太赫兹宽带调频脉冲回旋管

戚向波, 杜朝海*, 潘石, 刘濮鲲*

北京大学信息科学技术学院, 北京 100871

* 通信作者. E-mail: duchaohai@pku.edu.cn, pkliu@pku.edu.cn

收稿日期: 2016-11-23; 接受日期: 2017-03-02; 网络出版日期: 2017-08-14

国家自然科学基金 (批准号: 61531002, 61522101, 61471007)、北京市科技新星计划 (批准号: Z161100004916057) 和华中科技大学脉冲强磁场实验装置开放课题 (批准号: 2015KF13) 资助项目

摘要 回旋管基于相对论电子回旋脉塞原理工作, 可在毫米波 – 太赫兹频段产生高功率相干电磁辐射. 脉冲磁体体积小, 易产生强磁场, 相比于超导磁体可极大地降低回旋管系统体积并提供电子回旋所需的强磁场, 使回旋管在兼具小型化特性的同时其辐射频率有望突破 1 THz. 传统脉冲磁体回旋管通常采用开放腔式电路高 Q 值单频点工作, 需要近似稳恒的磁场, 使得脉冲磁体仅在峰值场强附近可用于支持回旋管工作, 导致回旋管单脉冲工作时间极短, 几乎无平均功率输出. 本文提出一种新型太赫兹宽带调频脉冲磁体回旋管互作用方案, 通过结合宽带调频预群聚互作用电路与脉冲磁体, 可拓展调频带宽、扩大磁场调谐范围、延长回旋管单脉冲工作时长、实现脉冲磁体回旋管准连续波工作. 频域稳态单模及时域动态多模的对比研究表明, 该宽带调频回旋管在加速电压为 20 kV 的电子注驱动下, 可在 0.328~0.338 THz 的频带范围内产生 1.0~2.1 kW 的电磁辐射, 单脉冲工作时长为 6 ms.

关键词 回旋管, 太赫兹, 宽带, 调频, 脉冲磁体

1 引言

回旋管基于相对论电子回旋脉塞原理工作, 采用快波模式与回旋电子注互作用, 在毫米波太赫兹波段具有产生高功率电磁辐射的独特优势, 在高分辨率成像雷达、远程通信、受控热核聚变、太赫兹相干检测及生物医学等领域具有重要的应用前景^[1,2]. 传统的超导磁体回旋管^[3~7]在可控核聚变等离子体加热^[3]、动态核极化增强的核磁共振^[8]及军事雷达^[9]等大科学及军用装置领域有重要应用. 为使回旋管在太赫兹领域获得更广泛的应用, 推进其从实验室研究到工业化应用的进程, 亟需发展小型化、高功率、宽频带、强鲁棒性的太赫兹回旋管. 脉冲磁体可产生超高的磁场强度, 高次谐波工作可成倍降低电子回旋所需的磁场强度, 二者均有可能回避常规的大型超导磁体系统. 相比而言, 高次谐波

引用格式: 戚向波, 杜朝海, 潘石, 等. 太赫兹宽带调频脉冲回旋管. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 1741–1751, doi: 10.1360/N112016-00223
Qi X B, Du C H, Pan S, et al. Terahertz broadband tunable pulse gyrotron (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 1741–1751, doi: 10.1360/N112016-00223

工作的注波耦合较弱易受模式竞争的影响, 而脉冲磁体体积小是实现小型化回旋管的较为可行的方法. 脉冲磁体技术的快速发展^[10]极大地推动了太赫兹回旋管的小型化进程. 基于脉冲磁体的太赫兹回旋管实验已分别在日本 Fukui University^[11,12]、俄罗斯科学院应用物理所^[13~16]及美国 University of Maryland^[15,16]开展, 其中俄罗斯科学院应用物理所成功利用 40 T 的脉冲磁体实现了突破 1 THz 的小型化回旋管系统^[13,14]. 传统脉冲磁体回旋管通常采用开放腔式电路工作, 存在 3 方面显著问题: (1) 采用高 Q 值模式工作, 通常仅能产生点频输出; (2) 为保证回旋电子与电磁波在单一频率上同步, 需要近似稳恒的磁场, 仅有脉冲磁体放电脉冲的顶端峰值场强附近满足该要求, 条件苛刻; (3) 回旋管输出脉宽远小于磁体放电脉冲宽度, 导致回旋管单脉冲工作时间极短, 平均功率极小.

