structure and its dispersion curves
图 1 单周期结构示意图及其色散特性

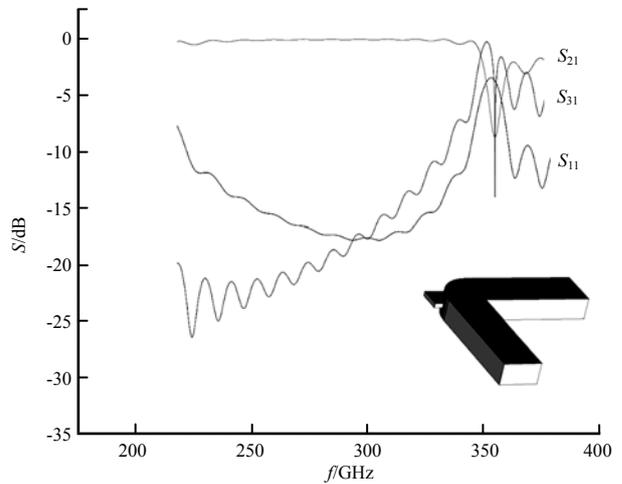


Fig.3 Transmission characteristics of the traditional corner
图 3 传统弯头结构传输特性

2.1 波导弯头

波导弯头是传输特性的一个重要环节，它是一种纵向突然变化的波导，起到改变传输方向的作用，对整个传输特性有重要的影响。传统弯头直接在波导端口进行 90° 的旋转变换，会产生 90° 的折角，造成较大的反射系数，其传输特性如图 3 所示(矩形波导长宽为 $711\ \mu\text{m} \times 356\ \mu\text{m}$)。

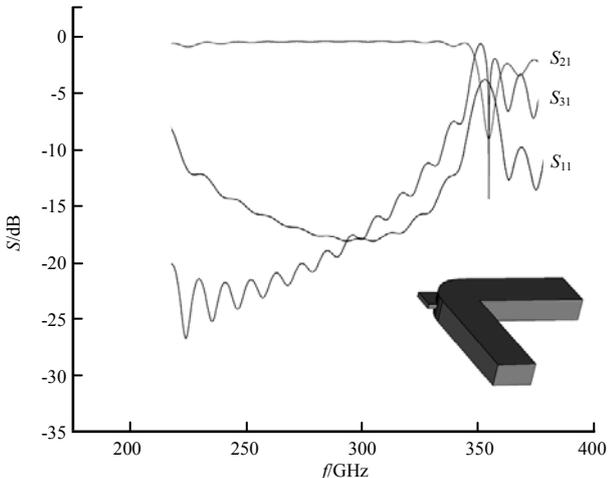


Fig.4 Transmission characteristics of the concentric cylindrical corner
图 4 同心圆柱弯头传输特性

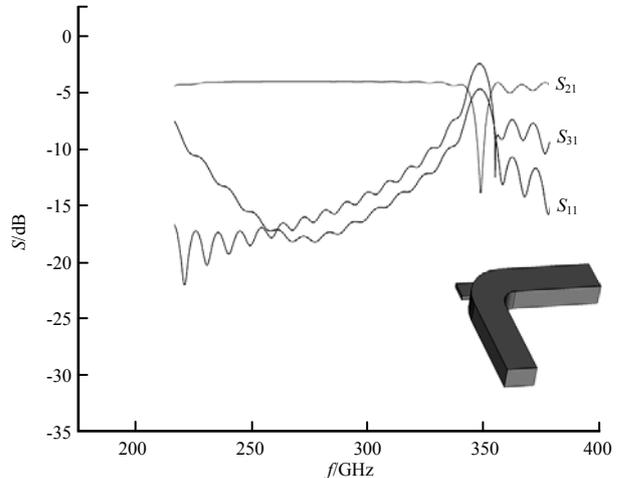


Fig.5 Transmission characteristics of the non-concentric cylindrical corner
图 5 非同心圆柱弯头传输特性

