

文章编号: 2095-4980(2024)01-0011-07

## 基于硅介质光栅的片上太赫兹波源

杨积涛<sup>1</sup>, 王少萌<sup>2</sup>, 雷于露<sup>1</sup>, 杜朝海<sup>\*1</sup>

(1. 北京大学 电子学院, 北京 100871; 2. 电子科技大学 电子科学与工程学院, 四川 成都 611731)

**摘要:** 随着太赫兹技术的快速发展, 人们对太赫兹技术在通信、光谱学和传感方面的各种应用越来越感兴趣。太赫兹技术发展与应用的基础是高性能的太赫兹源, 传统的太赫兹源体积大且需要高功率电源驱动, 难以适应集成太赫兹技术的发展, 迫切需要研发新机制的微型太赫兹源。本文研究了一种新型微型化自由电子太赫兹辐射器, 基于自由电子与其在光栅介质波导结构中激励的太赫兹波的相互作用, 实现太赫兹波的激励。这项研究为开发高效的片上太赫兹辐射源和拓展先进太赫兹应用提供了新的选项。

**关键词:** 太赫兹源; 微型化; 自由电子辐射; 光栅介质波导

中图分类号: TN248.6

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023290

## On-chip terahertz source based on silicon dielectric grating

YANG Jitao<sup>1</sup>, WANG Shaomeng<sup>2</sup>, LEI Yulu<sup>1</sup>, DU Chaohai<sup>\*1</sup>

(1.School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China; 2.School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

**Abstract:** With the rapid development of terahertz technology, people are increasingly interested in its various applications in communications, spectroscopy, and sensing. The basis for the development and application of terahertz technology is high-performance terahertz sources. Traditional terahertz sources are large in size and require high-power power supply to drive and are difficult to adapt to the development of integrated terahertz technology. Therefore, there is an urgent need to develop micro-terahertz sources with new mechanisms. This paper studies a new type of miniaturized free electron terahertz radiator, which realizes the excitation of terahertz waves based on the interaction of free electrons and the terahertz waves excited in the grating dielectric waveguide structure. This research provides new options for developing efficient on-chip terahertz radiation sources and expanding advanced terahertz applications.

**Keywords:** terahertz source; miniaturization; free electron radiation; grating dielectric waveguide

太赫兹(THz)频段位于红外波段与毫米波之间, 其独特的性质, 如宽谱特性、低能量性和高透射性等, 引起了科学界广泛的关注<sup>[1]</sup>。同时, 太赫兹技术在成像<sup>[2]</sup>、传感<sup>[3]</sup>和安全<sup>[4]</sup>等方面展现出巨大的应用潜力。太赫兹波属于电子学和光子学的交叉领域, 既不完全适合用经典的光学理论解释, 也不完全适合用电子微波理论研究。常规的电子学器件和光子学器件都很难在该频段高效工作, 在一段时间内太赫兹频段被称为“太赫兹空隙”。

太赫兹波源是发展太赫兹技术的关键, 对波源的室温工作能力、高效性、微型化等方面要求较高。光子学太赫兹源、固态太赫兹源以及基于真空电子器件的太赫兹源被广泛研究<sup>[5]</sup>。光子学太赫兹源可以产生高功率、高相干性、单频、宽调谐范围、小型化、可室温运行的多种太赫兹辐射, 但辐射功率低, 且太赫兹光束的平均功率通常只有微瓦量级, 光转换效率较低<sup>[6]</sup>; 固态电子学器件频率稳定性好, 易集成, 可实现超宽带工作<sup>[7]</sup>, 但在 1 THz 以上频段增益下降, 功率容量很低; 真空电子器件, 如自由电子激光器、回旋管、返波管、扩展相互作用速调管等, 可在室温下工作, 工作效率和输出功率较高<sup>[8]</sup>。因此, 与光学器件、固态电子器件等类型的太赫兹波源

收稿日期: 2023-10-06; 修回日期: 2023-11-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFA1600302); 国家自然科学基金资助项目(62271011; U21A20458); 北京市杰出青年科学基金资助项目(JQ21011); 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室基金资助项目

