

Simulation and Optimization of Micromachined Vacuum Electron Gun*

Hai Zhang, Yangzhou Shao, Yuehe Ge

College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen
Email: xjtuzhanghai@163.com

Received: Sep. 13th, 2013; revised: Sep. 14th, 2013; accepted: Sep. 17th, 2013

Copyright © 2013 Hai Zhang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Electron gun is an important part of vacuum electronic devices, and the foil-less diode is one kind of the vacuum electron guns. In this paper, a miniature vacuum electron gun which is used in terahertz backward wave oscillator is studied both by theoretical analysis and numerical simulation, especially the production mechanism of annular electron beam and the propagation characteristics of the beam. First, the performance of foil-less diode was qualitatively described through the theoretical analysis. Second, the static electric field in the diode was calculated by numerical simulation. Third, the device performances were optimized by using 2.5D particle-in-cell simulation software. Finally, a set of optimal operating parameters were achieved.

Keywords: Electron Gun; Cathode; Optimization Design; Numerical Simulation; Beam Quality

微型真空电子枪的优化设计与仿真*

张 海, 邵洋洲, 葛悦禾

华侨大学信息科学与工程学院, 厦门
Email: xjtuzhanghai@163.com

收稿日期: 2013年9月13日; 修回日期: 2013年9月14日; 录用日期: 2013年9月17日

摘 要: 电子枪是真空电子器件的重要组成部分, 无箔二极管是真空电子枪中的一种。本文利用理论分析和数值模拟相结合的方法研究太赫兹返波管中所使用的微型真空电子枪, 着重研究环形强流相对论电子束的产生机理及传输特性。首先, 通过理论分析对无箔二极管中束流传输规律做了定性的描述; 其次, 通过数值模拟对二极管中静态电场进行了计算; 再次, 利用 2.5 维粒子模拟软件对二极管的各项性能指标进行了优化设计, 最终得到了一套最优工作参数。

关键词: 电子枪; 阴极; 优化设计; 数值模拟; 束流品质

1. 引言

微波真空电子器件是当代国防装备和国民经济各部门都在使用的一类重要的电子器件。在国防信息系统和人民日常生活中, 真空电子器件也发挥着重要

的作用^[1]。在国防装备上, 它是雷达、通讯、电子对抗、遥测遥控和精密制导设备的核心; 在信息系统中, 作为广播电台、电视台的发射源, 微波通讯和卫星通讯的转发器, 以及接收和显示图像的彩色电视机与各种显示器件已广泛应用在我们工作和生活中。

电子枪是真空电子器件的重要组成部分, 而无箔

*资助信息: 华侨大学高层次人才科研启动费项目(11BS112), 福建省自然科学基金资助项目(2013J05093, 2012J01276)。

二极管是真空电子枪中的一种^[2]。图 1 所示为一个典型无箔二极管的示意图。其中,在高压脉冲的激励下,由环形阴极产生的电子束在阴、阳极间纵向电场的加速下向阳极端运动。由于受到轴向引导磁场的约束,电子束将不经过阳极而直接进入其后的传输区。由于外加引导磁场的作用,无箔二极管内部的物理过程相当复杂,包括电子的运动、爆炸发射阴极等离子体的形成、二极管内电磁场的变化等,都不可能给出精确的解析解。有关无箔二极管的理论研究,大都是在理想的条件下,利用一系列简化处理进行的,未能将上述因素完全考虑进去,因此只能给出二极管行为的一些定性规律。

然而,随着计算机技术的飞速发展,束流物理的数值模拟技术更好的协助了二极管的工程设计和实验操作。数值模拟的本质是通过直接求解与时间相关的 Maxwell 方程组和相对论 Lorentz 方程来描述二极管的物理特性。通过数值模拟不但可以给出二极管的宏观性质,而且可以给出各种复杂二极管的定量结果。很多与实验相结合的数值模拟研究表明,模拟结果已经可以很好的符合真实的物理过程,这就使人们对无箔二极管内强流电子束的运动规律及传输特性有了更加深入的认识。本文从理论分析和数值模拟两方面,对用于太赫兹返波管的微型真空无箔二极管进行理论分析与优化设计。