在基于传统弯头的基础上,针对其直角结构和反射较大等问题,设计比较了同心圆柱弯头和非同心圆柱弯头。同心圆柱是在弯头处采用四分之一同心扇形,且半径差为矩形波导长边,高度为矩形波导短边。通过计算分析其传输特性随着半径的增大而良好,但加入电子孔后,过大的半径对传输特性反而有遏制趋势。如图 4 所示,这种结构有效避免了结构中 90° 角,在同心圆基础上保证了模式的稳定性。通过计算分析可知,外圆半径为 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 时传输特性最优。对比图 3 可以看出,其 S_{11} 明显低于传统的波导弯头。

非同心圆柱弯头,即内外圆弧不同心,通过计算分析可以发现,外圆半径的影响要大于内圆半径且内外圆半径为 $400\ \mu\text{m}$ 、 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 时,反射最小,其传输特性如图 5 所示。

对比以上 3 种结构和传输特性能够发现:同心圆柱弯头的传输特性要优于传统的弯头结构,而非同心圆柱弯头的传输特性则是最优的,最终选用了非同心圆柱弯头。

2.2 T 型功分器

功分器作为双路放大器的一部分,起着信号分流的作用。采用标准 WR-2.8 矩形波导 T 型功分器,在距波导底边 h_x 处,加入半径为 r 的销钉(h_x 为销钉圆心距离 T 型功分器底边高度, r 为销钉的半径)。通过计算分析可知:当销钉半径 r 为波长的四十分之一左右,高度 h_x 为波长的四分之一左右时,传输特性最优。且功分器的谐振频率随 h 的增大而减小,而传输特性相对于 h 来说,对半径 r 更为敏感。设计的功分器传输特性如图 6 所示, $r=25\ \mu\text{m}$, $h_x=320\ \mu\text{m}$ 。

2.3 整体高频系统 S 参数

为了使电磁场信号以尽可能小的反射率及损耗在整个高频电路中传输,并很好地输出高频信号,必须设计慢波过渡结构以及两级慢波结构之间的连接波导。本文采用慢波结构金属栅高等差逐渐减小及槽底部等差逐渐增加的方式,慢波结构最后过渡到一个矩形波导^[7]。结构如图 2 所示,信号由功分器输入端输入,经过双路并联放大并由合路器输出端输出。对工作在 $310\ \text{GHz}$ 的上述高频系统,设置材料为无氧铜。

而在实际加工情况下,由于加工误差以及粗糙度的影响势必给系统性能带来一定影响。金属表面粗糙度直接影响着材料的电导率。本文在 E Hammerstad 提出的电导率计算的基础上,加以分析,系统损耗随粗糙度的增加而增加。

$$\sigma_c = \frac{\sigma}{\left\{1 + \frac{2}{\pi} \arctan \left[1.4 \left(\frac{h_1}{s} \right)^2 \right] \right\}^2} \quad (1)$$

式中: s 为趋肤深度; h_1 为金属表面粗糙度; σ 为不考虑粗糙度时的金属电导率。

当前的光刻、电镀和铸造(Lithographie, Galvanoformung und Abformung, LIGA)微细加工技术可使金属表面的粗糙度达到 $20\ \text{nm}$, 设置无氧铜材料粗糙度为 $R_a=30\ \text{nm}$ 时,根据公式(1),其电导率为 $\sigma=5.25 \times 10^7\ \text{S/m}$ ^[8],其传输特性如图 7 所示。在 $305\ \text{GHz} \sim 335\ \text{GHz}$ 内,电子通道口为截止状态, $S_{11} < -15\ \text{dB}$, $S_{21} > -6\ \text{dB}$,具有较好的传输特性。

