

新型高效率二次谐波宽带可调复合相互作用回旋管

刘本田

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 该文利用回旋管注-波模式耦合理论,提出了返波振荡-速调群聚-行波放大复合相互作用回旋管工作原理。理论分析表明,Ka波段二次谐波连续磁调谐复合相互作用回旋管的工作效率高达40%,磁调谐带宽为10%。利用该复合相互作用工作原理,回旋管振荡器可实现毫米波电磁辐射源的高效率、高功率输出及宽频带连续磁调谐。

关键词 回旋返波管,回旋速调管,回旋行波管,宽带连续磁调谐,毫米波

中图分类号: TN128

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-0760-05

A New Type of Highly Efficient, Second Harmonic, Broadband Tunable Gyrotron Device Utilizing a Hybrid Interaction Scheme

Liu Ben-tian

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Based on the beam-wave mode-coupling theory, a principle of gyrotron device utilizing a hybrid interaction scheme of Backward-Wave Oscillator, Klystron Ballistic-Bunching and Traveling-Wave Tube (Gyro-BWO-KBB-TWT) is presented in this paper. Theoretical analysis of a Ka-band second harmonic tunable gyro-BWO-KBB-TWT indicates that the device efficiency of 40% and magnetic tuning bandwidth of 10% are achieved. A gyrotron oscillator employing the hybrid interaction scheme can realize highly efficient, high-power output and broadband continuous magnetic tuning in millimeter wave band.

Key words Gyro-BWO, Gyroklystron, Gyro-TWT, Broadband magnetic tuning, Millimeter wave

1 引言

近年来,在电子对抗、生物医学工程、特种陶瓷烧结和定向能微波武器等重大应用需求的强烈推动下,高功率毫米波相干辐射源的研究在国际上得到高度重视^[1],并迅速发展成为微波真空电子学的前沿与热点。慢波型真空电子器件,如行波管、速调管等传统微波管,由于它们所用电子注和高频结构的几何参量受缩尺定律限制(几何尺寸正比于工作波长,功率容量与工作频率的 $5/2$ 次方成反比),因而在毫米波段此类管种都不可能达到高功率输出。20世纪60年代末发展的回旋管^[2,3](Gyrotron)是利用相对论电子学原理,通过螺旋运动电子注和高频场同步相互作用,实现高功率毫米波产生或放大的快波器件。由于无需遵循缩尺定律,回旋管在毫米波段能够实现高功率输出,因此世界主要工业发达国家如美、俄、德、日等,对回旋管的研究非常重视。到目前为止,国际上研究并发展了以下几种主要类型回旋管:(1)回旋管振

荡器(Gyrotron Oscillators),包括回旋单腔管(Gyromonotron)和回旋返波管(Gyro-BWO);(2)回旋管放大器,包括回旋行波管(Gyro-TWT)、回旋速调管(Gyroklystron)和回旋速调行波管(Gyrotwystrotron)等。表1列出了几种主要类型回旋管的性能参数和特点。其中回旋单腔管具有高效率优点,但是受开放式谐振腔工作模式及品质因数(Q)的限制,仅能工作于单一谐振频率;回旋返波管具有宽频带连续调谐的优点^[4-6],缺点是工作效率低。尽管改变高频相互作用电路或工作磁场^[13]可以提高回旋返波管的工作效率,但是输出耦合电路限制了高功率容量输出;回旋速调管具有高增益、高效率优点,但工作频带窄;回旋行波管具有宽频带放大、高效率优点,缺点是容易产生模式竞争等不稳定性问题。

为提高回旋返波管的工作效率和功率容量,本文提出了一种新型回旋返波振荡-速调群聚-行波放大复合相互作用机理,并建立了Ka波段二次谐波连续磁调谐复合相互作用回旋管的工作模型。本文的第2节利用注-波模式耦合理论阐述

