

质谱仪用分离打拿极电子倍增器结构优化

李娜¹ 刘利¹ 李洁¹ 贲新团¹ 刘虎林² 刘碧野^{1,3} 吴胜利¹ 胡文波^{1*}

(1. 西安交通大学 电子科学与工程学院电子物理与器件教育部重点实验室 西安 710049; 2. 中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710119; 3. 北京东方计量测试研究所 北京 100086)

Structural Optimization of Discrete Dynode Electron Multiplier for Mass Spectrometers

LI Na¹, LIU Li¹, LI Jie¹, YUN Xintuan¹, LIU Hulin², LIU Biye^{1,3}, WU Shengli¹, HU Wenbo^{1*}

(1. Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, School of Electronic Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 3. Beijing Orient Institute of Measurement & Test, Beijing 100086, China)

Abstract A device structure of 19-stage discrete-dynode electron multiplier (DDEM) for mass spectrometers was designed, and its structure model was constructed. The effects of the key configurational parameters of the dynode and collector as well as the last-stage voltage-division resistance on the DDEM gain were numerically investigated, and their mechanisms were explored by analyzing the internal electric field distribution and electron motion trajectory of the DDEM. Based on these analyses, the configurations of the dynode and collector as well as the last-stage voltage-division resistance were optimized. The simulation results show that when the length of the left sidewall of the 3rd dynode and the top length of the collector are 2.35 mm and 1.9 mm, respectively, and the last-stage voltage-division resistance is 0.7 M Ω , the electron collection efficiencies of the 3rd dynode and the collector can be improved so as that the DDEM gains at the operating voltages of 1800 V and 2500 V attain 3.70×10^4 and 5.09×10^7 , respectively. Moreover, the single-electron pulse rise time and pulse width of the optimized device reach 2.38 ns and 3.21 ns at 1800 V, respectively. The structurally optimized electron multiplier meets the design requirements in terms of gain and time characteristics.

Keywords Mass spectrometer, Electron multiplier (EM), Secondary electron emission, Numerical simulation

摘要 设计了一种用于质谱仪的19级分离打拿极电子倍增器的结构,构建了器件结构模型,仿真研究了打拿极和收集极的关键结构参数及末级分压电阻阻值对电子倍增器增益的影响,通过分析器件内部电场分布和电子运动轨迹,探究了影响机理,在此基础上对打拿极和收集极的结构及末级分压电阻进行了优化。仿真结果表明,当第3打拿极左侧壁长度和收集极顶部长度分别为2.35 mm和1.9 mm并且末级分压电阻阻值为0.7 M Ω 时,可以使第3打拿极和收集极获得较高的电子收集效率,从而使电子倍增器在1800 V和2500 V工作电压下的增益分别达到 3.70×10^4 和 5.09×10^7 ,在1800 V电压下单电子脉冲上升时间和脉冲宽度分别达到2.38 ns和3.21 ns。设计的电子倍增器在增益和时间特性上达到了目标要求。

关键词 质谱仪 电子倍增器 二次电子发射 数值模拟

中图分类号: TN152 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202410001

质谱仪是在电磁场作用下按照质荷比分离不同离子进行物质组成检测的仪器^[1],其主要由离子源、质量分析器和离子检测器等部件构成。离子检测器的作用是对经过质量分析器筛选后的离子信

收稿日期: 2024-10-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFF0700800; 2021YFF0700600); 国家自然科学基金项目(U2241207; 52002313)

* 联系人: E-mail: huwb@mail.xjtu.edu.cn

号进行放大和检测。电子倍增器是最常用的一种离子检测器,按照打拿极结构不同分为连续打拿极电子倍增器和分离打拿极电子倍增器两种。分离打拿极电子倍增器凭借其高增益、长寿命和低噪声等特性^[2],被应用于高端质谱仪。

质谱仪种类繁多,不同厂家设计制造的质谱仪在特性和结构上存在差异,为了满足质谱仪对不同性能及结构的电子倍增器应用需求,目前生产制造出的分离打拿极电子倍增器的常规型号有数十种,并且不断有新的定制产品出现。不同质谱仪中应用的电子倍增器的差异主要体现在电子倍增器结构、打拿极二次电子发射体材料方面存在不同。电子倍增器结构要素包括打拿极和收集极(或称为阳极)的结构及空间排布、打拿极级数、工作模式(脉冲模式、模拟模式及脉冲/模拟双模式)、打拿极极间电压分配方式、打拿极和收集极的安装固定方式等。

