

封面文章

用于超快扫描电子显微镜的光发射电子枪
及电子光学模拟*杨冬¹⁾²⁾ 李中文^{1)†} 田源¹⁾²⁾ 孙帅帅¹⁾³⁾田焕芳¹⁾ 杨槐馨¹⁾²⁾ 李建奇^{1)2)3)‡}

1) (中国科学院物理研究所, 凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学物理学院, 北京 100049)

3) (松山湖材料实验室, 东莞 523808)

(2024 年 9 月 5 日收到; 2024 年 10 月 7 日收到修改稿)

超快扫描电子显微镜将泵浦探测技术与显微成像相结合, 能够实现高时空分辨率下光诱导表面电荷动力学的可视化研究, 对于半导体表面态以及光电器件的高分辨检测具有非常重要的意义. 本文基于首台全国产化超快扫描电子显微镜的研制工作, 阐述了将热发射电子枪改造成光发射电子枪后的参数化设计, 定量分析了偏压、阴极、韦氏极、阳极的空间位置与交叉点位置、大小、发散角的依赖关系. 分析结果显示, 当韦氏极与阳极位置从 8 mm 调整到 23 mm 后, 通过将灯丝深度从 0.65 mm 调整至 0.45 mm, 配合偏压调节可以实现热发射高分辨成像、低工作电压以及光发射的正常使用. 此外, 也分析了反射镜分布对电子光路的影响, 发现当阳极高出反射镜 1.4 mm 后, 图像畸变几乎消失. 还研究了偏置电压对脉冲光电子在时域上的影响, 结果表明随着偏压的增大, 光发射的时间零点会推后且时间展宽变大. 这些工作将为后续超快电子显微镜的发展及光发射电子源的设计奠定基础.

关键词: 光发射电子枪, 超快扫描电子显微镜, 电子光学, 有限元分析方法**PACS:** 29.25.Bx, 41.85.-p, 07.78.+s, 87.64.Ee**DOI:** 10.7498/aps.73.20241245**CSTR:** 32037.14.aps.73.20241245

1 引言

扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 自问世以来, 在材料科学、生命科学、地球科学等领域发挥不可忽视的作用, SEM 具有分辨率高、景深大、图像立体感强等优点, 结合二次电子、背散射电子、电子背散射衍射、X 射线能

量色散谱、阴极荧光谱等分析方法, SEM 具有多个维度的分析能力. 不仅如此, 得益于 SEM 样品室空间大、可扩展性强的优点, 业界已经发展出了环境 SEM、聚焦离子束 SEM, 以及多物理场激励的原位扫描电子显微分析方法. SEM 已经从简单的表征工具发展成可观测、可加工、可物理激励的综合实验平台. 不过总体而言, SEM 的综合表征手段依旧停留在对物质信息稳态表征的层面.

* 国家自然科学基金 (批准号: U22A6005, 12074408, 52271195)、国家重点研发计划 (批准号: 2021YFA13011502)、中国科学院战略性先导科技专项 (B) (批准号: XDB25000000, XDB33000000)、中国科学院科学仪器研制项目 (批准号: YJKYYQ20200055)、中国科学院物理研究所综合极端条件实验装置 (SECUF)、北京市科技重大专项 (批准号: Z201100001820006) 和中国科学院物理研究所百人计划 (批准号: Y9K5051) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lizhongwen@iphy.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: lj@iphy.ac.cn

直到 2010 年, 美国加州理工学院的 Zewail 实验室将场发射型的 SEM 与泵浦探测技术结合, 实现超快扫描电子显微镜 (ultrafast scanning electron microscope, USEM)^[1,2]. 这一技术的突破使 SEM 的表征能力扩展到高时空 (fs-nm) 尺度, 赋予 SEM 对物质瞬态信息的表征能力^[3,4]. 由于二次电子对表面电位的变化十分敏感, USEM 能够直观地对半导体在光诱导后表面光生载流子的扩散、迁移等动力学过程进行可视化研究, 也取得了一些重要成果^[5-8]. 硅基 PN 结的相关研究, 直观地揭示了光生载流子的弹道扩散效应, 这一结果也显示出 USEM 在光生载流子动力学研究方面具有的独特优势^[7,9]. 光激发黑磷热空穴的各向异性输运的量化研究^[10,11], 阐明了非平衡的热载流子传导和近平衡 (near-equilibrium) 传导之间的区别. 除此之外, 针对半导体中掺杂、缺陷等对载流子行为的影响^[12-14], USEM 也具有强大的探测潜力.

