

XU Penghui, KONG Linggao, ZHANG Aibing, MA Jijie. Comparative Simulation Study of Graphene and Carbon Foils in Satellite-borne TOF System (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(3): 795–809. CSTR:32142.14.cjss.2024-0156. DOI:10.11728/cjss2025.03.2024-0156

星载飞行时间系统中石墨烯薄膜和碳膜的性能对比仿真*

徐鹏晖^{1,2} 孔令高^{3,1} 张爱兵^{1,2,4} 麻继杰^{1,2}

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(南京大学深空探测科学与技术研究院 苏州 215163)

4(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

摘要 在空间探测应用领域, 石墨烯薄膜因其低厚度特性, 成为一种受到研究者关注的新材料. 针对利用石墨烯薄膜替代碳膜作为星载薄膜式飞行时间 (Time of Flight, TOF) 系统中透射薄膜材料的应用情景, 采用粒子透射仿真软件 SRIM 和粒子光学仿真软件 SIMION 进行联用的方法, 进行石墨烯薄膜和碳膜在 TOF 系统中具体表现的计算机仿真模拟, 得到了飞行时间谱图、散斑分布与散角、探测效率等指标的对比结果. 仿真结果表明, 应用于星载 TOF 系统的石墨烯薄膜相比碳膜表现出更好的质谱分辨、更小的散斑半径和散角以及更高的探测效率, 表明使用石墨烯薄膜替代碳膜可明显提升薄膜式 TOF 系统的性能. 对该结论的进一步证明则需要对应的实验测试数据和结果. 相关结果可为后续对石墨烯薄膜进行实际测试以及其他相关研究提供参考.

关键词 空间粒子探测, 薄膜式飞行时间系统, 碳膜, 石墨烯薄膜, SRIM, SIMION

中图分类号 V45, V524

Comparative Simulation Study of Graphene and Carbon Foils in Satellite-borne TOF System

XU Penghui^{1,2} KONG Linggao^{3,1} ZHANG Aibing^{1,2,4} MA Jijie^{1,2}

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

3(Institute of Science and Technology for Deep Space Exploration, Nanjing University, Suzhou 215163)

4(Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190)

Abstract Recently, graphene foils are considered a promising material for space detection applica-

* 民用航天技术预先研究项目 (D050103) 和中国科学院空间科学战略性先导科技专项 (XDA1535010202) 共同资助

2024-11-05 收到原稿, 2025-02-11 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

tions due to their minimal thickness. For comparing the specific performance of graphene and carbon foils in film-type Time-of-Flight (TOF) systems, a detailed computer simulation in a definite TOF system is conducted by integrating SRIM, the particle transmission simulation software, with SIMION, the particle optical simulation software. TOF simulation results focused on various aspects of TOF system performance are obtained, such as TOF spectra, scattering distribution, scattering angle, and detection efficiency. These parameters of the TOF system provide reference to the ability of mass spectrometric differentiation and simulation results show that graphene foils applied to the satellite-borne TOF system have higher spectral resolution, shorter scattering radius, lower scattering angle, and higher detection efficiency compared to carbon foils. Graphene's better performance is derived from its lower thickness, which causes less scattering during ion transmission into graphene. These findings indicate that using graphene foils instead of carbon foils can improve the performance of film-type TOF systems. Further validation of this conclusion requires corresponding experimental test data and results. The conclusion can be referred to the practical testing of graphene foils and other related research, which can make progress for the final practical facilitation of graphene on in-flight TOF systems.

Key words Space particle detection, Film-type TOF system, Carbon foils, Graphene foils, SRIM, SIMION

0 引言

空间中粒子的成分分辨是空间环境和空间物理探测中的一项核心内容, 至今已有多个任务搭载了粒子成分分辨的相关载荷, 例如 Cluster、卡西尼号 (Cassini)、日本的月女神号 (SELENE)、新视野号 (New Horizons)、萤火一号、Solar Orbiter、天问一号等任务的相关载荷^[1-7]. 在进行粒子成分分辨的诸多探测方法中, 飞行时间 (Time of Flight, TOF) 法因质谱分辨率高和仪器质量小等优点在近年来得到广泛应用, 特别是对于等离子体和能量中性原子 (Energetic Neutral Atom, ENA) 的探测.

飞行时间法通过测量粒子在固定距离内的飞行时间来确定粒子的速度, 结合粒子能量的测量获得粒子的成分. 飞行时间的测量需要产生粒子飞行开始的起始时间事件和飞行结束的终止时间事件^[8].

起始时间事件通常采用粒子与透射薄膜的相互作用产生二次电子的信号来获得. 碳膜 (Carbon Foil, CF) 以其相对优异的粒子透射性能和较高的二次电子产生率, 被应用于数十年来的许多任务中, 例如范艾伦探测器 (Radiation Belt Storm Probes, RBSP)、星际边界探测器 (Interstellar Boundary Explorer, IBEX)、朱诺号木星探测器 (Juno)、BepiColombo、MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution)、TWINS (Two Wide-angle Imaging Neutral-

atom Spectrometers)、天问一号等^[9-15]. 在实际工作中, 粒子在穿透碳膜时会不可避免地产生能量损失和角度散射, 这些最终都会影响 TOF 系统的质谱分辨率^[16,17]. 要提高质谱分辨率, 主要解决方法是降低碳膜厚度, 以减少粒子在穿透碳膜时产生的能量损失和角度散射. 目前进入实际应用的、较常见的碳膜厚度一般在 $0.5 \sim 3.0 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($2.5 \sim 17 \text{ nm}$)^[18]. 但是碳膜在较低厚度下存在机械强度不足、易破损的问题^[19], 使得其无法承受空间任务发射过程中的振动环境. 同属碳材料的石墨烯 (Graphene) 薄膜作为一种新材料, 不仅能够实现比碳膜更薄的厚度 ($0.34 \sim 3 \text{ nm}$)^[20], 还能保持足够的机械强度^[21]. 这使得其有望替代碳膜成为下一代高分辨 TOF 系统透射薄膜的候选材料^[16,22,23].

作为一种新材料, 石墨烯薄膜已在多个领域得到了广泛的应用^[24-26], 但目前对于石墨烯薄膜的粒子透射性能以及其在粒子探测 TOF 系统中进行工程应用的可行性研究仍处于起步阶段, 相关研究还十分缺乏. 和碳膜类似^[27], 石墨烯薄膜需要附着在有一定透过率的栅网上才能应用到 TOF 系统中. 为了实现更高的探测灵敏度, 所使用的栅网需要同时具备大面积和高透过率的特点. 目前国外开展的关于将石墨烯薄膜制成栅网样品进行实测的相关研究还比较少, 仅有的几个研究制得的样品在面积和透过率上无法满足实际应用需求, 例如 Zeiger 等^[28] 在 2019 年制得的样

品面积大于 10 cm^2 , 但栅网透过率小于 31%; Vira 等^[29] 在 2020 年制得的样品栅网透过率为 36%, 样品直径却只有 3 mm. 造成这种情况的原因主要为针对前述情形的石墨烯薄膜样品制备工艺成熟度不高, 使得极低薄膜厚度、高栅网透过率和高薄膜覆盖率难以同时实现^[28]. 这些原因使得适应于空间粒子探测的石墨烯薄膜实际样品的制备和实测工作面临一定的困难. 而计算机仿真作为一种载荷设计的辅助手段, 能够精确快速地和实测结果形成迭代^[30], 因此可在石墨烯薄膜样品实测研究相对缺乏的情况下作为预先研究和补充.

然而传统的计算机仿真方法^[31] 大多只单独关注粒子在 TOF 系统中的飞行过程, 未对粒子穿透透射薄膜及在 TOF 系统中的整个飞行过程进行综合考察, 因而无法较好地体现透射薄膜材料性能提升对 TOF 系统整体性能提升的影响. 为了对石墨烯薄膜的相关性质有进一步了解, 本文针对石墨烯薄膜和碳膜在 TOF 系统中进行应用的具体场景, 采用了一种将两种仿真软件 (SRIM 和 SIMION) 进行联用的计算机仿真方法, 相比现有的仿真方法更加接近于真实情况, 通过对石墨烯薄膜和碳膜在 TOF 系统中具体性能表现的对比, 检验石墨烯薄膜相对碳膜在质谱分辨率等指标上的优越性, 为后续实际测试工作提供定量参考.

1 TOF 仿真模型建立

TOF 仿真模型采用典型的 TOF 系统设计方案^[1,31,32]. 该设计方案可以用于探测离子和能量中性原子. 本文将以离子为例来介绍 TOF 系统的各项研究结果. 仿真使用的 TOF 系统类型为均匀场飞行时间系统, 由电极 1、电极 2、电极 3、微通道板 (Microchannel Plate, MCP)、石墨烯薄膜或碳膜 (包括支撑栅网) 和屏蔽外壳组成, 如图 1 所示. 其中电极 1 的电势为 -15 kV , 电极 2 和电极 3 的电势为 -14.5 kV , MCP 的电势为 -13 kV , 屏蔽外壳和栅网的电势为 0 V .