为解决传统脉冲磁体回旋管存在的问题, 本文提出一种新型相互作用方案, 通过结合宽带相互作用电路与脉冲磁体提高脉冲磁体回旋管的工作性能, 拓展调谐带宽、扩大磁场调谐范围、延长工作脉冲时长、实现脉冲磁体回旋管准连续波输出. 回旋管的工作频率可近似为 $\omega \approx k_z v_z + s\Omega_e$, 其中 ω 和 k_z 分别为工作模式的角频率和轴向波数, s , v_z 和 $\Omega_e = eB_0/\gamma m_0$ 分别为电子注回旋谐波次数、轴向速度和相对论回旋频率, e 为电子的带电量, m_0 为电子的静态质量, γ 为电子的相对论因子, B_0 为引导磁场强度. 可见, 回旋管的工作频率与引导磁场强度正相关, 通过调节引导磁场强度改变电子注的回旋频率即可实现回旋管的工作频率调谐, 而脉冲磁体固有的产生时变磁场强度的特性与调频回旋管磁场调谐的需求完全吻合. 为延长脉冲磁体用于回旋管工作的脉冲时长, 需选择具有宽带调频性能的相互作用电路. 传统的回旋振荡器可分为回旋单腔管和回旋返波管. 回旋单腔管工作于临近截止频率的驻波状态, 相互作用效率高, 调谐带宽窄. 回旋返波相互作用^[17~19]工作于远离截止频率的返向行波状态, 易实现宽带频率调谐, 但注-波耦合弱, 难以被激发. 前期研究表明采用渐变腔式电路^[20~22]或预群聚电路^[23]等特殊的电路结构可增强返波相互作用效率, 拓展调谐带宽, 其中预群聚电路是目前报道的可获得最大调频带宽的电路结构, 通过优化其电路结构可在 94 GHz $TE_{0,1}$ 模式上获得 10 GHz 的调频带宽^[23], 其中 m , n 分别代表 $TE_{m,n}$ 模式的角向指数和径向指数. 新型相互作用方案采用预群聚电路增强返波相互作用效率进行宽带连续频率调谐, 进而扩大磁场调谐范围, 延长工作脉冲时长, 实现脉冲磁体回旋管的准连续波工作. 同时, 本文的预群聚电路研究进一步将回旋返波相互作用从前期的低阶模式^[23]向高阶边廊模式推进, 以提高腔体功率容量^[3,24], 满足调频回旋管在太赫兹频段的发展需求.

本文的研究通过采用 $TE_{6,2+}$ 模在预群聚电路中回旋返波相互作用论证了新型相互作用方案准连续波高阶模式宽带调频工作的可行性, 其中“+/-”代表同向旋转/反向旋转的模式. 通过频域单模理论和时域多模理论的对比较验证, 在加速电压 $V_b = 20$ kV、工作电流 $I_b = 0.5$ A 的电子注驱动下, 该回旋管可在 0.328~0.338 THz 的频率范围内产生峰值功率为 2.1 kW 的电磁辐射, 其单脉冲辐射时长为 6 ms. 将宽带预群聚相互作用电路与脉冲磁体相结合的创新集成方案, 既能产生准连续波工作的高功率宽带调频太赫兹波, 又能充分发挥脉冲磁体小巧紧凑的优势, 将传统太赫兹回旋管从大型昂贵的实验装置发展成为小巧紧凑的宽带相干太赫兹波源, 有效推动回旋管在太赫兹领域的创新应用.

2 非线性理论

2.1 频域稳态单模非线性理论

回旋管的频域非线性理论基于频域稳态单模相互作用假设, 可以系统地揭示回旋管的单模稳态自洽相互作用机理. 频域单模非线性理论从 Maxwell 方程组出发求得相互作用腔中的有源波动方程, 在冷场假

设条件下可近似为一维纵向波动方程, 进而求得互作用腔中的注-波互作用方程:

$$\begin{aligned} \left(k_z^2 + \frac{d^2}{dz^2}\right) f(z) &= j \frac{2}{\omega \mu f^*(z)} \frac{|k_{mn}|^2}{K_{mn}} \left(\frac{\omega}{2\pi}\right) \int_0^{2\pi/\omega} \int_0^{r_w} \int_0^{2\pi} (\mathbf{J}_\perp \cdot \mathbf{E}_\perp^*) r dr d\varphi, \\ K_{mn} &= 2\pi \int_0^{r_w} r |J_m(k_{mn}r)|^2 dr = \pi r_w^2 \left(1 - \frac{m^2}{x_{mn}^2}\right) J_m^2(x_{mn}), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $f(z)$ 为谐振腔中高频电场的轴向场型分布, k_{mn} 为工作模式的横向波数, $\mathbf{J}_\perp$ 为电流密度的横向分量, $\mathbf{E}_\perp^*$ 为谐振腔中高频电场横向分量的共轭, x_{mn} 是 m 阶 Bessel 函数导数 $J'_m(k_{mn}r_w) = 0$ 的第 n 个非零根. 频域自洽非线性理论通过假定单模稳态互作用并结合适当的边界条件, 能够预测注-波互作用系统在频域上的固有响应特性, 如自激励振荡、放大、线性互作用和饱和状态等.

2.2 时域动态多模非线性理论

回旋管时域非线性理论基于时域动态多模互作用假设, 可以动态地演化回旋管的多模注-波互作用工作过程. 时域多模非线性理论的基本思想是互作用系统中多个工作模式共同驱动回旋电子注运动, 并单独统计各个模式从电子注中获得的功率. 单个模式的时域注-波互作用方程可表示为

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - k_{mn}^2 - \mu \varepsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) f(z, t) = \frac{2(k_{mn}^*)^2}{\mu^* K_{mn} \frac{\partial}{\partial t} f^*(z, t)} \int_0^{r_w} r dr \int_0^{2\pi} d\varphi (\mathbf{J}_\perp \cdot \mathbf{E}_\perp^*), \quad (2)$$

其中 $f(z, t)$ 为谐振腔中时变高频电场的轴向场型分布. 时域自洽非线性理论能够清晰地呈现系统中电子注和多个模式的时变互作用过程, 揭示多模互作用特别是模式竞争的物理机制. 时域理论与频域理论的主要区别在于时域理论能够预测系统中多个模式与电子注的动态互作用过程, 十分接近实际器件系统. 基于时域理论编写的时域动态多模非线性仿真程序的运算速度远高于商用全三维粒子模拟软件.

