

毫米波功率应用研究进展(特邀)

鲁钝¹, 傅文杰^{1*}, Mikhail Glyavin², 唐相伟³, 胡旻^{1*}, 刘盛纲¹

(1. 电子科技大学 电子科学与工程学院 太赫兹科学技术四川省重点实验室, 四川 成都 610054;

2. 俄罗斯科学院应用物理研究所, 俄罗斯 下诺夫哥罗德 603950;

3. 广东美的厨房电器制造有限公司创新中心, 广东 佛山 528311)

摘要:微波功率应用是一种直接利用微波的功率和能量与物质互作用的应用。近年来,随着毫米波功率源技术的发展,微波功率应用逐渐向毫米波频段发展。由于毫米波波长较短,在功率应用中展现出诸多独特特性,并发展出一系列独特应用。本文对毫米波在物理科学、材料科学、生物医学等领域的研究工作进行了评述,主要包括聚变等离子体加热与诊断、材料加工与分析、生物效应应用等,对目前研究和发展的主要瓶颈问题进行了介绍,并对未来发展进行了展望。

关键词:真空电子器件;毫米波;功率应用;聚变等离子体;材料加工与分析;生物效应;研究进展

中图分类号:O43

文献标识码:A

The research progress of millimeter-wave power applications (invited)

LU Dun¹, FU Wen-Jie^{1*}, MIKHAIL Glyavin², TANG Xiang-Wei³, HU Min^{1*}, LIU Sheng-Gang¹

(1. Terahertz Science and Technology Key Laboratory of Sichuan Province, School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

2. Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod 603950, Russia;

3. Guangdong Midea Kitchen Appliance Manufacturing Co., Ltd. Innovation Center, Foshan 528311, China)

Abstract: In general, all known applications of high-power microwaves directly use energy to interact with matter. In recent years, with the development of powerful millimeter-wave radiation sources, microwave technology has gradually shifted towards the millimeter-wave frequency band. Due to the wavelength of radiation, millimeter waves have several unique characteristics, which allow for both the active development of existing technologies and the creation of new ones that require high power or radiation energy. This article provides an overview of research on the application of millimeter waves to solve problems in physics, material science, biomedicine, and others, including heating and diagnostics of thermonuclear plasma, processing and analysis of materials, biological effects, etc. The main difficulties arising in the implementation of the described tasks are presented, and the future development is also prospected.

Key words: vacuum electron device, millimeter wave, power application, fusion plasma, material processing and analysis, biological effect, research progress

引言

微波功率应用(Microwave Power Application)是一种直接利用微波的功率和能量与物质互作用的应用,与微波在通讯、雷达等电子信息领域中的应用不同,微波功率应用中微波仅提供互作用所需的

能量,无需进行调制也不携带信息^[1-2]。微波功率应用最早可追溯到20世纪50年代,前期的应用主要是食品加热。由于微波功率应用对带宽、相位、信噪比等指标要求较低,对功率、能量、效率等指标要求较高,因而具有高功率、高效率特性的功率源在

收稿日期:2023-07-05,修回日期:2023-10-07

Received date:2023-07-05, Revised date:2023-10-07

基金项目:国家自然科学基金(61971097,62071108,62371105);国家自然科学基金与俄罗斯基础研究基金合作交流项目(62111530054(中国),1-58-53051(俄罗斯));四川省科技计划(2023YFH0028)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61971097, 62071108, 62371105); NSFC-RFBR (62111530054 (Chinese group) and 21-58-53051 (Russian group)); Sichuan Science and Technology Program under Grant (2023YFH0028)

作者简介(Biography):鲁钝(1994—),男,安徽安庆人,博士,主要研究领域为太赫兹、毫米波辐射源及其应用。E-mail: ludun@uestc.edu.cn

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: fuwenjie@uestc.edu.cn; hu_m@uestc.edu.cn

微波功率应用中更被青睐与广泛应用。近20年,得益于以磁控管为代表的高效率、低成本微波功率源的发展与普及,微波功率应用技术得到了快速发展和广泛应用,不仅形成了以微波炉为代表的微波加热应用,还形成了微波等离子体、微波化学、微波冶金、微波杀菌等交叉学科和应用,目前比较成熟的工业应用包括商用微波炉、微波干燥、微波橡胶硫化、微波增强等离子体化学气相沉积(MPCVD)、微波烧结、微波辅助冶金、微波辅助化学合成等^[3-5]。随着应用的迅速拓展,微波源的需求也大幅增长,2021年各类磁控管总产量估计超过1亿支,市场规模逐年增长。目前,微波能应用常用的频率有915 MHz、2.45 GHz和5.8 GHz。近年,随着以回旋管为代表的大功率毫米波辐射源的发展,毫米波功率应用吸引了越来越多科研工作者的关注和研究^[6-12]。与微波相比,毫米波具有更短的波长、更窄的波束等特性,在功率应用中呈现出诸多新特性与现象。

对于微波功率应用,在研究中通常将被处理物品等效为有耗介质,有耗介质对微波的吸收功率 P 的定义如式(1)所示^[13]:

$$P = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r \tan \delta E^2 V \quad (1)$$

式中 f 是电磁波频率, E 是电场强度赋值, ε_0 是真空中介电常数, ε_r 是相对介电常数, $\tan \delta$ 是损耗角正切,且 $\tan \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$,其中 ε'' 和 ε' 分别是复介电常数的虚部和实部, V 是介质体积。从式(1)中可以得知,

在相同条件下,有耗介质能吸收的毫米波功率远大于能吸收的微波功率,采用毫米波可以实现更高的吸收功率以达到更高的温度。此外,电磁波的透入深度由式(2)定义为^[13]

$$D = \frac{0.225\lambda}{\sqrt{\varepsilon'} \sqrt{\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1}} = \frac{67.52 \times 10^6}{f} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon'} \sqrt{\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1}} \quad (2)$$

相比微波,毫米波的透入深度更浅,因此在表面处理方面更具优势。

目前已有等离子体加热、等离子体诊断、增强型核磁共振(DNP-NMR)以及材料加工等多种毫米波功率应用的报道,并且近年来呈现逐年增长的趋势^[14-18]。毫米波功率典型应用以及功率源工作关键参数如表1所示。根据国际电联3区和我国无线电频率划分规定[中华人民共和国无线电频率划分规定(2018)],5.8 GHz以上可用于工业、科学和医疗应用的毫米波频率包括:24 GHz、61 GHz、122 GHz、245 GHz,300 GHz以上频率尚无划分规定。本文对毫米波功率应用的研究现状进行了综述,并对相关领域的技术发展进行了展望。

1 聚变等离子体加热与诊断

1.1 聚变等离子体加热和电流驱动

毫米波功率应用中,功率需求最大的当属聚变

表1 毫米波功率典型应用以及功率源工作关键参数

Table 1 Typical millimeter-wave power applications and operating key parameters of power source

具体应用	回旋管工作电压	回旋管工作电流	回旋管输出功率	回旋管输出频率	磁体类型
聚变等离子体加热和电流驱动	75~90 kV	40~75 A	1~2 MW	100~140 GHz 170、250 GHz	超导磁体
聚变等离子体诊断与控制	60 kV	10~50 A	83~220 kW	295~389 GHz	超导磁体
微波推进器	75~90 kV	40~75 A	兆瓦级	140、170 GHz	超导磁体
粒子加速	75~100 kV	40~75 A	兆瓦级	110 GHz	超导磁体
主动拒止武器	40~60 kV	小于10 A	5~400 kW	95 GHz	永磁体、常温磁体、超导磁体
医学治疗	10~20 kV	小于1 A	几十瓦	95~220 GHz	超导磁体
电子自旋共振波谱	10~20 kV	小于1 A	10~100 W	38~889 GHz	超导磁体
增强型核磁共振	2~20 kV	几百毫安	10~100 W	140~600 GHz	超导磁体
产品成像、质检	10~20 kV	几百毫安	1~100 W	200、400 GHz	超导磁体
材料加工	10~30 kV	小于1 A	几百瓦到几千瓦量级	24、28、30、83、300 GHz	永磁体、常温磁体、超导磁体
毫米波激发等离子体与气体放电	15~30 kV	1~2.5 A	几百瓦到几十千瓦量级	20~110 GHz	永磁体、常温磁体、超导磁体

等离子体加热和电流驱动。受国际能源问题与可持续绿色发展运动的影响,核能是深受发达国家重视的一种绿色能源,而核聚变则被认为是解决能源问题的终极方案。受控热核反应中,需要将等离子体加热到极高温度以达到聚变条件。国际热核聚变实验堆(international thermonuclear experimental reactor, ITER)计划就采用了 127.5 GHz 和 170 GHz 的回旋管对反应装置中的等离子体进行加热。此外,我国的全超导托卡马克核聚变实验装置 EAST、德国的仿星器受控核聚变装置 W7-X、马克斯·普朗克等离子体物理研究所的 ASDEX、通用原子的 DIII-D、托卡马克配置变量 TCV、日本仿星器 LHD、日本量子科学技术研究开发机构(QST)的 JT-60SA 等装置均采用大功率回旋管进行等离子体加热。虽然不同装置对等离子体加热的频率要求不同,但目前这些装置采用的频率大部分都在毫米波频段,其中 110 GHz、140 GHz 和 170 GHz 频率使用最为广泛^[19]。现阶段的 ITER 计划需要 20 MW 的能量注入以诱导等离子体聚变,拟采用 3 支 127.5 GHz、1 MW 回旋管和 24 支 170 GHz、1 MW 回旋管,其中 127.5 GHz、1 MW 回旋管工作 10 s 用于启动,170 GHz、1 MW 回旋管工作 1 000 s 用于加热和电流驱动,这 24 支 170 GHz 回旋管的研发分别由欧洲负责 6 支、俄罗斯负责 8 支、日本负责 8 支、印度负责 2 支(由美国制造)^[20]。而 ITER 计划由于其系统庞大复杂,目前仍处于建设阶段,实验测试多次推后。目前,国际上高温等离子体运行脉冲长度的世界纪录,是由我国的 EAST 在 2021 年实现的 1 056 s,温度达七千万摄氏度。要

实现商业化的核聚变发电站运行,依然任重道远,而兆瓦级毫米波回旋管的研究目标则是更大输出功率、更长连续输出时间。图 1 展示的是目前较为成熟的聚变等离子体加热系统。

面向聚变等离子体加热和电流驱动的 MW 级回旋管研究可追溯到 20 世纪 90 年代。1990 年,美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)等离子体聚变中心(Plasma Fusion Center, PFC)就报道了 148 GHz,功率达到 1.2 MW 的脉冲回旋管。1992-1993 年,MIT-PFC 相继报道了 230 GHz~1.3 MW, 280 GHz~0.78 MW, 290 GHz~0.72 MW 回旋管的实验工作,实验脉冲宽度 3 μ s,重复频率 4 Hz。在各类聚变加热项目的支持下,以美国 Communications & Power Industries (CPI)、俄罗斯 GYCOM Ltd、欧洲卡尔斯鲁厄理工学院(Karlsruher Institut für Technologie, KIT)、日本量子与辐射科学技术研究所(National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, QST)为代表的机构对于特大功率的连续波回旋管做出了大量的研究工作,MW 级回旋管得到了持续发展,输出功率和工作时长都在不断提高,取得了一系列的成果,已报道的大功率回旋管实物如图 2 所示,分别展示了来自日本、俄罗斯、美国以及欧洲的兆瓦级回旋管。目前,美国研制的 110 GHz 回旋管实现了 1.67 MW、1 ms 输出和 0.95 MW、5 s 输出,140 GHz 回旋管实现了 1 MW、0.5 ms 输出和 0.9 MW、30 min 输出,170 GHz 回旋管实现了 1 MW、2 ms 输出和 0.6 MW、15 s 输出;日本研制的 110 GHz 回旋管实