TOF 系统通过测量离子在 TOF 系统中的飞行时间来确定离子的成分信息. 离子在穿过碳膜或石墨烯薄膜时会产生二次电子, 离子和二次电子从栅网上石墨烯薄膜或碳膜覆盖区域的下表面同时出发, 在电

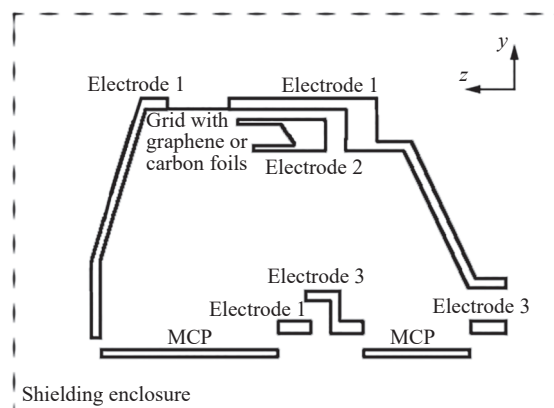


图 1 仿真使用的 TOF 系统设计 (侧面剖面)

Fig. 1 Design of the TOF system used in simulation (Cross section view)

极 1 的限制下进行飞行并到达 MCP. MCP 探测离子和二次电子的信号并限制终止飞行位置. 其中二次电子的轨迹会在电极 2 和电极 3 的作用下偏转, 使得二次电子的落点位置和离子分离. 屏蔽外壳在此过程中起到屏蔽绝缘和封闭电场的作用. “起始时间”定义为二次电子到达 MCP 的时刻, “终止时间”定义为离子到达 MCP 的时刻, 二者的时间差即为离子的起止信号时间差.

飞行时间法进行离子成分分辨的基本原理如下^[33]:

$$m = \frac{2E(t_c + t_e)^2}{d^2} = \frac{2Et_{\text{TOF}}^2}{d^2}. \quad (1)$$

其中, E 为离子进入 TOF 系统的能量, t_{TOF} 为离子的飞行时间, t_c 为离子的起止信号时间差, t_e 为产生起始信号的二次电子的飞行时长, d 为离子从起始位置到终止位置的飞行距离, m 为离子的质量. 对于不同成分的离子, 产生的二次电子飞行路径和能量相对固定, 因此 t_e 可认为是常数. 通过对起止信号时间差 t_c 的测量, 可以得到同一能量下离子的质量谱, 从而完成离子成分分辨.

仿真模型坐标系按以下方法建立: 以图 1 视图垂直于纸面向外的方向为 x 轴, 垂直方向为 y 轴, z 轴根据右手规则确定. 根据模型坐标系, 离子和二次电子的入射方位角被定义为 xz 平面内速度方向与 x 轴的夹角, 入射俯仰角被定义为速度方向与 y 轴的夹角. 在 TOF 系统中进行的仿真过程均在此模型和模型坐标系中进行.

2 仿真方法与数据处理

基于上述仿真模型进行仿真, 仿真采用 SRIM 和 SIMION 两款软件的联用方法.

2.1 仿真方法

仿真所使用的两款软件为 SRIM^[34] 和 SIMION^[35]. SRIM 用于仿真粒子穿透固定厚度材料物质的能量和角度散射情况, SIMION 主要用于仿真带电粒子在电场、磁场中的飞行轨迹. SRIM 的优势在于能通过数值仿真方法模拟粒子与薄膜的相互作用过程, 直接得到接近实际情况的出射粒子分布信息, 因此已在核物理和材料损伤分析等领域得到广泛应用^[36,37]; SIMION 的优势在于可进行带电粒子在静电场和静磁场中飞行轨迹的数值计算, 较以往的解析方式仿真更为精确^[30].

SRIM 和 SIMION 的联用方法具体操作过程如下. 首先使用 SRIM 对石墨烯薄膜和碳膜进行建模. 石墨烯薄膜和碳膜都由碳元素构成, 但二者的微观结构存在差别. 在石墨烯薄膜中, 碳原子形成六边形网格的二维平面结构, 并以单层平面或多层平面的方式堆叠. 在碳膜中, 碳原子以无序方式堆积, 微观层面没有有序结构. 为在 SRIM 中对二者进行区分, 石墨烯薄膜使用石墨态碳 (Graphite Carbon, ICRU-906) 作为组成物质, 并将厚度设置为 2 nm; 碳膜则直接使用碳元素作为组成物质, 并将厚度设置为 10 nm. 离子均从垂直于薄膜平面的方向入射. 得到离子从单点入射指定厚度的石墨烯薄膜或碳膜后的散射情况, 此步骤收集到的数据包括离子出射后的方向矢量、出射位置和出射能量. 从 SRIM 输出的离子信息中进行随机取样, 从方向矢量解算离子的方位角和俯仰角, 形成可供 SIMION 使用的离子样本. 二次电子的出射位置和离子相同, 其能量、方位角和俯仰角的初始分布则参考了文献 [18] 进行设置. 对二次电子的能量分布函数进行反函数运算, 在此反函数中利用蒙特卡罗法 (Monte Carlo Method) 对二次电子的能量分布进行随机取样, 形成可供 SIMION 使用的二次电子样本. 而后从前述样本建立 SIMION 中的离子源, 离子源位于石墨烯薄膜或碳膜的下表面, 区域形状呈圆形, 区域半径为 1 mm. 该区域内部每间隔 0.5 mm 设置一个取样点, 一共 13 个点. 每个取样点的离子和二次电子的初始参数, 包括位置、方位角、俯仰角和能量等

均采用前述样本进行设置. 随后离子和二次电子在模型中电场的作用下飞行, 从栅网位置出发, 最终打在 MCP 上. 经过类似图 2 的飞行过程之后, 收集离子从石墨烯薄膜或碳膜出射后打到 MCP 上的飞行时间分布、位置分布和有效计数等信息. 离子和二次电子在 MCP 上各自产生一个信号. 二次电子早于离子到达 MCP, 产生的信号为起始信号, 离子产生的信号为终止信号. TOF 系统测量到的起止信号时间差为起始信号和终止信号的时间差, 在仿真结果中对应的是离子飞行时间减去二次电子飞行时间的差值. 经统计二次电子的飞行时间为 (6.19 ± 0.35) ns, 故 SIMION 输出的离子飞行时间减去 6.19 ns 即为起止信号时间差.

一般意义上石墨烯薄膜厚度在 10 个原子层以内 (<3.3 nm)^[38], 实验室常见的碳膜厚度为 $0.5 \sim 3.0 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ($2.5 \sim 17$ nm). 仿真过程中使用的石墨烯薄膜模型是参考实际在中国科学院国家空间科学中心实验室已制得的可满足星载飞行时间系统使用需求的石墨烯薄膜样品建立的, 其厚度为 6 个原子层 (约 2 nm). 理论上石墨烯薄膜的最薄厚度可做到单原子层 (约 0.34 nm), 但由于制样条件和工艺流程限制, 制样尚只能在 6 层的厚度上实现较好的覆盖率和较高的制样可重复性. 为了与实测工作进行结合, 仿真过程中石墨烯薄膜的厚度也参考 6 层进行模拟. 作为对比的碳膜的模型厚度为 10 nm, 为目前空间中广泛应用的较薄的碳膜厚度. 10 nm 碳膜厚度相对较薄, 且具有更好的振动和噪声环境承受能力, 是实际空间应用的较优选择. 因此, 仿真中选择 10 nm 作为碳膜的厚度. 本文后续对仿真结果的介绍, 石墨烯薄膜均是 2 nm 厚度, 碳膜均是 10 nm 厚度. 离子种类选取

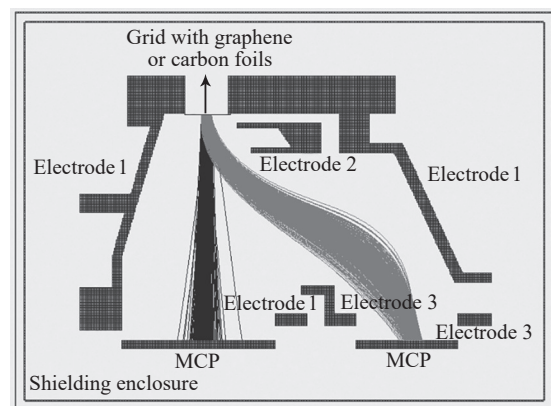


图 2 粒子飞行轨迹

Fig. 2 Trajectories of particles

的是典型的 H^+ , N^+ , O^+ , Ar^+ 四种离子. 每种离子成分选取了 10, 13, 15, 20, 25, 30 keV 六个能量点.