表 1 回旋管类型及性能

研究机构	回旋谐波数/ 工作模式	工作电压 (kV)	峰值功率 (kW)	效率/增 益(dB)	类 型	工作频率 (GHz)/3dB 带宽 (%)	特 点
KFK ^[4] Germany	—/TE _{10,4}	80	690	31%/—	Gyromono- tron	140 /—	逐步点频调谐
Yale University ^[5]	2/—	—	10	5%/—	Gyro-BWO	X 波段 (8.2-12.4GHz)	首先验证了 Gyro-BWO 的工 作机理
NRL ^[6]	1 / TE ₀₁ (矩形波导)	33	7	19%/—	Gyro-BWO	27.7-31.5 /—	验证了 Gyro-BWO 的宽带连 续调谐性能
NTHU ^[7] Taiwan	1 / TE ₁₁	95-115	67	19%/—	Gyro-BWO	Ka 波段/调谐带宽 5%	宽频带连续调谐, 注入锁相 技术的应用
IAP ^[8] Russia	1 / TE ₀₂	—	750	24%/20	Gyroklystron	35 / 0.6%	高功率、高平均功率频带窄
NTHU ^[9] Taiwan	1 / TE ₁₁	100	93	26% /70	Gyro-TWT	35 / 8.6%	宽频带, 高增益, 平均功率 小, 工作电压高
UCD ^[10] USA	2 / TE ₂₁	80	207	17% /30	Gyro-TWT	Ku 波段/ 3%	宽频带放大, 高增益, 平均功 率容量太低
IAP ^[11] Russia	2 / TE ₀₂₁	72	260	18% 17	Gyroklystron	32.33/ 0.1%	永磁包装, 带宽窄, 增益低
UMD ^[12] USA	1-2 / TE ₂₂ -TE ₄₂	58	100	35% /30	Inverted Gyrotwystron	Ka 波段/ 0.7%	谐波倍增, 结合了 Gyro-TWT 和 Gyroklys- tron 的优点

了返波振荡-速调群聚-行波放大复合相互作用回旋管的工作原理, 第 3 节给出了分析该复合相互作用机理的理论计算公式, 并对 Ka 波段二次谐波连续磁调谐复合相互作用回旋管的调谐带宽、工作效率进行了理论计算和分析, 第 4 节为本文结论。

2 返波振荡-速调群聚-行波放大复合相互作用回旋管工作原理

根据郭和忠教授提出的回旋管注-波模式耦合理论^[14], 回旋管工作原理可由波导模 TE_{mn} 模和电子注回旋模之间的耦合来阐述。如图 1 所示, 波导模 TE_{mn} 模和电子注回旋模的色散方程分别为

$$\omega^2 - k_z^2 c^2 - \omega_{c0}^2 = 0 \tag{1a}$$

$$\omega - k_z v_z - s\Omega = 0 \tag{1b}$$

其中式 (1b) 表示电子注回旋模 s 次空间谐波的色散方程。根据注-波模式耦合理论, 螺旋运动电子注和波导模同步相互作用时, 波导模色散曲线与电子注回旋模色散线必定相交或相切。如图 1 所示, 对于回旋返波管, 两种模式色散线相交于 $k_z < 0$ 的区间, 色散线的交点即为回旋返波振荡的工作点。因其工作点可随 $s\Omega$ 和 v_z 改变而改变, 所以调节磁场强度或电子注电压可实现回旋返波管的频率连续调谐。因高频场的能量增长方向和传输方向与电子注运动方向相反, 这决定了回旋返波管的工作效率比较低。对于回旋行波管, 工作点是两种模式色散线的切点及其附近(如图 1 所示), 其中 $k_z > 0$ 表示高频场的传播方向及其能流方向与电子注运动方向相同。当波导模与电子注回旋模同步相互作用时, 它们在切点及其附近产生有效的能量耦合, 因此回旋行波管具有宽频带放大和工作效率高的特点。

结合回旋返波管和回旋行波管的原理及特点, 本文提出了返波振荡-速调群聚-行波放大复合相互作用回旋管(gyro-BWO-KBB-TWT)工作原理。该复合相互作用回旋管(见图 2)由磁控注入电子枪、磁场绝热压缩区、回旋返波振荡区、无场漂移群聚区、回旋行波放大区、收集极、输出窗和磁场组成。其工作原理为: 磁控注入电子枪产生的空心圆环电子注, 经阳极电压加速而获得动能后, 在磁场绝热压缩区电子