2.3 电子动力学运动

注-波互作用系统中, 电子注的受力及运动方程可表示为

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{p} &= (-e\mathbf{E} - e\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - e\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0, \\ \frac{d(r e^{j\varphi})}{dt} &= \frac{d(r_L e^{j\theta})}{dt} + \frac{d(r_c e^{j\varphi_c})}{dt}, \\ \frac{dz}{dt} &= v_z, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{p}$ 为电子的动量, $\mathbf{E}$ 为谐振腔中的高频电场, $\mathbf{B}$ 为谐振腔中的高频磁场, $\mathbf{v}$ 为电子的速度. 电子动力学方程结合时域或频域互作用方程可以准确地呈现电子注的动力学运动状态, 并揭示注-波互作用的物理机制、分析系统的起振特性、优化系统的性能, 从而构建起准确、高效、全面的回旋管理论体系.

3 宽带预群聚互作用电路

图 1(a) 所示为传统开放腔式电路 (曲线 1)、预群聚电路 (曲线 2) 及互作用时的引导磁场强度轴向分布图. 可见, 预群聚电路即在传统开放腔式电路的上游临近截止处加载了一截半径较大的腔体

图 1 (网络版彩图) (a) 预群聚电路和开放腔式的电路结构图及轴向磁场分布图, 其中曲线 1 为开放腔式电路, 曲线 2 为预群聚电路, f_- 为返向波, f_+ 为前向波; (b) 返波相互作用工作于 330.1 GHz 时, 两不同电路分别对应的轴向相互作用效率 η ; (c) 和 (d) 分别为返波相互作用工作于 330.1 GHz 时, 开放腔式电路和预群聚电路对应的轴向场型 f_{total} 及前向波 f_+ 和返向波 f_-

Figure 1 (Color online) (a) Circuit profiles of pre-bunched circuit and open-cavity circuit with axial magnetic field distribution, where line 1 indicates the pre-bunched circuit profile, line 2 indicates the open-cavity circuit profile, f_- indicates backward wave, and f_+ indicates forward wave; (b) axial interaction efficiencies η in different circuits when the gyrotron operates in backward interaction region at 330.1 GHz; (c) and (d) are axial field profile f_{total} , forward wave f_+ and backward wave f_- in open-cavity circuit and pre-bunched circuit, respectively, when the gyrotron operates in backward interaction region at 330.1 GHz

结构. 图 1(b) 所示为返波相互作用工作频率为 $f = 330.1$ GHz 时, 工作模式 $TE_{6,2+}$ 在两不同相互作用电路中的轴向相互作用效率 η , 其中电子注工作参数为: 加速电压 $V_b = 20$ kV, 电流 $I_b = 0.5$ A, 横纵速度比 $\alpha = v_t/v_z = 1.5$, 速度离散 $\Delta v_z/v_z = 5\%$, 引导中心半径 $r_c = 0.905$ mm, 引导中心半径离散 $\Delta r_c/r_c = 5\%$. 两不同相互作用系统中, 电子注均在上游段受电磁波调制吸收能量并在中下游段持续的释放能量传递给电磁波. 对比二者的相互作用效率 η , 电子注吸收能量的长度 $L_2 < L_1$, 即预群聚电路在上游段电子注吸收能量的长度远小于开放腔式电路. 因而, 相比于开放腔式电路, 针对相同的腔体长度, 预群聚电路中电子注在中下游段释放能量的长度更长, 进而可增强返波相互作用效率. 图 1(c) 和 (d) 所示分别为返波相互作用工作频率为 $f = 330.1$ GHz 时, 两不同电路对应的轴向场型 f_{total} 及轴向场型 f_{total} 分解的前向波 f_+ 和返向波 f_- . 可见, 返波相互作用时 f_- 不断向上游端方向增长并在上游端口反射将其能量传递给 f_+ , 该能量伴随着 f_+ 的传播最终从下游端口向外辐射. 对比二者的轴向场型 f_{total} , 由于预群聚电路上游的预群聚段加载, 其轴向模式相当于在开放腔式电路轴向模式的基础上在上游段新增了两阶轴向模式, 进而提高了返波相互作用的轴向模式阶数. 文献 [22] 的研究表明, 高阶轴向模式的 Q 值较低、绕射特性强, 其相互间的模式转移更易实现宽带调频. 结合图 1 中关于轴向相互作用效率 η 及轴向场型 f_{total} 的研究, 预群聚电路可增强返波相互作用效率, 具有更强的绕射特性,

图 2 (网络版彩图) $\text{TE}_{6,2+}$ 模回旋管工作于不同磁场强度 (a) $B_0 = 12.0$ T, 对应工作频率 $f = 328$ GHz, (b) $B_0 = 12.4$ T, 对应工作频率 $f = 330$ GHz, (c) $B_0 = 12.9$ T, 对应工作频率 $f = 337$ GHz 下的轴向相互作用效率 η , 轴向场型 f_{total} 及分解的前向波 f_+ 和返向波 f_-