\*通信作者: 杜朝海 email:duchaohai@pku.edu.cn

相比,真空电子器件是产生高功率太赫兹辐射的极佳候选波源<sup>[9]</sup>。自由电子辐射器作为真空电子器件的一种,具有高效率、高频率、耐高温和抗辐照等特点。

微型化的太赫兹波源受尺寸及材料影响,采用的片上阴极发射电流小,电流密度低,难以实现有效的电子注-波相互作用增益<sup>[10]</sup>;传统的真空电子波源结构复杂,体积较大;常规行波管、速调管等真空太赫兹波源,采用复杂的电子光学系统产生电子,通过电子注-电磁波相互作用系统将电子动能转化为太赫兹辐射能量<sup>[11]</sup>。这些器件高频结构具有多波长尺度,电子输运困难,电子注-波耦合阻抗低,注-波相互作用强度较弱,导致太赫兹器件的功率和效率难以提升。因此,为解决常规真空电子面临的困境,急需发展适用目前片上电子发射器的微型高效太赫兹波源。在太赫兹频段内,金属固有的欧姆损耗变得突出,使低损耗的电介质材料成为太赫兹源器件材料的选择之一。采用合适介电常数的特殊介质材料,对于目前快速发展的太赫兹源向高效率、微型化方向发展具有重要的意义。

本文旨在研究一种新型微型化自由电子太赫兹辐射器,基于自由电子与光栅介质波导中的太赫兹波相互作用,实现太赫兹波的激励与放大。区别于以往研究的光子晶体中的切伦科夫辐射<sup>[12]</sup>和金属光栅结构产生的Smith-Purcell辐射<sup>[13]</sup>,本文使用介质光栅波导结构,既兼容平面微加工工艺,又可最大限度地提高电子与波耦强度,减少电磁损耗,提升能量转换效率,有利于开发高效的片上太赫兹辐射源和推进先进的太赫兹应用。

## 1 微型化太赫兹源

### 1.1 微型化太赫兹源模型

硅光栅介质波导结构,即所设计的太赫兹波段辐射源的能量耦合结构,是本文实现太赫兹辐射产生与放大的关键性结构,基于自由电子与其在微纳光栅介质波导结构中激励起的电磁波的相互作用,实现电磁波的激励;通过自由电子激发起结构中的共振模式实现电磁波的放大,输出辐射为切伦科夫辐射。光栅波导结构主要分为3部分:光栅阵列、波导层以及基底层,如图1所示。

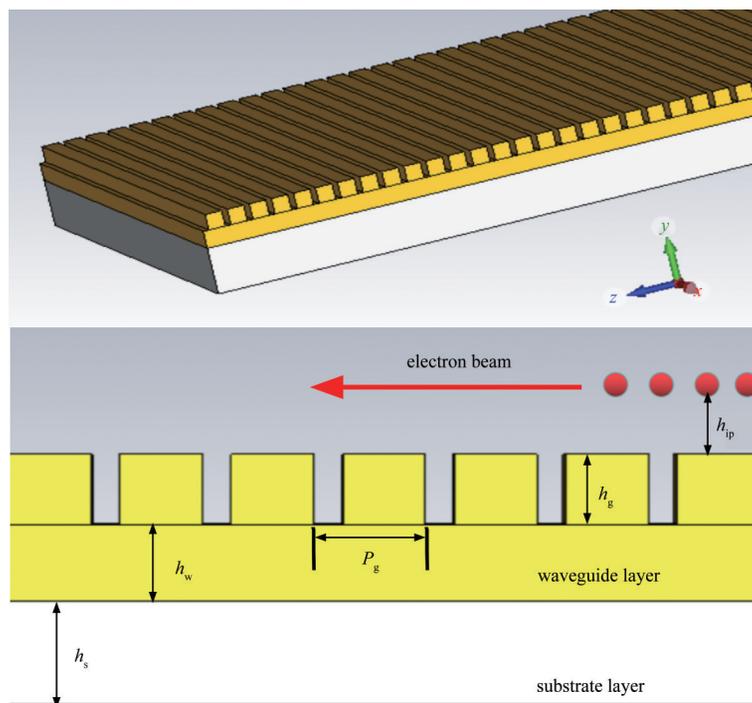


Fig.1 Schematic diagram of grating dielectric waveguide  
图1 光栅介质波导结构示意图

光栅结构可为电磁波提供2种类型的分布反馈共振:第1种为布拉格共振;第2种为返波振荡。光栅波导中的布拉格共振使光栅中存在2个反向传播分量的驻波,增强了输出辐射。全反射基底层有助于布拉格共振的产生。在返波振荡器中,返波模具有与电子传播方向相反的群速度。