2. 理论模型

当前,强流电子束的产生主要采用场致爆炸发射阴极^[3],它属于冷阴极。所构成的无箔二极管主要包括如下两种理论模型:一种是基于无限大引导磁场和极端相对论条件下的束流模型(包括 OAL 模型和 CL

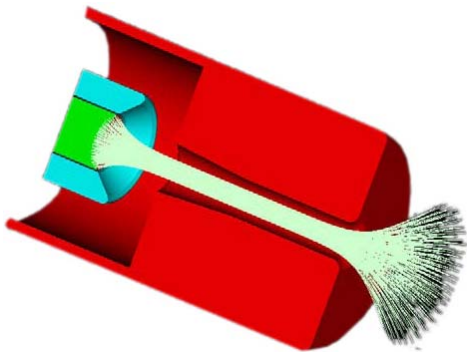


Figure 1. Schematic diagram of foil-less diode
图 1. 无箔二极管示意图

模型);另一种是基于有限大磁场和层流束假设的平衡理论^[4]。由于后者更加贴近于真实物理模型,因此被广泛应用于实际器件理论分析当中。

层流束模型包含了磁场对束流的影响^[5],认为二极管的束流可以由束在漂移区域内达到的平衡来确定,并且可以把束流处理成层流束。理想的层流束是可以把电子束流视作冷流体的,在这种思想下,径向力的平衡方程、安培定律和泊松方程,再加上两个约束条件就决定了束流的平衡,约束条件为所有粒子具有相同的总能量和轴向速度。对于层流束,束流空间内只存在非零电场 E_r 和非零磁场 B_z 、 B_ϕ ,而电子束也只有轴向和角向运动 v_z 、 v_ϕ ,那么可以列出电子径向力的平衡方程为:

$$E_r + v_\phi B_z / c - v_z B_\phi / c = \gamma m v_\phi^2 / r e \quad (1)$$

其中,

$$\gamma = (1 - v_\phi^2 / c^2 - v_z^2 / c^2)^{-1/2} \quad (2)$$

为冷流体的相对论因子。由安培定律可以得到以下方程:

$$dB_z / dr = -4\pi J_\phi / c \quad (3)$$

$$d(rB_z) / dr = -4\pi J_z r / c \quad (4)$$

其中 J_z 和 J_ϕ 分别是轴向和角向的电流密度。由于电子从阴极发射的初速度相对于束流平衡时的速度可以忽略,而所有的电子都具有相同的总能量,那么泊松方程可以用以下这种形式表达:

$$d\gamma / dr = -eE_r / mc^2 \quad (5)$$

由于所有电子具有相同的轴向速度,所以,

$$dv_z / dr = 0 \quad (6)$$

(1)~(6)式为决定束流平衡的方程组。

根据束流平衡方程组,在无限大磁场和一些必要的近似条件下得到束流公式为:

$$I = 34000 \sqrt{(\gamma_0 / 1 + 4 \ln R / r_b)^2 - 1} \quad (7)$$

其中, $\gamma_0 = 1 + e\phi_0 / mc^2$, ϕ_0 为阴阳极电位差,电子束的相对论因子 $\gamma = \gamma_0 / 1 + 4 \ln(R / r_b)$ 。

层流束模型还指出,二极管电流只有在高压 ($\gamma > \gamma_{cr} = (1 + 4 \ln(R / r_b))^{3/2}$) 下才符合式(7),是低于空