Figure 2 (Color online) Axial field profile f_{total} , forward wave f_+ and backward wave f_- in pre-bunched circuit when the $\text{TE}_{6,2+}$ mode gyrotron operates at different magnetic fields (a) $B_0 = 12.0$ T corresponding to frequency $f = 328$ GHz, (b) $B_0 = 12.4$ T corresponding to frequency $f = 330$ GHz, (c) $B_0 = 12.9$ T corresponding to frequency $f = 337$ GHz

图 3 (网络版彩图) $\text{TE}_{6,2+}$ 模回旋管的相互作用效率及连续频率调谐带宽, 假设电子注的加速电压为 $V_b = 20$ kV, 电流为 $I_b = 0.5$ A, 横纵速度比为 $\alpha = v_t/v_z = 1.5$, 引导中心半径为 $r_c = 0.905$ mm, 引导中心半径离散为 $\Delta r_c/r_c = 5\%$

Figure 3 (Color online) Interaction efficiency and the continuous frequency tuning band of the $\text{TE}_{6,2+}$ mode gyrotron with electron beam voltage $V_b = 20$ kV and current $I_b = 0.5$ A, assuming pitch factor $\alpha = v_t/v_z = 1.5$, guiding center radius $r_c = 0.905$ mm, and guiding center spread $\Delta r_c/r_c = 5\%$ during the magnetic field tuning

进而可拓展回旋管的频率调谐带宽. 图 2(a)~(c) 所示为回旋管工作于不同的磁场强度 $B_0 = 12.0$ T, $B_0 = 12.4$ T, $B_0 = 12.9$ T 下, 工作模式 $\text{TE}_{6,2+}$ 模在预群聚电路中的轴向相互作用效率 η 、轴向模式场型 f_{total} , 及前向波 f_+ 和返向波 f_- . 可见随着磁场强度的提高, 电子注回旋频率提高, 工作模式逐步从单腔相互作用的一阶轴向模式向返波相互作用的高阶轴向模式过渡, 工作频率逐步提高, 具有实现宽带频率调谐的潜能.

在频域单稳态模工作假设下, $\text{TE}_{6,2+}$ 模预群聚相互作用电路的工作效率和连续频率调谐带宽如图 3 所示. 在磁场强度为 $B_0 = 11.9 \sim 12.2$ T 的范围内, 回旋管为单腔互作用, 腔体中临近截止频率的驻波主导注-波互作用过程, 互作用效率高, 由于临近截止区域的频率灵敏度不高, 回旋管单腔互作用的调谐带宽受限. 在磁场强度为 $B_0 > 12.2$ T 的范围内, 回旋管为返波互作用, 腔体中远高于截止频率的返向行波主导注-波互作用过程, 由于远高于截止区域的频率灵敏度高, 回旋管返波互作用的调频带宽较宽. 由于回旋返波互作用时 $|k_z| \gg 0$, 其互作用效率容易受电子注速度离散的影响, 因而当电子注速度离散从 1% 提高到 7% 时, 返波互作用效率逐步降低进而导致频率调谐带宽随之减小. 当电子注速度离散在 1% 到 7% 之间变化时, 在频域稳态单模工作假设下, 可获得理论上 15 GHz 以上的连续

 图 4 (网络版彩图) 工作模式 $\text{TE}_{6,2+}$ 及竞争模式的注波耦合阻抗

Figure 4 (Color online) Beam-wave coupling impedances of the potential oscillating modes

频率调谐带宽. 当峰值功率下降约 50% 时, 回旋管可在 328~338 GHz 的范围内获得 10 GHz 的调谐带宽.

在多模相互作用系统中考虑到模式竞争的影响, 回旋管的调频带宽会受到一定的限制. 为探究的模式竞争问题, 分析腔体中各模式的注波耦合强度是关键, 定义耦合阻抗为^[25]