2.2 联用方法和单用方法的比较

常规的 TOF 系统仿真仅采用 SIMION 软件^[30,31], 通过理论假设粒子穿透薄膜以后的能量和角度. 这种情况与实际情况相差较大. 从 SRIM 给出的关于粒子穿过石墨烯薄膜和碳膜的散射情况的仿真结果可以看出, 粒子在穿透物质薄膜时存在不可忽略的散射, 且不同厚度和种类的薄膜之间存在明显差异. 通常的石墨烯薄膜要比碳膜薄很多. 图 3 分别利用 SRIM 软件仿真了 20 keV 的 Ar^+ 穿透 2 nm 石墨烯薄膜和 10 nm 碳膜的结果. 图 3(a)(c) 分别给出了 Ar^+ 在石墨烯薄膜和碳膜中的传播路径的侧视图; 图 3(b)(d)

分别给出了 Ar^+ 在石墨烯薄膜和碳膜中散射路径的后向横截面. 从图 3 可以看出, 即使石墨烯薄膜和碳膜同属碳材料, 由于二者厚度存在差别, 对粒子散射的情况也存在差别, 10 nm 碳膜相比 2 nm 石墨烯薄膜对粒子造成的散射更大, 散角分布也更大. 这些差异会对后续粒子在 TOF 系统中的性能造成影响. 将 SRIM 的输出结果作为 SIMION 的输入条件可实现两款软件的联用仿真, 从而实现比单独使用 SIMION 软件更接近真实情况的仿真效果.

为了说明 SRIM 和 SIMION 联用的方法 (联用方法) 比单独使用 SIMION 的方法 (单用方法) 更接近于真实情况, 二者的结果都与文献 [7] 实测值进行了对比. 单用方法使用了文献中的能量和散角分布数

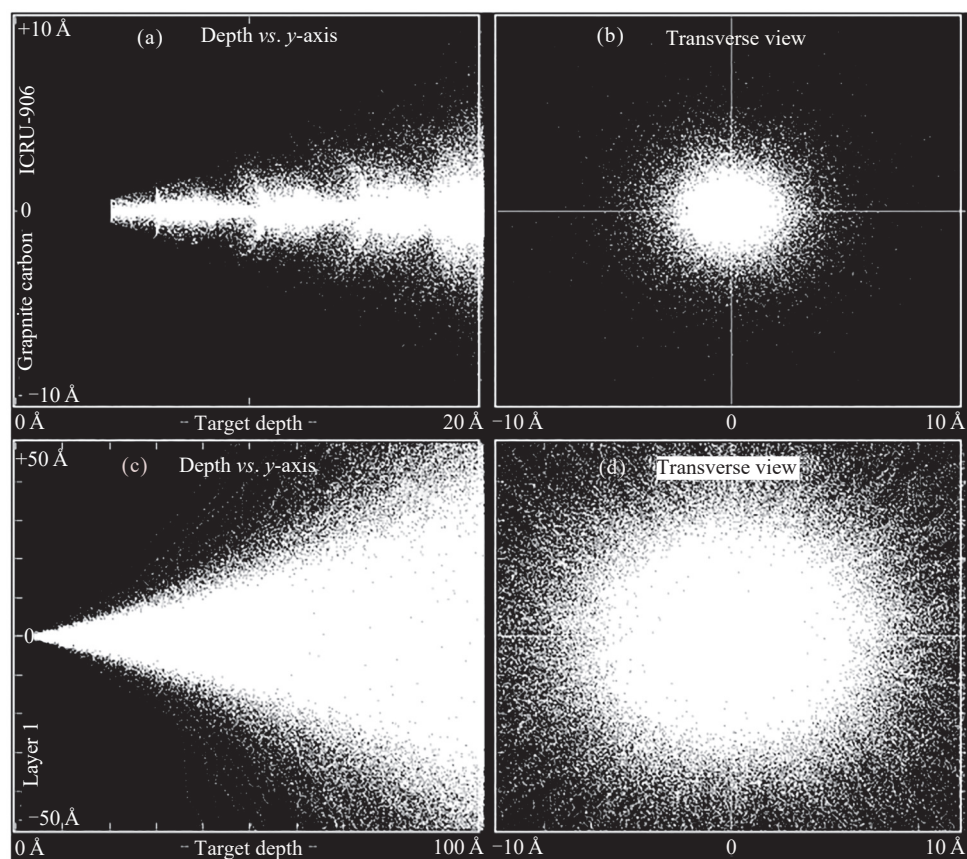


图 3 20 keV Ar^+ 在石墨烯薄膜和碳膜中散射的 SRIM 仿真结果. (a) 石墨烯薄膜的侧面视角, (b) 石墨烯薄膜的背面视角, (c) 碳膜的侧面视角, (d) 碳膜的背面视角. (a)(c) 横坐标为薄膜深度, 纵坐标为与入射点的水平偏移; (b)(d) 坐标平面为与薄膜平行的平面, 白点分布为入射粒子轨迹分布

Fig. 3 SRIM results of 20 keV Ar^+ scattering in graphene and carbon foils. (a) Side view of graphene, (b) back view of graphene, (c) side view of carbon foil, (d) back view of carbon foil. In (a) and (c), the horizontal axis represents film depth and the vertical axis shows horizontal offset from the incident point. In (b) and (d), the coordinate plane is parallel to the film surface, with white dots indicating the distribution of incident particle trajectories

据对 SIMION 进行设置. 具体方法为离子能量按高斯分布设置, 能量峰值和展宽根据文献 [17] 确定; 方位角在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 均匀分布; 俯仰角按高斯分布设置, 以 -90° (离子入射方向) 为中心, 据文献 [16] 确定的散角值为半高全宽. 由不同仿真方法和文献得到的起止信号时间差 t_c 之间的对比结果见表 1. 从表 1 可以看出, 同种离子 t_c 的联用方法值和单用方法值均比文献值偏小, 但单用方法值相比文献值偏差更大. 造成联用方法值相较文献值偏小的原因可能是, 文献中使用的碳膜的实际厚度可能比标称厚度要大以及实际的碳膜表面可能会吸附水气^[39] 造成散射过程加剧、能量损失增大. 同时, 实际测试中电子学部分也可能带来误差. 以上原因都可能使实测结果大于仿真结果.

单用方法因初始设置条件对实际测试实验或相关实验文献的参考数值依赖较大, 在石墨烯薄膜实际测试数据较为缺乏的情况下无法进行仿真工作. 与单用方法相比, 联用方法不仅在精度上有所提升, 同时

因其初始设置条件不依赖实际测试数据, 可以仿真任意质量数离子的情况, 例如尚无实测能散和散角数据的 O_2^+ 和 CO_2^+ . 联用方法更适应本文工作的要求. 此外, 联用方法和单用方法的 TOF 峰形也存在明显差异, 其中联用方法的 TOF 峰形因存在非对称性和长拖尾等特征而更接近真实情况, 二者 TOF 峰形对比如图 4 所示. 非对称性和长拖尾等峰形特征的物理过程来源主要是离子穿过碳膜后的能量损失. 离子在穿过碳膜后其剩余能量分布表现为一个具有长前延, 且峰最大值位置小于入射能量的非对称峰, 如图 5 所示. 根据式 (1), 能量越高, 飞行时间越短, 因此能量损失的此类分布在 TOF 峰形上的反映即为带有长拖尾的非对称性.

2.3 选用的拟合函数

通过图 4 中离子飞行时间谱分布可以看出, 其并不完全符合高斯分布, 因此对 TOF 峰进行拟合时采用的是伪福格特函数 (Pseudo-Voigt)^[40], 并以最大值

表 1 两种仿真方法与文献 [7] 实测数据得到 t_c 的对比
Table 1 Comparison of t_c derived from two simulation methods and experimental data in Ref. [7]

方法	$t_c (H^+) / ns$	$t_c (O^+) / ns$	$t_c (O_2^+) / ns$	$t_c (CO_2^+) / ns$
文献值	16.56	79.13	129.25	148.88
联用方法值	14.36	76.37	117.58	145.10
单用方法值	14.19	69.40	—	—

注 联用方法值和单用方法值的 t_c 是通过式(1)消除了不同的 d 和 E 的影响得到的. 由于缺乏相关文献数据进行初始设置, 单用方法无法对 O_2^+ 和 CO_2^+ 进行仿真, 因此数据暂缺.