间电荷限制传输流的，而在低压($\gamma < \gamma_{cr}$)下，二极管电流仍符合空间电荷限制传输流。

3. 数值模拟

3.1. 无箔二极管的计算模型

图2为无箔二极管的计算模型，其中， R_a 为二极管的阳极半径， R_c 为阴极环的外半径， h 为阴极环的厚度， D 为漂移管直径， S 为阴、阳极间距。由先前的课题预研和理论分析^[6]，并结合本单位的实际情况，可以初步设定太赫兹返波管的工作电压范围为： $500 < U < 600$ kV，工作电流范围为： $1.5 < I < 2.5$ kA。为此，我们给定二极管的一组初始结构参数值如下： $R_a = 10$ mm、 $R_c = 2.6$ mm、 $h = 0.4$ mm、 $D = 6$ mm、 $S = 12$ mm。在随后的分析中，我们将在此基础上对二极管进行优化设计，以满足设计要求，并使其运行于最佳工作状态。

3.2. 无箔二极管的静态电场模拟

运用以上结构参数，对无箔二极管进行数值模拟^[7]。首先，由加速器产生一个高压脉冲，经由传输线加载到二极管的输入端。而后，该脉冲以TEM波的形式传播至阴极端面，由于二极管自身结构的特殊性，该TEM波在此处被反射。反射波与原TEM波相互叠加后形成稳定的电压波，该电压称为“二极管输出电压”，简称二极管电压。同时，叠加后的电压波在阴极端面处形成局部高压电场，若电场强度超过阴极材料击穿阈值，则会产生爆炸发射。发射出的电子在外加引导磁场的约束下向阳极端运动，从而形成连续稳定的电子流，该电流称为“二极管输出电流”，

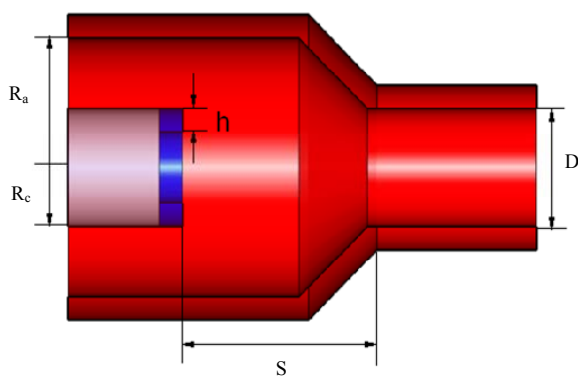


Figure 2. Calculation model of foil-less diode
图2. 无箔二极管计算模型

而所产生的二极管电压与二极管电流的比值便称为“二极管阻抗”。本文中，我们假设注入TEM波的幅值为350 kV，研究二极管的输出特性及束流电子的运动规律。

图3为注入350 kV电压波后，二极管内静态电场分布图。可以看到，阴极附近的电场较高。图4为阴极发射面所在圆面以及阴极杆外侧面所在圆柱面上的静电场分布。由图可见，阴极发射面处的电场最强，达到700 MV/m，最大电场存在于发射面的直角边缘。而在漂移管部分，径向电场和轴向电场都迅速降到了可以忽略的范围。

3.3. 外加引导磁场对二极管性能的影响

为了能够在数值模拟当中选择比较合适的轴向引导磁场，首先分析磁场强度对二极管性能的影响。在图3所示计算模型中，固定结构参数，改变引导磁场的大小，观察二极管的输出电流和电子横向运动的变化情况。模拟结果如图5所示，其中 $\beta_{\perp} = v_{\perp}/c$ 为电子的归一化横向速度， v_{\perp} 为电子横向速度， c 为光速。由图可见，引导磁场对发射电流的影响并不大。但是，当引导磁场增大时，二极管输出电流和电子的横向速度会略有下降，这是由空间电荷效应增强造成的。因为随着磁场强度增大，电子在磁场的约束下不断集中，形成的束流厚度逐渐减小，致使阴极发射表面附近和漂移阶段的电荷密度都相应增加，流的影响并不大。但是，当引导磁场增大时，二极管输出电流和电子的横向速度会略有下降，这是由空间电荷效应增强造成的。因为随着磁场强度增大，电子在磁场的约束