USEM 探测光生载流子的机理主要为能量增益机制和能量损失机制, 表现为光激发样品表面后局域电荷浓度、能量随时间的改变而造成二次电子产额差异形成系列图像^[15]. USEM 也并不局限于对半导体表面电荷的动力学研究, 在薄膜材料的表面声波^[16]、电介质加速器^[17]、光诱导等离子激元^[18]等方面的研究均有重要成果. USEM 的高时空综合表征探测能力有望进一步发展成为微纳器件的检测手段^[19].

与传统 SEM 电子光源热发射、场发射模式不

同, USEM 基于泵浦探测技术, 使用与激发样品的泵浦光在时间上相关联的探测光, 激发电子枪的灯丝阴极产生脉冲光电子束进而成像. 显然, 光发射电子束的质量直接决定了 USEM 的成像效果以及时间分辨能力. 在此之前, 所在课题组完成了首台基于国产热发射型 SEM 改造为 USEM 的工作. 基于此, 本文利用有限元分析方法, 对 USEM 中光发射电子光学的影响因素进行探究.

2 USEM 及光发射电子枪

图 1(a) 展示了 USEM 的基本原理. 由飞秒激光器提供 1030 nm, 300 fs 的超快激光, 通过倍频、分束获得两束激光, 一束 (泵浦) 激光激发样品, 另一束 (探测) 激光激发灯丝产生光电子. 通过调节探测光路上的延迟器可以改变两束光之间的光程差, 从而调节光电子与泵浦光到达样品表面的时间差. 延迟器上使光电子与泵浦光同时到达样品表面的位置被称为时间零点. 通过连续改变延迟器位置, 使脉冲光电子束对泵浦光激发后的某一时间距离的样品状态成像, USEM 即可获得样品表面态的瞬态信息.

成像的质量由脉冲光电子束直接决定, 所以 USEM 改造中的重点问题是如何获得高质量的光发射电子. 与传统 SEM 电子光源的电流激励 (热发射), 电场激励 (场发射) 不同, 光发射基于光电效应, 灯丝阴极中的电子吸收光子能量而溢出表面形

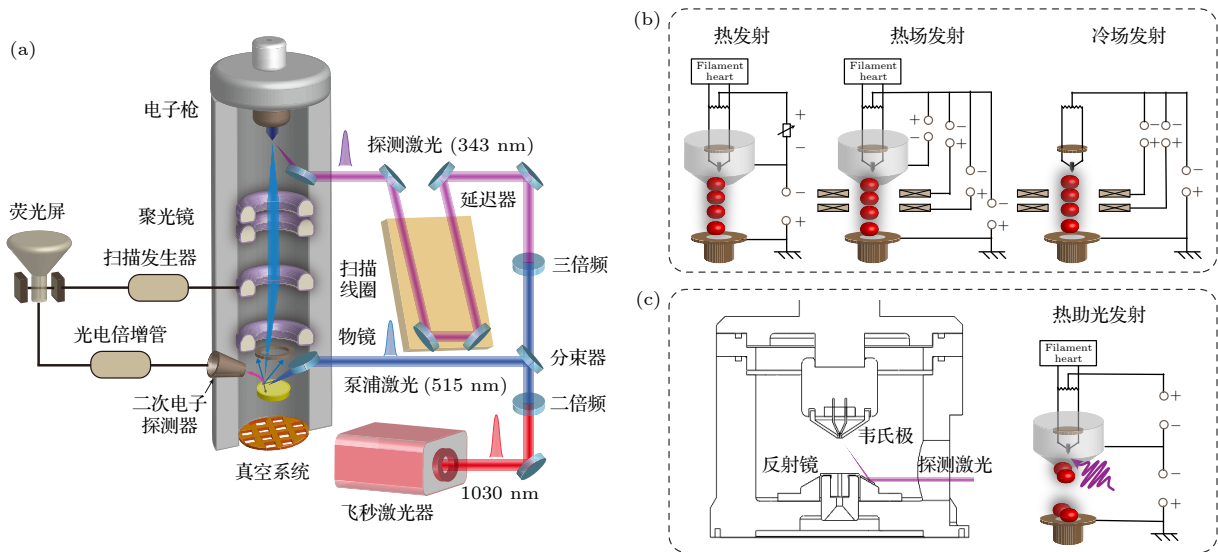


图 1 (a) 超快扫描电子显微镜原理图; (b) 三种激励模式的电子枪原理图; (c) 热助光发射电子枪结构图 (左) 与原理图 (右)

Fig. 1. (a) Schematic of ultrafast scanning electron microscope; (b) electron gun with three excitation modes; (c) structural diagram (left) and schematic (right) of thermally assisted photo-emitting electron gun.