由于片上电子发射器一次只能发射一个或者少量电子,在少量电子激发下,布拉格模式的传播分量很可能具有较低的辐射阈值,因此可能有来自返波模式的增益竞争。尽管可能存在其他模式的竞争,但为了实现太赫

兹源的微型化，本文建立低阈值布拉格模式。在光栅中建立一阶布拉格共振，这种条件允许光栅的每一个周期形成一个半波长长度的小谐振腔，即电磁场在一个光栅周期内的往返反射相位为  $2\pi$ ，增强产生的辐射。当自由电子开始激发结构场时，来自光栅的分布式反馈会增加辐射的相干性，从而增加输出辐射。

一阶布拉格共振所需条件为：

$$k_z = \frac{\pi}{P_g} \quad (1)$$

式中： $k_z$ 为波沿电子发射方向 $z$ 的传播系数； $P_g$ 为光栅阵列中光栅单元的周期。

为在光栅介质波导中产生切伦科夫辐射，保证能量从电子连续传递到辐射场的速度匹配主要受切伦科夫条件的控制，结构中切伦科夫辐射角度为：

$$\cos \phi = \frac{1}{n_g \beta_e} \quad (2)$$

式中： $\beta_e$ 为电子速度 $v_e$ 对光速 $c$ 的归一化量； $\phi$ 为切伦科夫角； $n_g$ 为光栅阵列及波导层的介质折射率。

对于在波导层中被引导的辐射，创建全反射条件，导波在薄膜和衬底界面的入射角 $\theta=90^\circ-\phi$ 必须大于全内反射的临界角 $\theta_c$ ：

$$\sin \theta > \sin \theta_c = \frac{n_s}{n_g} \quad (3)$$

式中 $n_s$ 为基底层介质的折射率。从式(2)和式(3)可得波导层可引导的切伦科夫辐射的电子速度范围：

$$\frac{c}{n_g} < v_e < \frac{c}{n_s} \quad (4)$$

由式(1)和式(4)可以得出：光栅周期取决于自由电子速度。光栅周期为：

$$P_g = \beta_e \frac{\lambda_0}{2} \quad (5)$$

式中 $\lambda_0$ 为目标辐射波长。

## 1.2 辐射器色散验证

根据理论研究，在商用时域仿真软件 CST 中搭建相关结构。为便于集成，使用硅材料构建光栅阵列，硅材料作为介质材料，在太赫兹频段具有较小的损耗。表 1 为所设计光栅介质波导的结构参数。图 2 为 CST 计算的光栅波导结构色散图，所述导模曲线位于硅波导和橡胶基底的色散曲线之间，布拉格共振模式频率为 32 THz，真空波长约为 9.5  $\mu\text{m}$ 。布拉格点被电子线所俘获，与设计相同，自由电子同时激发了结构中的前向波与后向波辐射。

表 1 基于硅介质光栅的片上太赫兹源参数

Table1 On-chip terahertz source parameters based on silicon dielectric grating

electron velocity/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	impact parameter $h_{ip}/\text{nm}$	waveguide thickness $h_w/\mu\text{m}$	grating period $P_g/\mu\text{m}$	grating depth $h_g/\mu\text{m}$
0.35c	540	1.5	1.75	1.4