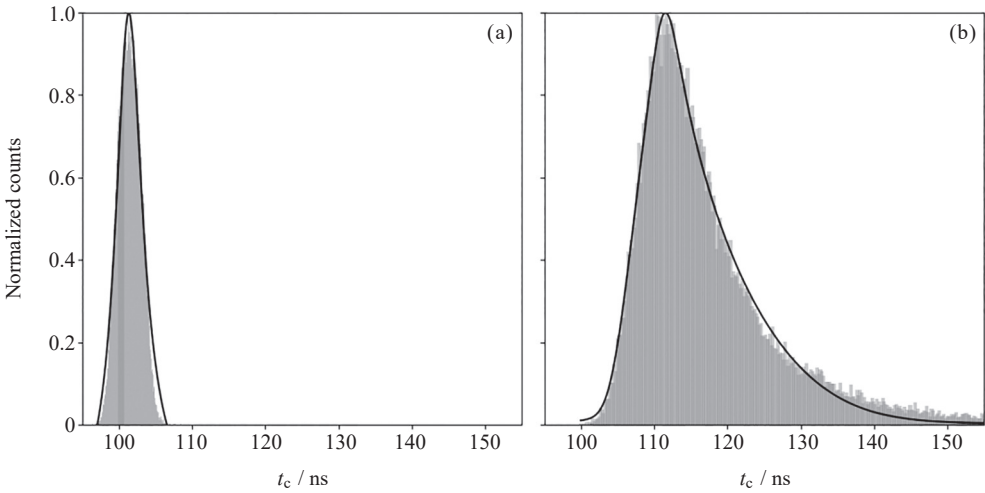


图 4 15 keV O^+ 的 TOF 峰形仿真结果. 灰色柱状图为仿真输出结果的统计分布, 黑色曲线为拟合曲线
Fig. 4 TOF spectra of 15 keV O^+ obtained by simulating. The gray histogram represents the statistical distribution of simulation outputs, while the black curve denotes the fitting result

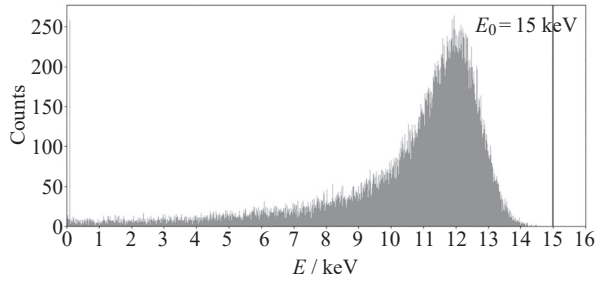


图5 图4中联用方法对应的出射粒子能量分布. 灰色柱状图为仿真输出的出射的粒子能量结果的统计分布, 黑色直线为入射能量

Fig. 5 Energy distribution of the transmission particles in Fig. 4. The gray histogram displays the statistical distribution of transmission particle energies from simulation, while the black vertical line indicates the incident energy

出现位置为峰位置、半高全宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 为误差 (Δt_c) 进行统计. 所使用的伪福格特函数具体形式如下:

$$\sigma(t) = \frac{2\sigma}{1 + e^{d(t-c)}}, \quad (2)$$

$$G(t) = ae^{-\frac{(t-c)^2}{2\sigma(t)^2}}, \quad (3)$$

$$L(t) = \frac{\frac{ba}{\sigma(t)}}{1 + 4\left[\frac{t-c}{\sigma(t)}\right]^2}, \quad (4)$$

$$V(t) = qG(t) + (1-q)L(t) + f. \quad (5)$$

其中, $\sigma(t)$ 为非对称性修正项, c 为对称情况下的峰中心位置, d 为非对称性系数, σ 为原对称高斯分布和洛伦兹分布的标准差, $G(t)$ 为非对称性修正后的高斯项, a 为高斯项峰高系数, $L(t)$ 为非对称性修正后的洛伦兹项, b 为洛伦兹项相对高斯项的峰高系数修正系数, q 为取值在 0~1 的线性混合比例值, f 为峰底偏置项, $V(t)$ 为最终所构建的伪福格特函数.

对 MCP 上的粒子散斑分布进行拟合时采用的是二维高斯分布 (2D Gaussian)^[29], 具体形式为

$$g(x, y) = Ae^{-\left[\frac{(x-x_c)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_c)^2}{2\sigma_y^2}\right]} + B. \quad (6)$$

其中, A 为峰高系数, B 为峰底偏置项, x_c 和 y_c 为峰中心位置, σ_x 和 σ_y 为对应方向的标准差. 散斑半径为从 σ_x 计算得到的 x 方向上的半高全宽 (FWHM) 和从 σ_y 计算得到的 y 方向上的半高全宽二者平均值的

一半. 统计有效计数时通过对离子落点的 xyz 坐标进行条件筛选得到打在 MCP 上的离子数量. 为了比较 TOF 系统中使用石墨烯和碳膜作为透射薄膜的性能差别, 下文将分别针对基于石墨烯薄膜和碳膜的 TOF 系统进行性能仿真.

3 仿真结果与分析

分别对在 TOF 系统中的 2 nm 石墨烯薄膜和 10 nm 碳膜进行仿真得到的分布数据 (飞行时间分布、位置分布和有效计数) 进行统计分析, 获得的结果有: 飞行时间谱图, 散斑分布、半径与散角, 探测效率.

3.1 飞行时间谱图

飞行时间谱是 TOF 系统质谱分辨能力的直接表征, 不同离子能量的飞行时间谱有所不同. 以 20 keV 能量点为例, 比较 2 nm 石墨烯薄膜和 10 nm 碳膜产生的 TOF 谱图的结果, 如图 6 所示, 相关指标结果见表 2. 图 6 显示了 20 keV 离子入射能量下、归一化后的石墨烯薄膜和碳膜的 TOF 谱图, 二者都可见按时间先后顺序排列的 H^+ , N^+ , O^+ , Ar^+ 四个信号峰. 从图 6 中二者的对比中可见, 在能量和离子种类相同的情况下, 采用石墨烯薄膜的 TOF 系统中离子飞行速度更快, 且飞行时间谱展宽更小. 比如在石墨烯薄膜的 TOF 谱图中, Ar^+ 峰的长拖尾有明显缩短的现象. 对于 N^+ 和 O^+ , 基于石墨烯的 TOF 系统可以明显地区分, 对应的 TOF 信号峰的重叠部分较小, 而基于碳膜的 TOF 系统则不能很好地区分, 对应的信号峰的重叠部分较大. 从表 2 中也可以看出, 碳膜 TOF 信号峰的出现位置均晚于石墨烯薄膜中对应的信号峰, 碳膜 TOF 信号峰的半高全宽也均大于石墨烯薄膜. 在其他能量点也有类似的情况, 因此采用 2 nm 石墨烯薄膜的 TOF 系统较使用 10 nm 碳膜的 TOF 系统具有更高的飞行时间谱分辨能力.

为了更好地反映离子在不同能量的飞行时间的变化趋势, 对起止信号时间差 t_c 和能量 E 的关系进行拟合, 结果如图 7 所示. 拟合过程如下. 将式 (1) 进行变形可以得到

$$t_c = \left(\frac{d}{10.366} \sqrt{\frac{m}{2}}\right) E^{-\frac{1}{2}} - t_e = kE^{-\frac{1}{2}} - t_e. \quad (7)$$

其中, t_c , d , m , E , t_e 的含义与式 (1) 一致; k 为简化公

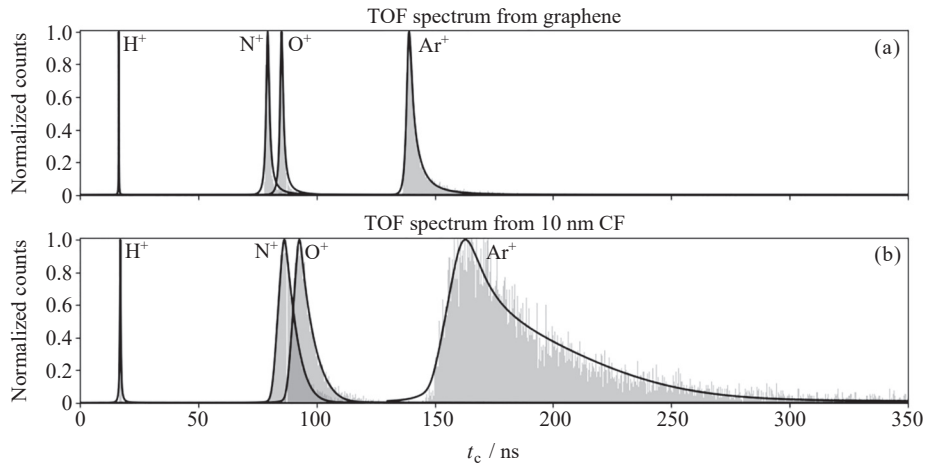


图6 石墨烯薄膜和碳膜在 20 keV 产生的飞行时间谱对比. 黑灰色柱状图为离子的仿真结果统计分布, 黑色曲线为拟合曲线

Fig. 6 TOF spectra of 20 keV from graphene and carbon foils. The dark gray histogram represents the statistical distribution of ion simulation results, while the black curve denotes the fitting result

表2 图6 谱图分析结果
Table 2 Analysis results of Fig. 6

离子种类	石墨烯薄膜		碳膜	
	t_c / ns	FWHM / ns	t_c / ns	FWHM / ns
H ⁺	16.45	0.14	17.07	0.59
N ⁺	79.55	1.99	86.36	7.37
O ⁺	85.35	1.84	92.87	7.72
Ar ⁺	139.20	3.29	162.88	31.49

式后便于拟合的系数; 10.366 为从国际单位制 (SI) 向文中使用的单位进行单位转化时用到的系数. 石墨烯薄膜和碳膜的结果均使用式 (7) 进行拟合, 拟合结果均通过 R^2 检验. 之后通过拟合结果得到的 k , 反演出以相对原子质量单位的离子相对原子质量值并和真实值对比. 根据石墨烯薄膜的拟合结果反演得到的离子相对原子质量比碳膜更接近真实值, 具体见表 3. 值得注意的是, 使用薄膜式 TOF 法测量并使用上述过程反演相对原子质量的方法得到的结果只会比真实值偏大, 因为离子在穿透薄膜时必然存在能量损失, 使得能量 E 偏小, 反映在拟合中的影响就是使得参数 k 偏大, 因此质量 m 偏大. 在 m 必然偏大的情况下越接近真实值说明离子的能量损失越少, 因此该结果可以说明石墨烯薄膜对离子造成的能量损失小于碳膜. 结合谱图结果可以判断, 使用石墨烯薄膜的 TOF 系统对于离子种类的分辨能力要好于使用碳膜

的 TOF 系统.