随着质谱仪技术发展及应用领域拓展,要求电子倍增器有更高的性能。电子倍增器结构优化设计及打拿极二次电子发射体新型材料开发和制备工艺改进是电子倍增器性能提升的主要途径。

在电子倍增器结构方面,日本滨松光子学株式会社^[3]开发出一种分离打拿极电子倍增器,打拿极具有圆弧形状,若干打拿极排成上下两行,交错排列成阵列,装入一外壳中,可以获得较高的增益,并能防止外部粒子的干扰。美国 Adaptas Solutions 公司^[4]开发出一种分离打拿极电子倍增器,通过适当延长打拿极侧面长度,以抑制离子反馈效应,从而降低器件背景噪声。西安交通大学^[5]开发了一种打拿极侧壁镀膜的电子倍增器结构,显著提升了分离打拿极电子倍增器的增益。

在二次电子发射材料方面,滨松光子学株式会社采用 Al_2O_3 、Cu-BeO 作为打拿极表面的二次电子发射材料,开发出有很好工作稳定性的分离打拿极电子倍增器。Adaptas Solutions 公司^[6]开发出基于金刚石薄膜的分离打拿极电子倍增器,解决了电子倍增器暴露在空气中时水分子对器件增益的影响问题。西安交通大学^[7]研发出基于 Au 掺杂 MgO 薄膜的分离打拿极电子倍增器,该薄膜具有较高的二次电子发射系数,可以提高器件增益。

为了满足一款质谱仪的应用需求,本文设计了一种具有 19 级打拿极的电子倍增器,通过关键结构参数优化,获得了增益高、时间特性好的电子倍增

器结构方案。

1 分离打拿极电子倍增器工作原理及设计要求

分离打拿极电子倍增器主要由多级打拿极和收集极组成,打拿极表面制备有高二次电子发射系数的电子发射体材料。入射带电粒子在电场作用下轰击第一打拿极,激发出二次电子,这些电子在电场作用下继续运动并撞击下一打拿极,产生新的二次电子,不断重复这一过程,直至末级打拿极发射的二次电子被收集极所接收,形成输出信号^[8]。由于打拿极二次电子发射体材料的二次电子发射系数大于 1,通过各级打拿极的二次电子逐级倍增,从而实现输入信号的放大^[9]。

衡量电子倍增器带电粒子信号放大能力的一个参数是增益(G),数值上为收集极接收的电子数 N_c 与电子倍增器入射带电粒子数 N_p 的比值,即 $G=N_c/N_p$ ^[10]。此外,对于质谱仪用的工作于脉冲计数模式下的电子倍增器,时间特性(包括单离子(或单电子)脉冲的上升时间和宽度)也是要考虑的重要参数,它影响到质谱仪的分辨率等参数。单电子脉冲上升时间是指单电子入射状态下输出的单峰电压脉冲波形的脉冲上升沿的脉冲峰值幅度 10% 至 90% 的两点之间的时间间隔。单电子脉冲宽度是指单电子入射状态下输出的单峰电压脉冲波形的峰值幅度 50% 的两点之间的时间间隔。

影响电子倍增器增益的主要因素包括打拿极二次电子发射体材料的二次电子发射系数、电子倍增器的结构(打拿极和收集极的结构、空间排布、极间电压分配)。同时,电子倍增器结构还对时间特性产生影响。

针对一款质谱仪对分离打拿极电子倍增器的要求:工作电压 ≤ 3000 V、最高脉冲增益 $\geq 5 \times 10^7$ 、单电子脉冲上升时间 ≤ 5 ns、单电子脉冲半高宽 ≤ 5 ns,设计了一种分离打拿极电子倍增器,结构如图 1 所示,由 19 级打拿极和 1 个收集极构成,相邻打拿极间通过一组串联的电阻进行分压。

2 电子倍增器仿真模型构建

利用 CST 电磁仿真软件构建了 19 级分离打拿极电子倍增器模型(隐去了两侧的陶瓷板),如图 2 所示。为了提高前两级打拿极对入射带电粒子的收集效率,前两级打拿极(特别是第 1 打拿极)采用