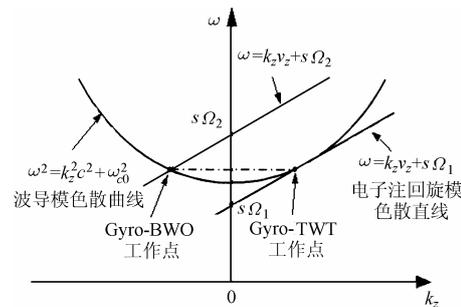


图 1 Gyrotron 注-波模式耦合原理图

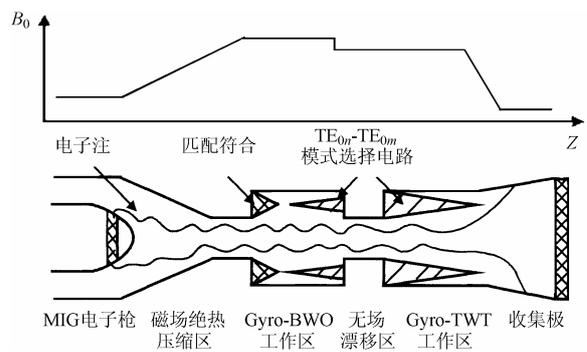


图 2 回旋返波振荡-速调群聚-行波放大器原理图

的横向动能增加;在回旋返波振荡区,由于电子内反馈机理,螺旋运动电子激起反向传输高频场,相应地高频场对电子注进行能量调制,同时因相对论效应电子注产生角向相位群聚。能量放大的高频场在左端被匹配负荷完全吸收,而能量调制的电子注进入无场漂移段后进一步相位群聚;在回旋行波放大区,相位群聚的电子注激起与回旋返波振荡区的频率和工作模式相同的前向传输高频场,并与其同步相互作用。电子注经过与高频场进行能量交换后散射到收集极,而高频场通过输出窗输出。该工作原理有机结合了回旋返波振荡-电子相位惯性群聚-回旋行波放大复合相互作用机理,使得回旋管振荡器能够实现毫米波电磁辐射源的高效率、高功率输出和低磁场宽频带连续调谐。

3 回旋返波振荡-速调群聚-行波放大器的理论分析

根据粒子理论^[15-17],可导出在理想圆波导内螺旋运动电子注和波导模 TE_{mm} 模同步互作用方程组为

$$\frac{dw}{dz'} = -2 \frac{(1-w)^{s/2}}{(1-bw)} \operatorname{Re}\{F e^{-i\vartheta_s}\} \quad (2)$$

$$\frac{d\vartheta_s}{dz'} = \frac{1}{1-bw} \left[w\bar{\mu} - \bar{\Delta} + s(1-w)^{s/2-1} \operatorname{Im}\{F e^{-i\vartheta_s}\} \right] \quad (3)$$

$$\frac{dF}{dz'} = -I_0 \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(1-w)^{s/2}}{(1-bw)} e^{i\vartheta_s} d\vartheta_0 \quad (4)$$