为了说明飞行时间谱对质谱分辨的影响, 定义 $\Delta m/m$ 为质量相对误差, 结合式 (1), 质量相对误差的表达式为^[29]

$$\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 = \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left[2\frac{\Delta(t_c + t_e)}{t_c + t_e}\right]^2 + \left(2\frac{\Delta d}{d}\right)^2. \quad (8)$$

其中, $\Delta m/m$ 为质量相对误差, $\Delta E/E$ 为能量相对误差, $\Delta(t_c + t_e)/(t_c + t_e)$ 为离子飞行时间 (t_{TOF}) 的相对误差, $\Delta d/d$ 为飞行距离的测量相对误差. 在本文讨论的仿真过程中可以不考虑能量相对误差和飞行距离的测量相对误差而仅关注离子飞行时间相对误差的影响. 因此, 式 (8) 可写为

$$\frac{\Delta m}{m} = 2\frac{\Delta(t_c + t_e)}{t_c + t_e} = \frac{2\sqrt{\Delta t_c^2 + \Delta t_e^2}}{t_c + t_e}. \quad (9)$$

其中, $\Delta m/m$ 和 $\Delta(t_c + t_e)/(t_c + t_e)$ 含义与式 (8) 相同,

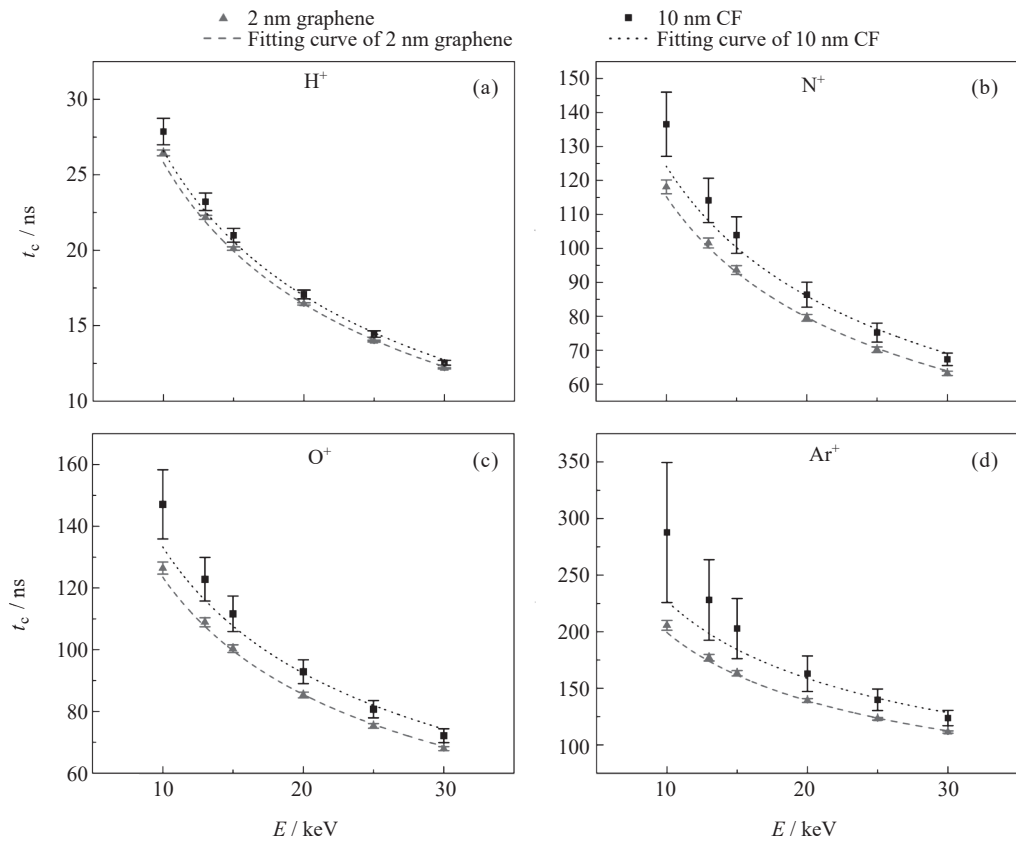


图 7 不同种类粒子的 t_c - E 拟合曲线

Fig. 7 t_c - E relationship for different particles

表 3 拟合反演相对原子质量的结果对比
Table 3 Contrast of derived relative atomic mass

离子种类	真实值/u	石墨烯薄膜反演结果/u	碳膜反演结果/u
H ⁺	1.01	1.02	1.07
N ⁺	14.01	14.69	16.93
O ⁺	16.00	16.76	19.38
Ar ⁺	39.95	42.05	54.23

注 u 为相对原子质量单位, 1 u 为碳原子质量的1/12, 即1 u=1.66×10⁻²⁷ kg.

t_c 和 t_e 含义与式 (1) 相同, Δt_c 为起止信号时间差的误差, Δt_e 为电子飞行时间的误差, 已在前文给出, 为 0.35 ns. 质量相对误差越小, TOF 系统对质谱的分辨率越高.

图 8 给出了 2 nm 石墨烯薄膜和 10 nm 碳膜的质量相对误差在不同离子种类下随能量变化的情况. 从图 8 中可以看出, 石墨烯薄膜的质量相对误差普遍小于碳膜的质量相对误差, 并且在大质量离子和低能量段下降更为明显. 图 8 结果说明应用于 TOF 系统中的 2 nm 石墨烯薄膜比 10 nm 碳膜有更好的质谱

分辨能力.

3.2 散斑分布、半径与散角

在 TOF 系统中, 穿过碳膜/石墨烯的离子打到 MCP 上后, 其分布位置会形成一个散斑, 对这部分的离子在 MCP 上的最终落点的分布统计为散斑分布. MCP 是沿 xz 坐标平面放置的, 故散斑分布的统计结果样式为在 xz 平面内的离子数量分布, 具体以等高线图的形式呈现.

散斑分布会直接影响 TOF 系统的质谱分辨率, 不同离子能量产生的散斑分布也有所不同. 同样以

20 keV 能量点为例, 比较石墨烯薄膜和碳膜产生散斑分布的结果如图 9 和图 10 所示. 从图 9 和图 10 对比中可以看出, 在能量和离子种类相同的情况下, 石墨烯薄膜产生的散斑大小比碳膜产生的要小. 其他能量点的情况和 20 keV 类似.

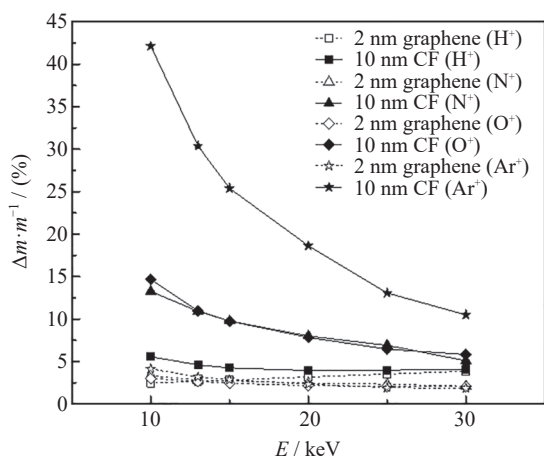


图 8 质量相对误差对离子能量的依赖性

Fig. 8 Dependence of mass relative error on E

定义从式 (6) 拟合散斑得到的半高全宽平均值的一半为散斑半径 ($\text{FWHM}/2$). 对不同能量点的散斑半径统计结果如图 11 所示, 从图 11 中可见散斑半径随能量增加而减小, 符合理论趋势, 且石墨烯薄膜的散斑半径普遍小于碳膜的散斑半径. 对于 H^+ , 石墨烯薄膜的散斑半径均在 1 mm 以下, 碳膜的散斑半径在 1.0~2.2 mm. 对于 N^+ , O^+ , Ar^+ , 石墨烯薄膜的散斑半径普遍在 4 mm 以下, 碳膜的散斑半径分布在 4~11 mm. 以上现象的出现和离子在薄膜内部的散射过程有关. 离子在穿透薄膜时会与薄膜的原子发生碰撞产生散射, 离子能量越高、离子质量越小, 离子的散射程度越小, 出射散角越小. 在同样的离子种类和离子入射能量情况下, 薄膜厚度是影响散斑半径大小的一个重要因素之一, 薄膜厚度越低, 对离子的散射程度越小, 出射散角越小, 散斑半径越小. 由此说明, 使用 2 nm 石墨烯薄膜替代 10 nm 碳膜用于粒子成像, 可以获得更高的成像分辨率.