$$K = \mu H_{sm} \frac{r_L^2}{s^2} \frac{v_p}{K_{mn}}, \quad (4)$$

其中 μ 为腔体内的磁导系数, $H_{sm} = |J'_s(k_{mn}r_L)J_{m-s}(k_{mn}r_c)|^2$ 为耦合系数, r_L 为电子注的 Larmor 半径, v_p 为工作模式的相速度, K_{mn} 如式 (1) 所示为功率因子. 式 (4) 的耦合阻抗包含了电子注因子 r_L^2/s^2 、模式因子 v_p/K_{mn} 及电子注与模式的耦合因子 H_{sm} , 三者的结合可以有效地衡量模式的注波耦合强度. 图 4 所示为磁场调谐时, 工作模式 $\text{TE}_{6,2+}$ 及其临近模式的耦合阻抗. 由于磁场扫过模式的截止频率点时, 模式的相速度 v_p 为无穷大, 因此各模式的耦合阻抗在图 4 中均会出现奇异点. 在所有模式中, 模式 $\text{TE}_{3,3+}$, $\text{TE}_{3,3-}$, $\text{TE}_{1,4+}$, $\text{TE}_{1,4-}$, $\text{TE}_{4,3-}$ 和 $\text{TE}_{7,2+}$ 的耦合阻抗可与工作模式 $\text{TE}_{6,2+}$ 相比拟, 将对 $\text{TE}_{6,2+}$ 模产生较严重的模式竞争. 在磁场强度为 $B_0 = 12.0 \sim 13.0$ T 的范围内, $\text{TE}_{6,2+}$ 模的耦合阻抗 K 值最高, 其他模式的 K 值则相对低了数倍甚至数十倍, 因而在该磁场范围内 $\text{TE}_{6,2+}$ 模将主导注-波相互作用过程. 在较低的磁场强度 $B_0 < 12.0$ T 范围内, $\text{TE}_{3,3-}$ 模的 K 值最高并将主导注-波相互作用过程. 在较高的磁场强度 $B_0 > 13.0$ T 范围内, 随着磁场的增强, $\text{TE}_{4,3-}$ 模和 $\text{TE}_{7,2+}$ 模依次具有最高的 K 值, 将依次起振并抑制先前的振荡模式. 以上有关耦合强度 K 的分析表明, 考虑模式竞争时, $\text{TE}_{6,2+}$ 模可在磁场强度为 $B_0 = 12.0 \sim 13.0$ T 的范围内单模稳态工作实现宽带连续调频, 在该范围内, 回旋管峰值功率下降约 50% 时, 可在 328~338 GHz 的范围内获得 10 GHz 的调谐带宽.

4 准连续波工作脉冲磁体

鉴于脉冲磁体的小型化及强磁场特性, 本文提出的宽带调频相互作用方案中电子回旋所需的强磁场由脉冲磁体提供. 设计的脉冲磁体轴向场型如图 1 所示, 其实验测量的半正弦分布时变磁场如图 5 所示, 磁体的脉冲持续时间为 24 ms, 峰值场强为 13 T. 由于传统回旋管通常为高 Q 值模式单频点工作, 需要脉冲磁体提供近似稳恒的磁场, 使得回旋管仅在脉冲磁场峰值区域工作, 如图 5 中橙色区域所示, 电磁辐射脉冲时长远低于磁体脉冲时长, 回旋管几乎为点脉冲工作, 平均功率极低. 宽带预群聚交互

图 5 (网络版彩图) 脉冲磁体实验测量的半正弦分布时变磁场, 单脉冲时长约 24 ms, 可用于回旋管工作的单脉冲时长约 6 ms (蓝色区域), 传统可用于回旋管工作的单脉冲时长极短 (橙色区域)

Figure 5 (Color online) Measured half-sinusoidal distribution time-varying magnetic field strength generated by the pulse magnet, where the pulse duration is about 24 ms, and about 6 ms could be utilized for gyrotron operating (blue region), while an extremely short duration could be used for conventional gyrotron operating (orange region)

用电路的宽带调频特性可以极大地拓展脉冲磁体的磁场调谐范围, 延长脉冲磁体用于支持回旋管工作的脉冲时间, 进而实现脉冲磁体回旋管单脉冲准连续波工作. 本文中 $TE_{6,2+}$ 模宽带预群聚回旋管的工作磁场范围为 $B_0 = 12.0 \sim 13.0$ T, 如图 5 中蓝色区域所示, 脉冲磁体可用于回旋管工作的脉冲持续时长约为 6.0 ms. 可见, 宽带预群聚电路与脉冲磁体相结合的互作用方案可以在实现系统小型化的同时极大地拓展脉冲磁体用于回旋管工作的脉冲持续时间, 实现较长时间的单脉冲准连续波工作, 获得较高的平均功率用于高功率太赫兹应用.

5 时域多模互作用

本文中回旋管的工作模式为高阶模式 $TE_{6,2+}$ 模, 由于不是角对称模式, 无法采用商用粒子模拟软件进行二维仿真, 而三维仿真对计算机硬件要求较高、耗时较长, 需要长达数星期甚至更长的时间, 故基于时域多模非线性理论自主开发了基于 FDTD+PIC 的时域多模仿真程序用于探究回旋管的时域多模非线性特性. 时域程序与广泛被认可的频域理论计算结构一致, 其准确性及可靠性已在文献 [23, 26] 中得到验证. 本文中的时域动态多模非线性与频域单模非线性两不同理论的研究结果相吻合, 进一步验证了时域多模仿真软件的准确性及可靠性, 同时验证了宽带调频脉冲回旋管的可行性. 时域多模仿真采用了图 5 实测的时变磁场 $B_0(t)$, 为节省仿真时间, 在保证不改变 $B_0(t)$ 时变场型的情况下, 将仿真时间从 6 ms 等比例地缩减为 500 ns. 时域多模仿真中包含了工作模式 $TE_{6,2+}$ 及竞争模式 $TE_{3,3+}$, $TE_{3,3-}$, $TE_{1,4+}$, $TE_{1,4-}$, $TE_{4,3-}$, $TE_{7,2+}$. 在 $t = 0 \sim 10$ ns 的仿真时间内, 仿真保持磁场强度 $B_0(t) = 12.05$ T 不变, 使工作模式起振; 随后在 $t = 10 \sim 510$ ns 的仿真时间内, 磁场强度在 $B_0 = 12.05 \sim 12.9$ T 的范围内呈半正弦分布调谐. 在磁体脉冲工作期间, 由于磁场是变化的, 电子注脉冲宽度对回旋管的工作状态和注-波相互作用效率有一定影响, 因而采用了信号发生器来保证电子注发射与磁场变化同步. 同时为精确地模拟回旋管的实际工作状态, 时域仿真的电子注工作参数为实际设计的磁控注入式电子枪在大范围磁场调谐时发射的电子注参数. 当加速电压为 $V_b = 20$ kV 时, 在 $B_0 = 12.0 \sim 13.0$ T 的磁场范围内, 电子枪发射的电子注具有恒定电流 $I_b = 0.5$ A, 恒定引导中心半径 $r_c = 0.905$ mm, 以及恒定的引导中心半径离散 $\Delta r_c/r_c = 5\%$, 其横纵速度比变化范围为 $\alpha = v_t/v_z = 1.75 \sim 1.1$, 速度离散变化范围为 $\Delta v_z/v_z = 8\% \sim 5.5\%$. 考虑时变磁场强度和变化电子注