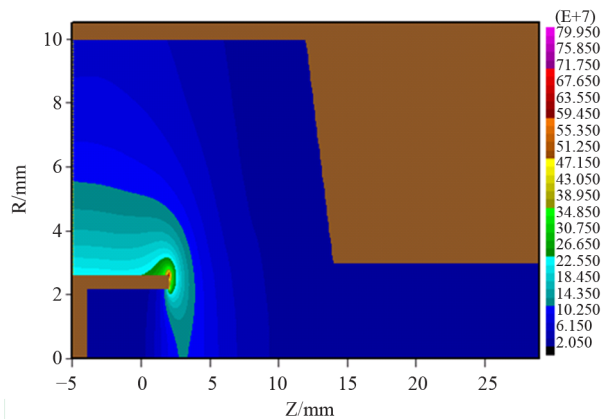


Figure 3. Equipotential graph of static electric field
图3. 无箔二极管静态电场等位图

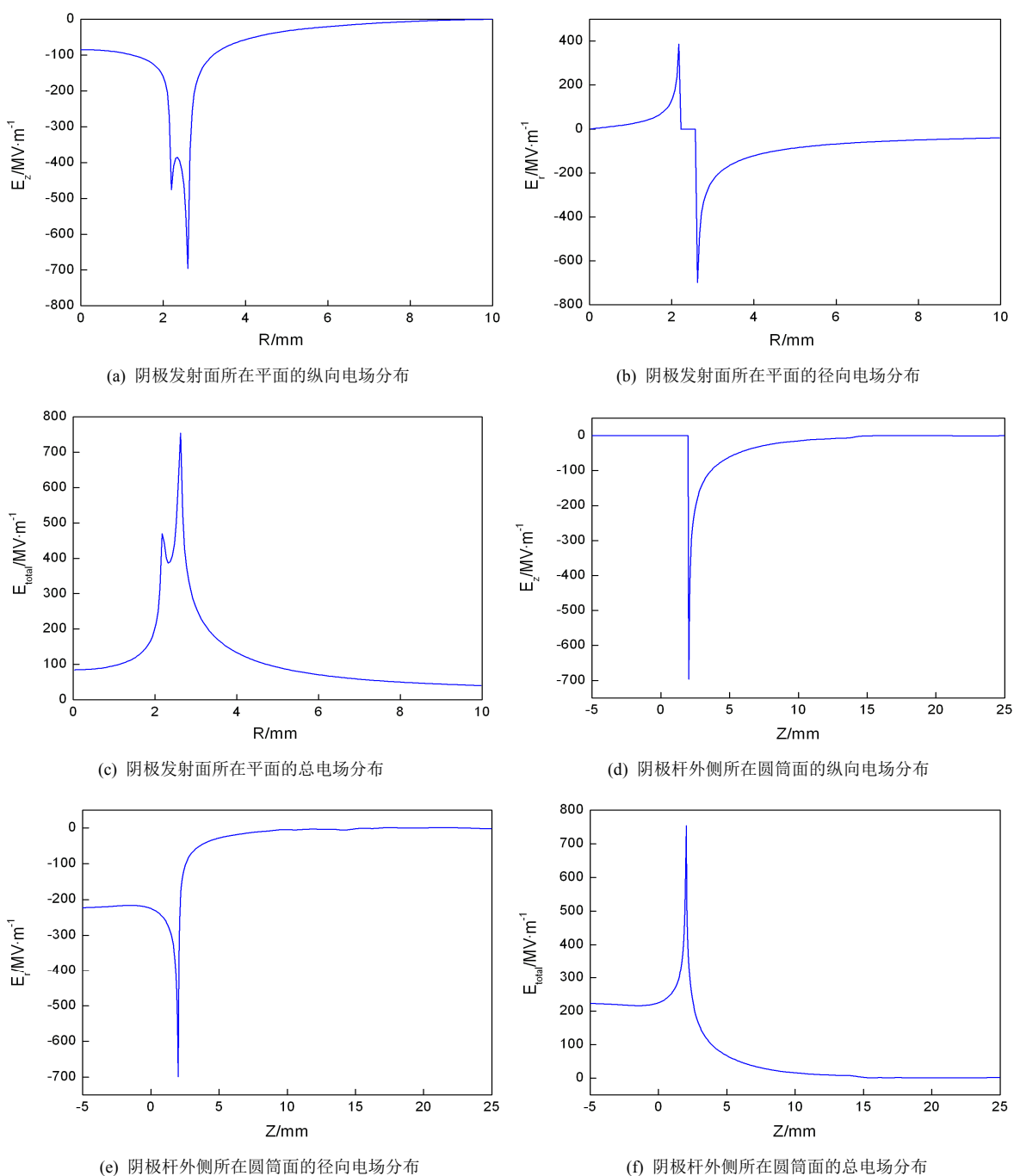


Figure 4. Simulation results of static electric field
图 4. 无箔二极管静态电场数值模拟结果

下不断集中，形成的束流厚度逐渐减小，致使阴极发射表面附近和漂移阶段的电荷密度都相应增加，从而电子在发射阶段和漂移阶段受到的空间电荷效应增强，限制了电子发射和传输，阴极发射电流呈现下降的趋势。但是当磁场很大时，所有电子都会被约束在磁力线上，增加磁场强度，束流的厚度也不会再减小，