实际应用中一般以离子束的出射散角度量散射过程对质谱分辨率产生的影响. 散角与散斑半径的关系为^[29]

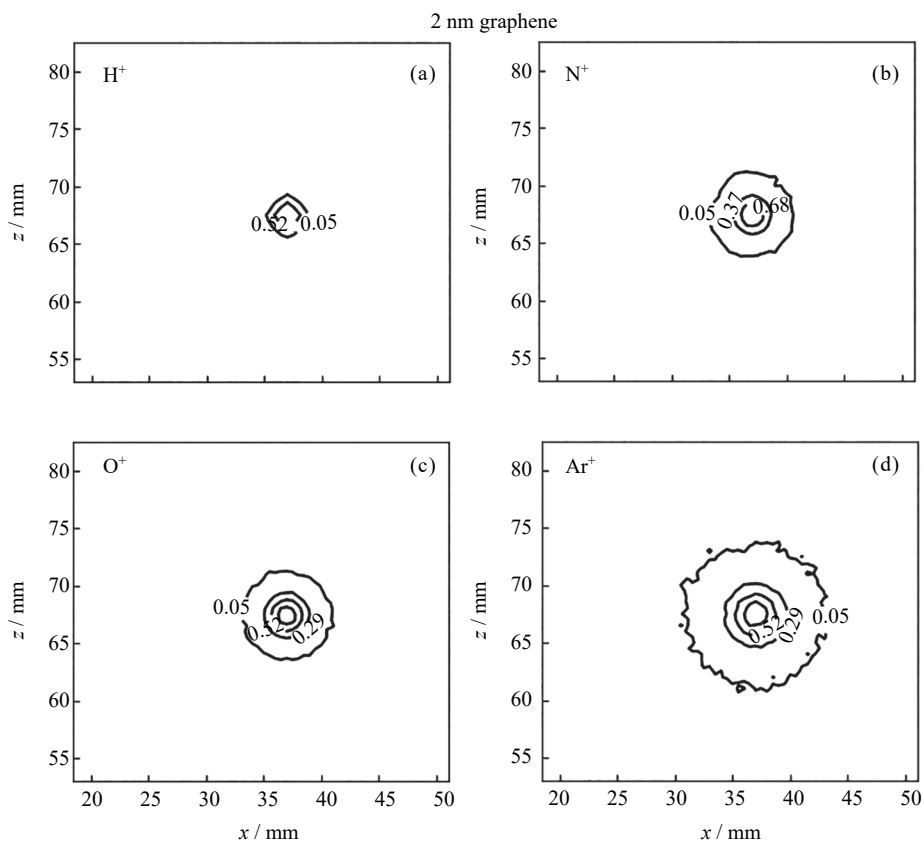


图 9 石墨烯薄膜在 20 keV 产生的散斑等高线

Fig. 9 Contours of 20 keV from graphene foils

$$\varphi = 2\arctan\left(\frac{r}{d}\right). \quad (10)$$

其中, r 为散斑半径, d 的含义与式 (1) 一致. 散角越大, 离子在穿透薄膜的过程中受到的散射影响越大, 在飞行过程中偏离直线最短路径的概率越大, 由此给飞行时间谱带来更宽的展宽, 从而影响质谱分辨率. 根据式 (8) 换算而来的离子穿透石墨烯薄膜和碳膜后的散角情况如表 4 所示. 从表 4 可以看出, 在同能量同离子种类的情况下, 石墨烯薄膜的散角均小于碳膜的散角. 石墨烯薄膜由于拥有更低的厚度, 对离子的散射影响相比碳膜更少, 离子在后续飞行过程中偏离直线最短路径的概率更小, 有助于减小飞行时间谱的信号展宽. 因此, 将 10 nm 碳膜替换为 2 nm 石墨烯薄膜可以有效提升 TOF 系统的质谱分辨率.

3.3 探测效率

定义 TOF 系统的探测效率为最终打在 MCP 上的有效计数比例, 即落在 MCP 上的离子有效计数与入射离子数的比值. 探测效率越高, 意味着经薄膜透射后损失的离子越少, TOF 系统具有更高的灵敏度,

可以探测到更微弱的信号.

探测效率受以下几个因素的影响: 栅网透过率、薄膜透过率和 TOF 系统收集效率. 其中, 栅网透过率为栅网的网孔面积与栅网整体面积的比值, 为定值, 且会因不同实验使用的栅网不同而有变化, 本文不进行讨论. 薄膜透过率为从薄膜后表面出射的离子数与从薄膜前表面入射的离子数的比值. 薄膜透过率是薄膜的固有性质, 会受到薄膜材料种类和厚度的影响, 薄膜越厚, 能穿透的离子数就越少, 则薄膜透过率越低. TOF 系统收集效率为落在 MCP 上的离子有效计数与从薄膜下表面出射的离子数的比值. TOF 系统收集效率与 TOF 系统的结构和薄膜厚度有关. 在前述仿真中石墨烯薄膜和碳膜使用的 TOF 系统结构相同, 因此 TOF 系统收集效率主要受到薄膜厚度的影响. 薄膜越厚, 离子穿透时的散射程度越大, 离子束出射散角越大, 最后能到达 MCP 的离子数越少, TOF 系统收集效率越低. 在仿真中石墨烯薄膜和碳膜的探测效率可定义为穿透效率和 TOF 系统收集效率的乘积.

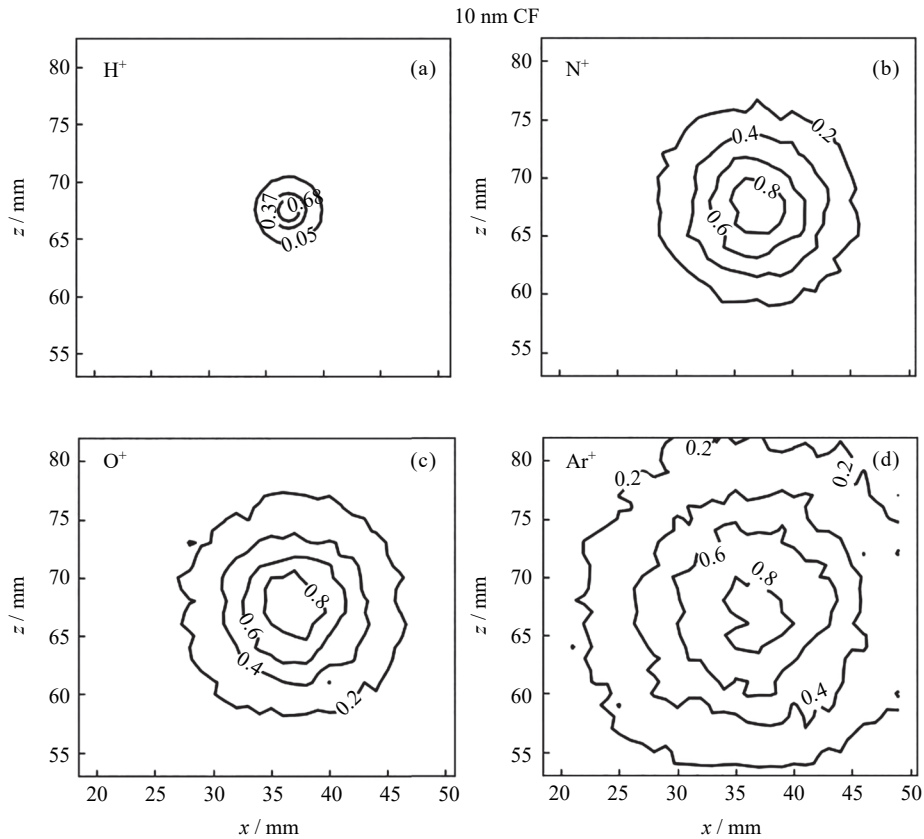


图 10 碳膜在 20 keV 产生的散斑等高线

Fig. 10 Contours of 20 keV from carbon foils

不同种类的离子对石墨烯薄膜和碳膜的透过率、TOF 系统收集效率对比结果分别见表 5 和表 6. 对透过率的统计结果显示, 虽然在绝大部分情况下大多数离子都可以穿透石墨烯薄膜和碳膜, 但由于拥有更薄的厚度, 石墨烯薄膜的透过率仍普遍高于碳膜. 对于 TOF 系统收集效率, 石墨烯薄膜同样普遍高于碳膜, 因为石墨烯薄膜的厚度更低, 产生的散射效果更少, 因散角过大偏离如图 2 的离子的飞行轨迹而打到其他电极或外壳上的离子更少, 落在 MCP 上的有效计数更多. 因此, 综合来看, 使用石墨烯薄膜的 TOF 系统的探测效率高于使用碳膜的 TOF 系统. 碳膜在面对相对原子质量相对较大的离子如 N^+ 、 O^+ 和 Ar^+ 时探测效率明显不如石墨烯薄膜.

探测效率的增加将有效提升 TOF 系统的几何因

子和计数率. 计数率的增加又可降低计数测量的相对误差.