图 6 (网络版彩图) 时域多模仿真考虑时变磁场及变化的电子注参数时的频谱图. 随着磁场调谐, 电子注横纵速度比变化范围为 $\alpha = v_t/v_z = 1.75 \sim 1.1$, 速度离散变化范围为 $\Delta v_z/v_z = 8\% \sim 5.5\%$, 引导中心半径为恒定值 $r_c = 0.905 \text{ mm}$, 引导中心半径离散为 $\Delta r_c/r_c = 5\%$

Figure 6 (Color online) Frequency spectrum of multimode simulation with time-varying magnetic field and changing electron beam parameters. Pitch factor varies between $\alpha = v_t/v_z = 1.75 \sim 1.1$, velocity spread ranges between $\Delta v_z/v_z = 8\% \sim 5.5\%$, and constant guiding center $r_c = 0.905 \text{ mm}$ and guiding center spread $\Delta r_c/r_c = 5\%$ during the magnetic field tuning

参数时, 时域多模仿真所得的频谱图如图 6 所示. 在 $t = 8 \text{ ns}$ 时, 磁场强度为 $B_0(t) = 12.05 \text{ T}$, $\text{TE}_{6,2+}$ 模起振并抑制先前起振的 $\text{TE}_{3,3-}$ 模. 随后, 随着磁场强度在 $B_0 = 12.05 \sim 12.9 \text{ T}$ 的范围内被半正弦分布的调谐, $\text{TE}_{6,2+}$ 模在腔体中单模稳态振荡并抑制竞争模式. 随着磁场强度的时变调谐以及电子注参数的相应变化, $\text{TE}_{6,2+}$ 模可获得在 0.328 THz 与 0.338 THz 之间连续变化的频谱输出以及 1.0 kW 到 2.1 kW 范围内波动的功率输出.

时域多模仿真中 $\text{TE}_{6,2+}$ 模的输出功率波动较大, 其峰值功率比频域单模计算的峰值功率高出大约 3%, 造成以上现象主要有以下 3 方面的原因: 第一, 在频域计算中电子注参数是恒定不变的, 而在时域仿真中电子注参数是时变的, 因而二者的输出功率会有微小的差异; 第二, 频域计算两端的边界条件为无反射的行波边界条件, 而时域仿真的两端则利用完美匹配吸收边界条件来近似行波边界条件, 近似边界条件的引入会在腔体的下游端口引入微弱的反射, 进而会在一定程度上提高时域仿真的峰值功率; 第三, 在该宽带调频回旋管的返波相互作用中, 返向波与电子注保持同步并提取电子注能量, 同时在上游预群聚段被反射, 将其能量传递给前向波, 最后伴随前向波从下游端口输出. 虽然相互作用过程中前向波与电子注不同步, 但前向波在腔体中的传输过程依然会对电子注产生一定的调制作用, 进而会与电子注发生微弱的能量交换而影响注-波相互作用效率. 根据以上的分析研究, 时域仿真与频域计算由于边界条件的不同导致结果有微小的差别, 二者的研究结果相吻合, 验证了太赫兹宽带预群聚脉冲磁体回旋管准连续波工作的可行性.

6 讨论

宽带预群聚相互作用电路产生的调频电磁波以波导模式输出, 为了进一步将其转换为可在自由空间中传播的高斯波束, 需要特别设计宽带准光模式转化器. 前期研究工作^[27~29]表明采用具有大口径弗拉索夫发射器的准光模式转化器可以实现宽带输出, 可在 0.31 THz 到 0.35 THz 的频率范围内获得高效率模式转换, 转换后的宽带高斯波束通过布鲁斯特窗^[27]向外辐射.

值得注意的是本文的预群聚相互作用电路虽然与分段式回旋速调管相互作用电路^[30]及回旋双腔管相互作用电路^[31,32]结构相仿, 但是其中的注-波相互作用机制则完全不同. 对于分段式回旋速调管相互作用电路和回旋双腔管相互作用电路, 腔体中临近截止状态的驻波占主导地位; 而对于本文的预群聚交互

用电路, 远高于截止频率的返向行波占主导地位, 通过调节磁场改变电子注回旋频率, 进而调节回旋管工作频率, 实现宽带连续频率调谐.