## 2 辐射特性研究

使用 CST 研究提出的三维光栅介质波导自由电子太赫兹辐射器的实际情况。三维结构由沿  $z$  方向的 100 个光栅周期组成，并使用从结构右侧入射的电子速度为 0.35c ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的单电子或包含 70 个电子的束团驱动结构。所用电子束团为高斯电子束，sigma 为 0.9  $\mu\text{m}$ ，截断长度为 1  $\mu\text{m}$ ，电荷量 1.12 e<sup>-17</sup> C。图 3 为电子束团从结构的右边缘注入电子后，计算得到的光栅结构在  $y$ - $z$  平面 ( $x=0$  处切割) 的 TM 场 ( $H_x$ ) 图。色散图表明结构既可以产生前向波辐射也能产生后向波辐射，由于布拉格光栅的存在增强了前向波辐射，在结构中产生了相对于后向波辐射较强的切伦科

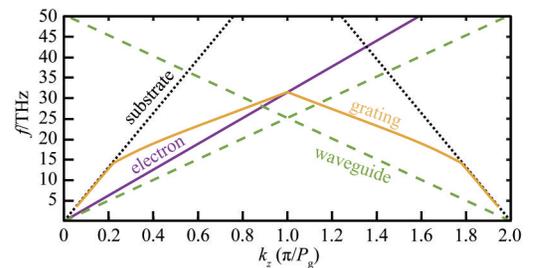


Fig.2 Dispersion diagram of grating dielectric waveguide  
图 2 光栅介质波导结构色散图

夫辐射，当电子离开结构时，波导输出端口会出现明显的辐射。电子离开光栅一段时间后，辐射会消散到整个空间，如图3所示。在辐射产生的过程中，自由电子激发光栅波导内部的强约束辐射形成共振模式，图4中的场图清晰地显示了特征布拉格共振的周期 $P_g = \lambda_z/2$ ，其中 $\lambda_z$ 为辐射模式的纵向波长。这清楚地证明，在光栅介质波导结构中布拉格共振模式对辐射的增强作用。

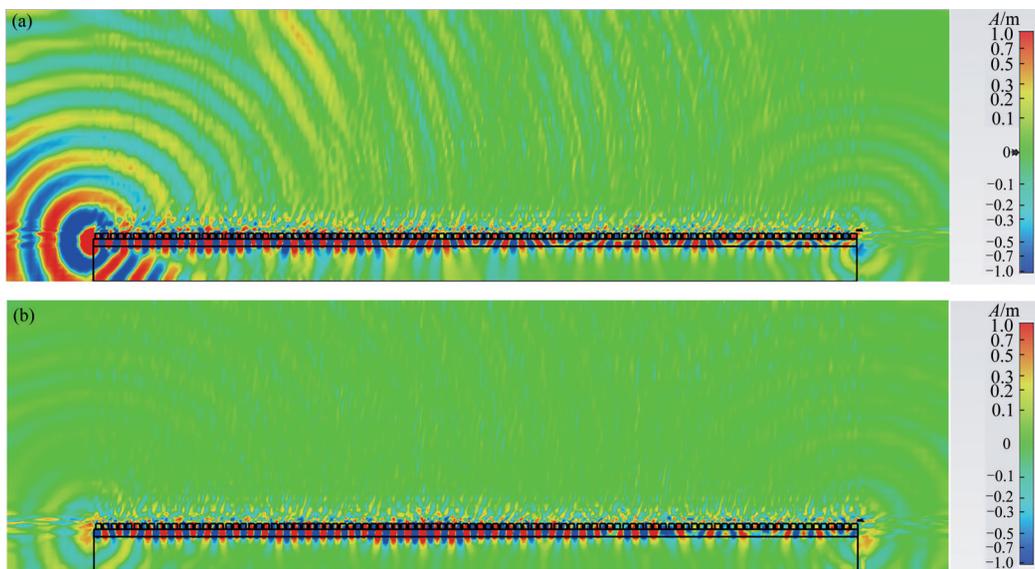


Fig.3 Magnetic field  $H_x$  diagram at (a) 2.2 ps and (b) 3.5 ps  
图3 (a) 2.2 ps; (b) 3.5 ps时的 $H_x$ 图