成光电子束. 辐照灯丝的探测激光的光子能量通常要大于阴极材料的功函数. 从结构而言, 如图 1(b), (c) 所示, 光发射电子枪与常规电子枪结构相似, 主要区别在于光发射电子枪配置了引光装置, 可以将激光引入电子枪内部并聚焦到灯丝尖端. 目前, 超快电子显微镜 (包括超快透射电子显微镜) 的主要方案均在商用电子显微镜的基础上进行改造, 既实现了时间分辨成像能力, 同时保留了电子显微镜常规的实验功能. 根据电子枪内部是否安装反射镜, 光发射电子枪激光引入方式主要分为底部激光引入方式和侧方激光引入方式. 底部激光引入方式中真空窗口开设于电子枪体下部, 反射镜安装在灯丝阴极下方, 水平入射的激光透过真空窗口, 经过反射镜反射之后以与电子束方向较小的夹角照射到灯丝表面. 侧方激光引入方式中的真空窗口开设于电子枪体上部, 水平入射的激光透过真空窗口后直接照射到灯丝表面. 底部激光引入方式在热发射型电子枪和场发射型电子枪中都可以见到^[5], 灯丝侧方激光引入方式则主要出现在场发射型电子枪中^[2].

本工作所研究的光发射电子枪是在热发射电子枪的基础之上改造完成的. 电子枪室底部安装有反射镜, 同时在原有基础之上增加了韦氏极与阳极之间的距离, 以确保激光能够以较小角度入射进韦氏极辐照灯丝, 如图 1(c) 所示. 为引入激光而在电子枪内部所做的机械变动势必会破坏电子枪原有的电子光学系统, 那么通过调节相关参数保证电子光路的正常运行就显得十分重要, 这也是本工作的主要目的.

3 影响 USEM 电子光源性能的参量

USEM 的电子光源, 主要关注的是在光发射模式下光源的亮度, 发射的稳定性以及脉冲光电子束的空间相干性和时间宽度. 在热发射型的电子枪中, 电子束会在阴阳极之间会聚形成一个交叉点, 交叉点同样存在于 USEM 的电子枪之中. 电子束交叉点的大小、发散度等可以极大地影响光源的质量, 而交叉点的参数受到电子枪内部电子光学参量的调控. 更重要的是, 相关电子光学参量的改变还会对 USEM 时间零点、时间分辨率等产生非常重要影响. 接下来将展开论述电子枪偏置电压、韦氏极与阳极距离、灯丝深度等多个因素对电子枪电子光学系统及最终 USEM 电子光源质量的影响.

3.1 偏置电压

如图 1 所示, 韦氏极安装在灯丝前端, 通常处于比灯丝更低的电势位, 是电子枪中提供偏置电压 (简称偏压) 的机械装置. 加载偏压的韦氏极形成静电透镜, 可以控制灯丝尖端电子束的发射剂量, 并对电子束起到会聚作用形成交叉点. 对不同偏压下的电子光学模拟可知, 随着偏压的增大, 韦氏极对电子束的会聚效应逐渐增强, 发射束流减小. 图 2(a) 展示了不同的偏压下, 灯丝及韦氏极开口处的电势和电场强度的分布状况. 图 2(b) 中展示了对应偏压下, 模拟得到的灯丝阴极发射电子束的传输轨迹. 当偏压 $V_{\text{bias}} = 0$ V 时电子束没有交叉点, 但由于韦氏极的存在仍会对电子束的发散产生限制. 灯丝尖端的负电势等值线 ($V = V_{\text{acc}}$) 呈现出马鞍形状, 电子沿垂直等值线的方向运动并持续发散. 此时, 灯丝尖端拥有最大发射面积, 且发射束流最大. 然而由于发散角过大, 大部分发射电子被阳极帽反射或吸收, 所以热发射型的电子枪在偏压失效时无法正常成像. $V_{\text{bias}} = 620$ V, 负电势等值线仅与灯丝尖端相接触, 负电势高于工作电压 V_{acc} 部分将被限制发射. 此时, 电子束出现明显交叉点, 并在灯丝尖端存在电场极小值区域. 图 2(c) 和图 2(d) 展示了偏压变化与交叉点参数及电子束束斑直径变化关系的模拟结果. 随着偏压的增加, 交叉点从远离灯丝处向近处移动, 交叉点缩小, 发射面积减小导致发射束流减小, 而发散角的减小使得亮度增加. 同时, 电场极小值区域向远离灯丝方向移动. 在偏压继续增大时, 韦氏极会对电子束产生过会聚, 而使电子反向运动, 无法发射. 在电场上表现为, V_{acc} 等值线不与灯丝尖端接触, 电场极小值区域离开灯丝, 此时的偏压定义为截止偏压.

