

## 太赫兹带状注器件

吕志方<sup>1</sup>, 张长青<sup>2</sup>, 王战亮<sup>1</sup>, 江胜坤<sup>1</sup>, 阮存军<sup>3</sup>, 冯进军<sup>2</sup>, 官玉彬<sup>1</sup>, 段兆云<sup>1\*</sup>

(1. 电子科技大学, 电子科学与工程学院, 微波电真空器件国家级重点实验室, 四川 成都 611731;

2. 中国电子科技集团公司第十二研究所, 微波电真空器件国家级重点实验室, 北京 100015;

3. 北京航空航天大学, 电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 带状注是指束流截面近似为矩形或椭圆形的电子注, 且具有大的宽高比。相对于传统的圆形注, 带状注具有很多优点, 例如大电流和大相互作用面积等。由于太赫兹波具有高频率、宽频带、高传输速率等优点, 因此太赫兹科学与技术近年来发展迅速。作为一种新型的真空电子器件, 太赫兹带状注器件在高功率、高增益、高效率及小型化方面具有良好的技术优势。但是, 带状注在传输过程中易出现 Diocotron 不稳定性, 难以保持长距离稳定的聚焦传输, 从而导致带状注的技术优势难以发挥。本文综述了带状注的产生成形方式和聚焦传输方法, 以及太赫兹带状注器件的研究进展, 同时讨论了它所面临的挑战和未来的发展方向。

**关键词:** 太赫兹; 带状注; 真空电子器件; Diocotron 不稳定性; 磁聚焦方法

中图分类号: TN129

文献标识码: A

## Terahertz sheet beam vacuum electron devices

LYU Zhi-Fang<sup>1</sup>, ZHANG Chang-Qing<sup>2</sup>, WANG Zhan-Liang<sup>1</sup>, JIANG Sheng-Kun<sup>1</sup>, RUAN Cun-Jun<sup>3</sup>,  
FENG Jin-Jun<sup>2</sup>, GONG Yu-Bin<sup>1</sup>, DUAN Zhao-Yun<sup>1\*</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics in Chengdu, School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics in Beijing, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China;

3. School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Sheet beam is a kind of electron beam, whose cross-section is approximate rectangular or elliptical shape with high aspect ratio. Compared with conventional pencil beam, sheet beam has many advantages, such as high beam current and large interaction area. Terahertz science and technology have got rapid development in recent years owing to its high frequency, wide bandwidth, high-speed transmission rate, and other advantages of terahertz waves. As a kind of new-type vacuum electron devices, terahertz sheet beam devices have excellent performance such as high power, high gain, high efficiency, and miniaturization. However, it is difficult for sheet beam to keep stable transport over a long distance due to the existence of Diocotron instability, which cannot lead to fully demonstrating its technical advantages. This paper briefly summarizes the generation, formation, and focusing methods of sheet beam, and then introduces the state-of-the-art of terahertz sheet beam devices. Finally, the challenges and development tendencies are discussed.

**Key words:** terahertz, sheet beam, vacuum electron devices, diocotron instability, magnetic focusing methods

### 引言

真空电子器件在微波和毫米波频段以高功率、

高效率或高增益等特点而为人们所熟知, 广泛应用在雷达探测、通信、电子战、大科学装置、生物医学

收稿日期: 2022-03-20, 修回日期: 2022-06-01

Received date: 2022-03-20, revised date: 2022-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(62131006, 61871095, 61921002);

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62131006, 61871095, 61921002);

作者简介(Biography): 吕志方(1996—), 男, 博士研究生, 主要研究领域为超构材料微波辐射源和超构表面太赫兹带状注行波管。E-mail: lv-zhifang2015@163.com.

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: zhyduan@uestc.edu.cn

成像、微波能应用等领域。根据电子注类型,真空电子器件可以分为单注器件、多注器件、空心注器件和带状注器件。带状注(Sheet beam)是一种薄片式电子注,其横截面形状为宽高比较大的近似矩形或椭圆形。与圆形注相比,带状注具有大电流和大互作用面积等优点。基于带状注的真空电子器件在功率、效率、增益及小型化等方面具有技术优势。带状注的引入为真空电子器件的发展提供了一条新路径,深受研究人员的青睐。

在1935年,H. C. Thompson<sup>[1]</sup>报道了真空三极管中产生的矩形截面电子注,这是带状注的雏形。随后在1938年,A. V. Haef<sup>[2]</sup>在研究真空电子管中的电流密度时,详细分析了带状注中存在的空间电荷效应问题。同年V. F. Kovalenko<sup>[3]</sup>提出使用带状注来代替传统圆形注与电磁波进行互作用的想法,首次提出带状注速调管的概念。在20世纪50年代到60年代,R. L. Kyhl与H. F. Webster<sup>[4]</sup>、C. C. Cutler<sup>[5]</sup>以及J. T. Mendel相继从实验上观测到空心注和薄带状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。这就是Diocotron不稳定性,也称Filamentation不稳定性。在实验中发现该现象后,J. R. Pierce<sup>[6]</sup>、O. Buneman<sup>[7]</sup>、W. Fnauer<sup>[8]</sup>和R. W. Gould<sup>[9]</sup>等人相继开展了初步的理论研究。此后,T. M. Antonsen<sup>[10]</sup>和R. C. Davidson<sup>[11]</sup>等人深入分析了Diocotron不稳定性的产生机理,在前期研究的基础上提出了多种抑制方法,例如强相对论束流速度法、低束流密度法、等离子体空间电荷中和法等,这些方法在当时难以实现,或者不利于器件的性能,均未得到实际应用。在20世纪90年代,E. T. Scharlemann和J. H. Booske在深入研究带状注Diocotron不稳定性的机理后,分别提出了不同的聚焦方法。E. T. Scharlemann在1985年提出利用摇摆磁场(Wiggler Magnetic Field)聚焦带状注<sup>[12]</sup>,J. H. Booske等人在1993年发展了PCM(Periodic Cusped Magnetic)磁场聚焦理论<sup>[13-15]</sup>。之后在PCM聚焦法的基础上,发展出多种改进型的PCM聚焦磁场,例如闭合型PCM,偏移型PCM,PCM-PQM(Periodic Cusped Magnetic - Periodic Quadrupole Magnetic),可调型PCM等<sup>[16-17]</sup>。带状注的传输特性得到了明显改善,为带状注器件的快速发展奠定了坚实的基础。

带状注器件早期发展较为缓慢的原因主要有

四点:1、传统的圆形注器件,如圆形注速调管,在真空电子器件发展早期可以满足当时的应用需求,因此带状注器件的发展在当时缺少明确的需求牵引;2、相比圆形注,带状注的非轴旋转对称结构增加了解析求解难度,而直至20世纪70年代计算机仿真软件才开始逐步发展;3、带状注的稳定发射和压缩成形面临较大的挑战,尤其是高发射电流密度带状注阴极的研制和应用(对于0.22 THz的带状注器件,通常发射电流密度大于30 A/cm<sup>2</sup>),同时带状注电子枪对装配精度要求很高;4、Diocotron不稳定性的存在对带状注的稳定聚焦传输影响较大,在20世纪90年代之前并没有找到较好的聚焦方法。