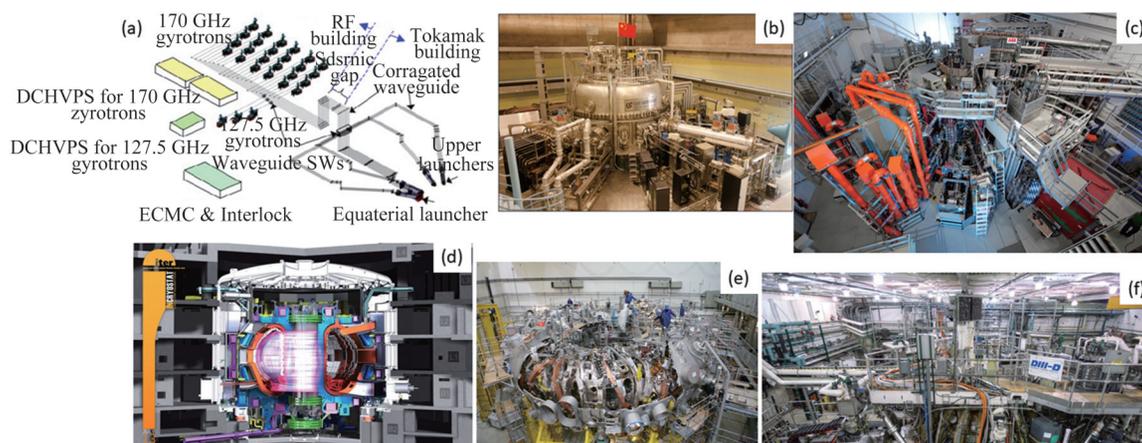


图 1 热核聚变系统:(a)ITER 热核聚变原理框图;(b)中国的 EAST 核聚变系统;(c)欧盟的 IPP;(d)ITER;(e)德国的托卡马克系统;(f)美国通用原子的 DIII-D

Fig. 1 Thermonuclear system: (a) schematic diagrams of the ITER; (b) China EAST; (c) Max Planck Institute for Plasma Physics (IPP); (d) ITER; (e) the Germany Tokamak; (f) the United States DIII-D

现了 1.5 MW、4 s 输出和 1 MW、100 s 输出, 170 GHz 回旋管实现了 1 MW、800 s 输出和 0.8 MW、60 min 输出; 俄罗斯研制的 110 GHz 回旋管实现了 1 MW、10 s 输出和 0.85 MW、300 s 输出, 140 GHz 回旋管实现了 1.14 MW、10 s 输出和 0.7 MW、1 000 s 输出, 170 GHz 回旋管实现了 0.99 MW、1 000 s 输出, 1.2 MW、100 s 输出和 1.75 MW、0.1 s 输出; 欧洲研制的 110 GHz 回旋管实现了 1.67 MW、7 ms 输出, 140 GHz 回旋管实现了 2.1 MW、1 ms 输出和 0.92 MW、30 min 输出; 170 GHz 回旋管实现了 2.2 MW、1 ms 输出^[21]。

在国内, 聚变等离子体加热用回旋管的主要研制单位有电子科技大学、北京真空电子技术研究所(中国电子科技集团公司第十二研究所)、中国科学院电子学研究所、中国工程物理研究院应用电子学研究所, 但目前报道的实验结果与国外还有较大差距^[21-25]。

应用于可控热核聚变的毫米波功率源朝更高频率与更大功率方向发展, 因此回旋管需要工作在更高次模式情形下, 也意味着更强的模式竞争, 给回旋管研究人员提出新的挑战。目前, 谐振腔多从线性渐变结构向曲线型过度转变, 可以有效抑制竞争模式激励。同时, 该应用对回旋管可连续工作时间(包括脉冲宽度与系统运行时间)也提出了更高的要求。科研工作者除了面临严峻的工程考验, 也需要解决更长工作时间造成的互作用腔体欧姆损耗带来的热管理与热形变等科学问题, 目前采用谐振无氧铜结构构造多种散热通道等有望进一步延长工作时间。

1.2 等离子体诊断

毫米波功率应用在聚变等离子体中的另一项重要应用是集体汤姆逊散射(collective Thomson scattering, CTS)诊断。由于聚变等离子体中温度极高, 传统接触式等离子体诊断方法(如 Langmuir 探针)难以在极高温条件下使用。CTS 诊断是一种研究等离子体中声子激发的方法。在这种方法中, 通过将高功率毫米波脉冲辐射到等离子体中, 产生声波激发, 然后通过测量声波的散射信号来研究等离子体中的声子激发。这种方法可以提供等离子体中声子激发的频率、波长、传播速度和阻尼等信息, 从而有助于深入了解等离子体物理和诊断。由于 CTS 是一种非接触式等离子体诊断技术, 可以在高温等离子体中使用, 因此, CTS 诊断技术在聚变研究领域得到了广泛应用。它可以用于研究等离子

体中的声波、离子温度、密度和流动等参数, 从而对等离子体物理和聚变研究提供有价值的信息。此外, 它还可以用于研究等离子体中的扰动和不稳定性, 例如湍流和纵向涡旋等。其诊断系统与原理如图 3(a)~(c)所示^[23]。



图2 MW级回旋管实物图(日本、俄罗斯、美国、欧洲)

Fig. 2 MW gyrotrons (From Japan, Russia, US and Europe)

在聚变等离子体的 CTS 诊断中, 对毫米波辐射的要求和聚变等离子体加热与电流驱动中的要求不同。在聚变加热的等离子体中通常需要功率超过 100 kW 的大功率波进行 CTS 激发, 才能获得足够的信号强度和大散射角。同时, 激发信号的频带宽度应小于几十 MHz, 以保护 CTS 接收机免受陷波滤波器的杂散辐射。此外, 为进行 CTS 频谱的时域分析, 激发信号通常需以一定占空比连续工作。由于聚变等离子体也是采用毫米波进行加热, 如果激发信号频率较低, 激发信号将在高密度等离子体中受到折射、吸收或截止, 并且加热用毫米波的背景噪声对信号检测的影响很大。因此, 用于 CTS 诊断的毫米波频率通常需远高于等离子体加热用的毫米波频率。目前报道的用于 CTS 诊断的毫米波源通常工作在毫米波的较高频段, 有的甚至工作在亚毫米波和太赫兹频段。国际上研究聚变加热回旋管的机构都有配套用于 CTS 诊断的回旋管的研究报道, 文献报道的用于 CTS 诊断的回旋管如图 3(d)所示, 典型的 CTS 信号如图 3(e)~(f)所示^[27]。

2 材料加工与分析

2.1 陶瓷烧结

已有文献中, 最早报道的毫米波功率应用是陶瓷烧结, 在 1987 年由美国橡树岭国家实验室报道。报道中陶瓷烧结使用的毫米波功率源为美国 CPI 公司研制的回旋管, 设计工作电压和电流分别是 100 kV、10 A, 连续波输出功率在 28 GHz 时达到

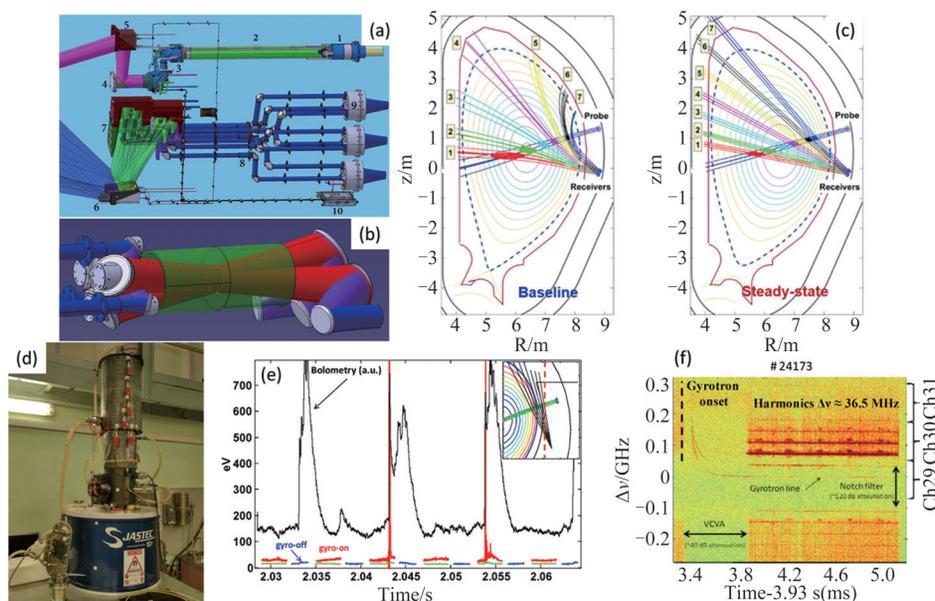


图3 集体汤姆逊散射系统:(a)集体汤姆逊散射(CTS)诊断系统;(b)CTS接收波束;(c)CTS散射体积;(d)用于CTS诊断的250 GHz回旋管系统;(e)CTS诊断数据;(f)回旋管单个脉冲与离子回旋共振加热同步信号频谱图

Fig. 3 The CTS system; (a) the CTS system in-vessel front-end components; (b) the configuration of the CTS receiver beams; (c) the location and size of the CTS scattering volumes; (d) a photo of the 250 GHz gyrotron for CTS diagnostics by Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences and Gycom Ltd.; (e) the time trace of CTS raw data; (f) the spectrogram of one gyrotron pulse in the same discharge during the ICRH heating

200 kW,效率为20%。研究表明,使用高频率的毫米波功率源进行陶瓷烧结,可以显著降低烧结温度,提高烧结效率以及提升材料的特性。传统升温方式高温烧结和28 GHz毫米波烧结过程中陶瓷扫描电镜如图4(a)~(h)所示。相较于传统烧结,毫米波烧结在相对较低温度下陶瓷就会开始发生致密化,并且毫米波烧结的致密化速度是要显著优于传统烧结^[28]。毫米波烧结过程中,温度达到1 375 °C时晶粒就开始生长,比传统烧结方式温度低300 °C,并且在毫米波烧结中,随着温度的升高,晶粒继续生长^[6]。同时,与微波烧结相比,由于毫米波波长更短,使得烧结样品表面与中心的温度差异较小,这可能是毫米波烧结的致密度和质量都较高的主要原因。图4(i)~(p)分别给出毫米波烧结、传统烧结 Y_2O_3 、 Gd_2O_3 、羟基磷灰石(HA)三种材料的扫描电镜对比,使用毫米波进行烧结的微观结构更加致密^[29-30]。图4(q)、(r)分别给出了微波2.45 GHz和毫米波烧结致密化程度、中心温度以及样品表面温度的温差,可以发现烧结频率达到毫米波之后,温差显著降低^[31]。

此后,1994年俄罗斯科学院应用物理研究所(Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences, IAP-RAS)研制了一种紧凑型毫米波回旋管