由上述讨论可知, 对于热发射型的电子枪光发射改造工作, 非常重要的一点是不能使用自偏置电压源. 在使用自偏置电压源的 SEM 中, 灯丝尖端在灯丝电流的热激励下发射出电子形成发射束流 (I_e), 发射束流在高压电源中通过偏置电阻时产生的电势差就是偏压 ($V_{\text{bias}} = I_e \cdot R_{\text{bias}}$). 此时偏压除了静电透镜的功能, 由于其大小和 I_e 相关, 还可以起到稳定束流的作用, 自偏置电压源对于常规电镜而言无疑是一项伟大的技术^[20,21]. 然而, 在 USEM 的光发射模式中, 为了降低非瞬态相关的信号 (热发射本底), 通常会将灯丝电流降低到不发射电子

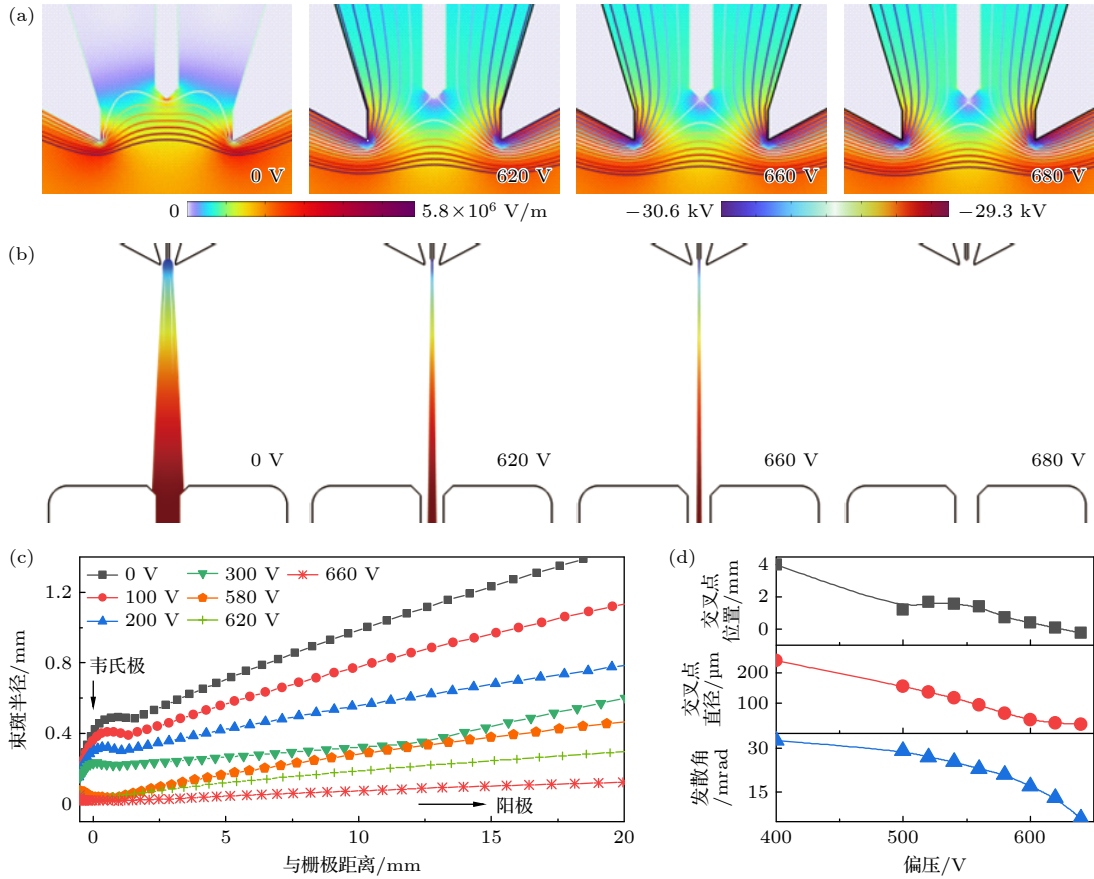


图 2 偏压对电子光学的影响 (a) 灯丝尖端的电场分布; (b) 电子束轨迹; (c) 电子束的几何光学, 其中 $z = 0$ mm 处为韦氏极, $z = -0.5$ mm 处为灯丝尖端, $z = 23$ mm 处为阳极; (d) 交叉点位置、直径、发散角

Fig. 2. Effect of bias voltage on the electron optics: (a) Electric field distribution at the filament tip; (b) electron beam trajectories; (c) optics geometry of electron beam, where the wehnelt at $z = 0$ mm, the filament tip at $z = -0.5$ mm, and the anode at $z = 23$ mm; (d) position, diameter, divergence angle as a function of bias voltage.

的大小, 甚至完全关闭灯丝电流. 完全由光电效应产生的脉冲光电子束的束流不仅不连续, 剂量 (I_{pe}) 通常也比热发射低 3—4 个数量级^[2], 此时由自偏置电压源产生的偏压接近零而使 USEM 无法成像. 因此, USEM 必须独立控制偏置电压.