相对于超导磁体, 脉冲磁体体积较小, 但是所需的电源部分要大得多, 同时考虑到应力冲击等一系列问题, 实现整个磁体系统小型化的难度较大, 但是具有实现的可能性. 目前俄罗斯科学院应用物理所已在 1 THz 采用 40 T 的脉冲磁体开展了实际意义上的小型化脉冲磁体回旋管的实验^[13,14]. 本文研究回旋管工作于 330 GHz, 所需的脉冲磁体磁场强度为 13 T, 其面临的电容大小、电源大小及所承受的脉冲应力等问题的难度远低于回旋管突破 1 THz 时所面临的问题难度, 具有实现回旋管整体系统小型化的可能性.

7 结论

本文提出了一种新型太赫兹宽带脉冲磁体回旋管相互作用方案, 相比于已报道的脉冲磁体回旋管实验^[11~16], 该方案通过集成宽带预群聚电路与脉冲磁体, 可将常规回旋管的调频带宽拓展数十倍, 并显著地拓宽脉冲磁体用于回旋管工作的单脉冲工作时长, 实现脉冲磁体回旋管准连续波工作. 同时, 文章首次在高阶模式上验证了预群聚电路返波相互作用宽带调频的可行性. 工作于 $TE_{6,2+}$ 模, 该脉冲磁体回旋管可获得超过 10 GHz 的调谐带宽, 其频率变化范围为 0.328~0.338 THz, 峰值功率为 2.1 kW, 约 6 ms 的脉冲磁体单脉冲工作时长可用于支持该回旋管工作. 太赫兹宽带脉冲磁体回旋管的研究为发展高功率宽带小型化太赫兹源奠定了基础, 并为发展高功率太赫兹科学技术提供支持.

致谢 感谢俄罗斯科学院应用物理所 Michael I. Petelin 教授以及 Andrey V. Savilov 教授给予的有益讨论.

参考文献

- 1 Chu K R. The electron cyclotron maser. *Rev Mod Phys*, 2004, 76: 489–540
- 2 Nusinovich G S, Thumm M K A, Petelin M I. The gyrotron at 50: historical overview. *J Infr Millim Terahertz Waves*, 2014, 35: 325–381
- 3 Sakamoto K, Kasugai A, Takahashi K, et al. Achievement of robust high-efficiency 1 MW oscillation in the hard-self-excitation region by a 170 GHz continuous-wave gyrotron. *Nature Phys*, 2007, 3: 411–414
- 4 Notake T, Saito T, Tatematsu Y, et al. Development of a novel high power sub-THz second harmonic gyrotron. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 225002
- 5 Saito T, Nakano T, Hoshizuki H, et al. Performance test of CW 300 GHz gyrotron FUCWI. *Int J Infrared Millim Waves*, 2007, 28: 1063–1078
- 6 Saito T, Tatematsu Y, Yamaguchi Y, et al. Observation of dynamic interactions between fundamental and second-harmonic modes in a high-power sub-terahertz gyrotron operating in regimes of soft and hard self-excitation. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 155001
- 7 He W, Donaldson C R, Zhang L, et al. High power wideband gyrotron backward wave oscillator operating towards the terahertz region. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 165101
- 8 Nanni E A, Barnes A B, Griffin R G, et al. Thz dynamic nuclear polarization NMR. *IEEE Trans Terahertz Sci Tech*, 2011, 1: 145–163
- 9 Thumm M. High power gyro-devices for plasma heating and other applications. *Int J Infrared Millim*, 2005, 26: 483–503
- 10 Sims J R, Rickel D G, Swenson C A, et al. Assembly, commissioning and operation of the NHMFL 100 Tesla multi-pulse magnet system. *IEEE Trans Appl Supercon*, 2008, 18: 587–591