3 注波相互作用参数设定

单路慢波结构共 90 个标准周期且前后 10 个过渡周期,在理想恒磁场,不考虑电子发散情况下,输入输出端

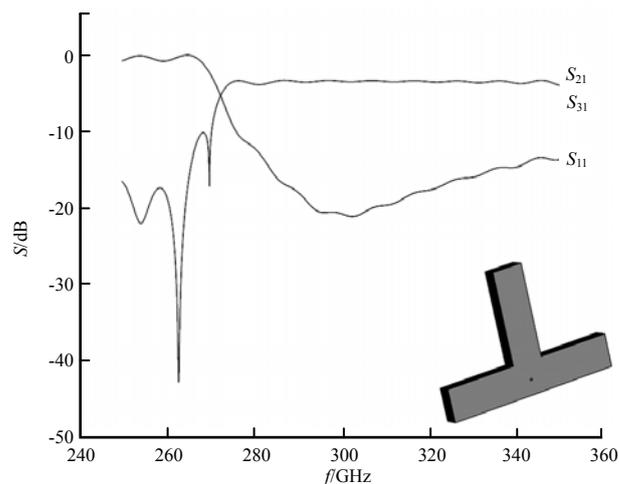


Fig.6 Transmission characteristics of T power divider
图 6 T 型功分器传输特性

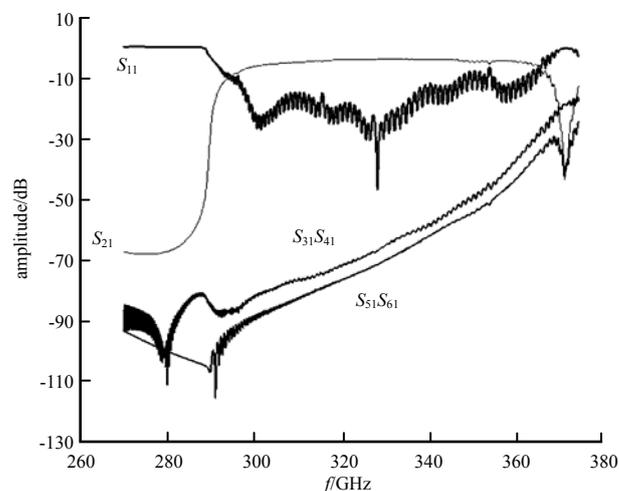


Fig.7 Transmission characteristics of the whole RF system
图 7 整个高频系统的传输特性

口尺寸为 $520\ \mu\text{m}\times 356\ \mu\text{m}$, 电流发射密度为 $107.14\ \text{A}/\text{cm}^2$ 。根据图 1 计算得同步电压为 $18.31\ \text{kV}$, 为了提高互作用效率, 将电子束电压微调至 $18.5\ \text{kV}$, 设定电流为 $30\ \text{mA}$, 输入信号为 $90\ \text{mW}$ 。

在粒子模拟过程中, 慢波结构工作状态稳定后某一时刻的粒子动能分布图直观地反映出慢波结构内电子束与高频信号间的相互作用情况^[9]。如图 8, 可以看到电子束在 $x < 2000\ \mu\text{m}$ 时, 速度和能量受到了有效的调制, 且在传输方向上不断增强, 而在输出端口大多数能量处于减小状态, 即电子束将能量交给了信号^[10]。

图 9 是输入输出以及反射信号归一化的傅里叶变换频谱图。可以明显看出, 信号在电子束的作用下得到了放大, 增益为 $19.22\ \text{dB}$, 输出功率为 $7.5\ \text{W}$ 。且频谱较为纯净, $3\ \text{dB}$ 带宽约 $17\ \text{GHz}$ 。

当给整体双路慢波结构加入 $180\ \text{mW}$ 信号时, 其输出信号如图 10 所示。电流密度降低至 $53.57\ \text{A}/\text{cm}^2$, 增益为 $11.27\ \text{dB}$, 输出功率为 $2.41\ \text{W}$ 。通过图 10 分析可知, 这种 THz 双通道行波管系统可在较低电流密度下具有较大的功率输出和 $30\ \text{GHz}$ 工作带宽 ($306\ \text{GHz}\sim 336\ \text{GHz}$)。