原型机用于给德国KIT进行陶瓷烧结研究。这支回旋管工作在二次谐波状态下,频率在30 GHz时有10 kW的连续波输出功率。工作电压、电流为23 kV、2 A,效率25%,此系统还被用来进行了各类先进结构和功能陶瓷的烧结^[32]。此系统基本奠定了工业应用回旋管应具备的特点,即使用较低电压,一般低于30 kV,电流一般不高于4 A。这是由于高压、高功率不仅使得电源系统本身体积较大,还需要配套设备例如使用更高功率的冷却系统等,会显著提高系统维护和使用成本。同时,由于回旋管工作输出频率与磁场大小成正比,在基次谐波模式工作时,1 Tesla磁感应强度大约能输出28 GHz的电磁波。为了降低磁场强度,进一步简化系统节约成本,所以使用高次谐波,例如二次谐波能减少一倍的磁场强度。在磁场强度不高时,甚至可以选择不使用超导磁体,而使用永磁体或者常温的电阻式磁体来为面向工业应用的毫米波回旋管提供均匀强磁场,这也是此类应用的发展方向之一。1995年,三菱公司就使用永磁体安装了一支工作在二次谐波状态下的回旋管,均匀磁场强度5 300 Gauss,工作电压、电流分别为30 kV、1.5 A,得到在28 GHz时,11.6 kW的功率输出^[33]。

进入21世纪,毫米波功率应用在材料处理领域

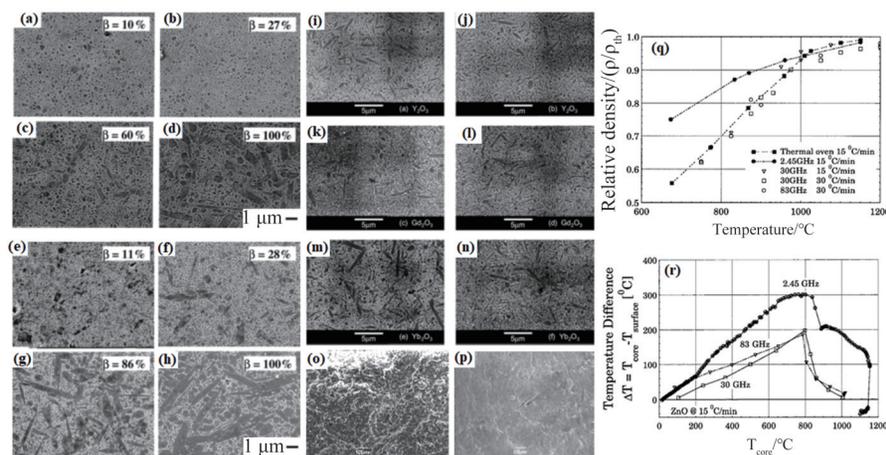


图4 烧结之后不同样品的扫描电镜照片,传统烧结样品在(a)1 600 °C;(b)1 650 °C;(c)1 700 °C;(d)1 750 °C的扫描电镜照片,在1 700 °C时才开始观测到晶粒生长,毫米波烧结,样品在(e)1 375 °C;(f)1 450 °C;(g)1 550 °C;(h)1 600 °C的扫描电镜照片,在1 375 °C时已经开始观测到晶粒生长;(i)毫米波烧结 Y_2O_3 至1 700 °C4小时;(j)传统烧结 Y_2O_3 至1 700 °C4小时,(k)毫米波烧结 Gd_2O_3 至1 700 °C4小时;(l)传统烧结 Gd_2O_3 至1 700 °C4小时,(m)毫米波烧结 Yb_2O_3 至1 700 °C4小时;(n)传统烧结 Yb_2O_3 至1 700 °C4小时;(o)毫米波烧结羟基磷灰石(HA)与(p)传统烧结HA扫描电镜图;(q)不同频率微波烧结的致密化程度曲线;(r)不同频率微波烧结的样品中心温度与中心温度和表面温度差的曲线

Fig. 4 SEM photos of different samples after sintering, the grain growth of traditional sintered samples was observed only at 1 700 °C when samples were at (a) 1 600 °C; (b) 1 650 °C; (c) 1 700 °C, and (d) 1 750 °C, millimeter-wave sintering, the scanning electron microscope photos of samples at (e) 1 375 °C; (f) 1 450 °C; (g) 1 550 °C; (h) 1 600 °C, the grain growth has been observed at 1 375 °C; (i) millimeter-wave sintering Y_2O_3 to 1 700 °C for 4 hours; (j) traditional sintering Y_2O_3 to 1 700 °C for 4 hours; (k) millimeter-wave sintering Gd_2O_3 to 1 700 °C for 4 hours; (l) traditional sintering Gd_2O_3 to 1 700 °C for 4 hours; (m) millimeter-wave sintering Yb_2O_3 to 1 700 °C for 4 hours; (n) traditional sintering Yb_2O_3 to 1 700 °C for 4 hours; (o) millimeter-wave sintered hydroxyapatite (HA) and (p) conventional sintered HA SEM; (q) densification curve of microwave sintering at different frequencies; (r) the curve of the central temperature and the difference between the central temperature and the surface temperature of the samples sintered by microwave at different frequencies

继续发展,已报道的工作频率包括24 GHz、28 GHz、30 GHz、83 GHz、300 GHz等,功率从几百瓦到几十千瓦量级^[34]。频率与功率的选取一般是具体应用的特点与要处理的材料的特性来决定^[35],特别是俄罗斯IAP-RAS联合GYCOM Ltd. 在此领域内取得了一系列成果。如图5(a)所示是IAP-RAS与日本福井大学(Fukui University)共同研制的基于15 kV、1 A,频率为24 GHz,功率可达到3.5 kW的回旋管陶瓷烧结系统,使用超导磁体,磁场强度为0.75 T^[13, 36]。该系统使用先进的电源技术,精确控制电源输出在-5~15 kV范围内,误差仅为±10 V,使得回旋管输出功率的精度控制在±50 W以内。此外,日本福井大学研制了基于回旋返波管和回旋振荡管的双频系统,系统实物如图5(b)所示,两支不同频率的回旋管通过传输线系统,将电磁波同时馈入反应腔体中,其中回旋返波管提供24 GHz、2.5 kW功率输出,回旋振荡管提供28 GHz、15 kW功率输出^[13, 37-38]。为进一步提升工作频率,

2006年福井大学在其研制的FU CW I号300 GHz连续波回旋管的基础上,搭建了300 GHz毫米波材料处理系统(如图5(c)所示),该系统包括回旋管工作系统、传输线系统与反应腔等^[39]。其中,回旋管使用10.9 Tesla超导磁体,最高工作电压16 kV,电流1 A,调整工作电压大小,可以得到连续波输出范围在500 W至3.5 kW之间。

2.2 等离子体增强化学气相沉积

等离子体增强化学气相沉积(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)是一种利用等离子体破坏气体分子并促进化学反应最终在固体表面沉积薄膜的技术。微波辅助等离子增强化学气相沉积(microwave assisted plasma enhanced chemical vapor deposition, MPCVD)是一种利用微波辐射激发等离子体进而进行PECVD的技术。MPCVD与直流或射频激发的PECVD相比,具有等离子体密度高,沉积速率快的优点,尤其在金刚石薄膜沉积方面,更是目前金刚石薄膜制备的重要技术手段。根



图5 回旋管系统:(a)基于输出频率24 GHz、功率3 kW的紧凑回旋管组装的陶瓷烧结系统;(b)双频率回旋器件应用系统;(c)基于输出频率300 GHz、输出功率3 kW连续波回旋管的材料处理系统

Fig. 5 The gyrotron system: (a) general view of the gyrotron system for ceramic sintering based on compact gyrotron assembly with 24-GHz/3-kW; (b) two-frequency gyro-device-based technological system; (c) general view of the technological system with the 300-GHz/3-kW gyrotron FU CW I

据等离子体对电磁波的吸收特性,其激发频率越高,能获得的等离子体密度越大,因此,毫米波激发等离子体被认为可以增加放电速率、提高效率,为PECVD提供更快的沉积速率。此外,提高频率的另外一个优点是可以精确控制电磁波波束激发产生的等离子形状和大小,并且能使其保持在自由空间或者材料表面位置,特别适用于对材料纯度要求高的制备领域。2008年,俄罗斯应用物理研究所报道了使用10 kW、30 GHz回旋管进行金刚石薄膜生长,薄膜生长具有高质量和高速率的工作特点,其搭建的系统框图和生长的金刚石显微照片如图6(a)、(b)所示^[40]。2011年,IAP-RAS报道了5 kW、24 GHz的毫米波功率源进行PECVD制取高纯硅的实验,制备得到高纯Si实物如图6(c)所示,相较于MPCVD,毫米波辅助PECVD具有更高的沉积速率与硅纯度,这

些优势得益于毫米波激发获得的高电离率以及极高的等离子体密度。同时,通过实验发现,提高功率可以使得等离子体密度持续增加^[41]。

为进一步研究不同频率激发的低温等离子体的特性,俄罗斯IAP-RAS开展了10 GHz、24 GHz、30 GHz、37 GHz、85 GHz、110 GHz等频率激发等离子体放电实验研究^[42-44]。此外,最近几年,IAP-RAS利用频率24 GHz、功率输出范围从0.1~5 kW的回旋管输出电磁波激发非平衡态等离子体并进行二氧化碳分解的实验研究^[45-46],取得了良好的试验效果。回旋管辐射电磁波激发微波等离子体分解CO₂实验装置与等离子体放电实验结果如图7所示。

2.3 材料分析

材料分析是毫米波功率应用中一类重要的应用,将毫米波辐射至被分析材料样品表面,可以激励材料的特殊响应,进而对材料特性进行分析。目前报道的利用毫米波进行材料分析应用有:动态核极化-核磁共振(dynamic nuclear polarization-nuclear magnetic resonance, DNP-NMR)波谱,电子自旋共振光谱(electron spin resonance spectroscopy, ESR),电声谱(radio acoustic spectroscopy, RAS),X射线检测磁共振(X-ray Detected Magnetic Resonance, XD-MR)测量,电子偶素的超精细分裂(hyperfine splitting (HFS) of Positronium (Ps))测量等。

(1)DNP-NMR是一种提高NMR光谱灵敏度的技术。在传统的核磁共振中,信号强度是由两个核自旋态之间的总体差决定的,这个差很小,并且在室温下受玻尔兹曼分布的限制,这限制了低浓度样

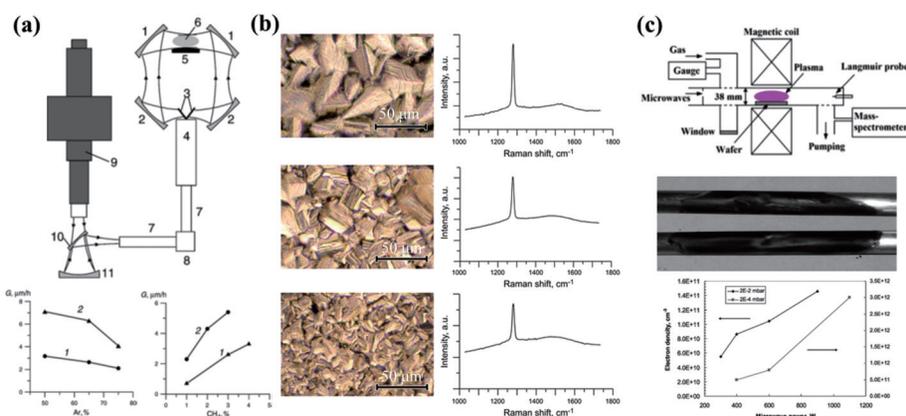


图6 原理图和显微照片:(a)基于回旋管的金刚石生长设备原理图;(b)不同比例的氩气、甲烷生长的金刚石薄膜表面的显微照片以及拉曼光谱;(c)24 GHz毫米波PECVD制备的高纯Si