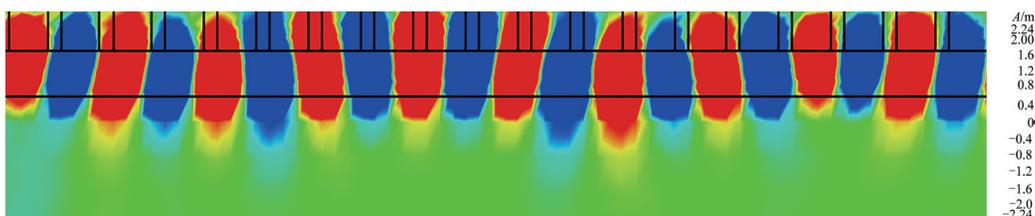


Fig.4 Magnetic field  $H_x$  diagram at 1.5 ps  
图4 1.5 ps时的 $H_x$ 图

磁场时域探针放置于波导层输出端口的中央，探针所探测到的波导层下游输出处的 $H_x$ 场的时域信号通过傅里叶变换到频谱中。分别使用单电子和包含70个电子的电子束团驱动结构，图5显示频率为32 THz的自由电子辐射被成功获得且电子束团的输出功率远大于单电子情况。对于电子源，相对于其他太赫兹频段产生一个标准规模的带状电子注，不论是直接法还是间接法，电子注的聚焦都是一个难题，因为带状注中存在Diocotron效应(20世纪50年代对电子注的研究中发现：电子注在螺线管磁场聚焦下，传输一段距离后，电子注会旋转缠绕，最后分裂成细丝状，无法保持长距离稳定聚焦传输，此现象称为Diocotron效应<sup>[14]</sup>)。带状电子注相比传统电子注，电流密度低，空间电荷效应小，相互作用区大。本设计中，单电子或少量电子的Diocotron效应较弱，不需要设计额外的聚焦结构。因此，本结构对于电子源的要求较低，这也是采用自由电子辐射器做太赫兹源器件的优势之一。

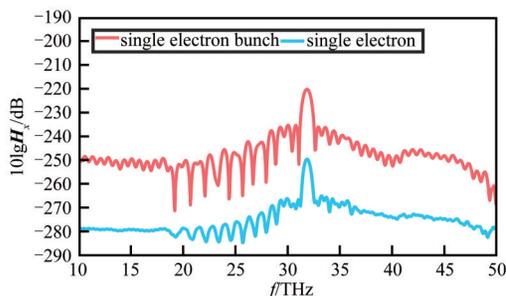


Fig.5 Output spectrum of single electron and single electron bunch  
图5 单电子与电子束团输出频谱图

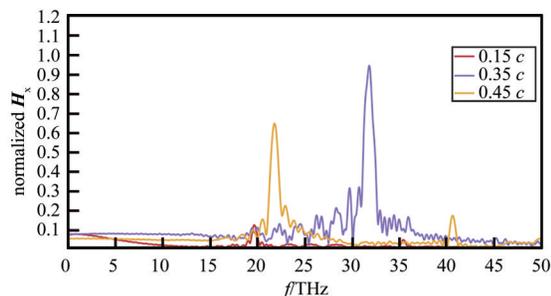


Fig.6 Normalized spectrum of output at different electronic speeds  
图6 不同电子速度输出归一化频谱图

本文提出了产生 32 THz 辐射的硅光栅介质波导太赫兹源并通过仿真验证，得到了比较纯净的窄带辐射。该结构可以被单自由电子或规模不大的电子束团所驱动，完全满足微纳量级的电子发射器 1 次只能产生 1 个或少量电子的限制。

对于自由电子辐射器，电子速度是决定结构输出辐射频率的参量之一。由图 6 可知，不同电子速度可以激发出光栅介质波导结构不同的辐射，但由于光栅周期所限定，除设计速度为  $0.35c$  的自由电子，其他速度的电子不能激发起结构的一阶布拉格共振模，无法实现辐射共振放大，且根据色散图，不同速度的电子激发起的结构的辐射频率也不同。如图 6 所示，分别测试了速度为  $0.15c$ 、 $0.35c$  以及  $0.45c$  3 种不同速度的粒子激发起的辐射。速度为  $0.35c$  的电子所产生的辐射最大，且大于能量更大的  $0.45c$  的自由电子激发的辐射，这也从侧面说明了布格拉光栅的共振放大能力。