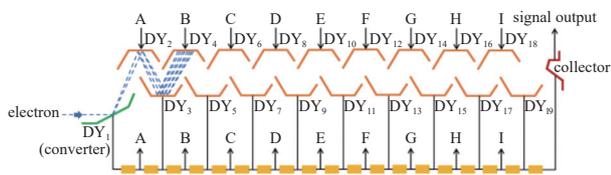


图1 设计的分离打拿极电子倍增器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the designed discrete dynode electron multiplier

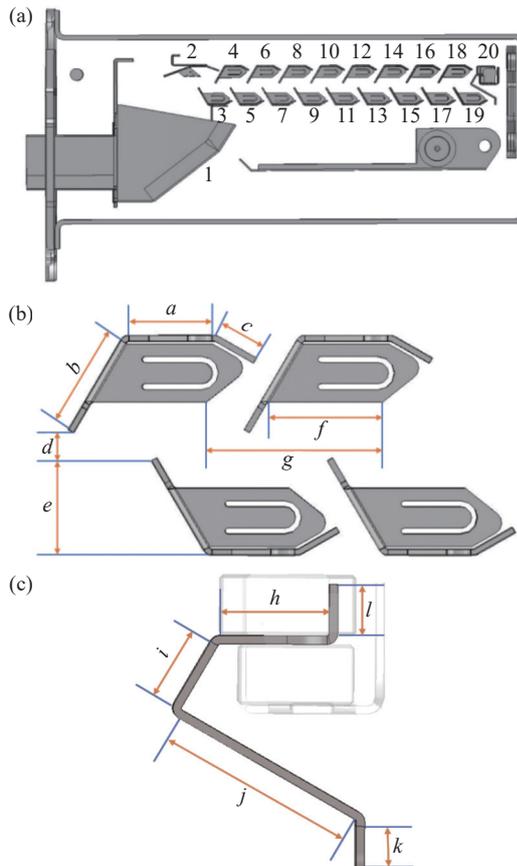


图2 19级分离打拿极电子倍增器仿真模型(1~19—第1~19级打拿极, 20—收集极), (a)整体结构, (b)打拿极结构和布局, (c)收集极结构

Fig. 2 Model of the 19-stage discrete dynode electron multiplier(1~19—the 1st~19th dynodes, 20—collector), (a) Overall structure, (b) dynode configuration and layout, (c) collector structure

了较大尺寸。第3~第19打拿极采用了相同的结构并且尺寸较小,使器件结构紧凑。第1与第2打拿极间的分压电阻为4.2 MΩ,第2~第19打拿极的相邻打拿极之间的分压电阻均为1.4 MΩ,第19打拿极与收集极之间的分压电阻为0.4 MΩ。打拿极二次电子发射体材料采用MgO-Au薄膜,二次电子发射系数曲线如图3所示。电子倍增器工作时,通常

在第1打拿极前设置一个转换电极,将经质量分析器筛选的离子撞击转换电极,引起二次电子发射,这些电子再入射第1打拿极。因此,采用电子入射方式进行仿真,第1打拿极电压上施加一个负高压,入射电子能量设置为6000 eV。设置的初始打拿极及收集极结构参数见表1。

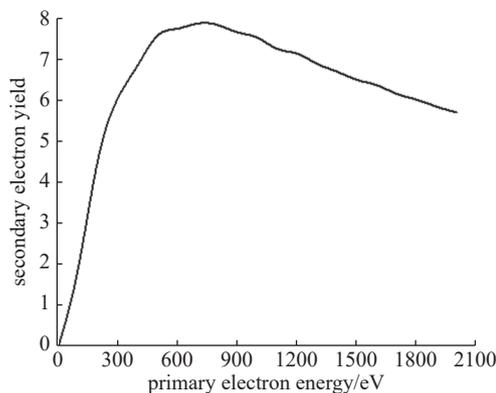


图3 MgO-Au薄膜的二次电子发射系数曲线

Fig. 3 Secondary electron emission yield curve of MgO-Au film

表 1 19级分离打拿极电子倍增器模型参数

Tab. 1 Model parameters of 19-stage discrete dynode electron multiplier

结构参数	参数数值/mm
<i>a</i>	4.26
<i>b</i>	3.47
<i>c</i>	1.45
<i>d</i>	0.95
<i>e</i>	3.18
<i>f</i>	3.76
<i>g</i>	5.85
<i>h</i>	2.68
<i>i</i>	1.74
<i>j</i>	4.94
<i>k</i>	1.57
<i>l</i>	1.20