Fig. 6 Schematic diagrams and microphotographs: (a) schematic diagrams of the gyrotron-based system for diamond growth; (b) microphotographs and Raman shift of the surface of the as-grown diamond films deposited at 50% Ar concentration and at various CH₄ concentrations; (c) high purity Si produced by 24 GHz MMW-PECVD

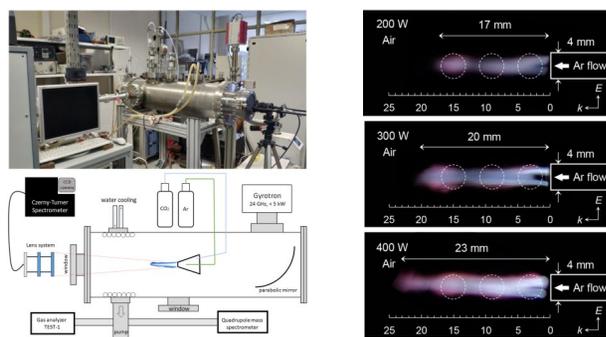


图7 回旋管辐射电磁波激发微波等离子体分解 CO_2 实验装置图与激发的等离子体照片

Fig. 7 Diagram of the experimental setup for CO_2 decomposition by microwave plasma excited by gyrotron and the photo of plasma structure

品的灵敏度。相比之下, DNP-NMR 使用电磁辐射将未配对电子的极化转移到附近的原子核进行自旋共振, 激发电子能级跃迁, 并使得电子与核相互作用, 使核磁共振信号强度增强, 进而可以实现低浓度分子的检测和复杂生物分子系统的研究。电磁波驱动的 DNP 也被公认为是最强有力的提高 NMR 信号灵敏度与分辨率的方法^[47]。在实际应用中, 电磁波信号的频率必须接近电子的拉莫频率(Larmor-Frequency)才能发生能量的转移, 而 NMR 为获得更高性能, 使用的磁场强度也越来越高。以 Bruker 销售的 NMR 设备为例, 其销售的 Ascend 400 型 NMR 谱仪采用 9.4 Tesla 超导磁体, 此时电子的拉莫频率约为 263 GHz, 位于毫米波频段。图 8(a) 是使用 40 GHz 和 263 GHz 的毫米波进行 DNP-NMR 的实验信号, 文献数据表明, 苯酚与氮氧双自由基的水溶液(产生共价键)浸渍到二氧化硅表面后, 9.4 Tesla 的 DNP 可以使 $^1\text{H} \rightarrow ^{13}\text{C}$ 交叉极化作用增强 50 倍^[48-50]。其中, 40 GHz 的辐射源使用的是速调管提供的 10 W 连续波信号, 而 263 GHz 辐射源使用的是回旋管提供的。

(2) ESR 光谱也被称为电子顺磁共振 (electron paramagnetic resonance, EPR) 光谱, 是一种用于研究含有未配对电子的化学和生物系统的光谱技术。ESR 光谱通常对样品施加磁场和电磁辐射, 从而引起未配对电子能级之间的跃迁。这导致了特定频率的电磁辐射的吸收或发射, 可以检测和分析, 以确定样品的信息。ESR 光谱的应用包括研究化学反应中的自由基和活性中间体、生物系统中金属离子及其配位环境的特征、研究材料的电子结构和性

质、研究抗氧化剂和其他参与氧化应激和疾病的分子的行为等。与其他光谱技术相比, ESR 光谱有几个优点, 能检测未配对电子并提供有关其环境的信息, 以及具有高灵敏度和非破坏性。图 8(b) 是日本福井大学报道的采用 154 GHz 毫米波进行激励的 ESR 波谱试验的系统结构, 得到了磁性材料样品的更高分辨率 ESR 光谱^[51]。

(3) RAS 是一种结合电磁波和声波来检测和量化不同基质中微量材料的非侵入性分析技术。它基于辐射诱导加热的概念, 通过向待测样品发射电磁脉冲, 导致待测样品吸收电磁波温度迅速升高, 产生瞬时压力波, 从而激发产生声波信号, 在微波波段又被称为微波热致超声波效应。RAS 技术包括以下步骤, 用高频电磁波照射样品, 使样品升温; 样品产生的热量会产生声波, 灵敏的麦克风可以探测到信号; 然后分析声音信号, 以确定样品的性质, 如它的组成、浓度和结构。RAS 与其他分析技术相比的优点包括非破坏性、高灵敏度和原位分析等。图 8(c) 是日本福井大学报道的 RAS 实验系统与测试信号, 实验中采用 263.2 GHz 毫米波。

(4) 电子偶素的超精细分裂是指电子偶素中两个紧密间隔的能级之间的能量差, 它们是由电子和正电子自旋之间的相互作用分裂产生的。由于电子磁矩和正电子磁矩的相互作用, 产生了超精细分裂, 这种相互作用导致电子偶素的能级分裂为两个能级, 这两个能级之间有一个很小的能量差。电子偶素的超精细分裂是原子物理中的一个重要指标, 它可以用来确定自然界的基本常数, 如精细结构常数和电子质量, 在量子电动力学理论的检验、反物质性质的探测等方面都有重要的应用。文献报道 Ps-HFS 频率约为 203 GHz, 位于毫米波频段, 传统方法均为间接测量。利用毫米波辐射进行激发测量, 有望成为一种 Ps-HFS 的直接测量手段, 提升 Ps-HFS 的测量精度。图 8(d) 是文献报道的利用毫米波激发进行 Ps-HFS 测量的实验系统图^[52]。

(5) XDMR 是一种结合 X 射线衍射和磁共振来研究材料性质和行为的技术。这项技术能够在原子水平上探测材料的磁性, 从而可以深入了解材料的电子和磁性行为。XDMR 使用 X 射线来激发样品中电子的自旋, 从而产生可以用 X 射线衍射检测到的磁共振信号。通过分析 X 射线衍射图案, 可以确定材料的原子和磁结构, 以及它如何响应外部刺激(如温度、压力或磁场)而变化。XDMR 有可能为复

杂材料(如高温超导体)的行为提供新的检测手段,并有助于开发具有特定磁性能的新材料。图8(e)是文献报道的利用毫米波激发进行XDMR测量的实验示意图^[52]。

目前,毫米波功率应用在材料分析领域研究最为广泛并得到商业化应用的是DNP-NMR。在商业化方面,Bruker公司已有商业化产品销售(如图9(a)所示)^[53],目前 Bruker 公司销售的 400 MHz DNP-NMR 采用 263 GHz 速调管、600 MHz DNP-NMR 采用 395 GHz 回旋管、800 MHz DNP-NMR 采用 527 GHz 回旋管、900 MHz DNP-NMR 采用 593 GHz 回旋管。在 DNP-NMR 研究中,美国 MIT 的起步最早,瑞士洛桑联邦理工学院(École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL)、日本福井大学、俄罗斯 RAS-IAP 都有相关研究报道,近年来国内电子科技大学也有相关研究开展的报道^[54-63]。据文献报道,MIT 相继研发了 140 GHz、250 GHz、330 GHz 和 460 GHz 等频率的回旋管用于 DNP-NMR 技术的研究^[64-69]。相比于等离子体加热和材料处理等应用,DNP-NMR 应用中对毫米波功率的需求较低,多数文献报道中采用的毫米波源均只有几十瓦的输出功率,但需要毫米波源具有一定的调频带宽。此外,由于核磁共振技术需要较长的时间进行采样与数据处理,对于毫米波源的稳定工作时间和功率稳定性有较高要求,有的需要能稳定工作几天甚至是一周,功

率输出的稳定度要求在 1% 以内。MIT 在 330 GHz 回旋管的实验研究中实现了 110 小时无中断的稳定输出^[66]。由于毫米波回旋管工作所需磁场强度高,需要超导磁体才能达到 DNP-NMR 研究中需求频率对应的工作磁场,因此整套 DNP-NMR 系统需要两套超导磁场,一套用于 NMR 工作,一套用于毫米波回旋管工作,导致系统体积较为庞大,因此在低频的 DNP-NMR 中,采用速调管等小型化毫米波源的研究也在不断开展和尝试^[70-72]。如图 9(b)所示是英国华威大学(University of Warwick)报道的 284 MHz DNP-NMR 系统,值得一提的是其毫米波源采用的就是 187 GHz 扩展相互作用速调管(extended interaction klystron, EIK),其使用的 EIK 可以在 187 GHz 输出 3 W 左右的连续波^[73]。图 9(c)~(e)展示的分别是基于回旋振荡管的 DNP-NMR 系统实物图。

应用于材料分析的毫米波功率源虽然所需功率较小,但是在要求频率可调同时须具有较高的功率与频率稳定性,因此对配套设备例如磁体与电源的精度要求更高。同时,由于回旋振荡管点频工作特性,目前回旋管连续可调谐依然是技术难点。目前较普遍的频率可调谐方式是通过调节磁场或者电压以调整工作模式的轴向模式数,同时,对于研究新型可调谐的准光谐振腔例如共焦相互作用腔等也是研究的新方向,有望实现频率连续可调。

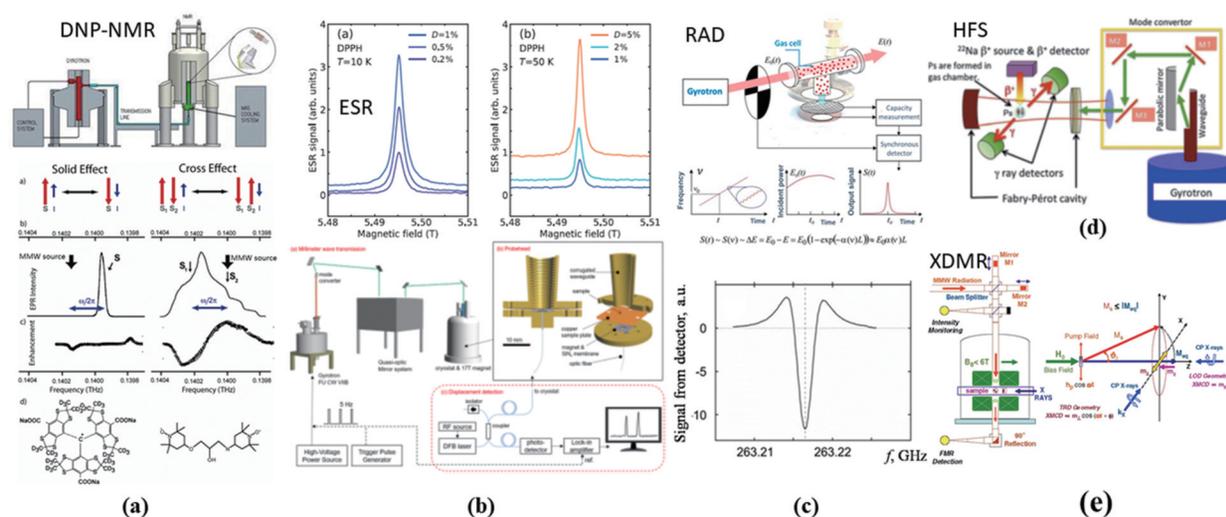


图8 (a) 魔角旋转 DNP-NMR 系统原理及其典型应用;(b) 基于回旋管的 ESR 波谱系统结构框图以及被探测样品的 ESR 谱线;(c) 无线电声学探测器(RAD)波普系统;(d) 正电子素超精细分裂(HFS)系统;(e) 基于 FU-II 回旋管的 X 射线检测磁共振(XDMR)