自由电子器件，在使用过程中可能会造成电子在表面的积聚。自由电子的大量积聚会造成介质折射率的改变以及局部电场畸变，从而影响波注相互作用，削弱输出辐射或产生杂波。本文提出的片上太赫兹源只需要一个或少量电子驱动，很难在介质表面积聚足够的自由电子来影响输出。同时所提出的片上太赫兹源关键结构为微纳级别的光栅，可以使用光刻技术，包括极紫外光源结合掩模板光刻、电子束光刻以及全息光刻等制作，但极紫外光刻过于昂贵，全息光刻工艺难度较高，电子束光刻足以完成所设计的线宽在几十纳米的片上太赫兹源，之后通过深反应离子刻蚀等过程即可制作所提出的片上太赫兹源。

### 3 结论

本文基于自由电子辐射以及光栅介质波导结构，研究了一种新型微型化自由电子太赫兹辐射器构建方法。借助分布式反馈原理，在硅光栅介质波导结构中构建布拉格光栅；通过自由电子激发光栅中的共振模式，进而实现太赫兹辐射的激发和放大。

通过原理介绍，将硅光栅介质波导中的激发辐射描述为光栅结构共振的切伦科夫辐射。当电子激发光栅槽的分布式反馈及布拉格共振模式时，有利于增强辐射的强度及相干性。借助 CST 进行模拟仿真，通过自由电子成功激发了 32 THz 的辐射输出，32 THz 的辐射输出与理论及色散验证相符。光栅介质波导结构可以使用单电子、少量电子束团驱动，输出幅值随电子束团规模增加而增加。

本项研究对于太赫兹源的构建发展具有两方面的优势：首先，提供了太赫兹源微型化的一种方法——借助光栅介质波导结构减少太赫兹源尺寸以及最大化电子与波耦合；第二，对电子源的需求减少。太赫兹辐射的产生不仅需要波束互作用系统，也需要电子发射器，而受制于片上电子发射器性能，互作用系统也需降低对电子源的需求，而光栅介质波导结构可以满足需求，只需少量电子甚至单个电子便可以驱动结构，同时也降低了对电子速度的要求。本项研究为微型化太赫兹源的发展以及片上太赫兹技术的进步提供了更多的可能性。

#### 参考文献：

- [1] 许涌,张帆,张晓强,等. 自旋电子太赫兹源研究进展[J]. 物理学报, 2020,69(20):1-13. (XU Yong,ZHANG Fan,ZHANG Xiaoqiang,et al. Research advances in spintronic terahertz sources[J]. Acta Physica Sinica, 2020,69(20):1-13.)
- [2] BAILLERGEAU M, MAUSSANG K, NIRRENGARTEN T, et al. Diffraction-limited ultrabroadband terahertz spectroscopy[J]. Scientific Reports, 2016,6(1):24811. doi:10.1038/srep24811.
- [3] WADE C G, ŠIBALIĆ N, DE MELO N R, et al. Real-time near-field terahertz imaging with atomic optical fluorescence[J]. Nature Photonics, 2017,11(1):40-43. doi:10.1038/NPHOTON.2016.214.
- [4] 蒋林华,王尉苏,童慧鑫,等. 太赫兹成像技术在人体安检领域的研究进展[J]. 上海理工大学学报, 2019,41(1):46-51. (JIANG Linhua,WANG Weisu,TONG Huixin,et al. Research progress of terahertz imaging in the field of human security[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2019,41(1):46-51.) doi:10.13255/j.cnki.jusst.2019.01.007.
- [5] 宫玉彬,周庆,田瀚文,等. 基于电子学的太赫兹辐射源[J]. 深圳大学学报(理工版), 2019,36(2):111-127. (GONG Yubin,ZHOU Qing,TIAN Hanwen,et al. Terahertz radiation sources based on electronics[J]. Journal of Shenzhen University(Science and Engineering), 2019,36(2):111-127.) doi:CNKI:SUN:SZDL.0.2019-02-001.
- [6] 李德华. 光整流产生 THz 辐射及其转换效率的研究[D]. 济南:山东科技大学, 2010. (LI Dehua. Terahertz optical rectification and optical-to-terahertz conversion efficiency[D]. Jinan,China:Shandong University of Science and Technology, 2010.)
- [7] MAESTRINI A, MEHDI I, SILES J, et al. Design and characterization of a room temperature all-solid-state electronic source tunable from 2.48 to 2.75 THz[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012,2(2):177-185. doi:10.1109/TTHZ.2012.2183740.