3 结果与讨论

3.1 初始结构模拟计算

利用粒子追踪法对初始结构的电子倍增器的电场分布、电子运动轨迹及增益进行模拟计算。图4所示为1800 V工作电压下的电子倍增器电场分布图,箭头方向即电场方向。可以看出,相邻打拿极之间及打拿极阵列之外均具有较强的电场。在第

13 打拿极和第 14 打拿极之间选取一条路径“1”，计算出沿路径“1”上的电场强度变化情况，如图 5 所示。结果表明，内部电场强度遵循相邻打拿极之间由弱变强再变弱的规律，从上一级打拿极出射的大多数电子在电场作用下能够顺利被下一级打拿极所接收并产生更多的二次电子，从而实现二次电子倍增。

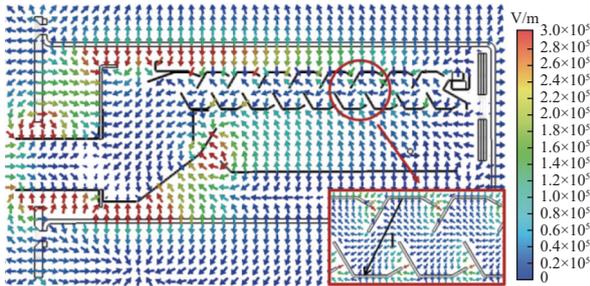


图4 初始结构电子倍增器的电场分布

Fig. 4 Electric field distribution of the electron multiplier with the initial structure

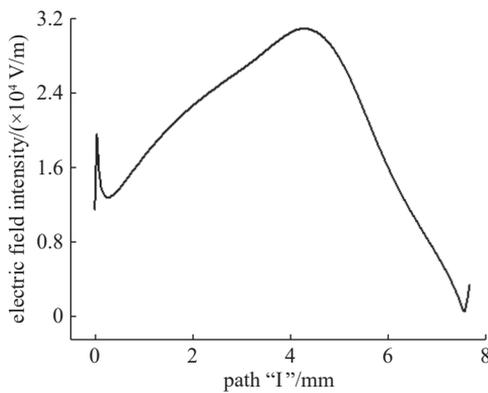


图5 沿路径“1”的电场分布

Fig. 5 Electric field distribution along the path "1"

为了获得高增益，理论上希望上一级打拿极发射的二次电子都能撞击到下一级打拿极的电子发射面。但在电子倍增器实际工作过程中，不可避免地存在少量二次电子未能被下一级打拿极的电子发射面所接收，这些电子中有的撞击到下一级打拿极的侧壁背面，有的逃逸出打拿极阵列，有的越过下一级打拿极而撞击到后续的打拿极，从而减少了电子倍增的机会，导致器件增益降低。电子倍增器前三级打拿极由于入射和发射的电子数较少，二次电子能否顺利到达下一级打拿极的电子发射面并产生新的二次电子发射对实现高增益尤为重要。对于具有初始结构的电子倍增器(结构参数见表 1)，在 1800 V 电压下的增益仅为 5.33×10^3 ，在 2500 V 电压下增益上升到 1.33×10^7 。图 6 所示为 1800 V

电压下的电子运动轨迹图。可以看出，初始结构电子倍增器从第 1 打拿极发射的部分二次电子被第 3 打拿极的左侧壁背面所拦截，没有全部被第 2 打拿极所接收，而第 2 打拿极发射的部分二次电子也撞击到第 3 打拿极左侧壁背面，导致器件增益受到影响。