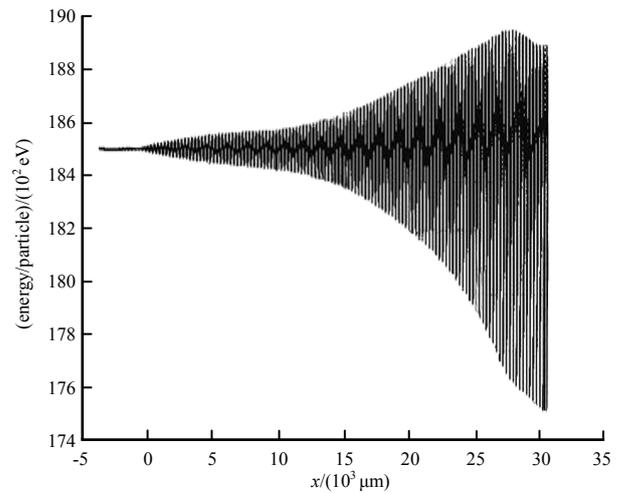


Fig.8 Phase space of the e-beam
图 8 粒子空间相位分布图

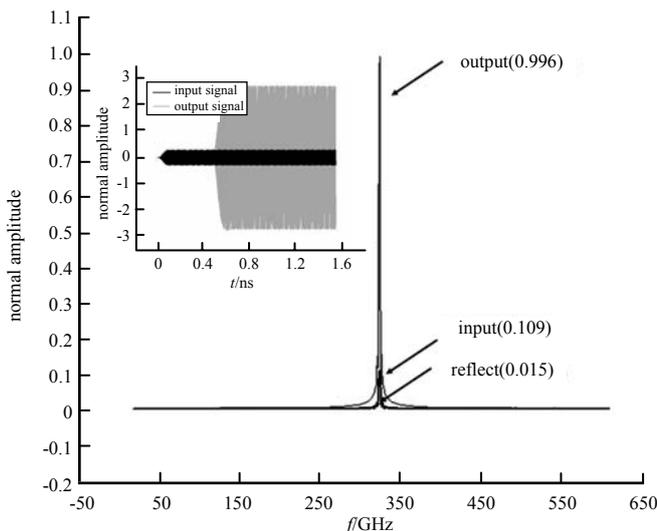


Fig.9 Output power and frequency spectrum of single channel
图 9 单通道场分布图及其频谱

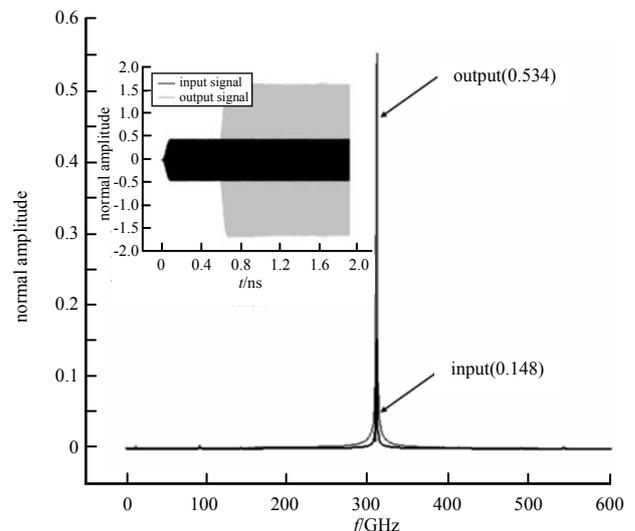


Fig.10 180 mW input signal and its FFT results
图 10 180 mW 输入信号及其输入输出信号 FFT 结果

4 结论

提出了一种基于交错双光栅的双路并联慢波结构, 其加工方便, 成本低廉, 具有平面二维结构。设计了 T 型功分器、波导变换、慢波过渡等结构, 在 $305\ \text{GHz}\sim 335\ \text{GHz}$ 内, 整体传输特性 $S_{11} < -15\ \text{dB}$, $S_{21} > -6\ \text{dB}$, 在发射电流密度 $53.57\ \text{A}/\text{cm}^2$ 情况下双路输出可达到 $2.41\ \text{W}$ 。这种结构在高频段具有传输特性好、工作电流小、易于加工的特点, 是一种适合于工作在 THz 波段的平面二维慢波结构。