电荷密度基本保持不变，因而阴极发射电流趋于稳定。于此同时，随着磁场强度增加，电子的回旋频率升高，回旋半径减小，电子几乎只沿纵向运动，因此横向速度必然减小。因此，在随后模拟研究中，为了忽略磁场强度对器件性能的影响，我们把其选在可以获得较好束流品质的稳定区域，即 $B > 4.0$ T。

4. 优化设计

4.1. 阳极半径 R_a 对二极管性能的影响

由无箔二极管的结构可以初步分析, 当阴阳极间距 $S < 0$ 时, 阴极完全伸入到漂移管内部, 它和漂移

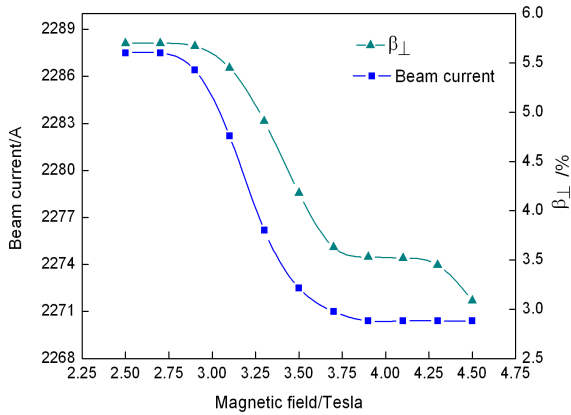
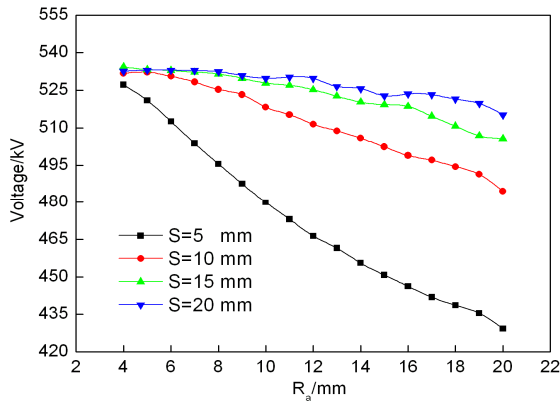


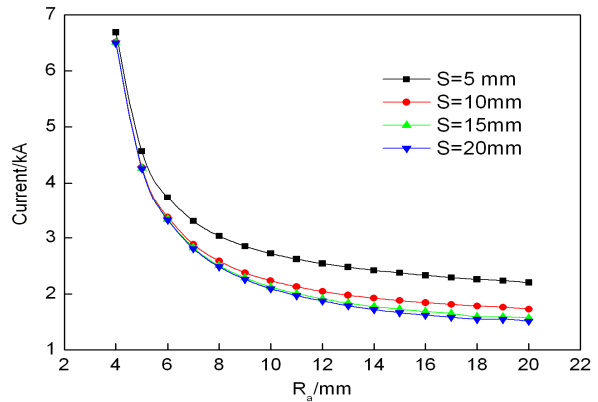
Figure 5. Calculation model of foil-less diode
图 5. 无箔二极管计算模型