TOF 系统的几何因子和计数率与探测效率均呈正比关系^[41], 即

$$G = TS\Delta\Omega, \tag{11}$$

$$C = GJ. \tag{12}$$

其中, G 为几何因子, T 为探测效率, S 为 TOF 系统在立体角方向上的有效测量面积, $\Delta\Omega$ 为立体角, C 为计数率, J 为离子通量. 因此, 仪器可以有效测量的最低离子通量 $J_{\min}$ 为

$$J_{\min} = \frac{C_{\min}}{G}. \tag{13}$$

其中, $C_{\min}$ 为仪器可以测量的最小计数率, 为固定值, 与薄膜材料无关. 以可测量的最小离子通量作为灵敏度, 可衡量 TOF 系统对微弱信号的探测能力, 灵敏度和几何因子呈反比关系. 石墨烯薄膜和碳膜的灵敏度分别记为 $J_{\min,G}$ 和 $J_{\min,C}$, 几何因子分别记为 G_G 和 G_C . 因此, 可将碳膜替换为石墨烯薄膜后带来的灵敏度提升效果以灵敏度比值 ($J_{\min,G}/J_{\min,C}$, 即 G_C/G_G) 表示, 灵敏度比值越小, 则替换后对微弱信号感知能力的提升越明显.

实际测量中仪器计数的分布符合泊松分布, 所以计数相对误差符合如下公式:

$$\delta = \frac{\sqrt{C\Delta t_m}}{C\Delta t_m} = p \cdot \frac{\sqrt{C}}{C}. \tag{14}$$

其中, Δt_m 为计数测量时长, 在时长固定的情况下其对计数相对误差的影响可简化为一常数 p . 计数相对误差的下降效果以计数相对误差比值 (δ_G/δ_C) 表示, 计数相对误差比值越低, 则对计数测量误差的降低越明显.

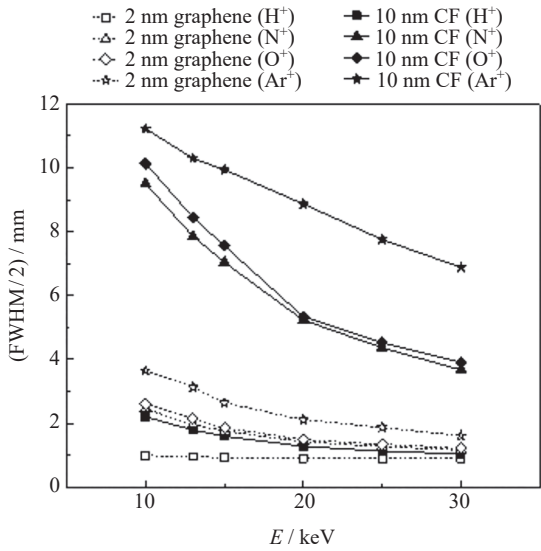


图 11 石墨烯薄膜和碳膜的散斑半径统计结果
Fig. 11 Scattering radius of graphene and carbon foils

表 4 离子穿透石墨烯薄膜和碳膜后的散角
Table 4 Scattering angle of ions through graphene and carbon foils

E/keV	H^+		N^+		O^+		Ar^+	
	石墨烯薄膜/(°)	碳膜/(°)	石墨烯薄膜/(°)	碳膜/(°)	石墨烯薄膜/(°)	碳膜/(°)	石墨烯薄膜/(°)	碳膜/(°)
10	5.17	11.47	12.80	48.74	13.56	51.91	19.00	57.24
13	5.00	9.33	10.23	40.50	11.20	43.47	16.30	52.70
15	4.81	8.30	9.15	36.37	9.69	38.98	13.76	50.94
20	4.70	6.68	7.45	27.15	7.74	27.71	11.01	45.59
25	4.66	5.86	6.64	22.68	7.01	23.48	9.77	40.00
30	4.65	5.46	6.09	19.09	6.33	20.31	8.41	35.55

表 5 离子对石墨烯薄膜和碳膜的透过率 [单位: (%)]

Table 5 Transmitting efficiency of ions through graphene and carbon foils [unit: (%)]

E/keV	H^+		N^+		O^+		Ar^+	
	石墨烯薄膜	碳膜	石墨烯薄膜	碳膜	石墨烯薄膜	碳膜	石墨烯薄膜	碳膜
10	99.98	99.94	99.91	94.53	99.93	92.90	99.99	69.87
13	99.99	99.95	99.96	97.38	99.98	96.48	99.99	85.38
15	99.99	99.96	99.98	98.14	99.98	97.68	100	90.99
20	99.99	99.98	99.98	99.24	99.99	99.07	100	96.96
25	99.99	99.99	99.99	99.61	99.99	99.52	100	98.85
30	99.99	99.99	99.99	99.78	99.99	99.72	100	99.52

表 6 离子穿透石墨烯薄膜和碳膜后的 TOF 系统收集效率 [单位: (%)]

Table 6 TOF system collecting efficiency of ions through graphene and carbon foils [unit: (%)]

E/keV	H^+		N^+		O^+		Ar^+	
	石墨烯薄膜	碳膜	石墨烯薄膜	碳膜	石墨烯薄膜	碳膜	石墨烯薄膜	碳膜
10	99.74	98.27	93.83	61.72	93.08	57.08	91.95	25.39
13	99.83	99.08	95.97	73.05	95.49	69.22	95.52	43.16
15	99.88	99.29	96.96	78.27	96.37	74.47	96.78	52.45
20	99.94	99.61	97.88	86.16	97.71	83.84	98.17	68.18
25	99.96	99.74	98.63	90.61	98.49	88.91	98.81	77.59
30	99.96	99.81	99.03	93.11	98.80	91.87	99.26	84.01

表 7 灵敏度比值和计数相对误差比值 [单位: (%)]

Table 7 Ratio of sensitivity and ratio of relative count error [unit: (%)]

E/keV	H^+		N^+		O^+		Ar^+	
	$G_{\text{C}}/G_{\text{G}}$	$\delta_{\text{G}}/\delta_{\text{C}}$	$G_{\text{C}}/G_{\text{G}}$	$\delta_{\text{G}}/\delta_{\text{C}}$	$G_{\text{C}}/G_{\text{G}}$	$\delta_{\text{G}}/\delta_{\text{C}}$	$G_{\text{C}}/G_{\text{G}}$	$\delta_{\text{G}}/\delta_{\text{C}}$
10	98.49	99.24	62.23	78.89	57.01	75.50	19.29	43.92
13	99.21	99.60	74.15	86.11	69.95	83.64	38.58	62.11
15	99.38	99.69	79.24	89.02	75.50	86.89	49.31	70.22
20	99.65	99.83	87.37	93.47	85.02	92.20	67.34	82.06
25	99.77	99.89	91.52	95.67	89.84	94.78	77.62	88.10
30	99.84	99.92	93.82	96.86	92.73	96.30	84.23	91.78

对灵敏度比值和计数相对误差比值的统计结果见表 7。从表 7 中可见, 能量越低、离子质量越大, 灵敏度比值和计数相对误差比值的降低就越明显, 可见低能量、大质量的离子对散射过程更为敏感。2 nm 石墨烯薄膜相比 10 nm 碳膜更薄, 对离子的散射效果更少, 有助于这部分离子信号的有效获取。因此, 使用 2 nm 石墨烯薄膜替代 10 nm 碳膜可以提升 TOF 系统对低能量、大质量离子的探测能力, 减少信号的测量误差。

4 结论与讨论

针对石墨烯薄膜的空间应用需求, 采用一种将 SRIM 和 SIMION 联用的仿真方法, 获得了更为接近真实情况的仿真模拟结果。以此方法为基础, 对适用于飞行时间系统的 2 nm 石墨烯薄膜和 10 nm 碳膜分别进行了仿真模拟, 并对不同离子成分的飞行时间谱、散斑分布情况、探测效率等指标进行了统计对比分析, 获得结果如下。

(1) 2 nm 石墨烯薄膜产生的离子能量损失更小, 飞行时间谱信号展宽更小, 更有利于提高离子质谱分辨率.

(2) 2 nm 石墨烯薄膜产生的散斑具有更小的半径、散角更小, 有利于 TOF 系统质谱分辨率的提升.

(3) 使用 2 nm 石墨烯薄膜的 TOF 系统具有更高的探测效率, 有利于低能量、大质量离子的微弱信号的探测, 同时有利于降低探测相对误差.

以上结果均是在特定薄膜厚度基础上给出的. 从仿真比较结果来看, 使用常规的 2 nm 石墨烯薄膜的飞行时间系统相对于 10 nm 碳膜将具有更高的质谱分辨率、位置分辨率和探测效率, 有着明显的替代优势.

对于该结论的进一步证明则需要实验实际测试的数据和结果. 因此, 对石墨烯薄膜的粒子透射相关性能的实际测试, 特别是和碳膜的对比测试, 推进石墨烯薄膜进入 TOF 系统实际应用, 将是下一步工作的重点. 本文结果可对相关工作提供定量参考.