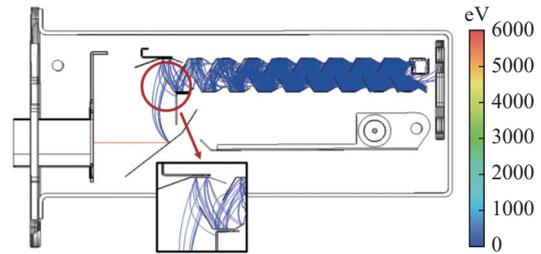


图6 初始结构电子倍增器的电子轨迹图

Fig. 6 Electron trajectory of the electron multiplier with the initial structure

3.2 打拿极结构优化

为了减少撞击第 3 打拿极左侧壁背面的二次电子数量，以提高器件增益，计算分析了第 3 打拿极左侧壁长度对增益的影响，1800 V 电压下的模拟计算结果如图 7 所示。可以看出，随着左侧壁从 2.27 mm 增加到 3.55 mm，电子倍增器增益呈现出先升高后下降的变化规律，当左侧壁长度为 2.35 mm 时，增益达到最高。如图 8 所示为第 3 打拿极左侧壁长度为 2.35 mm 时的器件内部电子轨迹图。相比于初始结构，该结构从第 2 打拿极出射的大部分二次电子能够顺利运动到第 3 打拿极的二次电子发射薄膜表面，从而产生更多的二次电子。经过第 3 打拿极结构优化后，电子倍增器增益从初始结构的 5.33×10^3 增长到 3.11×10^4 。

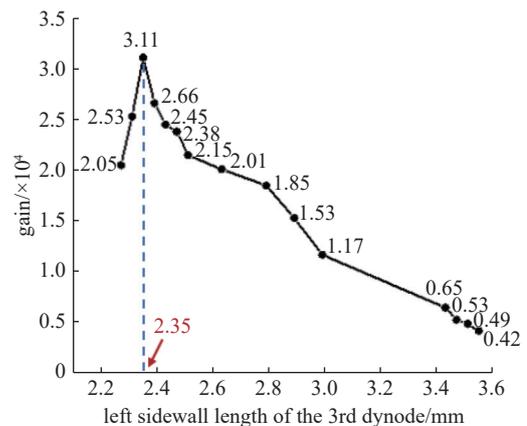


图7 电子倍增器增益随第 3 打拿极左侧壁长度的变化

Fig. 7 Variation of the EM gain with the left sidewall length of the 3rd dynode

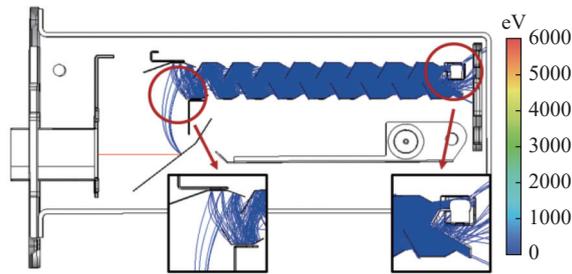


图8 第3打拿极结构优化后的电子倍增器电子轨迹图

Fig. 8 Electronic trajectory of the electron multiplier with the optimized 3rd dynode configuration

3.3 收集极结构优化

对第3打拿极左侧壁长度进行优化后,增益获得了较大的提升,在此基础上对收集极的结构进行优化。从图8中可以看到,从第19打拿极出射的二次电子有一部分从收集极上面逃逸而没有被收集到。为此,适当加长收集极顶部的长度有望进一步提高器件增益。模拟计算了1800 V电压下收集极顶部长度 l 在1.6 mm~2.2 mm范围内的增益,结果如图9所示。当收集极顶部长度为1.9 mm时,电子倍增器增益最高,达到 3.41×10^4 。图10为该结构电子

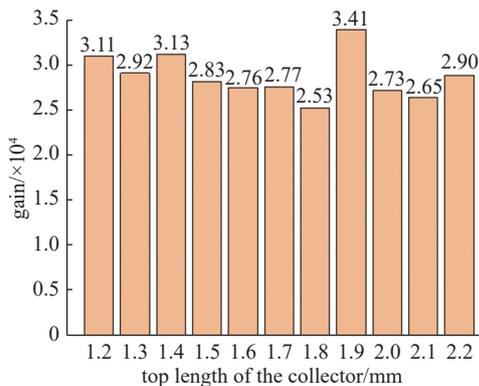


图9 不同收集极结构下的电子倍增器增益

Fig. 9 Gains of the electron multipliers with the different collector configurations