式中 $w = 2(1-h\beta_{z0})(\gamma_0 - \gamma)/(\beta_{z0}^2\gamma_0)$ 为电子能量归一化参量,其中 γ 为相对论因子, γ_0 为相对论因子的初始值, $h = k_z/k$ 表示高频场的轴向波数 k_z 对波数 k 的归一化, $\beta_{z0} = v_{z0}/c$ 和 $\beta_{r0} = v_{r0}/c$ 分别表示电子的轴向和横向初始速度 v_{z0} , v_{r0} 对光速 c 的归一化; $\vartheta_s(t) = s\theta - \omega t + k_z z$ 为电子注回旋模 s 次谐波相位相对于高频场相位的缓变量, $\theta = \int_0^t \Omega dt$ 为电子瞬时相位参量, Ω 为电子回旋角频率, $\vartheta_0 \in [0, 2\pi]$ 表示 $\vartheta_s(t)$ 的初始相位, ω 为高频场角频率;高频场振幅归一化参量 $F = (1-h\beta_{z0})\mu_0 c A' L_s(X, Y)/(\gamma_0 \beta_{r0} \beta_{z0} \kappa)$, 其中 μ_0 为真空磁导率, $\kappa = k_r/k$ 表示横向截止波数 k_r 对 k 的归一化, $A' = eA/(m_e c \omega)$ 为高频场振幅 A 的归一化表达式, m_e 为电子质量, e 为电子电荷; $L_s(X, Y) = C_{mn} J_{s-m}(k_r r_b)$, $C_{mn} = 1/\sqrt{\pi(k_r^2 r_w^2 - m^2)} J_m(k_r r_w)$, $J_{s-m}(k_r r_b)$ 和 $J_m(k_r r_w)$ 表示贝塞尔函数, r_b 为电子注导引中心半径, r_w 为圆波导半径; $\bar{\Delta} = [1-h\beta_{z0}-s e B_0/(m_e \gamma_0)]/\beta_{z0}$ 为未调制电子相位相对于高频场相位的失谐量, $b = h\beta_{r0}^2/[2\beta_{z0}(1-h\beta_{z0})]$; 归一化电子注电流 $I_0 = (1-h\beta_{z0})2\mu_0^2 e |I_b| [L_s(X, Y)]^2 / (\gamma_0 m_e \beta_{z0}^2 k_r^2 N_s)$, I_b 为电子注电流, $N_s = 2\mu_0 c C_{mn}^2 k k_z / k_r^4$; $\bar{\mu} = \beta_{z0}^2(1-h^2)/[2\beta_{z0}(1-h\beta_{z0})]$, $z' = kz$ 为相互作用长度 z 对 k 的归一化值。式(2)–式(4)适用于任意回旋谐波工作的回旋

行波放大和回旋返波振荡的理论分析。当以上方程组应用于回旋返波振荡分析时,仅需要把方程组中轴向波数 k_z 替换成 $-k_z$ 即可。

回旋管的工作效率可表示为

$$\eta = \frac{\beta_{z0}^2}{2(1-\gamma_0^{-1})(1-h\beta_{z0})} \eta_{\perp} \quad (5)$$

其中 $\eta_{\perp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} w(L') d\vartheta_0$ 是电子轨道效率。

利用以上注-波互作用方程组,结合不同工作区相关参量的边界条件,我们可以分析返波振荡-速调群聚-行波放大复合相互作用回旋管的工作效率和调谐频带宽度。

3.1 回旋返波振荡区

将所有 k_z 替换为 $-k_z$ 后,式(2)–式(4)可用于分析电子注和波导模 TE_{mm} 模同步相互作用产生回旋返波振荡机理。在回旋返波振荡区,相关参量的边界条件^[13]为

$$w(0) = 0, \quad \vartheta_s(0) = \vartheta_0, \quad F(L_1) = 0$$

其中电子初始相位 ϑ_0 在 $[0, 2\pi]$ 之间均匀分布, L_1 为回旋返波振荡区的归一化长度。为确定该回旋管的工作频率,假设在回旋返波振荡区高频场能量为电子注能量的 1%,当给定调谐磁场 B_0 ,选择频率参量,由式(2)–式(4)计算归一化振幅 F 沿归一化相互作用长度 z' 的变化量,直到 F 降低至初始值的 2% 时确定为回旋振荡频率。由此方法计算出振荡频率和工作磁场的关系如图 3 所示。

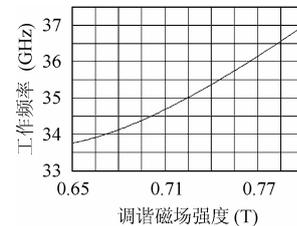


图3 振荡频率与调谐磁场之间的关系

3.2 无场漂移区

在无场漂移区 ($F = 0$), 电子注进行惯性相位群聚, 式(2)–式(4)可简化为

$$w(L_2) = w(L_1) \quad (6)$$

$$\vartheta_s(L_2) = \frac{1}{1-bw} \left[w\bar{\mu} - \bar{\Delta} \right] (L_2 - L_1) + \vartheta_s(L_1) \quad (7)$$

其中 L_1 为电子离开返波振荡区时位置的归一化值, L_2 为电子离开无场漂移区时位置的归一化值。式(6)表示在无场漂移区电子能量保持不变, 而式(7)描述了电子相位演化。