参考文献

- [1] RÈME H, BOSQUED J M, SAUVAUD J A, *et al.* The cluster ion spectrometry (CIS) experiment[J]. *Space Science Reviews*, 1997, **79**(1): 303-350
- [2] YOUNG D T, BARRACLOUGH B L, BERTHELIER J J, *et al.* Cassini plasma spectrometer investigation[C]//Cassini/Huygens: A Mission to the Saturnian Systems. Denver: SPIE, 1996, **2803**: 118-128
- [3] SAITO Y, YOKOTA S, ASAMURA K, *et al.* In-flight performance and initial results of plasma energy angle and composition experiment (PACE) on SELENE (Kaguya)[J]. *Space Science Reviews*, 2010, **154**(1/2/3/4): 265-303
- [4] MCCOMAS D, ALLEGRINI F, BAGENAL F, *et al.* The solar wind around Pluto (SWAP) instrument aboard *New horizons*[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **140**(1/2/3/4): 261-313
- [5] LI L, WANG S J, ZHANG A B, *et al.* The plasma experiment of the YH-1 mission[C]//Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Optoelectronic Technology and Instruments, Control Theory and Automation, and Space Exploration. Beijing: SPIE, 2008, **7129**: 71292P
- [6] OWEN C J, BRUNO R, LIVI S, *et al.* The solar orbiter solar wind analyser (SWA) suite[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, **642**: A16
- [7] KONG L G, ZHANG A B, TIAN Z, *et al.* Mars ion and neutral particle analyzer (MINPA) for Chinese mars exploration mission (Tianwen-1): design and ground calibration[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, **4**(4): 333-344
- [8] KONG Linggao, SU Bin, GUAN Yibing, *et al.* Planetary plasma measurement technology[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, **52**(5): 459-472
- [9] FUNSTEN H O, SKOUG R M, GUTHRIE A A, *et al.* Helium, oxygen, proton, and electron (HOPE) mass spectrometer for the radiation belt storm probes mission[J]. *Space Science Reviews*, 2013, **179**(1/2/3/4): 423-484
- [10] FUSELIER S A, BOCHSLER P, CHORNAY D, *et al.* The IBEX-Lo sensor[J]. *Space Science Reviews*, 2009, **146**(1/2/3/4): 117-147
- [11] MCCOMAS D J, ALEXANDER N, ALLEGRINI F, *et al.* The Jovian Auroral distributions experiment (JADE) on the Juno Mission to Jupiter[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **213**(1/2/3/4): 547-643
- [12] DELCOURT D, SAITO Y, LEBLANC F, *et al.* The mass spectrum analyzer (MSA) on board the BepiColombo MMO[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(7): 6749-6761
- [13] MCFADDEN J P, KORTMANN O, CURTIS D, *et al.* MAVEN SupraThermal and thermal ion composition (STATIC) instrument[J]. *Space Science Reviews*, 2015, **195**(1/2/3/4): 199-256
- [14] MCCOMAS D J, ALLEGRINI F, BALDONADO J, *et al.* The two wide-angle imaging neutral-atom spectrometers (TWINS) NASA mission-of-opportunity[J]. *Space Science Reviews*, 2009, **142**(1/2/3/4): 157-231
- [15] KONG Linggao, ZHANG Aibing, TIAN Zheng, *et al.* Integrated ion and neutral particle analyzer for Chinese Mars mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, **6**(2): 142-149
- [16] EBERT R W, ALLEGRINI F, FUSELIER S A, *et al.* Angular scattering of 1–50 keV ions through graphene and thin carbon foils: potential applications for space plasma instrumentation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, **85**(3): 033302
- [17] ALLEGRINI F, EBERT R W, NICOLAOU G, *et al.* Semi-empirical relationships for the energy loss and straggling of 1–50 keV hydrogen ions passing through thin carbon foils[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2015, **359**: 115-119
- [18] ALLEGRINI F, EBERT R W, FUNSTEN H O. Carbon foils for space plasma instrumentation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(5): 3931-3950
- [19] ALLEGRINI F, DAYEH M A. Thin carbon foil resistance to differential pressure[J]. *Vacuum*, 2014, **107**: 124-128
- [20] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, **306**(5696): 666-669
- [21] LEE C, WEI X D, KYSAR J W, *et al.* Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. *Science*, 2008, **321**(5887): 385-388
- [22] ALLEGRINI F, EBERT R W, FUSELIER S A, *et al.* Charge state of ~1 to 50 keV ions after passing through graphene and ultrathin carbon foils[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(2): 024101
- [23] ALLEGRINI F, BEDWORTH P, EBERT R W, *et al.* Energy loss and straggling of 1~50 keV H, He, C, N, and O

- ions passing through few layer graphene[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2015, **358**: 223-228
- [24] OLABI A G, ABDELKAREEM M A, WILBERFORCE T, et al. Application of graphene in energy storage device—a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, **135**: 110026
- [25] WU H Q, LINGHU C Y, LU H M, et al. Graphene applications in electronic and optoelectronic devices and circuits[J]. *Chinese Physics B*, 2013, **22**(9): 098106
- [26] ZHONG Y J, ZHEN Z, ZHU H W. Graphene: fundamental research and potential applications[J]. *FlatChem*, 2017, **4**: 20-32
- [27] KONG Linggao, ZHANG Aibing, ZHENG Xiangzhi, et al. Development and calibration of thermal ion mass spectrometer[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, **37**(5): 585-592 (孔令高, 张爱兵, 郑香脂, 等. 热离子质谱分析仪的研制及定标[J]. *空间科学学报*, 2017, **37**(5): 585-592)
- [28] ZEIGER B R, SHIELDS M W, PAUL B, et al. Graphene foils for neutral atom detectors[C]//Earth Observing Systems XXIV. San Diego: SPIE, 2019, **11127**: 111272C
- [29] VIRA A D, FERNANDES P A, FUNSTEN H O, et al. Angular scattering of protons through ultrathin graphene foils: application for time-of-flight instrumentation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, **91**(3): 033302
- [30] KONG Linggao, ZHANG Aibing, WANG Shijin, et al. Numerical simulation analysis of space plasma detector based on SIMION[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2012, **32**(4): 71-76 (孔令高, 张爱兵, 王世金, 等. 基于 SIMION 软件的空间等离子体探测器的数值仿真[J]. *中国空间科学技术*, 2012, **32**(4): 71-76)
- [31] GALVIN A B, KISTLER L M, POPECKI M A, et al. The plasma and suprathermal ion composition (PLASTIC) investigation on the STEREO observatories[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **136**(1): 437-486
- [32] KONG L G, ZHANG A B, ZHENG X Z, et al. A satellite-borne miniature ion mass spectrometer for space plasma[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2015, **35**(6): 755-762
- [33] MCCOMAS D J, ALLEGRI F, POLLOCK C J, et al. Ultrathin (~ 10 nm) carbon foils in space instrumentation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, **75**(11): 4863-4870
- [34] ZIEGLER J F, ZIEGLER M D, BIERACK J P. SRIM—the stopping and range of ions in matter (2010)[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2010, **268**(11/12): 1818-1823
- [35] DAHL D A. SIMION for the personal computer in reflection[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2000, **200**(1/2/3): 3-25
- [36] DIB A, AMMI H, MSIMANGA M, et al. Stopping force of (0.09–0.30) MeV/n ^{22}Ti , ^{24}Cr and ^{28}Ni ions in aluminum oxide and titanium oxide thin foils by time of flight spectrometry[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2023, **543**: 165099
- [37] YIĞİT M, KARA A, YILMAZ A. A study on interactions of 14.7 MeV protons and 3.6 MeV Alphas in ^{93}Nb target[J]. *Fusion Science and Technology*, 2024, **80**(2): 156-165
- [38] SUN Litao, XU Tao, YIN Kuibo. Microstructural Characterization of Graphene and Related 2D Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018 (孙立涛, 徐涛, 尹奎波. 石墨烯及相关二维材料显微结构表征[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018)
- [39] WANG C Y, XING Y W, LEI Y Z, et al. Adsorption of water on carbon materials: the formation of “water bridge” and its effect on water adsorption[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, **631**: 127719
- [40] STANCIK A L, BRAUNS E B. A simple asymmetric lineshape for fitting infrared absorption spectra[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2008, **47**(1): 66-69
- [41] WÜEST M, EVANS D S, VON STEIGER R. Calibration of Particle Instruments in Space Physics[M]. Noordwijk: The International Space Science Institute, 2007.

作者简介



徐鹏晖 男, 1996 年 10 月出生于湖南省常德市, 现为中国科学院国家空间科学中心博士研究生, 主要从事空间粒子辐射探测、星载飞行时间系统的仿真与测试等的研究。

E-mail: xupenghui19@mails.ucas.ac.cn



孔令高 (通信作者) 男, 1981 年出生于安徽省明光市, 现为南京大学深空探测科学与技术研究院教授, 博士生导师, 主要研究方向为空间环境探测技术研发及数据应用。

E-mail: lgkong@nju.edu.cn



张爱兵 男, 博士, 研究员, 主要从事空间探测技术研究及载荷研制方面的研究。

E-mail: zhab@nssc.ac.cn



麻继杰 男, 博士研究生, 主要从事火星空间环境粒子探测数据分析研究。

E-mail: majjie19@mails.ucas.ac.cn