Fig. 8 (a) Magic Angle Spinning (MAS) DNP-NMR system; (b) schematic of the gyrotron FDESR system and ESR spectra of sample powder with different duty ratios; (c) principle of gyrotron-based RAD spectroscopy; (d) hyperfine splitting (HFS) system; (e) X-ray Detected Magnetic Resonance (XDMR) system

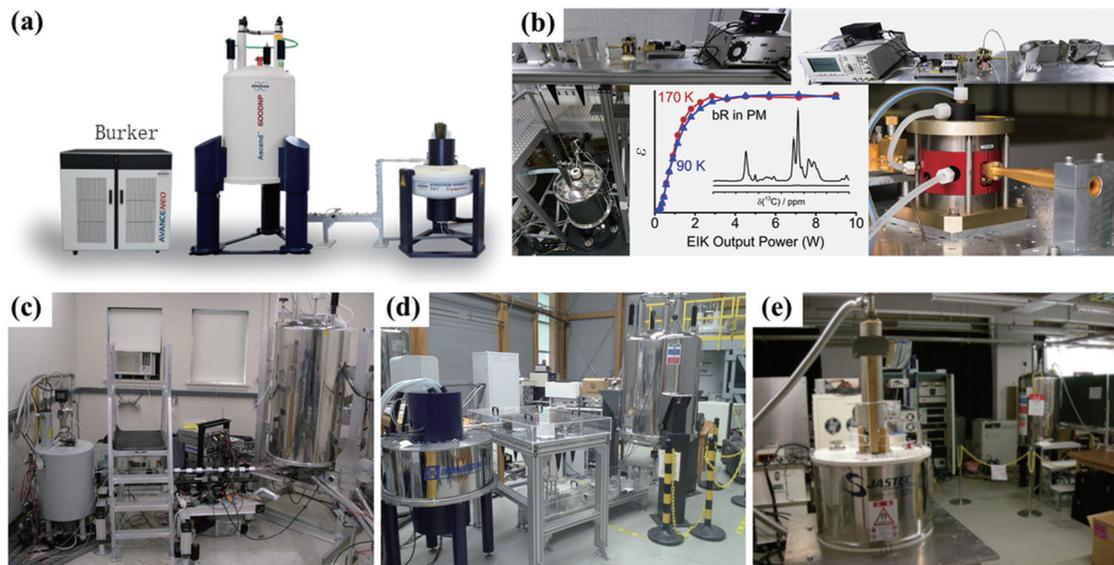


图9 (a)布鲁克商用的动态核极化磁共振系统;(b)使用EIK的DNP-NMR系统;(c)MIT基于460 GHz回旋管的DNP-NMR系统;(d)MIT搭建的配合布鲁克DNP探针的磁共振系统;(e)基于FU CW IV回旋管的200 MHz DNP-NMR系统

Fig. 9 (a) The DNP-NMR of Bruker; (b) the DNP-NMR of University of Warwick with EIK; (c) the DNP-NMR of MIT with 460 GHz gyrotron; (d) the NMR system with Bruker's DNP probe built by MIT; (e) 200 MHz DNP-NMR based on FU CW IV Gyrotron

3 生物效应应用

3.1 肿瘤消融

微波肿瘤消融是微波能在生物医学中的重要应用,其原理是使用天线对生物组织局部施加一个高频的电磁场,水分子等偶极分子和蛋白质分子会以极高频率振荡,摩擦生热并向周围传导,这会使得在很短的时间内达到局部65~107 °C的高温而最终杀死病变组织^[74-76]。该技术已实现产业化,目前临床使用较多的频率为915 MHz和2.45 GHz。根据电磁理论,915 MHz和2.45 GHz的波长分别为32 cm、12.24 cm,由于波长较长,在生物体中的趋肤深度大约在1~3 cm之间,使得消融病灶的精度降低,会伤害肿瘤附近的健康组织。而毫米波由于波长更短,因此趋肤深度更短,同样功率条件下的能量密度更高,更具技术优势。当频率大于50 GHz时,其趋肤深度小于1 mm,如图10(a)所示^[74]。

2013年,Perambur N.等人提出了毫米波子宫内膜消融术,分析了毫米波在肿瘤消融领域的技术优势,如图10(b)所示,在相同的功率输入情况下,毫米波消融肿瘤组织的速率要比普通微波消融高出几个数量级^[74]。2016年,Norio M.等人采用107 GHz和203 GHz毫米波辐射进行了小鼠局部肿瘤消融试验,到达小鼠病变位置处的功率为40 W左右,试验设备、过程以及肿瘤消融结果如图10(c)

所示,并且提出了使用毫米波辐射热疗加上光动力疗法(Hyperthermia and Photodynamic Therapy, PDT)的混合治疗方式,采用毫米波和657 nm光波相结合的方式,避免肿瘤组织的重新生长。实验结果表明频率越高可以获得更好的治疗效果,治疗效果曲线见图10(c)所示^[75]。

3.2 灭菌

早在19世纪60年代,便有学者尝试利用射频消除种子上的病原菌,其后利用微波进行灭菌的实验也屡有报道,但至今仍未有实用化案例,主要原因在于种子受到微波辐照处理时,种子含水量最高的胚芽吸收微波升温而受到伤害。病原菌多附在种子表面,毫米波频率更高,根据式(2),其透入种子的深度更浅,因此有望在杀灭表面病原菌的同时不损伤种子。2019年,台湾大学在中国电子协会第十九届全国微波能应用学术会议报道了使用24 GHz、600 W扩展互作用速调管对甘蓝种子中的黑腐病菌进行灭菌的实验研究,仅处理1秒钟,就可以将种子表面的病原菌降低99%,同时不伤害种子^[77]。

2021年,以色列阿里埃勒大学(Ariel University)报道了使用95 GHz回旋管对冠状病毒和脊髓灰质炎病毒进行照射灭菌,系统框图和效果如图11(b)所示。毫米波脉冲功率达到10 kW,对两种病毒进



图10 (a)趋肤深度与频率关系图;(b)从30 GHz到300 GHz在给定电磁波功率的情况,照射子宫内膜得到的每秒组织局部温升与2.45 GHz微波功率的温升比值曲线;(c)小鼠肿瘤消融试验图以及使用PDT和不同频率的毫米波热疗的混合疗法效果曲线图

Fig. 10 (a) Skin-depth (δ in mm) versus frequency (in GHz) of a wet tissue medium; (b) plot of frequency versus surface temperature-rise per second for a given EM power applied across 30 GHz through 300 GHz relative to conventional temperature-rise per second at microwaves (2.54 GHz) in the endometrial lining; (c) the experimental setup and instrumentation of tumor ablation, growth curves of the tumors (controlled and treated) after the irradiation at 107 GHz (left) and 203 GHz (right) followed by PDT

行2秒钟照射之后,使得病毒浓度分别减少了99.98%和99.375%^[78]。

3.3 主动拒止武器

基于毫米波能加热生物组织,且毫米波辐射方向性好的特点,美国提出了基于大功率毫米波的主动拒止武器(Active Denial System, ADS),并由美国雷神公司(Raytheon Company)为美国空军实验室进行研发。这种非致命武器系统被认为可以用于反恐等领域,用于在较远的距离外震慑和驱赶恐怖分子。对比微波2.45 GHz的波束,毫米波以其更短的波长导致更严重的趋肤效应,ADS系统通常采用95 GHz毫米波,该频率辐射达到人体皮肤深度约1/64英寸,并产生强烈的灼烧感,血管和神经系统位于这个皮肤深度之下,因此该辐射对血管和神经是无害的。同时,该频率光子能量低,辐射是非电离的,不足以影响细胞和分子结构。当辐射结束时,灼烧感就会结束。由于95 GHz是大气窗口频率,大气衰减小,当辐射功率达到10 kW级时,可以实现数公里外的人群驱赶和震慑。美国公布的ADS系统如图15所示,整个ADS系统可以安装在一辆军车上,包括毫米波源与天线等部分组成,毫米波功率源使用95 GHz回旋管^[79]。

4 其他应用

4.1 无线输能

为了更充分地利用太阳能,美国能源部等提出

在地球的静止同步轨道卫星上建设太阳能电站,充分收集太阳能并通过无线输能技术以电磁波的形式将电能送至地球。1963年,W. C. Brown使用2.45 GHz的磁控管实现了微波无线输能直升机,在15.2 m的空中利用无线传输的微波能量飞行10小时,且该系统获得了50%的整流效率,实现了首次完整的微波无线输能实验。无线输能应用领域广泛,还可以应用到各种难以直接获取到能量的工业领域中,例如无人机、无人值守传感器、工业机器人、电动汽车无线充电等,无线输能技术被认为是今后电力科技的发展方向。与微波相比,毫米波波长更短,其定向性更好,旁瓣更小,且天线等系统部件的体积可以大大缩小,如整流器和天线(Rectenna)^[80]。毫米波频段内的“大气窗口”频率,如35 GHz、45 GHz、94 GHz、140 GHz、220 GHz、303 GHz等,均可以用于无线输能应用。日本福井大学研究人员使用输出功率300 kW量级的303 GHz回旋管进行了相关的能量输出试验,验证了大功率毫米波源用于无线输能的优势,电磁波到直流的转换效率为2.17%,该系统如图13(a)所示,无线传输的距离达到3 m,天线的接收系统紧凑^[81]。接着日本筑波大学(University of Tsukuba)使用265 GHz回旋管进行了无线输能实验,实现0.83 m处0.47 mW的功率输出,电磁波到直流的转换效率为0.07%^[82],其实验系统如图13(b)所示。以色列 Ariel University 分别用400 mW、94 GHz固态源和5 kW、95 GHz脉

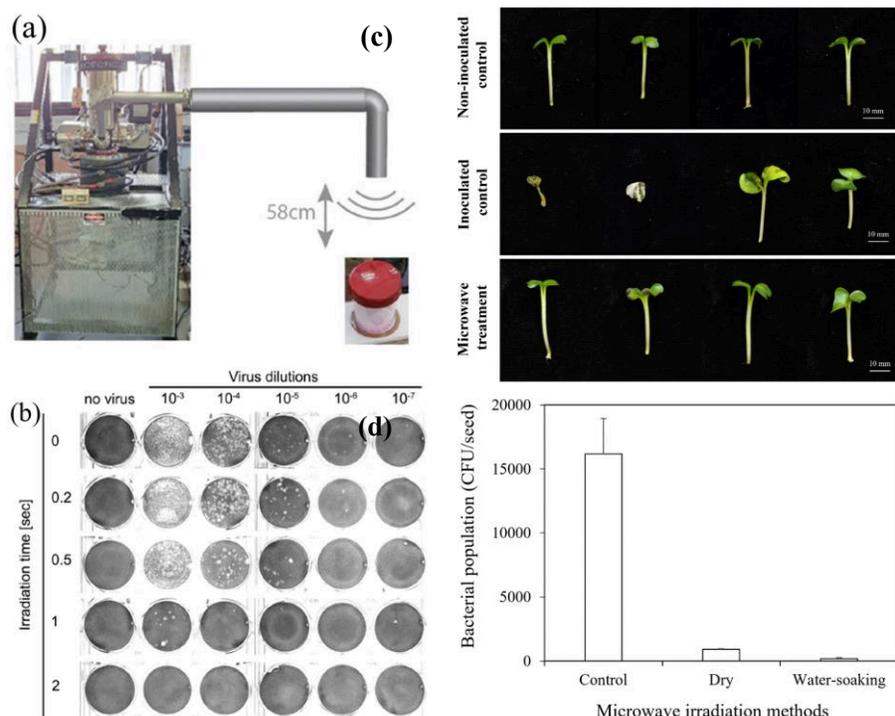


图 11 (a)毫米波灭杀病毒系统;(b)95 GHz毫米波对冠状病毒杀毒效果图;(c)甘蓝种子被 24 GHz、600 W 电磁波处理 1 秒种后的幼苗生长情形;(d)干燥与浸水情况下使用微波处理种子的对照试验