目前在微波频段,圆形注器件应用广泛,圆形注作为电子源的真空电子器件可以满足绝大部分研究和应用的需要,而带状注的优势在微波频段并不明显。随着频率的提高,一些应用真空电子器件的系统性能会有明显提升,例如,无线通信系统的传输速率会随着频率的提升而提高,而系统内部电压噪声频谱密度和频率的平方根成反比,同时电压噪声频谱密度的降低可以提高相对信道带宽和系统信噪比;对于天线,当结构确定时,在工作频带内,天线的工作频率越高,则增益越高,波束方向性越好<sup>[18]</sup>。这些应用需求促使真空电子器件向更高频段发展,而太赫兹频段恰好是目前研究的热点。太赫兹波是频率介于0.1~10THz之间的电磁波,具有频带宽、传输速率高、方向性好、散射小以及穿透性好等特点。太赫兹带状注器件汇集了太赫兹波和带状注的各自优势,在宽带通信、电磁干扰、公共安全检测、高速数据传输、高精度无损探测、等离子体诊断、生物医学成像等方面有着广泛的应用前景<sup>[19]</sup>。

在真空电子器件向太赫兹频段发展的过程中,传统圆形注器件遇到了固有的瓶颈。圆形注无法在较小的尺寸下传输大电流。若要提高圆形注的电流,会导致电子注尺寸增大,无法适应太赫兹频段真空电子器件的小尺寸特性。而解决这一问题的重要手段之一则是使用带状注代替传统的圆形注。带状注由于其天然的平板型结构优势,可以在较小的窄边尺寸下传输大电流<sup>[13]</sup>,应用在太赫兹频段的真空电子器件中,可以产生较大功率的太赫兹辐射。因此,将带状注应用在太赫兹真空电子器件中是目前研究的重点之一<sup>[20]</sup>。

## 1 带状注的产生

基于热电子发射理论,真空电子器件通常利用热阴极来发射电子注。目前钨酸盐阴极具有高的发射能力,发射电流密度在一定条件下可达几百  $\text{A}/\text{cm}^2$ <sup>[21]</sup>,工作温度比传统钨钨阴极低,预估寿命长<sup>[22]</sup>,是太赫兹带状注器件所需阴极的较好选择。带状注的产生方法主要有两类,分别为直接法和间接法。

### 1.1 直接法

直接法即直接利用电子枪产生带状注,无需额外部件的辅助。其通过利用圆形截面阴极,或直接利用近似矩形或椭圆形截面阴极,在热发射机理和空间电荷限制下,直接发射出柱状电子流或平面对称的带状电子流。通过将传统皮尔斯电子枪的聚焦极开口形状设计为矩形或椭圆形,利用阴极与聚焦极之间的静电场对柱状电子流或带状电子流进行压缩,最终得到高电流密度的带状注<sup>[23]</sup>,如图1(a)所示。

近年来,利用直接法产生带状注的实验多有报道。在2015年,俄罗斯科学院设计了一个用于太赫兹带状注行波管的电子枪<sup>[24]</sup>。此电子枪采用浸渍型刀片状热阴极,阴极截面为近似矩形,当阴极表

面工作在  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  时,可以产生截面尺寸为  $0.7\text{ mm}\times 0.1\text{ mm}$ ,电流为  $80\text{ mA}$  的带状注,注电流密度约为  $114\text{ A}/\text{cm}^2$ ,阴极如图1(b)所示。在2018年,美国 UC-Davis 报道了一款太赫兹带状注行波管<sup>[25]</sup>。其中带状注电子枪采用椭圆截面的多孔钨基扩散型钨酸盐阴极。在  $1150\text{ }^\circ\text{C}$  下进行电子枪性能测试,结果表明:该电子枪的压缩比约为  $12.5:1$ ,电子注截面尺寸约为  $1.5\text{ mm}\times 0.2\text{ mm}$ ,注电流密度约为  $438\text{ A}/\text{cm}^2$ 。

中科院空天院在2020年报道的W波段带状注速调管中也采用了椭圆形阴极来产生带状注<sup>[26]</sup>。其采用椭圆截面的M型阴极来产生截面尺寸为  $6\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$  的带状注,阴极发射电流密度约为  $12.2\text{ A}/\text{cm}^2$ ,电子枪的压缩比约为  $8:1$ ,注电流密度约为  $97.6\text{ A}/\text{cm}^2$ 。电子科技大学在2021年报道了一种用于G波段带状注行波管的电子光学系统实验<sup>[17]</sup>。其中带状注电子枪采用直径为  $0.8\text{ mm}$  的圆形截面钨酸盐阴极发射柱状电子流,经过椭圆形聚焦极的静电压缩,最终形成了截面尺寸为  $0.4\text{ mm}\times 0.1\text{ mm}$ ,电流为  $115\text{ mA}$  的带状注。阴极发射电流密度约为  $23\text{ A}/\text{cm}^2$ ,电子枪的压缩比约为  $12.5:1$ ,注电流密度约为  $304\text{ A}/\text{cm}^2$ 。带状注电子枪结构如图1(c)所示。

在直接法中,对于工作在  $0.2\text{ THz}$  以下的器件,根据目前的热阴极工艺水平,采用近似矩形或椭圆形截面阴极的电子枪直接产生的带状注的电流密度多处于  $50\text{--}270\text{ A}/\text{cm}^2$  的范围内,公开报道的带状注电子枪实验中注电流密度最大的是  $438\text{ A}/\text{cm}^2$ <sup>[25]</sup>,而工作在  $0.2\text{ THz}$  以上的器件对带状注电流密度的要求很高,如  $0.22\text{ THz}$  的行波管的注电流密度通常为  $300\text{ A}/\text{cm}^2$  以上<sup>[17]</sup>,  $0.3\text{--}0.4\text{ THz}$  的扩展相互作用振荡器的注电流密度通常为  $400\text{ A}/\text{cm}^2$  以上<sup>[27]</sup>,对于工作在  $0.5\text{ THz}$  甚至更高频率的器件,需要的注电流密度将更高。因此,对于工作在  $0.2\text{ THz}$  或更高频率的太赫兹带状注器件,该方法目前并不实用;直接法中采用圆形截面阴极的电子枪产生的带状注的电流密度一般为  $250\text{ A}/\text{cm}^2$  以上,相比矩形或椭圆形截面的阴极更容易实现较大的注电流密度,且圆形截面阴极结构简单,因此,利用圆形截面阴极产生带状注是目前太赫兹带状注器件采用的主流方法。