管内壁的横向距离远小于阴阳极间的横向距离, 因此 R_a 对二极管输出特性的影响很小。然而, 当 $S > 0$ 时, 由于整个阳极具有相同的电势, R_a 的变化会显著影响阴极附近的电场分布, 从而影响二极管的输出电流。因此, 我们计算了在不同的阴阳极间距 S 情况下, 二极管输出特性随阳极半径 R_a 的变化情况, 结果如图 6 所示。其中包括: 二极管输出电压、输出电流、等效阻抗及电子能量。注入电压波的幅值为 350 kV。

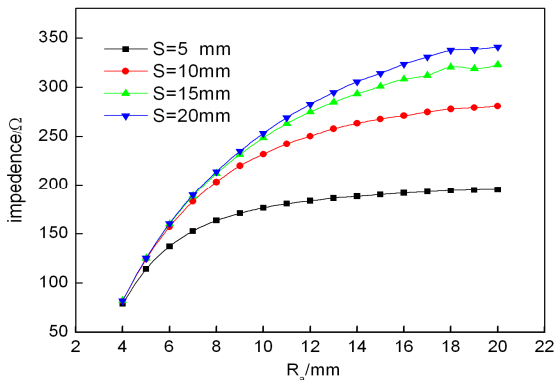
由图 6 可见: 1) 随着阳极半径 R_a 的增大, 输出电压逐渐下降, 并且在阴阳极间距 S 较小时, 输出电压下降更加明显; 2) 二极管输出电流随 R_a 的增大而减小, 且 S 越大, 输出电流越小。另外, 随着 R_a 的增加, 不同 S 情况下电流之间的差距也越大; 3) 随着阳极半径 R_a 的增大, 二极管阻抗也随之增加并趋于缓和, 且 S 越大, 阻抗随 R_a 的变化范围也越大; 4) 电子能量随 R_a 的增大, 其变化规律为先增大后减小。这是因为电子能量是由如下两个因素共同决定的: 二极



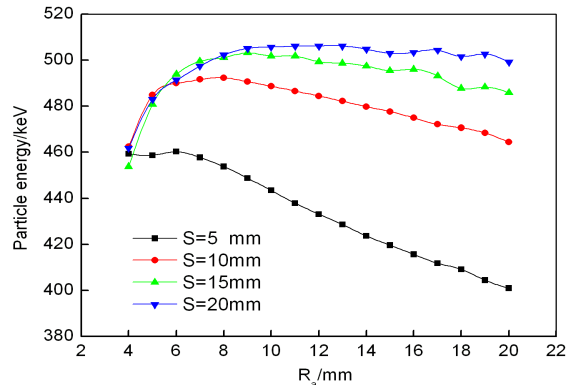
(a) 二极管输出电压随阳极半径的变化



(b) 二极管输出电流随阳极半径的变化



(c) 二极管阻抗随阳极半径的变化



(d) 电子能量随阳极半径的变化

Figure 6. Output characteristics with variation of anode radius
图 6. 二极管输出特性随阳极半径的变化情况

管输出电压和加速电场的纵向分量。当 R_a 较小时，电场的径向分量很大，纵向分量很小，因此，电子未能得到充分的加速，所以导致电子能量较小。随着 R_a 的增大，电场的径向分量减小，纵向分量增大，因此电子能量上升。继续增大 R_a ，由于此时输入电压下降明显，最终导致电子束能量下降。