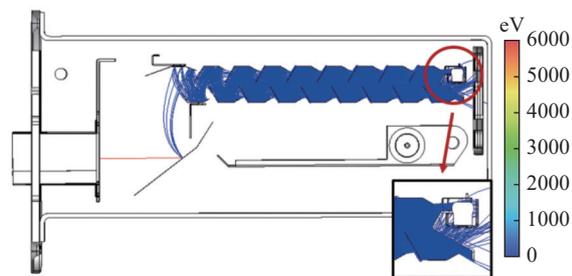


图10 收集极顶部长度为1.9 mm时的电子倍增器电子轨迹图
Fig. 10 Electronic trajectory of the electron multiplier with $l=1.9$ mm

倍增器的电子轨迹图,从第19打拿极出射的二次电子被收集极有效接收到,实现了增益的提升。但由于第19打拿极与收集极之间有一定的间隙,并且打拿极阵列之外也存在较强的电场,少量二次电子在运动过程中仍会逃逸出打拿极阵列。当收集极顶部长度继续加长时,第19打拿极出射的二次电子中从收集极侧面逃逸的部分增多,导致电子倍增器增益未得到进一步提升。

3.4 收集极电阻优化

在第3打拿极左侧壁长为2.35 mm并且收集极顶部长度为1.9 mm的基础上,仅改变第19打拿极与收集极间电阻阻值,而保持其余打拿极的分压电阻及总工作电压1800 V不变,计算出不同收集极电阻下的电子倍增器增益,结果如图11所示。收集极电阻为0.7 M Ω 时,电子倍增器的增益达到最高,为 3.70×10^4 ,其电场分布及电子运动轨迹分别如图12和图13所示。此时,第19打拿极电势为-43.90 V,而收集极电阻为0.4 M Ω 时第19打拿极电势为-25.35 V。由于总工作电压是一定的,因此收集极电阻阻值越大,其分压越高,二次电子在此处受到的电场力也越大。因此,相对于收集极电阻0.4 M Ω ,收集极电阻为0.7 M Ω 时器件增益提升的原因主要在于第19打拿极与收集极之间的电势差更高,使得二次电子所受电场力更大,导致更多的二次电子顺利地地被收集极所接收。若收集极电阻太小,则会使得其对电子的“控制力”太弱,导致较多的电子逃逸出电子倍增器,没有被有效接收。若收集极电阻过大,又会导致二次电子“越级接收”现象严重,使得电子倍增过程受到影响。因此,选取合适的收集极电阻对

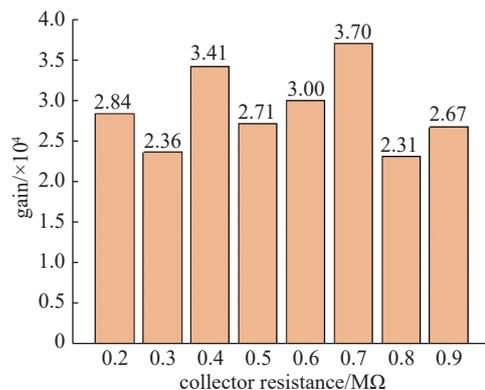


图11 不同收集极电阻下的电子倍增器增益

Fig. 11 Gains of the electron multipliers with the different collector resistances

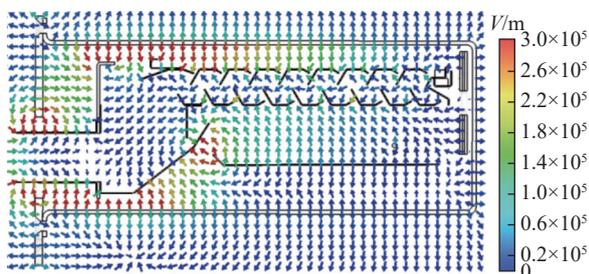


图12 收集极电阻为 0.7 MΩ 时的电子倍增器电场分布

Fig. 12 Electric field distribution of the electron multiplier with the collector resistance of 0.7 MΩ

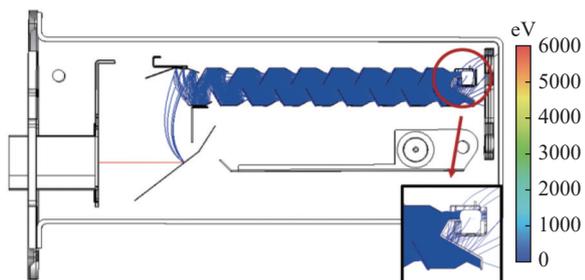


图13 收集极电阻为 0.7 MΩ 的电子轨迹

Fig. 13 Electronic trajectory of the electron multiplier with the collector resistance of 0.7 MΩ