### 1.2 间接法

间接法是在常规圆形注电子枪后端增加束流

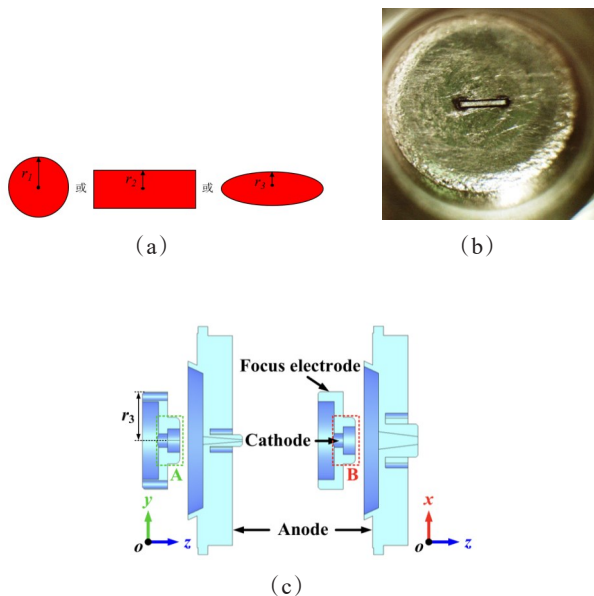


图1 (a)带状注的直接产生,(b)浸渍型刀片状热阴极,(c)圆形截面阴极带状注电子枪示意图

Fig. 1 (a) Direct generation of sheet beam ,(b) Image of impregnated thermionic blade cathode ,(c) Diagram of sheet beam electron gun with a cylindrical cathode



转换部件,利用束流转换部件中的磁体对圆形注进行压缩,从而得到高椭圆率的带状注。具有代表性的压缩方式有两种:磁四极子压缩和椭圆螺线管压缩。

磁四极子压缩圆形注主要依靠电子在磁四极子磁场中的运动将圆形注压缩为带状注。磁四极子由四块永磁体组成,极面形状均为双曲面,其示意图如图2(a)所示。圆形注在磁四极子磁场中,受到洛伦兹力,在水平方向被拉伸,在竖直方向被压缩,最终形成高椭圆率的带状注。威斯康辛大学麦迪逊分校曾报道通过在圆形注电子枪之后增加磁四极子束流转换部件从而得到带状注的实验<sup>[28]</sup>。

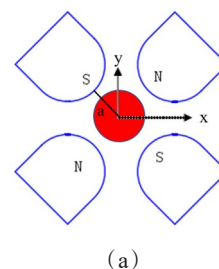
椭圆螺线管压缩圆形注是利用螺线管的内部磁场对圆形注进行压缩。螺线管内部轴向磁场越强,对圆形注的压缩能力越强。圆形注在通过椭圆螺线管时,利用椭圆螺线管内部的轴向磁场分布,在水平方向被压缩程度较弱,在竖直方向被压缩程度较强,最终形成了高椭圆率的带状注。如图2(b)所示,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室曾报道利用椭圆螺线管将圆形注压缩为带状注的实验<sup>[29]</sup>。

由于间接法不可避免地增加了束流转换部件,这直接导致电子光学系统变得更加复杂,增加了整管的装配、真空度的保持等多方面的难度以及增大了器件的体积。因此,间接法产生带状注在国内目前应用较少。

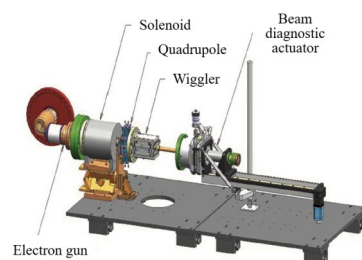
## 2 带状注的聚焦

由于带状注在传输过程中存在 Diocotron 不稳定性,因此合理的聚焦方式极为重要,通常采用磁场聚焦带状注。分析带状注在磁场中的运动有四种方法,即单粒子模型法<sup>[14]</sup>,宏粒子模型法<sup>[30]</sup>,冷流模型法<sup>[31]</sup>以及三维粒子模拟法。单粒子模型法和宏粒子模型法求解简单,但是结果精确度较低;冷流模型法相比单粒子和宏粒子模型更加符合真实情况,但求解难度很大;三维粒子模拟法求解精度高,结果相对可信,但计算量大且耗时。当前通常采用单粒子模型法结合三维粒子模拟法来研究带状注的传输特性,且随着计算机计算能力的不断提升,该方法已经成为主流。

常见的磁聚焦方式有均匀磁场聚焦和周期磁场聚焦。其中周期磁场聚焦方式主要包括摇摆磁场(Wiggler 磁场)和周期会切磁场(PCM 磁场),而 PCM 磁场又包括多种改进型结构。下面分别概述。



(a)



(b)

图2 (a)磁四极子结构示意图,(b) W 波段带状注行波管电子光学系统实验平台

Fig. 2 (a) Diagram of magnetic quadrupole ,(b) Experiment platform of electron-optical system for W-band sheet beam traveling-wave tube (TWT)

### 2.1 均匀磁场

均匀磁场聚焦包括均匀永磁聚焦和螺线管聚焦。均匀磁场聚焦带状注起源于20世纪70年代,在研究带状注 Diocotron 不稳定性的过程中,T. M. Antonsen 等人尝试利用较强的均匀磁场聚焦带状注<sup>[10]</sup>。研究发现,对于高质量的带状注,其横截面上的电流密度分布相对均匀,空间电荷场的最强点通常出现在电子注横截面宽边的边缘附近,因此 Diocotron 不稳定性将在该区域首先出现。而带状注 Diocotron 不稳定性是随着时间和空间而发展的,因此强均匀磁场可以在一定距离内降低 Diocotron 不稳定性的影响,使电子注保持相对稳定的聚焦传输。

在2017年,电子科技大学利用通电螺线管磁场聚焦 160kV, 1.55kA 的带状注。当带状注通过超构材料慢波结构时,首次观测到了超构材料中存在的反向切伦科夫辐射<sup>[32]</sup>,实验平台如图3所示。

### 2.2 摇摆磁场

在1985年,E. T. Scharlemann 提出使用摇摆磁场聚焦带状注<sup>[12]</sup>。摇摆磁场是周期磁场聚焦方式的一种。其磁场结构如图4所示,上下对称磁体极性相反,周期排列,沿  $z$  向极性交错变化。图中  $l_m$  是

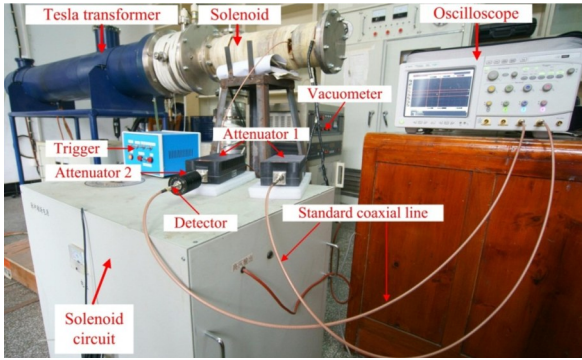


图3 超构材料中反向切伦科夫辐射实验平台  
Fig. 3 Experiment platform of reversed Cherenkov radiation in metamaterial