4.2. 阴阳极间距 S 对二极管性能的影响

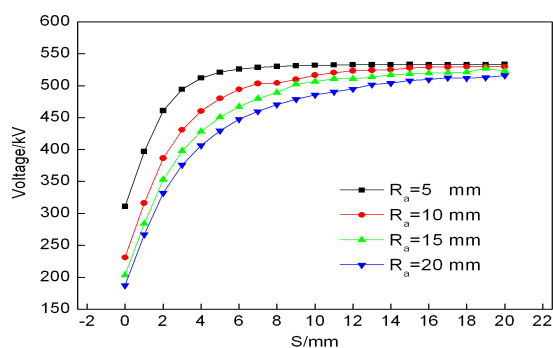
与前面类似，我们研究了阴阳极间距 S 对二极管性能的影响。固定其它参数不变，改变 S 的大小，观察二极管输出性能的变化情况。此处，注入电压波的幅值依然为 350 kV，计算结果如图 7 所示。由图可见：
 1) 在 $S < R_a$ 情况下，输出电压随 S 的增大迅速上升，但是当 S 增大到与 R_a 可比拟时，输出电压趋向于饱和，且对于不同的阳极半径，其饱和值基本相同；
 2) 输出电流随 S 的增大迅速下降，最终趋于稳定，且 R_a 越大，稳定值越小；
 3) 二极管阻抗随 S 的增加而变大，且阳极半径越大，阻抗变化范围越大；
 4) 电子能量的变化趋势与输出电压基本相同。

与阳极半径变化对二极管输出特性的影响相比，阴阳极间距变化对二极管的输出电压、输出电流、电子能量及阻抗的影响较小。特别是当阴阳极间距大于阳极半径 $S > R_a$ 时，继续增大阴阳极间距对输出束流的性能基本上没有影响，此时二极管性能近似保持一种稳态。

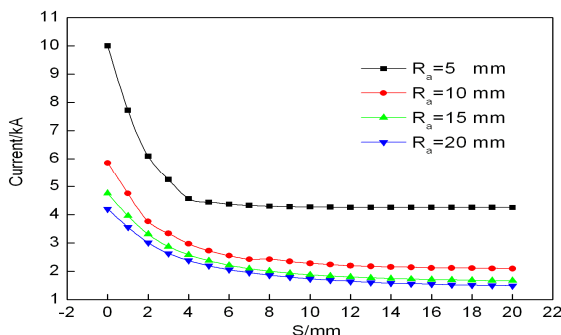
综合以上分析可知，束流强度主要由阴极表面的电场来决定，而阴极表面电场受阳极半径以及阴阳极间距影响很大。因此改变阳极半径或阴阳极之间的距离能有效改变二极管输出束流的特性。而电子能量主要由输入电压幅值和加速电场的方向共同决定，当阴阳极间距或者阳极半径固定时，电子束能量基本由输入电压决定。

4.3. 注入电压波幅值对二极管性能的影响

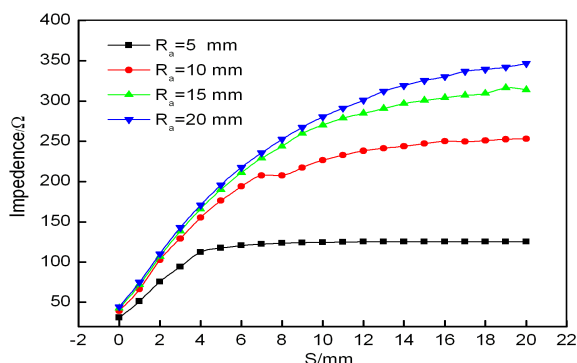
在以上分析中，我们使用的注入电压波幅值 U_m 均为 350 kV，此时，可以产生近似 520 kV，2.2 kA 的工作电流。该工作电流完全可以驱动太赫兹返波管正常运行。为了保证返波管在一定的电压、电流范围内均能正常工作，有必要研究二极管输出束流随注入电压幅值的变化规律。