Fig. 11 (a) Millimeter wave antiviral system; (b) results of 95 GHz irradiating coronavirus; (c) the seedling growth of cabbage seeds treated with 24 GHz, 600 W microwave for 1 second; (d) the comparison experiment by microwave to treat seeds under dry and water-soaking

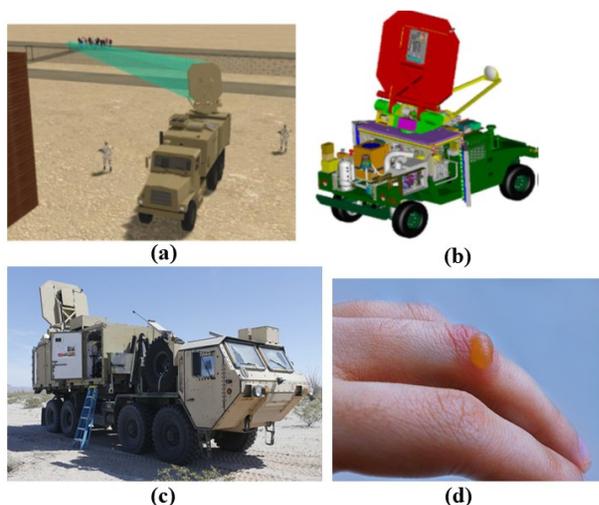


图 12 (a)主动拒止武器系统示意图;(b)军用搭载主动拒止武器的载具概念图;(c)主动拒止武器装甲车;(d)灼烧皮肤组织

Fig. 12 (a) Schematic view of ADS system; (b) schematic of ADS on a military vehicle; (c) active denial of weapons armored vehicles; (d) burning of skin tissue

冲输出的回旋管进行毫米波无线输能应用试验,对比试验验证了 W 波段的电磁波转换到直流电能的效率在 15%~20% 之间^[83],其搭建的能量传输系统

如图 13(c)所示。

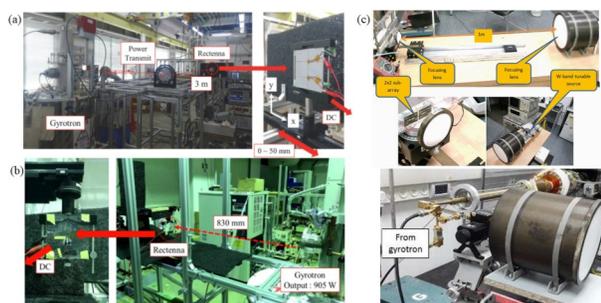


图 13 (a)使用 303 GHz 回旋管无线能量传输试验系统;(b)使用 265 GHz 回旋管无线能量传输系统;(c)使用 95 GHz 回旋管无线能量传输系统

Fig. 13 (a) Experimental setup of wireless power transfer with the 303 GHz gyrotron; (b) measurement setup of WPT with the 265 GHz gyrotron installed at 830 mm from the rectenna; (c) the WPT experimental setup with the W-band gyrotron

4.2 岩石钻井

利用红外激光定向穿透岩石的研究已经进行了几十年,但一直没有实际实现。在岩石钻井中使用红外激光的最大难点是无法有效地将能量与岩

石表面耦合,同时提取向外流动的小颗粒。由于小颗粒的瑞利散射损失规模为 $1/\lambda^4$,因此短红外波长很容易被微米和亚微米大小的粒子散射。美国 MIT 的 Paul Woskov 等人提出了毫米波钻孔技术,毫米波波长比红外长,远大于钻井过程中产生小颗粒的尺寸,可以有效降低粒子散射的影响,其钻探技术原理如图 14(a)所示。此外,以回旋管为代表的大功率辐射源与激光相比具有更高的平均功率和效率,通过准光传输,可以有效地引导毫米波波束跨越井眼,并实现远距离传输。国际上,美国 MIT 报道了采用 28 GHz、10 kW 毫米波对花岗岩的钻孔实验,花岗岩可以被烧熔,其表面平衡温度约为 $2710 \pm 120^\circ\text{C}$ ^[84],其烧熔系统与花岗岩烧熔前后变化如图 14(b)所示。国内,电子科技大学与中国科学院近代物理研究所报道了 45 GHz、15 kW 的石头熔解实验,在石头样品表面最大功率密度达到 1650 W/cm^2 、最高温度达到 2032.6°C ,该技术被认为可以用于地下深井钻探,开发地热能^[85],其配合准光传输系统以及岩石烧熔系统如图 14(c)所示。

4.3 光束能量推进器

在传统的宇宙飞船中,燃料总是保存在船上。因此,它必须随着负载质量、速度增量和行驶距离的增加而增加。因此,有效载荷比是有限的。例

如,当一枚化学火箭被发射到地球静止轨道,其有效载荷质量最大仅为总质量的 1%。1972 年,由 Kantrowitz A. 提出利用无线功率传输(Wireless Power Transfer, WPT)通过电磁波束传递能量推动火箭的设计,这种装置也被称为光束能量推进器(Beamed Energy Propulsion, BEP),有诸多基于激光和微波的 BEP 工作已开展^[86]。

日本福井大学、东京大学和日本量子与辐射科学技术研究所(QST)自 2003 年起持续开展相关研究工作^[87-88]。在 2003 年的报道中,采用 170 GHz 回旋管,在峰值功率 600 kW、脉宽 1.25 ms、重复频率 100 Hz、平均功率 75 kW 条件下,将 109 g 和 126 g 火箭模型推高了 1.2 m^[89],系统产生推力的原理如图 15(a)所示,其推进器模型与实物如图 15(b)所示。在 2018 年的报道中,采用 170 GHz 回旋管,在束流功率 638 kW、光束半径 20.4 mm、脉宽 0.4~1.2 ms、重复频率 100 Hz 的条件下实现了最大耦合效率 204 N/MW 并产生 71 mNs/pulse 的推力^[90]。

5 总结与展望

本文总结了毫米波功率应用的发展状况,主要包括:聚变等离子体加热与诊断、陶瓷烧结、等离子体增强化学气相沉积、材料分析、肿瘤消肿、灭菌、

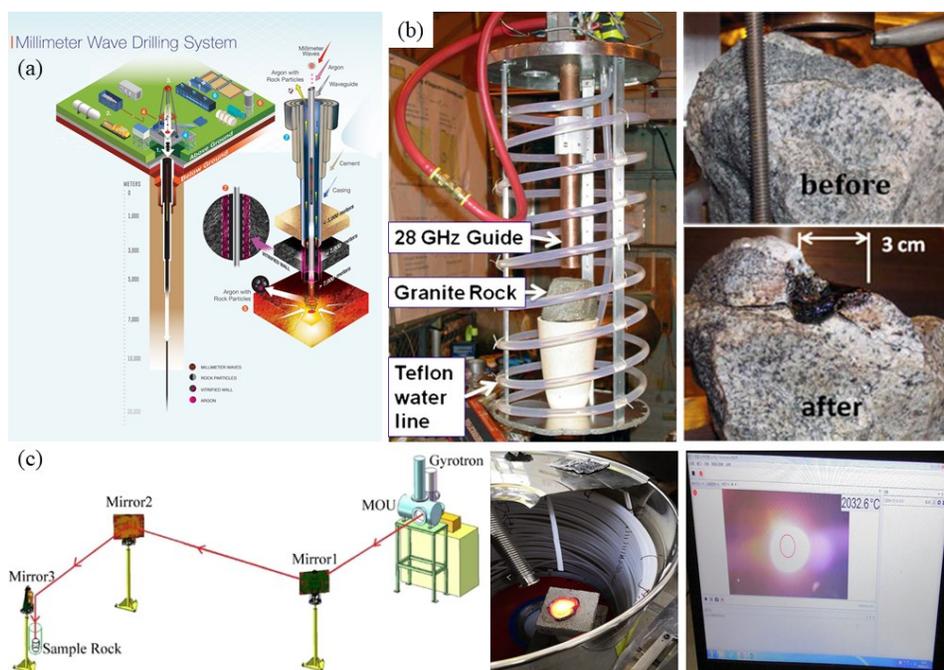


图 14 (a)毫米波钻探技术系统;(b)基于回旋管毫米波花岗岩烧熔系统及其烧熔前后变化图;(c)配合准光传输回旋管岩石烧熔系统

Fig. 14 (a) Millimeter wave drilling system; (b) internal configuration of the rock exposure test chamber and photos of the peaked ridged surface ablated away by the 28 GHz gyrotron beam; (c) scheme of the quasi-optical transmission line for melting rock

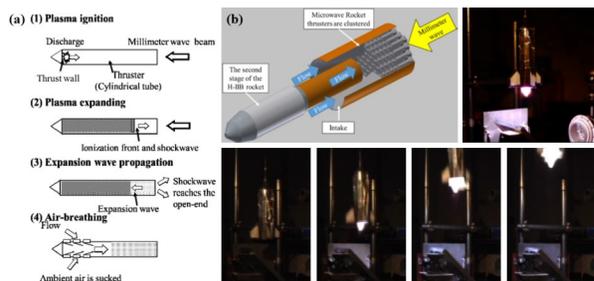


图 15 (a) 光束能量推力产生过程; (b) 微波火箭模型以及 109 g 火箭模型微波驱动实物图

Fig. 15 (a) Thrust generation process; (b) the schematic image of Japanese H-IIIB and the 109 g model rocket launched in a multi-pulse operation

主动拒止武器、无线输能、岩石钻井、光束能量推进器等。目前以上应用大部分仍处于研究阶段,少数应用(如材料分析中的 DNP-NMR)已进入产品转化阶段并实现商品化。

现阶段,制约毫米波功率应用发展的主要瓶颈是缺乏类似磁控管的小型化经济型毫米波功率源。上文综述中可知,目前毫米波功率应用中主要采用的功率源是回旋管,回旋管是一种基于自由电子在磁场中的回旋谐振受激辐射机理的真空电子器件,其输出频率与电子在磁场中的回旋频率相关,产生 30 GHz 的辐射输出需要约 1.1 Tesla 的磁场,通常这种磁场需要由超导磁体提供,导致系统体积庞大,使用成本高。因此,研制小型化经济型毫米波功率源是推动毫米波功率应用发展的关键。扩展互作用速调管具有体积小巧的优势,在中小功率毫米波功率应用中,逐渐被引入,Bruker 公司销售的 400 MHz DNP-NMR 系统中就采用 263 GHz 速调管替代了回旋管。但在大功率毫米波功率应用中,回旋管目前仍无可取代,因此研制小型化经济型回旋管称为近年来回旋管研究中的一个新方向,探索的技术途径包括采用谐波工作降低所需工作磁场^[91-92]、采用室温非超导磁体^[93-97]、降低器件工作电压^[69, 98-100]等。