于电子倍增器实现高增益同样至关重要。

3.5 优化后的电子倍增器的增益和时间特性

优化后的电子倍增器的第3打拿极左侧壁长度为 2.35 mm、收集极顶部长度为 1.9 mm，收集极电阻为 0.7 MΩ(其他结构参数见表1)，与优化前相比，器件增益得到明显提高，结果如图14所示。此外，随着工作电压逐渐升高，增益提升幅度越来越大，呈指数型增长，电压为 2500 V 时增益达到 5.09×10^7 。

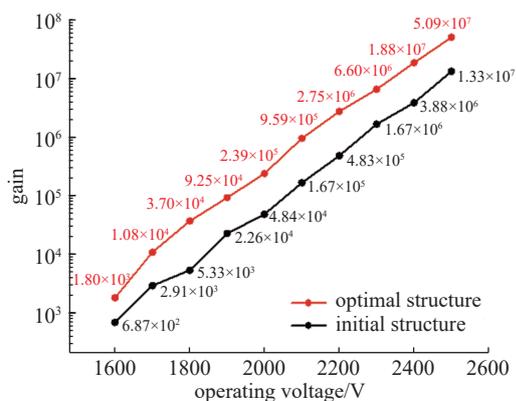


图14 优化前后电子倍增器的增益对比

Fig. 14 Comparison of the gains of the electron multiplier before and after optimization

由以上研究可以看出，优化后的电子倍增器的增益得到显著提高。在此基础上，进一步探究了电子倍增器的时间特性。为此，利用 CST 粒子工作室的静态电场 PIC 求解器(E-Static PIC Solver)模块对收集极进行监测。表2列出了四种结构电子倍增器的时间特性参数，其中打拿极结构优化代表第3打拿极左侧壁长度为 2.35 mm 时的结构，收集极结构优化代表第3打拿极左侧壁长度为 2.35 mm 并且收集极顶部长度为 1.9 mm 的结构，综合优化结构即第3打拿极左侧壁长度为 2.35 mm、收集极顶部长度为 1.9 mm、收集极电阻为 0.7 MΩ 的结构。可以看出，在 1800 V 电压下，优化后的三种结构相比于初始结构，单电子脉冲上升沿和脉冲宽度均有一定程度的减小，综合优化结构的时间特性最佳，其相比于初始结构单电子脉冲上升时间和脉冲宽度分别减小了 0.74 ns 和 0.34 ns。这表明优化后的电子倍增器有更好的时间响应特性。

表2 不同结构电子倍增器的时间特性参数

Tab. 2 Time characteristic parameters of the electron multipliers with the different structures

电子倍增器结构	单电子脉冲上升时间/ns	单电子脉冲宽度/ns
初始结构	3.12	3.55
打拿极结构优化	2.90	3.53
收集极结构优化	2.77	3.37
综合优化结构	2.38	3.21

4 总结

本文提出了一种质谱仪用 19 级打拿极电子倍增器的结构，仿真研究了第3打拿极左侧壁长度、收集极顶部长度及收集极电阻对电子倍增器的影响，通过分析电子倍增器内部的电场分布和电子运动轨迹，揭示了影响机理，在此基础上，对这三项参数进行了优化，获得了第3打拿极左侧壁长度为 2.35 mm、收集极顶部长度为 1.9 mm 及收集极电阻为 0.7 MΩ 的优化参数，使电子倍增器在 1800 V 和 2500 V 工作电压下的增益分别达到 3.70×10^4 和 5.09×10^7 ，单电子脉冲上升时间和脉冲宽度分别达到 2.38 ns 和 3.21 ns，符合电子倍增器的设计要求。