磁体排列周期,  $y_m$  是电子束通道宽度,  $\lambda_m$  是磁体间隙宽度。

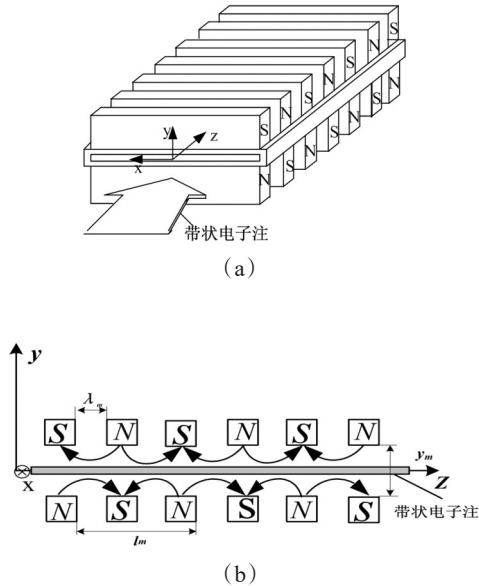


图4 (a) 摇摆磁场结构示意图, (b) 摇摆磁场结构侧视图  
Fig. 4 (a) Diagram of Wiggler focusing configuration, (b) Side view

在摇摆磁场中, 电子注沿着  $z$  方向运动, 当经过上下磁体之间时, 电子受到洛伦兹力, 在  $x$  方向发生偏转。当运动到左右两个磁极之间时, 电子注的上下表面电子受到洛伦兹力, 在  $y-z$  平面被压缩。当磁场聚焦力和电子注空间电荷力平衡后, 电子注保持稳定传输。通过设置合理的磁体周期长度和磁感应强度大小, 可以使得空间电荷发散力和磁体聚焦力相互平衡, 以克服带状注在  $y-z$  平面上的不稳定性。但摇摆磁场会引入带状注的横向速度, 在  $x-z$  平面内, 电子注整体横向摇摆。若横向偏转过度

则可能会被电子注通道截获, 因此需要针对不同的电子注参数对磁场结构进行优化, 以保证高的电子注流通率。

中科院空天院在2012年开展了摇摆磁场聚焦带状注的W波段速调管电子光学系统实验<sup>[33]</sup>。采用摇摆磁场聚焦注电压为55 kV, 注电流为2.28A, 电子注截面尺寸为10 mm×0.5 mm的带状注, 在长度为50 mm的流通管中, 电子流通率大于95%。

### 2.3 周期会切磁场及其改进型

#### 2.3.1 PCM

在1993年, J. H. Booske 等人利用周期会切磁场聚焦带状注<sup>[13-15]</sup>。周期会切磁场结构如图5所示, 其由在电子注通道宽边两侧周期排列的磁块组成, 上下相邻的磁体极性一致, 左右相邻磁体极性相反, 沿  $z$  向周期排列。

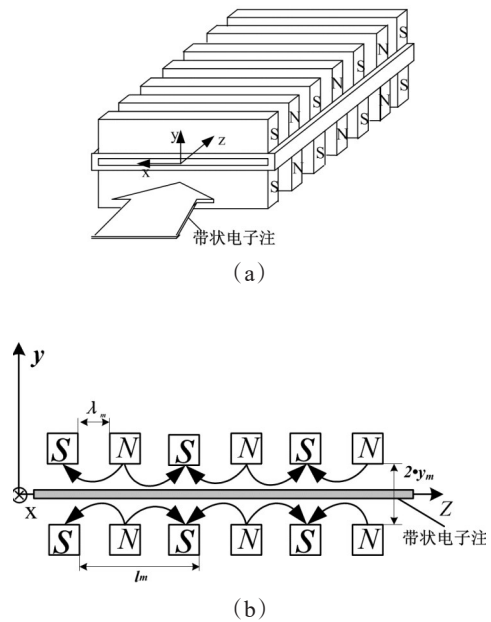


图5 (a) 周期会切磁场结构图, (b) 周期会切磁场结构侧视图  
Fig. 5 (a) Diagram of PCM focusing configuration, (b) Side view

利用标量磁位  $\varphi_m$  可以求解得到半平面周期会切磁场的场表达式如下:

$$\begin{cases} B_x = 0 \\ B_y = -B_0 \sinh(ky) \cos(kz) \\ B_z = B_0 \cosh(ky) \sin(kz) \end{cases}, \quad (1)$$

其中  $k$  为波数,  $k = 2\pi/l_m$ ,  $l_m$  为PCM聚焦系统的周期,  $k^2 = k_x^2 + k_y^2$ ,  $B_0$  为PCM磁场的磁感应强度最大值。

由式(1)可知, PCM磁场拥有  $y$  和  $z$  方向的磁感

应强度分量,在  $y-z$  平面能很好地对带状注进行聚焦。但由于  $y$  向磁场的影响,带状注会在  $x-z$  平面上被拉伸,导致注电流密度降低。因此,在周期会切磁场结构的基础上发展出了多种磁聚焦方式变体。

### 2.3.2 闭合型 PCM

闭合型 PCM (Closed-PCM) 磁场结构由 J. H. Booske 等人在 1993 年提出<sup>[34]</sup>。其磁场结构如图 6 (a) 所示,即在传统 PCM 磁场结构的基础上增加了两侧的磁体以形成闭合的磁体包围,这样可以在  $x-z$  平面上对带状注进行有效聚焦。中科院空天院<sup>[35]</sup>详细分析了闭合型 PCM 磁场结构聚焦带状注的可行性。

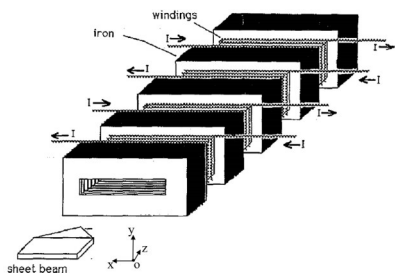


图 6 闭合型 PCM 聚焦系统示意图

Fig. 6 Diagram of closed-PCM focusing configuration

### 2.3.3 偏置型 PCM 磁场

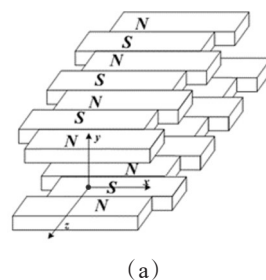
偏置型 PCM 磁场 (Offset-PCM) 由 J. H. Booske 等人为解决 PCM 磁场聚焦椭圆带状注时边缘出现延伸和发散情况而提出的<sup>[14,34]</sup>。它能够在边缘处产生  $B_y$  磁场,提供水平方向的洛伦兹力,和椭圆电子注边缘处的空间电荷力抵消,能够减少电子截获。偏置型 PCM 磁场结构如图 7 (a) 所示。可以发现其磁场结构与 PCM 相似,但在电子注通道宽边方向有一定的偏移量。

中电科第 12 研究所在 2021 年报道了一种适用于 G 波段带状注行波管的改进型偏置 PCM 聚焦系统并开展了电子光学系统实验<sup>[36]</sup>,实验证明了该聚焦系统对带状注边缘具有较好的聚焦效果。