综上所述,得益于毫米波的短波长特性,毫米波功率应用与微波功率应用相比,具有诸多独特的优势。目前毫米波功率应用已经获得了科研工作者的广泛关注并已开展持续研究,且已有应用实现商业化趋势。随着毫米波功率源的发展与普及,毫米波功率应用将有望在物理科学、材料科学、生物医学等更多学科领域得到应用,越来越多应用场景也将被开发和利用。

References

- [1] Osepchuk, J M. Microwave power applications [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3):975-985.
- [2] Thostenson E T, Chou T W. Microwave processing: fundamentals and applications [J]. *Composites Part A Applied Science & Manufacturing*, 1999, **30**(9):1055-1071.
- [3] Brosnan K H, Messing G L, Agrawal D K. Microwave sintering of alumina at 2.45 GHz [C]. 104th Meeting of the American-Ceramic-Society, 2003.
- [4] Liu Yanjing, He Jiawei, Zhang Nan, *et al.* Advances of microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition in fabrication of carbon nanotubes: a review [J]. *Journal of Materials Science*, 2021, **56**(22): 12559-12583.
- [5] Renaux M, Méresse D, Pellé J, *et al.* Mechanical modeling of microwave sintering and experimental validation on an alumina powder [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, **41**(13): 6617-6625.
- [6] Jones M I, Valecillos M, Hirao K, *et al.* Densification Behavior in Microwave-Sintered Silicon Nitride at 28 GHz [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2001, **84**(10): 2424-2426.
- [7] Egorov S V, Ereemeev A G, Kholoptsev V V, *et al.* Rapid microwave sintering of zinc oxide-based varistor ceramics [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, **41**(13): 6508-6515.
- [8] Sintsov S, Vodopyanov A, Mansfeld D. Measurement of electron temperature in a non-equilibrium discharge of atmospheric pressure supported by focused microwave radiation from a 24 GHz gyrotron [J]. *AIP Advances*, 2019, **9**(10): 105009.
- [9] Mansfeld D, Sintsov S, Chekmarev N, *et al.* Conversion of carbon dioxide in microwave plasma torch sustained by gyrotron radiation at frequency of 24 GHz at atmospheric pressure [J]. *Journal of CO2 Utilization*, 2020, **40**: 101197.
- [10] Thielens A, Bell D, Mortimore D B, *et al.* Exposure of Insects to Radio-Frequency Electromagnetic Fields from 2 to 120 GHz [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1): 3924.
- [11] Glyavin M Y, Idehara T, Sabchevski S P. Development of THz Gyrotrons at IAP RAS and FIR UF and Their Applications in Physical Research and High-Power THz Technologies [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, **5**(5): 788-797.
- [12] YANG Nan, DU Hai-Wei. Diagnosis plasma density and collisions by terahertz time-domain spectroscopy [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨楠, 杜海伟. THz 时域光谱诊断激光等离子体密度和碰撞频率 [J]. *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(3): 237-240.
- [13] Glyavin M, Sabchevski S, Idehara T, *et al.* Gyrotron-Based Technological Systems for Material Processing—Current Status and Prospects [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, **41**(8): 1022-1037.
- [14] Gold S H, Nusinovich G S. Review of high-power microwave source research [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, **68**(11): 3945-3974.
- [15] Idehara T, Agusu L, Ogawa I, *et al.* Development of medium power sub-THz CW gyrotrons for high power THz

- spectroscopy [C]. 2009 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IEEE, 2009.
- [16] Griffin R G, Swager T M, Temkin R J. High frequency dynamic nuclear polarization: New directions for the 21st century [J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2019, **306**: 128–133.
- [17] Jones M I, Valecillos M, Hirao K, *et al.* Densification Behavior in Microwave-Sintered Silicon Nitride at 28 GHz [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2001, **84** (10): 2424–2426.
- [18] Link G, Feher L, Thumm M, *et al.* Sintering of advanced ceramics using a 30-GHz, 10-kW, CW industrial gyrotron [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, **27** (2): 547–554.
- [19] Kariya T, Minami R, Imai T, *et al.* Development of High Power Gyrotrons for Advanced Fusion Devices [J]. *Nuclear Fusion*, 2019, **59**(6): 10.
- [20] Thumm M K A, Denisov G G, Sakamoto K, *et al.* High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive [J]. *Nuclear Fusion*, 2019, **59**(0730017).
- [21] Thumm M. State-of-the-Art of High-Power Gyro-Devices and Free Electron Masers [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, **41**(1): 1–140.
- [22] ZHANG Shan, XUE Qian-Zhong, LIU Gao-Feng, *et al.* Beam-wave interaction analysis of a megawatt coaxial cavity gyrotron for controlled thermonuclear fusion [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张珊, 薛谦忠, 刘高峰, 等. 用于受控热核聚变的兆瓦级同轴腔回旋振荡器的注-波相互作用分析 [J]. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(5): 613–620.
- [23] MA Guo-Wu, HU Lin-Lin, ZHUO Ting-Ting, *et al.* Design of a TE₃₄, 10 mode cylindrical cavity for MW level gyrotron [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (马国武, 胡林林, 卓婷婷, 等. 用于 MW 级回旋管的 TE₃₄, 10 模圆柱高频腔体设计. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(1): 15–20.
- [24] MA Guo-Wu, HU Lin-Lin, ZHUO Ting-Ting, *et al.* Development and test of 140GHz / 50KW Gyrotron [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (马国武, 胡林林, 卓婷婷, 等. 140GHz/50kW 回旋管的研制与测试 [J]. *红外与毫米波学报*), 2021, **40**(2): 189–197.
- [25] CHEN Pu, ZENG Xu, ZHANG Yi-Chi, *et al.* Design of 170 GHz TE₂₅, 10 mode quasi-optical mode converter for MW-level gyrotrons [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈璞, 曾旭, 张亦弛, 等. 170 GHz 兆瓦级回旋管 TE₂₅, 10 准光模式变换器设计. *红外与毫米波学报*), 2023, **42**(3): 350–355.
- [26] Korsholm S B, Chambon A, Gonçalves B, *et al.* ITER collective Thomson scattering—Preparing to diagnose fusion-born alpha particles [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, **93**(10): 103539.
- [27] Meo F, Stejner M, Salewski M, *et al.* First results and analysis of collective Thomson scattering (CTS) fast ion distribution measurements on ASDEX Upgrade [J]. *Journal of physics. Conference series*, 2010, **227**(1): 12010.
- [28] Kimrey H D, Janney M A, Becher P F. Techniques for ceramic sintering using microwave energy [C], 1987 Twelfth International Conference on Infrared and Millimeter Waves, IEEE, 1987.
- [29] Hirota M, Valecillos M C, Brito M E, *et al.* Grain growth in millimeter wave sintered silicon nitride ceramics [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, **24**(12): 3337–3343.
- [30] Egorov S V, Ereemeev A G, Kholoptsev V V, *et al.* Additive Manufacturing of Ceramic Products Based on Millimeter-Wave Heating [J]. *IOP conference series. Materials Science and Engineering*, 2017, **678**(1): 12022.
- [31] Birnboim A, Gershon D, Calame J, *et al.* Comparative study of microwave sintering of zinc oxide at 2.45, 30, and 83 GHz [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1998, **81**(6): 1493–1501.
- [32] Link G, Feher L, Thumm M, *et al.* Sintering of advanced ceramics using a 30-GHz, 10-kW, CW industrial gyrotron [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, **27** (2): 547–554.
- [33] Kikunaga T, Asano H, Yasojima Y, *et al.* A 28 GHz gyrotron with a permanent magnet system [J]. *International Journal of Electronics*, 1995, **79**(5): 655–663.
- [34] Bykov Y V, Ereemeev A G, Glyavin M Y, *et al.* Millimeter-Wave Gyrotron Research System. I. Description of the Facility [J]. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2019, **61**(10): 752–762.
- [35] Bykov Y V, Egorov S V, Ereemeev A G, *et al.* Millimeter-Wave Gyrotron System for Research and Application Development. Part 2. High-Temperature Processes in Polycrystalline Dielectric Materials [J]. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2019, **61**(11): 787–796.
- [36] Mitsudo S, Hoshizuki H, Matsuura K, *et al.* High power millimeter and submillimeter wave material processing. *Infrared and Millimeter Waves, Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on 2004 and 12th International Conference on Terahertz Electronics*, IEEE, 2004.
- [37] Samsonov S V, Denisov G G, Bratman V L, *et al.* Frequency-Tunable CW Gyro-BWO with a Helically Rippled Operating Waveguide [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, **32**(3): 884–889.
- [38] Denisov G, Bykov Y, Ereemeev A, *et al.* High Efficient Gyrotron-Based Systems for Materials Processing [C] IEEE International Vacuum Electronics Conference, IEEE, 2007.
- [39] Mitsudo S, Hoshizuki H, Idehara T, *et al.* Development of material processing system by using a 300 GHz CW gyrotron [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2006, **51**: 549–552.
- [40] Vikharev A L, Gorbachev A M, Kozlov A V, *et al.* Microcrystalline diamond growth in presence of argon in millimeter-wave plasma-assisted CVD reactor [J]. *Diamond and Related Materials*, 2008, **17**(7–10): 1055–1061.
- [41] Vodopyanov A V, Golubev S V, Mansfeld D A, *et al.* Experimental investigations of silicon tetrafluoride decomposition in ECR discharge plasma [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, **82**(6): 63503.
- [42] Sintsov S, Vodopyanov A, Mansfeld D. Measurement of electron temperature in a non-equilibrium discharge of atmospheric pressure supported by focused microwave radiation from a 24 GHz gyrotron [J]. *AIP Advances*, 2019, **9** (10): 105009.
- [43] Cook A, Shapiro M, Temkin R. Pressure dependence of plasma structure in microwave gas breakdown at 110 GHz [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(1): 11504.
- [44] Sidorov A V, Razin S V, Tsvetkov A I, *et al.* Gas break-