3.2 韦氏极与阳极距离

如图 1(c) 所示, 在 USEM 进行光发射改造时, 为使激光以小角度入射灯丝, 需要将韦氏极与阳极之间的间距增加. 随着此间距的增大, 韦氏极与阳极之间的电压梯度减小, 同等偏压下韦氏极的会聚作用增加, 而使得截止偏压减小. 图 3(a) 展示了在电子枪工作电压为 30 kV 时, 不同的韦氏极-阳极间距对应的截止偏压. 较小的截止偏压不利于最优偏压数值的调节, 对束流的稳定性也有影响, 因此在满足激光入射的条件下, 应取尽量小的韦氏极与阳极间距.

同样, 降低电子枪的工作电压也会导致电压梯度减小, 截止偏压降低. 图 3(b) 展示了韦氏极与阳极间距为 23 mm 时, 不同的工作电压所对应的截止偏压. 由此可以得到, USEM 在低工作电压运行时需要配合小的偏压; 高工作电压运行时需要配合较大的偏压.

3.3 灯丝深度

由图 1(b) 和图 1(c) 所知, 偏压是灯丝与韦氏极之间的电势差, 那么灯丝尖端与韦氏极开口外侧平面之间的距离 (灯丝深度) 将直接改变韦氏形成静电透镜的会聚能力. 目前, 国内外电镜厂商均采用楔形开口的韦氏极设计, 距离韦氏极开口越近的位置直径越小, 文中 USEM 所使用的韦氏极开口直径为 1 mm. 图 4(a)—(c) 展示了在电子枪工作电压为 30 kV, 韦氏极与阳极间距为 23 mm 时, 不同灯丝深度在不同偏压下所对应的电子束交叉点

的位置、大小和发散角. 当灯丝深度变小时, 韦氏极对灯丝尖端电子束发射的抑制作用减弱, 需要更大的偏压稳定电子束发射并实现聚焦. 当灯丝深度变大时, 韦氏极对灯丝尖端电子束发射的抑制作用增强, 需要使用较小的偏压来维持电子束正常发射. 图 4(d) 展示了不同灯丝深度下对应的截止偏

压. 阳极对电子束的加速作用与韦氏极对电子束的会聚 (抑制) 作用相互竞争, USEM 电子枪在增加韦氏极与阳极的间距之后, 可以通过调节灯丝深度, 实现可调节偏压下的良好聚焦状态. 在本工作中, 当韦氏极与阳极位置从 8 mm 调整到 23 mm 后, 将灯丝深度从 0.65 mm 调整至 0.45 mm, 通过