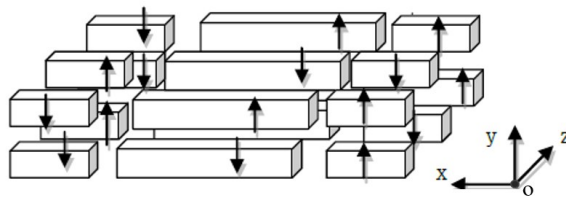
### 2.3.4 周期永磁四极子

PCM-PQM 磁场是由半无界的 PCM 磁场和 PQM 磁场组成的混合磁场<sup>[15,17]</sup>,磁场结构如图 7 (b) 所示。它利用边缘的磁四极子磁场对带状注在  $x-z$  平面进行聚焦。

2021 年,电子科技大学报道了一种用于 G 波段带状注行波管的 PCM-PQM 聚焦系统并开展了电子光学系统实验<sup>[17]</sup>。实验结果表明:注电压和注电流



(a)



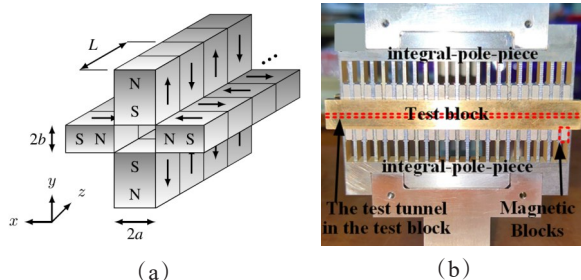
(b)

图 7 (a)偏置型 PCM 聚焦系统示意图,(b) PCM-PQM 磁场结构图

Fig. 7 Diagrams of magnetic focusing configuration. (a) Offset-PCM, (b) PCM-PQM

分别为 22 kV、115 mA 的带状注通过 21.2 mm 长的流通管,电子流通率可达 92.1%,注电流密度约为  $304 \text{ A/cm}^2$ 。此聚焦系统具有小型化、易装配、方便调节等优点。

除上述的带状注聚焦方式外,近期也有改进型的带状注聚焦方式的报道。韩国国立蔚山科学技术院 (UNIST) 在 2021 年报道了使用多组周期排列的矩形磁四极子 (PRQ) 磁场来聚焦带状注的电子光学系统仿真研究<sup>[37]</sup>,如图 8 (a) 所示。电子科技大学在 2021 年报道了一种集成化的 PCM (IPCM) 磁场结构<sup>[38]</sup>,并通过实验证明了 IPCM 比传统 PCM 在 W 波段带状注



(a)

(b)

图 8 (a)周期矩形四极子聚焦系统示意图,(b) IPCM 磁场结构样品

Fig. 8 (a) Diagram of periodic rectangular quadrupole, (b) Sample of the IPCM



行波管上拥有更好的聚焦效果,如图8(b)。

### 3 太赫兹带状注器件研究进展

带状注凭借其独特的优势,受到众多研究单位的重视,因此,太赫兹带状注行波管和速调管取得了一定的研究进展。下面简要概述。

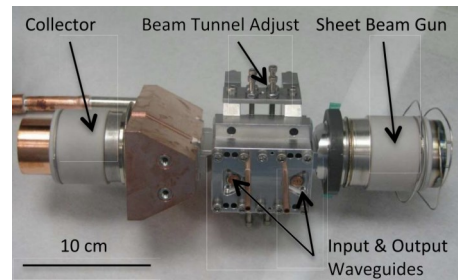
#### 3.1 行波管

行波管由于其宽频带、高功率、高效率等特性,被广泛应用于雷达、通信、电子战、以及深空探测等领域。美国的UC-Davis、CPI和Teledyne在美国国防部HiFIVE计划支持下,联合开发G波段带状注行波管。作为HiFIVE计划的一部分,在2018年,UC-Davis设计了一款中心频率为200 GHz的带状注行波管<sup>[25]</sup>。他们采用交错双栅慢波结构,拥有较高的耦合阻抗,可以充分提高注波相互作用效率;在21.8 kV的带状注驱动下,在200 GHz处实测输出功率为107 W,增益为30 dB,3 dB带宽为6 GHz。由于阴极加热电阻短路导致阴极表面温度未达预期,带状注发射不均匀,在螺线管磁场聚焦下,通过40 mm的相互作用结构,电子流通率仅约为75%。实验样管和测试平台如图9(a)和(b)所示。

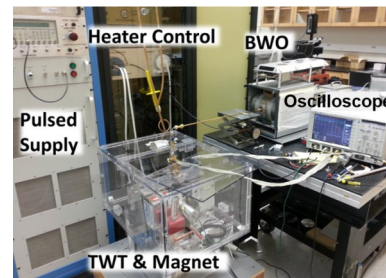
美国海军实验室利用紫外线光刻-电铸成型-塑铸(UV-LIGA)技术为G波段带状注行波管加工了单排矩形栅慢波结构,其周期为150  $\mu\text{m}$ ,槽宽75  $\mu\text{m}$ ,在210~220 GHz频带内,冷测结果和仿真结果吻合较好<sup>[39]</sup>,后续有望开展G波段带状注行波管的整管实验。

#### 3.2 速调管

速调管作为一种高功率、高效率的放大器被广泛应用于大科学装置以及粒子加速器中。美国海军实验室在2014年报道了一种工作于W波段的带状注扩展相互作用速调管<sup>[40]</sup>。其采用两个5间隙输入耦合腔和一个4间隙群聚腔,利用螺线管磁场聚焦19.5 kV/3.6 A,注电流密度约为160 A/cm<sup>2</sup>的带状注,在94 GHz处实测输出功率约为7.5 kW,采用-11 kV的单极降压收集极时整管效率约为17.2%。由于该管高频结构长度较短,仅为28 mm,Diocotron不稳定性不明显,在螺线管磁场聚焦下,电子流通率可达97.5%。实验平台如图10(a)所示。相比于螺线管磁场聚焦,周期永磁聚焦结构在体积和重量方面更有优势,但带状注在磁场周期间隙受到的聚焦力较弱,Diocotron不稳定性相对螺线管磁场而言更加明显,因此很难保证与螺线管磁场一样具有较好的电子流通率。因此,研究人员提出了一种更加紧



(a)



(b)

图9 (a)太赫兹带状注行波管样管,(b)太赫兹带状注行波管测试平台

Fig. 9 (a) Sample of terahertz sheet beam TWT, (b) Experiment platform of terahertz sheet beam TWT

凑的永磁螺线管聚焦结构,相比传统的螺线管聚焦结构,重量和体积减少了~50%,已在Ka波段带状注行波管上验证了其有效性<sup>[41]</sup>。

在国内,中科院空天院在2020年开展了W波段带状注速调管的实验<sup>[26]</sup>,采用通电螺线管聚焦注电压55 kV,注电流2.2 A的带状注,测试结果显示:在95 GHz处,输出功率可达2.57 kW,增益为20 dB,电子效率约为2.2%,通过100 mm的高频结构,电子流通率约为90%,实验样管如图10(b)所示。因为是实验原型管,结构参数等并未经过全域优化,所以功率和效率均低于同频段的其他速调管,后续将开展进一步的研究。目前开展实验的带状注速调管最高工作在W波段,今后将会扩展到太赫兹频段。