- down by a focused beam of CW THz radiation [C]. 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS), IEEE, 2017.
- [45] Sintsov S, Tabata K, Mansfeld D, *et al.* Optical emission spectroscopy of non-equilibrium microwave plasma torch sustained by focused radiation of gyrotron at 24 GHz [J]. *Journal of Physics D—Applied Physics*, 2020, **53**: 305203.
- [46] Mansfeld D, Sintsov S, Chekmarev N, *et al.* Conversion of carbon dioxide in microwave plasma torch sustained by gyrotron radiation at frequency of 24 GHz at atmospheric pressure [J]. *Journal of CO2 Utilization*, 2020, **40**: 101197.
- [47] Nanni E A, Barnes A B, Griffin R G, *et al.* THz Dynamic Nuclear Polarization NMR [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, **1**(1): 145–163.
- [48] Rankin A G M, Trébosc J, Pourpoint F, *et al.* Recent developments in MAS DNP-NMR of materials [J]. *Solid State Nuclear Magnetic Resonance*, 2019, **101**: 116–143.
- [49] Lock H, Wind R A, Maciel G E, *et al.* A study of ¹³C-enriched chemical vapor deposited diamond film by means of ¹³C nuclear magnetic resonance, electron paramagnetic resonance, and dynamic nuclear polarization [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1993, **99**(5): 3363–3373.
- [50] Lesage A, Lelli M, Gajan D, *et al.* Surface Enhanced NMR Spectroscopy by Dynamic Nuclear Polarization [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, **132**(44): 15459–15461.
- [51] Takahashi H, Ishikawa Y, Okamoto T, *et al.* Force detection of high-frequency electron spin resonance near room temperature using high-power millimeter-wave source gyrotron [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, **118**(2): 22407.
- [52] Idehara T, Sabchevski S P. Development and Applications of High-Frequency Gyrotrons in FIR FU Covering the sub-THz to THz Range [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, **33**(7): 667–694.
- [53] Temkin R J. Development of terahertz gyrotrons for spectroscopy at MIT [J]. *Terahertz Science and Technology*, 2014, **7**(1): 1–9.
- [54] Nowak K. The gyrotron for DNP-NMR spectroscopy: A review [J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical sciences*, 2022, **70**(1): e140354.
- [55] CHANG Shao-Jie, WU Zhen-Hua, HUANG Jie, *et al.* The research progress of vacuum electron device in terahertz band [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (常少杰, 吴振华, 黄杰, 等. 真空电子太赫兹器件研究进展. *红外与毫米波学报*). 2022, **41**(01): 85–102.
- [56] GUAN Xiaotong, FU Wenjie, LU Dun, *et al.* Experiment of a High-Power Sub-THz Gyrotron Operating in High-Order Axial Modes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, **66**(6): 2752–2757.
- [57] SONG Tong, QI Xu, YAN Zheng, *et al.* Experimental Investigations on a 500GHz Continuously Frequency-Tunable Gyrotron [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, **42**(8): 1232–1235.
- [58] Blank M, Borchard P, Cauffman S, *et al.* Demonstration of a 593 GHz gyrotron for DNP [C], International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Nagoya, 2018: 1–2.
- [59] Idehara T, Sabchevski S P. Development and Application of Gyrotrons at FIR UF [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, **46**(7): 2452–2459.
- [60] Idehara T, Kosuga K, Agusu L, *et al.* Continuously Frequency Tunable High Power Sub-THz Radiation Source—Gyrotron FU CW VI for 600 MHz DNP-NMR Spectroscopy [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2010, **31**(7): 775–790.
- [61] Idehara T, Kosuga K, Agusu L, *et al.* Gyrotron FU CW VII for 300MHz and 600MHz DNP-NMR Spectroscopy [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2010, **31**(7): 763–774.
- [62] Kuleshov A, Ishikawa Y, Tatematsu Y, *et al.* Low-Voltage Operation of the Double-Beam Gyrotron at 400 GHz [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, **67**(2): 673–676.
- [63] CAO Yi-Chao, CHEN Qiang, ZHANG Chen, *et al.* Investigations on an improved transmission line for THz DNP-NMR spectroscopy [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (曹毅超, 陈强, 张晨, 等. 应用于动态核极化核磁共振系统的改进型传输线研究 [J]. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(6): 690–694.
- [64] Becerra L R, Gerfen G J, Temkin R J, *et al.* Dynamic nuclear polarization with a cyclotron resonance maser at 5 T [J]. *Phys Rev Lett.*, 1993, **71**(21): 3561–3564.
- [65] Bajaj V S, Farrar C T, Hornstein M K, *et al.* Dynamic nuclear polarization at 9T using a novel 250GHz gyrotron microwave source [J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2003, **160**(2): 85–90.
- [66] Torrezan A C, Shapiro M A, Sirigiri J R, *et al.* Operation of a Continuously Frequency-Tunable Second-Harmonic CW 330-GHz Gyrotron for Dynamic Nuclear Polarization [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, **58**(8): 2777–2783.
- [67] Hornstein M K, Bajaj V S, Griffin R G, *et al.* Continuous-wave operation of a 460-GHz second harmonic gyrotron oscillator [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, **34**(3): 524–533.
- [68] Torrezan A C, Han S, Mastovsky I, *et al.* Continuous-Wave Operation of a Frequency-Tunable 460-GHz Second-Harmonic Gyrotron for Enhanced Nuclear Magnetic Resonance [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, **38**(6SI1): 1150–1159.
- [69] Hornstein M K, Bajaj V S, Griffin R G, *et al.* Efficient Low-Voltage Operation of a CW Gyrotron Oscillator at 233 GHz [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2007, **35**(1): 27–30.
- [70] CHEN Shu-Yuan, RUAN Cun-Jun, WANG Yong, *et al.* Interaction system of W-band sheet beam EIK [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈姝媛, 阮存军, 王勇, 等. W波段带状注扩展相互作用速调管注波相互作用系统. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(2): 230–235.
- [71] XU Che, MENG Lin, YIN Yong, *et al.* Analysis of oscillation-starting characteristics in millimeter wave extended interaction oscillators [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐彻, 蒙林, 殷勇, 等. 毫米波扩展相互作用振荡器的起振特性研究. *红外与毫米波学报*), 2021, **40**(5): 627–633.
- [72] LEI Yan-Ming, YAN Yang, FU Wen-Jie. 8 mm radial extended interaction oscillator [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (雷颜铭, 鄢扬, 傅文杰. 8mm 径向扩展相互作用振荡器. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(4): 493–496.

- [73] Kemp T F, Dannatt H R W, Barrow N S, *et al.* Dynamic Nuclear Polarization enhanced NMR at 187 GHz/284 MHz using an Extended Interaction Klystron amplifier[J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2016, **265**: 77–82.
- [74] Neelakanta P S, Sharma B. Conceiving THz Endometrial Ablation: Feasibility, Requirements and Technical Challenges [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, **3**(4): 402–408.
- [75] Miyoshi N, Idehara T, Khutoryan E, *et al.* Combined Hyperthermia and Photodynamic Therapy Using a Sub-THz Gyrotron as a Radiation Source [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2016, **37**(8): 805–814.
- [76] PAN Yuan-Yuan, WANG Li-Na, LIU Jian-Wei, *et al.* Design and experiments of 94 GHz Gyrotron for non-lethal biological effects of millimeter wave radiation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (潘媛媛, 王丽娜, 刘建卫, 等. 用于毫米波辐射非致命生物效应的 94 GHz 回旋管设计与实验 [J]. *红外与毫米波学报*), 2020, **39**(2): 163–168.
- [77] LIAO Cheng-hsiang, TSAI Yu-fang, KO Chiun-cheng, *et al.* Study on eliminating *Xanthomonas campestris pv. campestris* from cabbage seeds by high frequency microwave [C]. The 19th National Academic Conference on Microwave Energy Applications (廖证翔, 蔡有方, 柯俊成, 等. 以高频微波消除甘蓝种子之黑腐病菌之研究 [C]. 第十九届全国微波能应用学术会议). 2019, 1–4.
- [78] Kaczmarczyk L S, Marsay K S, Shevchenko S, *et al.* Corona and polio viruses are sensitive to short pulses of W-band gyrotron radiation [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, **19**: 3967–3972.
- [79] Kumar N, Singh U, Singh T P, *et al.* A Review on the Applications of High Power, High Frequency Microwave Source: Gyrotron [J]. *Journal of Fusion Energy*, 2011, **30**(4): 257–276.
- [80] Koert P, Cha J T. Millimeter wave technology for space power beaming [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1992, **40**(6): 1251–1258.
- [81] Sei M, Shunsuke M, Kohei S, *et al.* Development of Sub-Terahertz Rectenna Using Gyrotron [C]. 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2018, pp. 129–131.
- [82] Mizojiri S, Takagi K, Shimamura K, *et al.* Demonstration of Sub-Terahertz Coplanar Rectenna using 265 GHz Gyrotron [C]. 2019 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2019, pp.409–412.
- [83] Ettinger A, Pilosoff M, Litvak B, *et al.* Characterization of a Schottky Diode Rectenna for Millimeter Wave Power Beaming Using High Power Radiation Sources [J]. *Acta physica Polonica A.*, 2017, **131**(5): 1280–1285.
- [84] Woskov P, Michael P. Millimeter-Wave Heating Radiometry and Calorimetry of Granite Rock to Vaporization [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, **33**(1): 82–95.
- [85] Liu J, Guo J, Wang L, *et al.* Design and Experimental Research of 45-GHz Quasi-optical Transmission Line for Melting Rock [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2022, **43**(3–4): 213–224.
- [86] Kantrowitz A. Propulsion to Orbit by Ground-Based Laser [J]. *Astronaut. Aeronaut.*, 1972, **10**: 34–35.
- [87] Komurasaki K, Tabata K. Development of a Novel Launch System Microwave Rocket Powered by Millimeter-Wave Discharge [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 2018(10):1–9.
- [88] Glyavin M Y, Denisov G G, Zapevalov V E, *et al.* Terahertz gyrotrons: State of the art and prospects [J]. *Journal of Communications Technology & Electronics*, 2014, **59**(8): 792–797.
- [89] Masafumi F, Kimiya K, Yusuke N, *et al.* Rocket Propulsion Powered Using a Gyrotron [J]. *Journal of Energy and Power Engineering*, 2017, **11**(6): 363–371.
- [90] Fukunari M, Yamaguchi T, Nakamura Y, *et al.* Thrust generation experiments on microwave rocket with a beam concentrator for long distance wireless power feeding [J]. *Acta Astronautica*, 2018, **145**: 263–267.
- [91] Saito T, Yamada N, Ikeuti S, *et al.* Generation of high power sub-terahertz radiation from a gyrotron with second harmonic oscillation [J]. *Physics of Plasmas*, 2012, **19**(6): 63106.
- [92] Bandurkin I V, Fokin A P, Glyavin M Y, *et al.* Demonstration of a Selective Oversized Cavity in a Terahertz Second-Harmonic Gyrotron [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2020, **41**(9): 1412–1415.
- [93] Li H, Xie Z, Wang W, *et al.* A 35-GHz low-voltage third-harmonic gyrotron with a permanent magnet system [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2003, **31**(2): 264–271.
- [94] Proyavin M D, Morozkin M V, Manuilov V N, *et al.* Results of the Study of a New Generation Technological Gyrotron System with High Power and Efficiency [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2023, **44**(1): 148–151.
- [95] Lu D, Fu W, Han M, *et al.* Design and Preliminary Experiment of Room-Temperature Bitter Magnet for Compact Gyrotron [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2023, **70**(6): 2719–2724.
- [96] Sun D, Huang Q, Hu L, *et al.* A CW, 94 GHz Second Harmonic Gyrotron with a Continuous Operation Solenoid Cooled by Water [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2021, **42**(12): 1105–1115.
- [97] Pilosoff M, Einat M. 95-GHz Gyrotron With Room Temperature DC Solenoid [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, **65**(8): 3474–3478.
- [98] Lu D, Fu W, Fedotov A, *et al.* Ultimate transverse power of pulsed low-voltage gyrotron beam [J]. *Physics of Plasmas*, 2022, **29**(9): 93107.
- [99] Bratman V L, Fedotov A E, Kalynov Y K, *et al.* Smooth Wideband Frequency Tuning in Low-Voltage Gyrotron with Cathode-End Power Output [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, **64**(12): 5147–5150.
- [100] Glyavin M Y, Zavolskiy N A, Sedov A S, *et al.* Low-voltage gyrotrons [J]. *Physics of Plasmas*, 2013, **20**(3): 33103.