- [ 8 ] 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(7):1766–1772. (WANG Minghong,XUE Qianzhong,LIU Pukun. Review of THz vacuum electronic devices and development[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008(7):1766–1772.) doi:10.3724/SP.J.1146.2007.00858.
- [ 9 ] ZHU Juanfeng, DU Chaohai, LI Fanhong, et al. Free–electron–driven multi–frequency terahertz radiation on a super–grating structure[J]. IEEE Access, 2019(7):181184–181190. doi:10.1109/ACCESS.2019.2938270.
- [10] HUANG Y C, PENG Luohao, SHIRVANI H, et al. Single–electron nano–chip free–electron laser[J]. APL Photonics, 2022, 7(9): 096101. doi:10.48550/arXiv.2205.08741.
- [11] 谷智,陈沅,李焕勇,等. 太赫兹辐射源的研究进展[J]. 红外技术, 2011,33(5):252–256,261. (GU Zhi,CHEN Yuan,LI Huanyong, et al. Research progress of terahertz radiation sources[J]. Infrared Technology, 2011,33(5):252–256,261.) doi:10.3969/j.issn.1001–8891.2011.05.002.
- [12] LUO Chiyan, IBANESCU M, JOHNSON S G, et al. Cerenkov radiation in photonic crystals[J]. Science, 2003,299(5605):368–371. doi:10.1126/science.1079549.
- [13] LI Dazhi, NAKAJIMA M, TANI M, et al. Terahertz radiation from combined metallic slit arrays[J]. Scientific Reports, 2019,9(1): 6804. doi:10.1038/s41598–019–43072–2.
- [14] 吕志方,张长青,王战亮,等. 太赫兹带状注器件[J]. 红外与毫米波学报, 2023,42(1):26–36. (LYU Zhifang,ZHANG Changqing, WANG Zhanliang, et al. Terahertz sheet beam vacuum electron devices[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2023,42(1): 26–36.) doi:10.11972/j.issn.1001–9014.2023.01.005.

#### 作者简介:

杨积涛(2001–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为自由电子辐射. email: yangjitao@stu.pku.edu.cn.

雷于露(1999–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为自由电子辐射.

王少萌(1986–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为毫米波太赫兹器件、太赫兹生物物理、太赫兹医学检测与成像.

杜朝海(1982–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为毫米波–太赫兹回旋器件、自由电子辐射等.

(上接第10页)

- [ 6 ] THEISS A J, MEADOWS C J, FREEMAN R, et al. High–average–power W–band TWT development[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010,38(6):1239–1243. doi: 10.1109/TPS.2010.2041794.
- [ 7 ] COOK A M, WRIGHT E L, NGUYEN K T, et al. Demonstration of a W–band–Traveling–Wave Tube power amplifier with 10 GHz bandwidth[J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 2021,68(5):2492–2498. doi:10.1109/TED.2021.3068926.
- [ 8 ] DU Yinghua, CAI Jun, PAN Pan, et al. Experimental investigation of an ultra–wide–bandwidth W–band pulsed Traveling Wave Tube with microfabricated Folded Waveguide circuits[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2019, 47(1): 219–225. doi: 10.1109/TPS.2018.2880792.

#### 作者简介:

高 畅(1994–), 女, 学士, 工程师, 主要研究方向为短毫米波真空电子器件的研制. email: gaochang1018@163.com.

潘 攀(1986–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为短毫米波及太赫兹真空电子器件的研制.

张小青(1982–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为短毫米波真空电子器件的研制.

蔡 军(1978–), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为短毫米波及太赫兹真空电子器件的研制.

穆涵硕(1995–), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为短毫米波真空电子器件的研制.

冯进军(1966–), 男, 博士, 研究员, 中国电科首席科学家, 主要研究方向为短毫米波和太赫兹真空电子器件.