另外,北京航空航天大学在2021年报道了G波段高功率、宽带宽的带状注扩展相互作用速调管<sup>[42]</sup>,仿真结果表明:该管在218.9 GHz处,峰值输出功率可达650 W,增益约为35 dB,3 dB带宽为700 MHz,电子效率为7.9%。同年中科院空天院也开展了G波段带状注扩展相互作用速调管的仿真研究<sup>[43]</sup>。结果显示:该管在220 GHz处,峰值输出功率为700 W,增益约为42.5 dB,3 dB带宽为500 MHz,采用单

极降压收集极,整管效率为26.9%。相关信息如表1所示。

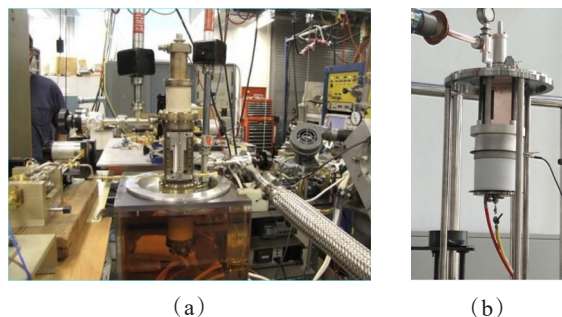


图10 (a)W波段带状注速调管测试平台,(b)W波段带状注速调管样管

Fig. 10 (a) Experiment platform of W-band sheet beam klystron, (b) Sample of W-band sheet beam klystron

## 4 挑战和未来发展

通过对带状注的发展历程、产生方法、聚焦方式以及太赫兹带状注器件研究进展的介绍,可以发现太赫兹带状注器件面临的挑战主要有以下四个方面:

### 4.1 大电流密度带状注的产生

(1) 阴极材料。带状注阴极的发射性能直接决定了发射电流密度的大小。对于太赫兹带状注器件,通常阴极发射电流密度约为 $30 \text{ A/cm}^2$ 或更高,注电流密度一般大于 $300 \text{ A/cm}^2$ ,以实现更高的功率输出。对于传统的钨钨阴极,很难达到太赫兹频段器件对阴极发射电流密度的要求。目前,以铪酸盐阴极为代表的新一代高发射电流密度阴极材料的技术进步,对太赫兹带状注器件的发展具有重要的推动作用,在实验室条件下,铪酸盐阴极发射电流密度高达几百 $\text{A/cm}^2$ ,经过聚焦极压缩后,注电流密度将更高,且稳定工作温度约为 $1050^\circ\text{C}$ ,相比钨钨阴

极低 $\sim 100^\circ\text{C}$ 。但是,其发射一致性较差,抗中毒能力弱,克服这些缺点还需大量的实验研究。此外,新型阴极材料,例如碳纳米管冷阴极也相继出现。碳纳米管是一种优异的场致发射冷阴极材料,其具有理论预测发射电流密度大,开启时间快,无需高温加热等优点,符合太赫兹带状注器件的小尺寸要求,但实测发射电流密度小,一般低于 $10 \text{ A/cm}^2$ ,目前无法满足太赫兹带状注器件对注电流密度的要求<sup>[44]</sup>。若要应用到太赫兹带状注器件中,还需要大幅度提高发射电流密度,同时需要深入研究使用寿命、发射一致性以及封装技术等一系列卡脖子技术难题。

(2) 高压压缩比带状注的成形。通过静电场对阴极发射的电子注进一步压缩是实现大电流密度带状注的常用方法,可以适当弥补阴极发射能力的不足。对于太赫兹带状注器件,其压缩比通常大于10:1,以实现高的注电流密度,最终形成的带状注截面尺寸窄边通常为 $0.1\sim 0.2 \text{ mm}$ ,宽边通常小于 $1 \text{ mm}$ 。高压压缩比电子枪对阴极与聚焦极的结构设计要求很高,常用的柱面椭圆阴极与椭圆聚焦极压缩能力有限。因此,需要进一步探索聚焦极和阴极的结构以及与带状注电子枪的适配来实现带状注的高压缩比。

### 4.2 带状注的聚焦

(1) 矩形截面带状注由于直角位置处不利于静电压缩,且空间电荷力大,难以聚焦,通常会采用圆角形式,因此实际的带状注截面多为近似椭圆形,空间电荷力在带状注截面宽边上并不恒定,由于周期磁场的磁体宽度通常大于带状注宽度,带状注的边缘容易出现聚焦过度。改进后的偏置型磁场结构通过提供额外恒定磁场,仅可以实现一定程度的边缘聚焦。由于带状注边缘是不断变化的,如何设置周期磁场结构的边缘磁场分布以适应不断变化的带状注边缘,仍然需要深入研究。现有边缘聚焦

表1 部分带状注速调管参数

Table 1 Parameters of part of reported sheet beam klystrons

序号	研制单位	频率(GHz)	电压(kV)	电流(A)	功率(kW)	效率	相互作用区长度(mm)	流通率
1(实验)	美国海军实验室	94	19.5	3.6	7.5	17.2%	28	97.5%
2(实验)	中科院空天院	95	55	2.2	2.57	2.2% (电子效率)	100	90%
3(仿真)	北京航空航天大学	218.9	16.5	0.5	0.65	7.9% (电子效率)	-	-
4(仿真)	中科院空天院	220	16.2	0.66	0.7	26.9%	-	-



方式尽管数值模拟结果较好,但难以从实验中观测到实际的聚焦效果,其有效性仍需进一步实验验证。

(2) 目前常用的带状注聚焦方式以PCM磁场及其变型为主,随着太赫兹带状注器件不断向高频段发展,注通道尺寸在不断变小,这对带状注与注通道的同心度要求更高,同时带状注聚焦结构也变得更加紧凑。在实际应用中应针对不同器件的需求,结合带状注的电压、电流和结构尺寸,确定合理的磁场周期和磁场强度,以实现带状注的长距离聚焦传输。

(3) 太赫兹带状注器件的注电流密度较大,从而面临着高聚焦磁场强度的需求。目前实用的钕钴永磁材料最大磁能积较低,而拥有高磁能积的钕铁硼材料工作温度较低(稳定工作温度低于150℃)。改良型稀土永磁材料钕铁氮在较高的工作温度(通常稳定工作温度应低于400℃)下,拥有相比钕铁硼更高的内禀矫顽力(通常大于600 kA/m)和最大磁能积(通常大于100 kJ/m<sup>3</sup>)<sup>[45]</sup>。改良型钕铁氮目前已完成了实验室研制,正在攻克批量工业制备流程,有望应用到未来的太赫兹带状注器件中。