3.3 回旋行波放大区

在回旋行波放大区,相位群聚的电子注激起与回旋返波振荡区工作频率和模式相同的高频场,并与其同步相互作用,电子横向动能将逐渐转化为高频场能量。回旋行波放大区注-波互作用方程为式(2)–式(4),边界条件^[18]为 $w(0) = w(L_2)$,

$\vartheta_s(0) = \vartheta_s(L_2)$ 和 $F(0) = 0$ 。其中 L_2 为电子离开无场漂移区进入回旋放大区时位置的归一化值。

3.4 理论计算结果

利用前面给出返波振荡-速调群聚-行波放大复合相互作用回旋管不同工作区的注-波相互作用方程和边界条件, 本文计算了 Ka 波段二次谐波连续磁调谐复合相互作用回旋管的工作效率。数值计算时采用: (1)理想电子注; (2)在回旋返波振荡区高频场能量为电子注能量的 1%; (3)频率磁调谐时仅调节回旋返波振荡区工作磁场, 无场漂移区和回旋行波放大区的磁场保持恒定; (4)在回旋行波放大区和回旋返波振荡区, 高频场的工作频率及波导模式相同, 高频电路均为圆波导。数值计算的相关参数为: $r_w = 10\text{mm}$, $r_c = 0.54r_w$, $V_b = 65\text{kV}$, $I_b = 15\text{A}$, $\alpha = 1.5$ (电子注的横向速度与轴向速度的比值), 工作模式为 TE_{02} , 二次谐波工作, 调谐磁场 B_0 变化范围为 $[0.65, 0.8]\text{T}$, 无场漂移区和回旋行波放大区的工作磁场 $B_0 = 0.638\text{T}$, 回旋返波振荡相互作用长度为 40mm , 无场漂移区和回旋行波放大区的长度分别为 80mm , 95mm 。

图4给出了调谐磁场 $B_0 = 0.734\text{T}$ 时归一化振幅 F 沿相互作用长度 z 的变化曲线。由图可知在返波振荡区高频场的能量倒置分布: 当电子注进入返波振荡区时高频场的能量高, 而电子注离开返波振荡区时高频场的能量低; 在回旋行波放大区, 电子注和激起的高频场同步相互作用, 电子注的横向动能不断转化为高频场能量, 使高频场能量迅速增加。图5给出了复合相互作用回旋管工作效率随振荡频率的变化曲线, 由该图可知, 采用返波振荡-速调群聚-行波放大复合相互作用工作机理, 回旋管的磁调谐 3dB 带宽为 10%, 工作效率最高可达 40%, 与二次谐波回旋返波振荡管工作效率(8%)相比有很大的提高。

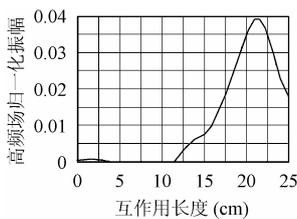


图4 归一化振幅 F 沿相互作用长度 z 的变化曲线

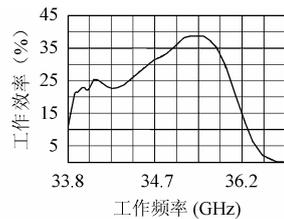


图5 Ka 波段二次谐波复合相互作用回旋管的工作效率

4 结束语

本文利用注-波模式耦合理论, 结合回旋返波管和回旋行波管的原理及优点, 提出了返波振荡-速调群聚-行波放大复合相互作用回旋管工作原理。该原理有机结合了回旋返波振荡-电子相位惯性群聚-回旋行波放大机理: 通过连续磁调谐, 回旋返波振荡能够在宽频带内激起高频信号, 并使电子注产生角向相位群聚; 无场漂移区不仅使电子注进一步产生角向相位群聚, 同时隔离回旋返波振荡区和回旋行波放大区, 使

频率磁调谐不影响回旋行波放大区的工作稳定性和宽频带特性; 回旋行波放大能够对电子注激起的高频信号进行宽频带放大, 提高了工作效率。利用粒子理论, 本文给出了返波振荡-速调群聚-行波放大复合相互作用回旋管的理论公式和边界条件, 并对 Ka 波段二次谐波连续磁调谐复合相互作用回旋管进行了理论分析和计算, 结果表明采用回旋返波振荡-速调群聚-行波放大复合相互作用机理, Ka 波段二次谐波回旋管振荡器的工作效率高达 40%, 调谐带宽为 10%。