- 11 Idehara T, Tsuchiya H, Watanabe O, et al. The first experiment of a THz gyrotron with a pulse magnet. *Int J Infrared Millim*, 2006, 27: 319–331
- 12 Idehara T, Saito T, Mori H, et al. Long pulse operation of the THz gyrotron with a pulse magnet. *Int J Infrared Millim*, 2008, 29: 131–141
- 13 Glyavin M Y, Luchinin A G. A Terahertz gyrotron with pulsed magnetic field. *Radiophys Quantum Electron*, 2007, 50: 755–761
- 14 Glyavin M Y, Luchinin A G, Golubiatnikov G Y. Generation of 1.5-kW, 1-THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 015101
- 15 Glyavin M Y, Luchinin A G, Nusinovich G S, et al. A 670 GHz gyrotron with record power and efficiency. *Appl Phys Lett*, 2012, 101: 153503
- 16 Glyavin M Y, Luchinin A G, Bogdashov A A, et al. Experimental study of the pulsed Terahertz gyrotron with record-breaking power and efficiency parameters. *Radiophys Quantum Electron*, 2014, 56: 497–507
- 17 He W, Cross A W, Phelps A D R, et al. Theory and simulations of a gyrotron backward wave oscillator using a helical interaction waveguide. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 091504
- 18 Chang T H, Fan C T, Pao K F, et al. Stability and tunability of the gyrotron backward-wave oscillator. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 191501
- 19 Chen N C, Yu C F, Yuan C P, et al. A mode-selective circuit for TE₀₁ gyrotron backward-wave oscillator with wide-tuning range. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 101501
- 20 Kou C S, Chen C H, Wu T J. Mechanisms of efficiency enhancement by a tapered waveguide in gyrotron backward wave oscillators. *Phys Rev E*, 1998, 57: 7162–7168
- 21 Chen N C, Chang T H, Yuan C P, et al. Theoretical investigation of a high efficiency and broadband subterahertz gyrotron. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 161501
- 22 Qi X B, Du C H, Liu P K. Broadband continuous frequency tuning in a Terahertz gyrotron with tapered cavity. *IEEE Trans Electron Devices*, 2015, 62: 4272–4278
- 23 Du C H, Qi X B, Kong L B, et al. Broadband tunable pre-bunched electron cyclotron maser for Terahertz application. *IEEE Trans Terahertz Sci Tech*, 2015, 5: 236–243
- 24 Nusinovich G S, Pu R F, Granatstein V L. Suppression and nonlinear excitation of parasitic modes in second harmonic gyrotrons operating in a very high order mode. *Appl Phys Lett*, 2015, 107: 013501
- 25 Du C H, Liu P K. Beam-wave coupling strength analysis in a gyrotron traveling-wave amplifier. *J Infr Millim Terahertz Waves*, 2010, 31: 714–723
- 26 Qi X B, Du C H, Liu P K. High-efficiency excitation of a third-harmonic gyrotron. *IEEE Trans Electron Devices*, 2015, 62: 3399–3405
- 27 Du C H, Qi X B, Luo L, et al. Development of a 0.33 THz pulse gyrotron. In: *Proceedings of IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Beijing, 2015. 1–2
- 28 Du C H, Qi X B, Liu P K. Broadband THz gyrotron based on a pulse magnet. In: *Proceedings of the 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Hong Kong, 2015. 1–2
- 29 Du C H, Qi X B, Liu P K. Theoretical study of broadband quasi-optical mode converter for pulse gyrotron devices. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2016, 10: 2348–2355
- 30 Bandurkin I V, Kalynov Y K, Savilov A V. Experimental study of a gyrotron with a sectioned klystron-type cavity operated at higher cyclotron harmonics. *Radiophys Quantum Electron*, 2016, 58, 694–700
- 31 Flyagin V A, Gaponov A V, Petelin M I, et al. The gyrotron. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 1977, 25: 514–521
- 32 Kou C S, Wu M H, Tseng F. Nonlinear analysis of a multi-cavity gyro-twistron. *Int J Infrared Millim Waves*, 1997, 18: 1857–1883

Terahertz broadband tunable pulse gyrotron

Xiangbo QI, Chaohai DU*, Shi PAN & Pukun LIU*

School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author. E-mail: duchaohai@pku.edu.cn, pkliu@pku.edu.cn

Abstract Based on the principle of a relativistic electron cyclotron maser, gyrotrons can generate high-power coherent radiation in the millimeter-terahertz (THz) waveband. A pulse magnet can generate an ultra-high field strength, and simultaneously reduces the volume by several times compared with a conventional superconducting magnet, which promotes a THz gyrotron to break the 1 THz barrier. However, only an extremely short duration around the peak field of the pulse magnet can be used for a conventional open-cavity gyrotron fixed-frequency operation. In this letter, a novel gyrotron interaction scheme is proposed to excite the broadband THz radiation by integrating a broadband pre-bunched interaction circuit with a pulse magnet, which is a promising way to expand the frequency tuning bandwidth, enlarge the magnetic field by utilizing the range of the pulse magnet, extend the operating pulse duration of a gyrotron, and realize the quasi-continuous operation of a pulse magnet gyrotron. After an investigation into the frequency and time domains, a broadband pulse gyrotron driven by a 20 kV low-voltage electron beam is predicted to generate radiation with a frequency of between 0.328 and 0.338 THz, with a peak power of 2.1 kW in a 6 ms pulse duration.

Keywords gyrotron, terahertz, broadband, frequency tuning, pulse magnet

Xiangbo QI was born in 1990. She received her B.S. degree in electronic information science and technology from Central South University, Changsha, China in 2012. She is currently pursuing her Ph.D. degree at the School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing, China. Her current research interests include millimeter-terahertz electronic devices.

Chaohai DU was born in 1982. He received his B.S. degree in electronics from the University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China in 2005, and his Ph.D. degree in physical electronics from the University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China in 2010. He is currently a research professor with Peking University, Beijing, China. His research interests include various types of high-power millimeter-terahertz sources and

their applications.

Shi PAN was born in 1994. He received his B.S. degree in electronic information science and technology from Xiamen University, Xiamen, China in 2015. He is currently working toward his Ph.D. degree at the School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing, China. His research interests include high-power millimeter-terahertz devices and their applications.

Pukun LIU was born in 1965. He received his B.S. degree in radio physics from Nanjing University, Nanjing, China in 1987, his M.S. degree in physical electronics from the University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China in 1991, and his Ph.D. degree in nuclear fusion and plasma physics from Southwestern Institute of Physics, Chengdu in 1995. He is currently a professor with Peking University, Beijing, China. His principal research interests are in the field of millimeter-terahertz wave sources and technology.