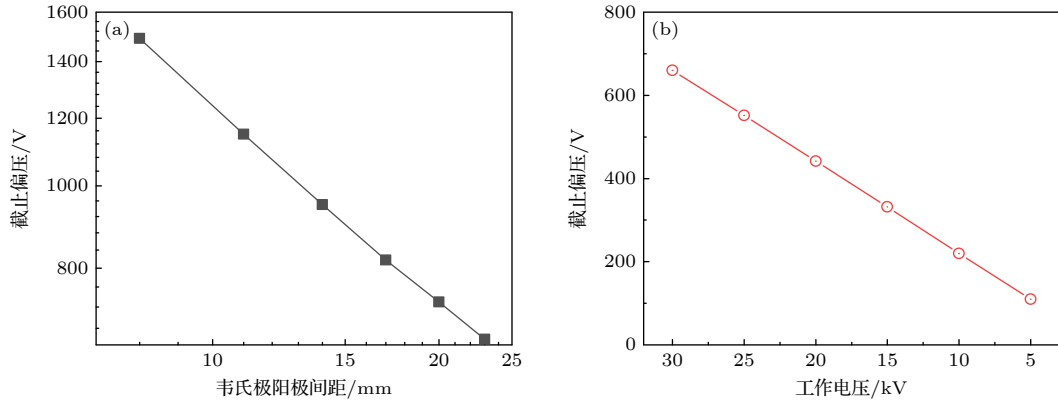


图 3 (a) 截止偏压与韦氏极-阳极间距的关系, 工作电压为 30 kV; (b) 截止偏压与工作电压的关系, 韦氏极与阳极间距为 23 mm
Fig. 3. (a) Relationship between cutoff bias voltage and the distance between the wehnelt electrode and the anode at 30 kV; (b) relationship between cutoff bias voltage and working voltage with a distance of 23 mm between the wehnelt electrode and the anode.