#### 4.3 太赫兹带状注器件的精密加工

随着太赫兹频率的增加,真空电子器件尺寸不断减小,这要求器件的加工精度更高,表面粗糙度更小,对材料表面质量要求更高。太赫兹带状注器件通常要求的加工精度在数十微米甚至数微米量级,尤其对于大宽高比类型的高频结构,如交错双栅慢波结构等,其加工要求将更高。同时,为了降低高频损耗,表面粗糙度一般应低于高频趋肤深度(如0.22 THz对应的趋肤深度约为139 nm,1 THz对应的趋肤深度约为60 nm)。因此,对于太赫兹带状注器件,高频结构表面粗糙度一般应低于60 nm,当然不同频率的器件要求应有不同。在这种加工需求下,新型精密加工技术将展现出明显的优势。对于工作在0.3 THz以下的器件,智能型数控加工设备可以满足加工精度要求;当器件工作在0.3-1 THz时,可以采用智能型数控加工设备和微加工技术相结合的方式;当器件工作在1 THz以上时,微加工技术的优势将充分体现,常见的微加工技术有机电系统(MEMS),紫外线光刻-电铸成型-塑铸(UV-LIGA)技术,深反应离子刻蚀(DRIE)等。利用这些先进的微细加工手段可以实现器件高频结构

等重要部件的精密加工,确保加工精度和表面粗糙度满足器件的要求。

#### 4.4 太赫兹带状注器件的精确装配

(1) 带状注电子枪的装配。带状注电子枪的聚焦极在几何结构上具有非轴对称的特点,这导致其装配要求比常规圆形注电子枪更加苛刻。对于太赫兹带状注电子枪,聚焦极与阴极的同心度一般应低于0.02 mm,以保证对带状注的压缩成形效果;

(2) 高频结构的装配。大深高比的高频结构通常采用剖分加工方式,剖分的高频结构在组装时需精确控制横向与纵向的偏差,以保证该结构具有较好的电磁波传输与反射特性;在太赫兹频段,其装配误差应确保在微米量级;

(3) 磁聚焦系统的装配。磁聚焦系统中各组磁体之间或磁体与极靴之间的装配精度直接影响聚焦磁场分布,进而影响聚焦磁场与带状注的电压、电流、尺寸等参数的匹配;另外,磁聚焦系统与电子枪和高速率通信、雷达、深空探测等应用系统对此类器件的要求。此外,太赫兹带状注器件具有初步的平面化特点,有助于应用系统的集成。在未来,太赫兹带状注器件将充分结合固态器件的优势,逐步向平面化和集成化方向发展,为未来的新一代片上集成真空电子学的发展提供一种新的途径<sup>[46]</sup>。

综上所述,太赫兹带状注器件由于自身的高功率、高效率、高增益及小型化等优势,可以很好地满足高速率通信、雷达、深空探测等应用系统对此类器件的要求。此外,太赫兹带状注器件具有初步的平面化特点,有助于应用系统的集成。在未来,太赫兹带状注器件将充分结合固态器件的优势,逐步向平面化和集成化方向发展,为未来的新一代片上集成真空电子学的发展提供一种新的途径<sup>[46]</sup>。

#### References

- [1] H. C. Thompson. Electron beams and their applications in low voltage devices[J]. *Proc. I.R.E.*, 1936, **24**(10):1276-1297.
- [2] A. V. Haeff. Space-charge effects in electron beams [J]. *Proc. I.R.E.*, 1939, **27**(9):586-602.
- [3] G. Caryotakis. A sheet-beam klystron paper design [R]. SLAC-PUB-8967, 2004, 1-13.
- [4] R. L. Kyhl and H. F. Webster. Breakup of hollow cylindrical electron beams[J]. *IRE Trans. Electron Devices*, 1956, **3**(4):172-183.
- [5] C. C. Cutler. Instability in hollow and strip electron beams [J]. *J. Appl. Phys.*, 1956, **27**(9):1028-1029.
- [6] J. R. Pierce. Instability of hollow beams [J]. *IRE Trans. Electron Devices*, 1956, **3**(4):183-189.
- [7] O. Buneman, R. H. Levy, and L. M. Linson. Stability of crossed-field electron beams [J]. *J. Appl. Phys.*, 1966, **37**(8):3203-3222.
- [8] W. Fnauer. Diocotron instability in plasmas and gas discharges[J]. *J. Appl. Phys.*, 1966, **37**(2):602-611.
- [9] R. W. Gould. Space charge effects in beam-type magnetrons