参考文献:

- [1] 王明红, 薛谦忠, 刘濮鲲. 太赫兹真空电子器件的研究现状及其发展评述[J]. 电子与信息学报, 2008,30(7): 1766-1768. (WANG Minghong, XUE Qianzhong, LIU Pukun. Review of THz vacuum electronic devices and development[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,30(7):1766-1768.)
- [2] WILMINK G J, GRUNDT J E. Invited review article: current state of research on biological effects of terahertz radiation[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2011,32(10):1074-1122.
- [3] 程焰林, 向伟, 王远. 太赫兹微型电真空器件及其制造工艺[J]. 真空电子技术, 2011(3):43-48. (CHENG Yanlin, XIANG

- Wei,WANG Yuan. Terahertz micro-vacuum electronic device and its fabrication technology[J]. Vacuum Electronics, 2011(3): 43-48.)
- [4] LAI Jianqiang,GONG Yubin,XU Xiong,et al. W-band 1-kW staggered double-vane Traveling-Wave Tube[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012,59(2):496-503.
- [5] SHIN Y M,BAIG A,BARCHFELD R,et al. Experimental study of multichromatic terahertz wave propagation through planar micro-channels[J]. Applied Physics Letters, 2012,100(100):154103-154103-4.
- [6] XU Xiong,WEI Yanyu,SHEN Fei,et al. Sine waveguide and its applications in terahertz range[C]// 2011 China-Japan Joint Microwave Conference Proceedings(CJMW). Hangzhou,China:[IEEE], 2011:1-3.
- [7] 赖剑强,魏彦玉,黄民智,等. W 波段交错双栅返波振荡器高频系统[J]. 强激光与粒子束, 2012(9):2164-2168. (LAI Jianqiang,WEI Yanyu,HUANG Minzhi,et al. W-band staggered double vane backward wave oscillator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012(9):2164-2168.)
- [8] 徐翱,胡林林,陈洪斌,等. 太赫兹折叠波导慢波结构 S 参数特性[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(4):968-972. (XU Ao,HU Linlin,CHEN Hongbin,et al. S-parameter characteristics in THz folded waveguide slow wave structures[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(4):968-972.)
- [9] 史宗君. 周期束团驱动的毫米波及 THz 源的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009. (SHI Zongjun. Study on the radiation sources of millimeter and THz waves driven by the periodic electron bunches[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [10] 刘盛刚. 微波电子学导论[M]. 北京:国防工业出版社, 1985:110-115. (LIU Shenggang. Introduction to Microwave Electronics[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 1985:110-115.)

作者简介:



李浩光(1989-), 男, 安徽省淮南市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 THz 真空电子器件.email:18225882634@139.com.

邓光晟(1982-), 男, 重庆市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为微波电子学、THz 真空电子器件.

黄小玲(1990-), 女, 武汉市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波电子学、THz 真空电子器件.

杨 军(1978-), 男, 安徽省淮南市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为微波电子学、THz 真空电子器件.

(上接第 6 页)

作者简介:



房艳燕(1984-), 女, 陕西省宝鸡市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹大气传输.email:810643159@qq.com.

王玉文(1990-), 男, 宁夏省中卫市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹大气传输.

董志伟(1962-), 男, 北京市人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为高功率微波与脉冲功率技术.

李瀚宇(1980-), 男, 四川省资阳市人, 副研究员, 主要研究方向为电磁场与微波技术.