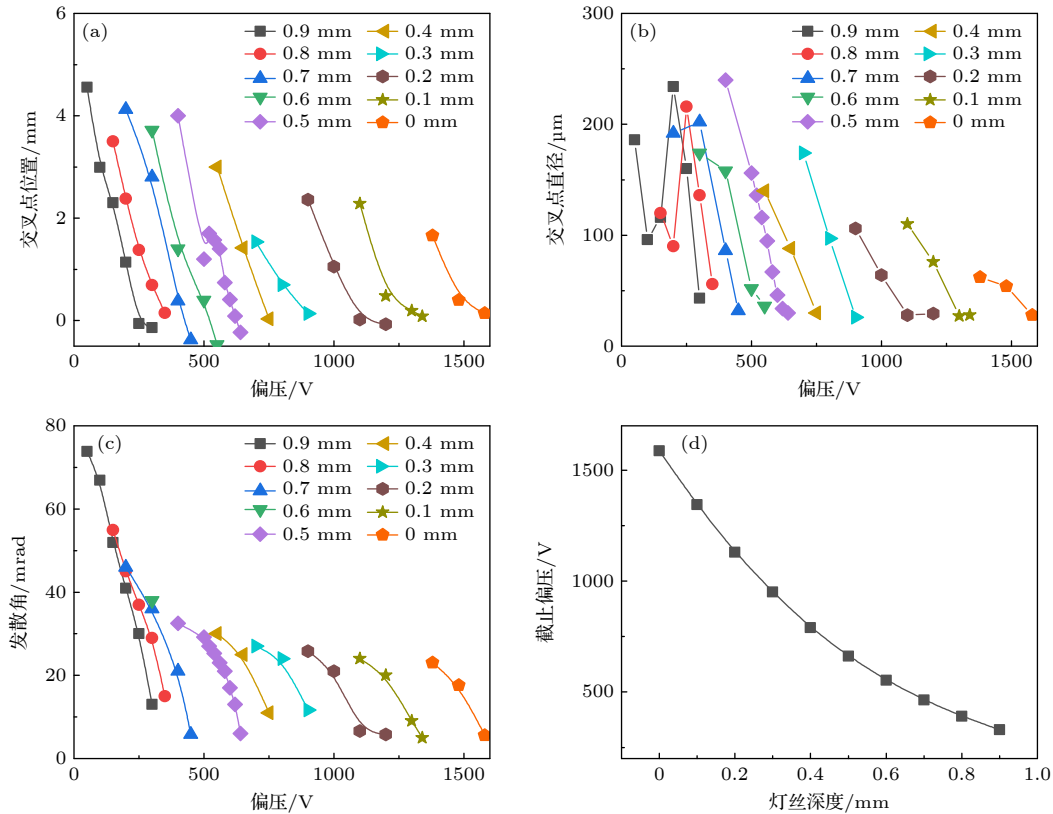


图 4 不同灯丝深度的发射状态 (a)–(c) 不同灯丝深度的交叉点位置、交叉点大小、发散角等随偏压的变化; (d) 不同灯丝深度条件下的截止偏压, 当偏压大于截止偏压时处于禁止发射状态

Fig. 4. Emission states at different distances between filament and wehnelt: (a)–(c) Variation of positions, diameters and divergence angles of crossover with bias voltage; (d) the cut-off bias voltage at the different distance between filament and wehnelt; when the bias voltage is greater than the cut-off bias voltage, the emission is prohibited.

偏压对电子光路的优化, 可以分别满足热发射下的空间相干性、低工作电压成像以及光发射剂量要求.

4 反射镜架对成像的影响

USEM 工作电压为 30 kV 时, 电子枪内部电场强度可以达到 10^6 V/m, 从前面讨论可知, 电子枪内部结构的改变将对电子束产生巨大的影响. 为了使激光以一定的入射角度会聚至灯丝的发射平面, 在电子枪内部加装的反射镜架必然会破坏原有电场分布. 如图 5(a) 所示, 单边放置的镜架会严重破坏电子枪内电场的轴向分布, 使电子束无法正常发射. 所以 USEM 中反射镜及其镜架的安装需要以光轴为中心完全对称分布, 保证电子束不偏离光轴或在空间上发生畸变. 电子枪内所使用反射镜及镜架必须为导电良好的金属材质, 以免产生电荷聚集引起异常放电.

不仅如此, 反射镜要尽量远离阳极或不高于阳

极. 尽管阳极处对称分布反射镜已经可以使电子束沿光轴传输, 但相比于不装反射镜及镜架时细微的电场差异仍然会给图像质量带来极大的影响, 如图 5(b) 所示. 两侧分布的反射镜引起电子束截面在一个方向上拉伸, 使得图像产生像散且无法消除. 当调节阳极平面高出反射镜上边缘 1.4 mm, 图像畸变基本消失, 此时阳极平面电场的分布如图 5(b) 所示.

5 时间零点和时间展宽

USEM 基于泵浦探测技术实现飞秒级时间分辨率, 与光学泵浦探测技术不同的是, USEM 是使用脉冲光电子束作为探针, 那么确定时间零点时必须考虑光电子的漂移时间. 如图 6(a) 所示, 探测激光激发灯丝产生光电子, 光电子在阴极与阳极之间完成加速, 之后匀速运动到样品表面. 从图 6(b) 可知, 不同偏压下阴阳极之间电场的差异主要体现