参考文献

[1] Liu C, Xiao M, Zhang X B, et al. Simulation study on the

- influence of different ion incidence conditions on the resolution capability of dual focus magnetic mass spectrometer[J]. *Journal of vacuum science and technology*, 2022, 42(11): 822–827 (刘畅, 肖梅, 张晓兵, 等. 不同离子入射条件对双聚焦磁质谱仪的分辨能力影响的仿真研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2022, 42(11): 822–827 (in Chinese))
- [2] Yan B J, Wei W L, Liu S L, et al. Development of a new type of separated anode electron multiplier[J]. *Chinese inorganic analytical chemistry*, 2023, 13(9): 1023–1029 (闫保军, 韦雯露, 刘术林, 等. 新型分离式打拿极电子倍增器研制 [J]. *中国无机分析化学*, 2023, 13(9): 1023–1029 (in Chinese))
- [3] Hiroyuki K, Goshō E, Yuki M, et al. Ion detector[P]. Shizuoka: CN110189977B, 2024.08. 27 (小林浩之, 远藤刚志, 守屋裕树, 等. 离子检测器 [P]. 静岡: CN110189977B, 2024.08. 27 (in Chinese))
- [4] Yurek R, Hongtel K. Improvement of the internal area of the electron multiplier[P]. New south wales: CN113302715B, 2024.03. 12 (R-尤雷克, K-宏特尔. 对电子倍增器内部区域的改进 [P]. 新南威尔士: CN113302715B, 2024.03. 12 (in Chinese))
- [5] Hu W B, Li J, Wu S L, et al. A high gain electron multiplier and its manufacturing method[P]. Chinese patent: CN117524829A, 2024.02. 06 (胡文波, 李洁, 吴胜利, 等. 一种高增益电子倍增器及其制作方法 [P]. 中国专利: CN117524829A, 2024.02. 06 (in Chinese))
- [6] Aditya W, Russell J, Kevin H. Electron Multipliers having improved gain stability[P]. United States: US2023/0298873A1, 2023.09. 21
- [7] Li J, Hu W B, Hao L, et al. Secondary electron emission enhancement of MgO/Au composite film by adopting a gold buffer layer[J]. *Materials Research Bulletin*, 2019, Volume 118: 110493
- [8] Li Y H, Xia Z C, Li J, et al. Simulation calculation of the effect of collecting electrode pair separation on the gain of nanopole electron multiplier[J]. *Vacuum electronic technology*, 2022, 80(4): 47–51 (李杨昊, 夏章聪, 李洁, 等. 收集极对分离打拿极电子倍增器增益影响的模拟计算 [J]. *真空电子技术*, 2022, 80(4): 47–51 (in Chinese))
- [9] Tan X Q, Wu S L, Wang H G, et al. Simulation calculation of box grid electron multiplier[J]. *Journal of vacuum science and technology*, 2017, 37(4): 380–385 (谭孝青, 吴胜利, 王洪广, 等. 盒栅式电子倍增器模拟计算 [J]. *真空科学与技术学报*, 2017, 37(4): 380–385 (in Chinese))
- [10] Xia Z C, Wang Y R, Peng Y W, et al. 3D structure of box-and-grid electron multiplier with higher electron collection efficiency[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 2023, 41(6): 064205

文章简介

本文设计了一种用于质谱仪的 19 级分离打拿极电子倍增器的结构, 构建了器件结构模型, 仿真研究了打拿极和收集极的关键结构参数及末级分压电阻阻值对电子倍增器增益的影响, 通过分析器件内部电场分布和电子运动轨迹, 探究了影响机理, 在此基础上对打拿极和收集极的结构及末级分压电阻进行了优化。结果表明, 当第 3 打拿极左侧壁长度和收集极顶部长度分别为 2.35 mm 和 1.9 mm 并且末级分压电阻阻值为 0.7 M Ω 时, 可以使第 3 打拿极和收集极获得较高的电子收集效率, 从而使电子倍增器在 1800 V 和 2500 V 工作电压下的增益分别达到 3.70×10^4 和 5.09×10^7 , 在 1800 V 电压下单电子脉冲上升时间和脉冲宽度分别达到 2.38 ns 和 3.21 ns。设计的电子倍增器在增益和时间特性上达到了目标要求。

通讯作者介绍



胡文波, 男, 西安交通大学教授, 博士生导师。主要从事光电子材料与器件、宽禁带半导体材料与器件等领域的研究工作。获陕西省科学技术进步一等奖 1 项。主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金、国防前沿创新计划项目、国防技术基础项目、国防重点实验室基金等科研项目 20 余项。已发表学术论文 130 余篇, 其中 SCI 收录 70 余篇。主持制定国家标准 4 项、电子行业标准 2 项, 编写教材 1 部。申请国家发明专利 40 余件, 已授权 29 件。任陕西省真空学会常务理事。