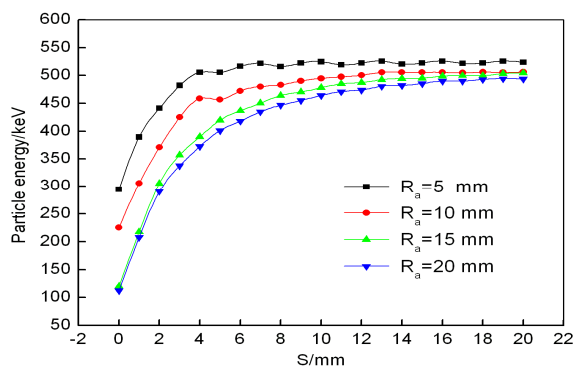
(a) 二极管输出电压随阴阳极间距的变化



(b) 二极管输出电流随阴阳极间距的变化



(c) 二极管阻抗随阴阳极间距的变化



(d) 电子能量随阴阳极间距的变化

Figure 7. Diode output characteristics with the variation of space between cathode and anode
 图 7. 不同阳极半径下，二极管输出特性随阴阳极间距变化情况

图 8 为模拟结果，由图可见，二极管输出电压和电流随注入电压幅值的变化近似成线性关系。这是因为当器件结构参数一定时，其阻抗基本保持不变，输出电压、电流近似符合欧姆定律。且当 U_m 在 300~400 kV 变化时，可以获得近似 480~600 kV，2~3 kA 输出束流。该范围正是太赫兹返波管正常运行时所需的二极管工作范围。

5. 结论

本文对太赫兹返波管中所使用的微型无箔二极管进行了理论分析和模拟研究。结果表明：束流电子传输过程中，其横向相对速度的大小会受到轴向引导

磁场和二极管结构参数的影响，增大轴向引导磁场和优化二极管参数，均可以减小束流电子的横向相对速度。利用数值模拟方法，对无箔二极管的结构参数进行了优化设计，最终得到一套最优结构参数为：阴极外半径 2.6 mm、漂移管半径 3.0 mm、前端阳极半径 10.0 mm、阴阳极间距 12.0 mm 及轴向引导磁场 4.5 T。在该参数下，可获得二极管的输出电压为 520 kV、输出电流为 2.2 kA，输入阻抗 236 Ω 。研究表明，二极管的各项输出指标完全满足后续太赫兹返波管正常工作时对束流品质的要求。

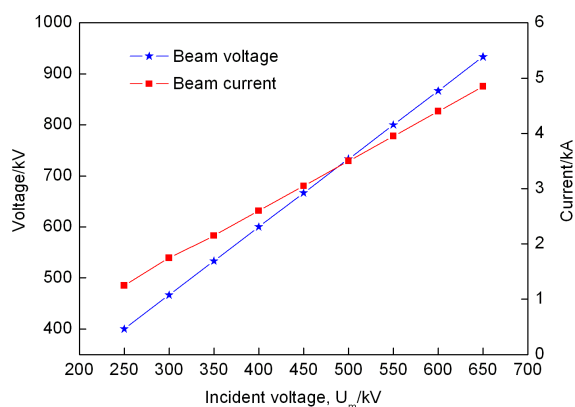


Figure 8. Effect of incident TEM wave amplitude on device output characteristic

图 8. 不同阳极半径下，二极管输出特性随阴阳极间距变化情况注入 TEM 波幅值对二极管输出特性的影响

参考文献 (References)

- [1] 廖复疆, 孙振鹏, 闫铁昌. 真空电子技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 阿良莫夫斯基著, 黄高年译. 电子注与电子枪[M]. 北京: 科学出版社, 1974.
- [3] 刘元震, 王仲春. 电子发射与光电阴极[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [4] E. J. Michael, M. A. Mostrom and L. E. Thode. Analytical and numerical studies of foilless diodes. Journal of Applied Physics, 1981, 52(8): 4942-4949.
- [5] E. Ott, T. M. Antonsen and R. V. Lovelace. Theory of foil-less diode generation of intense relativistic electron beams. Physics of Fluids, 1977, 20(7): 1180-1184.
- [6] 张海, 王建国, 童长江. 过模高功率太赫兹表面波振荡器优化设计[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1531-1536.
- [7] 李永东, 王洪广, 刘纯亮, 张殿辉, 王建国, 王玥. 高功率微波器件 2.5 维通用粒子模拟软件—尤普[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(12): 1866-1870.