利用该复合相互作用原理, 回旋管振荡器可实现毫米波、亚毫米波段电磁辐射源的高效率、高功率输出及宽频带连续磁调谐。目前, 我们正研制 Ka 波段二次谐波连续磁调谐复合相互作用回旋管, 以便实验验证该回旋管工作原理。

致谢 文中描述的回旋返波振荡-速调群聚-行波放大复合相互作用机理是在郭和忠教授指导下提出, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] Granatstein V L, Levush B, Danly B G, Parker R K. A quarter century of gyrotron research and development. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1997, 25(6): 1322 – 1334.
- [2] Hirshfield J L, Wachtel J M. Electron cyclotron maser. *Phys. Rev. Lett.*, 1964, 12(5): 533 – 536.
- [3] Barker R J, Schamiloglu E. High-power Microwave Sources and Technologies. New York, IEEE Press, 2001: 155 – 196.
- [4] Gantenbein G, Borie E, Dammertz G, et al.. Experimental results and numerical simulations of a high power 140 GHz gyrotron. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1994, 22(5): 861 – 870.
- [5] Guo H, Gyrotron BWO. Symposium on Novel Methods for Generation of Electromagnetic Radiation. Yale, 1983: 1 – 5.
- [6] Park S Y, Kyser R H, Armstrong C M, et al.. Experimental study of a Ka-band gyrotron backward wave oscillator. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1990, 18(3): 321 – 325.
- [7] Kou C S, Chen S H, Barnett L R, et al.. Experimental study of an injection-locked gyrotron backward wave oscillator. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70(7): 924 – 927.
- [8] Antakov I I, Zasytkin E V, et al.. 35GHz radar gyrokystrons, Con.Digest 18th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves. Colchester, UK, 1993: 338 – 339.
- [9] Chu K R, Chen H Y, Hung C L, et al.. Theory and experiment of ultra-high gain gyrotron traveling wave amplifier. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1999, 27(2): 391 – 404.
- [10] Wang Q S, McDermott D B, Luhmann N C. Operation of a stable 200 kW, second harmonic gyro-TWT amplifier. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1996, 24(3): 700 – 706.
- [11] Zasytkin E V, Moiseev M A, Gachev I G, et al.. Study of high-power Ka-band second-harmonic gyrokystron amplifier. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1996, 24(3): 666 – 670.

- [12] Guo H, Chen S H, Granatstein V L, *et al.*. Operation of a highly overmoded, harmonic-multiplying, wideband gyrotron amplifier. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 79(3): 515 – 518.
- [13] Nusinovich G S, Dumbrajs O. Theory of gyro-BWO with tapered magnetic field and waveguide cross section. *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 1996, 24(3): 620 – 629.
- [14] Guo H, Chen L, Keren H L, Hirshfield J. Measurements of gain for slow cyclotron waves on an annular electron beam. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, 49(10): 9 – 12.
- [15] Gaponov A V. Relativistic dispersion equations for waveguide systems with helical and trochoidal electron Beams. *Izv. VUZov. Radiofiz.*, 1961, 4(3): 547 – 560.
- [16] Fliflet A W. Linear and non-linear theory of the doppler-shifted cyclotron resonance maser based on TE and TM waveguide modes. *Int. J. Electronics*, 1986, 61(6): 1049 – 1080.
- [17] Nusinovich G S, Li H. Theory of gyro-travelling-wave tubes at cyclotron harmonics. *Int. J. Electronics*, 1992, 72(5,6): 895 – 907.
- [18] Zhao J, Guo H, Nusinovich G S, *et al.*. Studies of a three-stage inverted gyrotwystron. *IEEE Trans.on Plasma Sci.*, 2000, 28(3): 657 – 664.
- 刘本田: 男, 1971 年生, 博士生, 研究方向为宽频带连续可调回旋管振荡器、高功率高效率回旋管放大器等毫米波相干辐射源及其应用.