- [J]. *J. Appl. Phys.*, 1957, **28**(5):599–605.
- [10] T. M. Antonsen, Jr. and E. Ott. Velocity shear driven instabilities of an unneutralized electron beam [J]. *Phys. Fluids*, 1975, **18**(9):1197–1208.
- [11] R. C. Davidson, H. W. Chan, C. Chan, and S. Lund. Equilibrium and stability properties of intense non-neutral electron flow [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1991, **63** (2) : 341–374.
- [12] E. T. Scharlemann. Wiggle plane focusing in linear wigglers[J]. *J. Appl. Phys.*, 1985, **58**(6):2154–2161.
- [13] J. H. Booske, A. H. Kumbasar, and M. A. Basten. Periodic focusing and ponderomotive stabilization of sheet electron beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71** (24) : 3979–3982.
- [14] J. H. Booske, M. A. Basten, A. H. Kumbasar, T. M. Antonsen, Jr., S. W. Bidwell, Y. Carmel, W. W. Destler, V. L. Granatstein, and D. J. Radack. Periodic magnetic focusing of sheet electron beams [J]. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**(5):1714–1720.
- [15] J. H. Booske and M. A. Basten. Demonstration via simulation of stable confinement of sheet electron beams using periodic magnetic focusing [J]. *IEEE. Tran. Plasma Sci.*, 1999, **27**(1):134–135.
- [16] P. C. Panda, V. Srivastava, and A. Vohra. Staggered closed PCM for stable rectangular sheet electron beam transport [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2013, **60**(9): 2918–2923.
- [17] S. Jiang, X. Wang, X. Zhang, Z. Lyu, Z. Wang, H. Gong, Y. Gong, and Z. Duan. Experimental investigation of an electron-optical system for terahertz traveling-wave tubes [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2021, **68**(12): 6498–6504.
- [18] M. J. Rosker and H. B. Wallace. Vacuum electronics and the world above 100 GHz [C]. 9th IEEE International Vacuum Electronics Conference, Monterey, USA, 2008.
- [19] S. Chang, Z. Wu, J. Huang, T. Zhao, D. Liu, M. Hu, Y. Wei, Y. Gong, and S. Liu. The research progress of vacuum electron device in terahertz band [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (常少杰, 吴振华, 黄杰, 赵陶, 刘頔威, 胡旻, 魏彦玉, 宫玉彬, 刘盛纲. 真空电子太赫兹器件研究进展 [J]. *红外与毫米波学报*), 2022, **41**(1):85–102.
- [20] Z. Duan, Y. Gong, J. Feng, Y. Wei, and W. Wang. Sheet beam vacuum electron devices [C]. 18 Annual Conference of Vacuum Electronics Branch of Chinese Electronics Society, Zhangjiajie, China, 2011.
- [21] J. Zhao, D. Gamzina, N. Li, J. Li, A. G. Spear, L. Barnett, M. Banducci, S. Risbud, and N. C. Luhmann, Jr. Scandate dispenser cathode fabrication for a high-aspect-ratio high-current-density sheet beam electron gun [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2012, **59**(6):1792–1798.
- [22] J. Wang, Y. Yang, Y. Wang, W. Liu, M. Zhou, and T. Zuo. A review on scandia doped tungsten matrix scandate cathode [J]. *Tungsten*, 2019, **1**:91–100.
- [23] X. Tang, Z. Duan, Z. Wang, T. Tang, Y. Wei, and Y. Gong. The design method of millimeter-wave sheet-beam electron gun [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (唐先锋, 段兆云, 王战亮, 唐涛, 魏彦玉, 宫玉彬. 毫米波带状注电子枪的设计方法. *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(6): 619–624.
- [24] A. A. Burtsev, N. A. Bushuev, I. A. Navrotsky, G. V. Sakhadzi, P. D. Shalaev, Y. A. Grigoriev. Experimental study of electron guns for TWT of terahertz range [C]. 16th IEEE International Vacuum Electronic Conference, Beijing, China, 2015.
- [25] M. Field, T. Kimura, J. Atkinson, D. Gamzina, N. C. Luhmann, Jr., B. Stockwell, T. J. Grant, Z. Griffith, R. Borwick, C. Hillman, B. Brar, T. Reed, M. Rodwell, Y-M Shin, L. R. Barnett, A. Baig, B. Popovic, C. Domier, R. Barchfield, J. Zhao, J. A. Higgins, and Y. Goren. Development of a 100-W 200-GHz high bandwidth mm-wave amplifier [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2018, **65**(6):2122–2128.
- [26] D. Zhao, W. Gu, Q. Li, S. Wang, and Z. Zhang. Experimental demonstration of a W-band sheet beam klystron [C]. 21st International Vacuum Electronics Conference, Monterey, USA, 2020.
- [27] G. Shu, J. Lin, Z. Huang, J. Deng, Z. Chang, and W. He. Design and microfabrication of an interaction circuit for a 0.3-THz sheet beam extended interaction oscillator with multiple-mode operation [J]. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 2021, **11**(4):425–432.
- [28] M. A. Basten. Formation and transport of high-perveance electron beams for high-power, high-frequency microwaves devices [D]. Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin-Madison, Madison, 1996.
- [29] B. E. Carlsten, S. J. Russell, L. M. Earley, F. L. Krawczyk, J. M. Potter, P. Ferguson, and S. Humphries, Jr. Technology development for a mm-wave sheet beam traveling-wave tube [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2005, **33** (1):85–93.
- [30] A. J. Jensen, G. Caryotakis, G. Scheitrum, D. Sprehn, and B. Steele. Sheet beam klystron simulations using AJDISK [C]. 2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference held Jointly with 2006 IEEE International Vacuum Electron Sources, Monterey, USA, 2006.
- [31] J. Zhou, R. Bhatt, and C. Chen. Cold-fluid theory of equilibrium and stability of a high-intensity periodically twisted ellipse-shaped charged-particle beam. [J]. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2006, **9**, 034401:1–6.
- [32] Z. Duan, X. Tang, Z. Wang, Y. Zhang, X. Chen, M. Chen, and Y. Gong. Observation of the reversed Cherenkov radiation [J]. *Nature Commun.*, 2017, **14901**:1–7.
- [33] C. Ruan, S. Wang, D. Zhao, Y. Han, and Q. Li. Theory and experimental investigation on the high-performance transport of sheet electron beam for the XSBK and WSBK [C]. 13rd International Vacuum Electronics Conference, Monterey, USA, 2012.
- [34] J. H. Booske, B. D. Mcvey, and T. M. Antonsen, Jr. Stability and confinement of nonrelativistic sheet electron beams with periodic cusped magnetic focusing [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(9):4140–4155.
- [35] D. Zhao. Research on feasibility of closed and offset PCM focusing structures for sheet electron beams [J]. *ACTA Phys. Sin.* (赵鼎. 关于闭合及偏置 PCM 结构约束带状电子注可行性的研究. *物理学报*), 2010, **59**(3):1712–1720.
- [36] C. Zhang, P. Pan, X. Chen, S. Su, B. Song, Y. Li, S. Lue, J. Cai, Y. Gong, and J. Feng. Design and experi-

- ments of the sheet electron beam transport with periodic cusped magnetic focusing for terahertz traveling-wave tubes[J]. *Electronics*, 2021, **10**(24), 3051.
- [37] W. Choi, I. Lee, J. Shin, and E. Choi. Stability analysis of 300-GHz sheet electron beam transport in a periodic rectangular quadrupole [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2021, **49**(3):1121–1127.
- [38] P. Yin, J. Xu, S. Fang, R. Yang, J. Luo, J. Zhang, D. Jia, H. Yin, L. Yue, G. Zhao, G. Guo, L. Xu, W. Wang, and Y. Wei. Electron optical system with integrated PCM for sheet electron beam devices [J]. *Phy. Plasmas*, 2021, **28**(12), 123101.
- [39] C. D. Joye, J. P. Calame, M. Garven, and B. Levush. UV-LIGA microfabrication of 220 GHz sheet beam amplifier gratings with SU-8 photoresists [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2010, **20**(12), 125016.
- [40] J. Pasour, E. Wright, K. T. Nguyen, A. Balkcum, F. N. Wood, R. E. Myers, and B. Levush. Demonstration of a multikilowatt, solenoidally focused sheet beam amplifier at 94 GHz [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2014, **61**(6):1630–1636.
- [41] D. Pershing, K. Nguyen, D. K. Abe, E. Wright, P. Larsen, J. Pasour, S. Cooke, A. Balkcum, F. Wood, R. Myers, and B. Levush. Demonstration of a wideband 10-kW Ka-band sheet beam TWT amplifier[C]. 15th International Vacuum Electronics Conference, Monterey, USA, 2014.
- [42] S. Li, F. Zhang, C. Ruan, Y. Su, and P. Wang. A G-band high output power and wide bandwidth sheet beam extended interaction klystron design operating at  $TM_{31}$  with  $2\pi$  mode[J]. *Electronics*, 2021, **10**(16), 1948.
- [43] H. Wang, D. Zhao, Q. Xue, Z. Qu, and H. Ding. Design and simulation of high-aspect-ratio sheet beam EIK at 0.22 THz[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2021, **49**(12):3811–3817.
- [44] X. Wang. Research on carbon nanotubes cold cathode for application in high power microwave tube[D]. University of Electronic Science and Technology of China (王翔. 用于高功率微波管的碳纳米管场发射冷阴极研究. 电子科技大学), 2016.
- [45] J. A. B. Engerhoff, A. B. Baldissera, M. D. Magalhaes, P. H. Lamarao, P. A. P. Wendhausen, C. H. Ahrens, and J. M. Mascheroni. Additive manufacturing of Sm-Fe-N magnets[J]. *J. Rare Earths*, 2019, **37**(10):1078–1082.
- [46] J. Feng. Integrated vacuum electronics [J]. *Vacuum Electronics* (冯进军. 集成真空电子学. 真空电子技术), 2010, **285**(2):1–7.