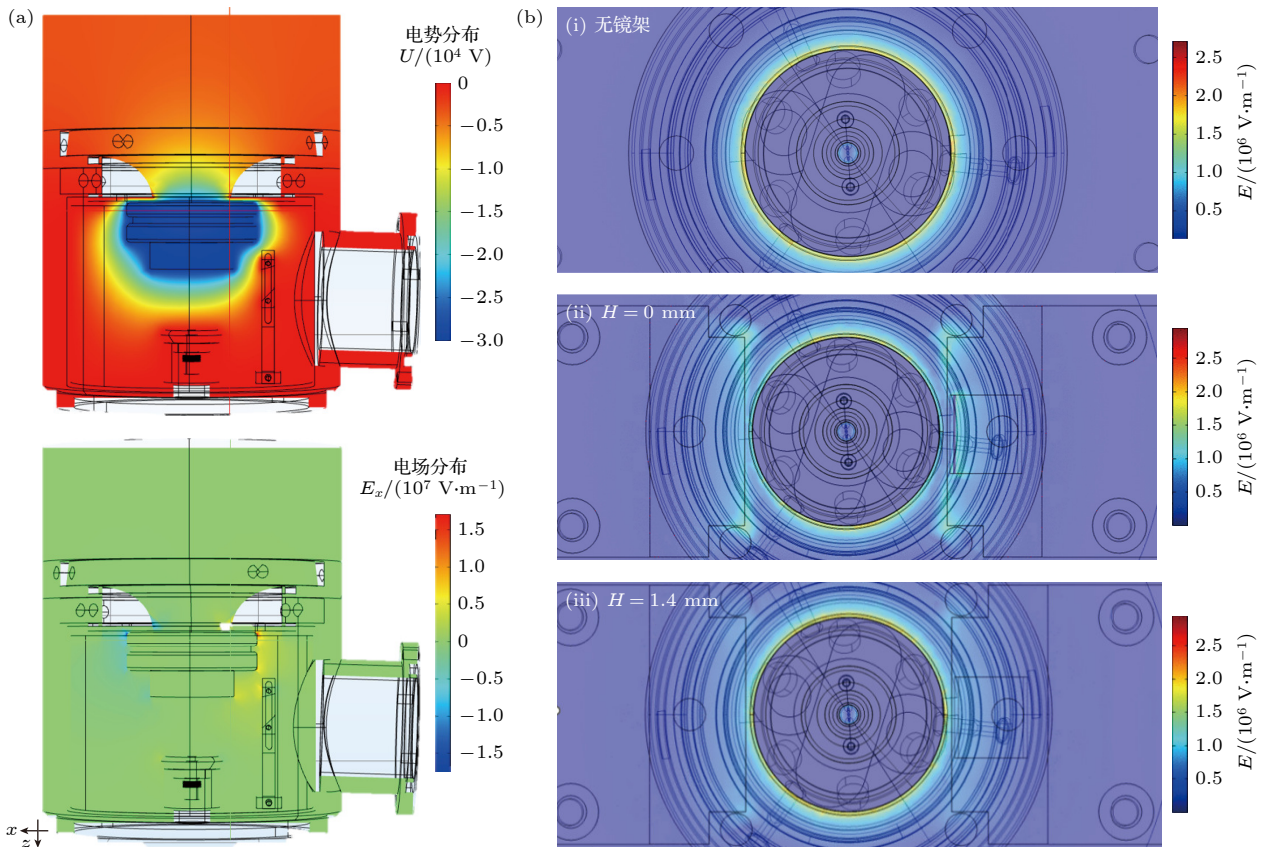


图 5 反射镜对电子枪内部电场的影响 (a) 不对称放置反射镜的纵向截面电势分布 (上图)、电场分布 (下图). (b) 阳极平面处的横向截面电场分布 (i) 无反射镜; (ii), (iii) 阳极与反射镜高度差为 $H = 0, 1.4 \text{ mm}$

Fig. 5. Effect of mirrors on the electric field inside the electron gun: (a) Longitudinal cross-sectional potential distribution (top) and electric field distribution (bottom) for asymmetrically placed mirrors. (b) Transverse cross-sectional electric field distribution at the anode plane: (i) Without mirrors; (ii), (iii) height difference between the anode and mirror $H = 0, 1.4 \text{ mm}$.

在灯丝与韦氏极之间, 在截止偏压之下, 偏压值越大, 这一段的加速电场越小. 因此, 设定所有光电子初速度均相同 (不考虑初始能散), 计算不同偏压下的电子运动状态. 当光电子逃逸出阴阳极间的加速电场后, 光电子达到最大速度 (30 kV 时为 $1/3$ 倍光速), 所需时间随着偏压的增大而增大. 光电子从阴极逸出时速度较低, 在进入显著的加速过程之前, 运动过程主要受到灯丝与韦氏极之间电场的影响. 差异主要表现为, 随着偏压增大, 光电子从阴极到逃出韦氏极所需要的时间增加.

如图 6(c) 所示, 偏压选取 0 和 300 V, 与 0 V 相比, 300 V 的脉冲光电子束剂量峰值传播时间相差 177 ps. 这些时间差对于飞秒级时间分辨实验来说是十分关键的, 不同偏压下所对应的时间零点差异很大. 当改变偏压时需要重新调整泵浦光和探测光之间的光路差, 以确保延迟器可以在恰当的位置卡到时间零点. 脉冲光电子束中所包含的光电子因为运动轨迹不同以及库仑排斥, 造成脉冲光电子束

波包在时间上的展宽, 且在不同偏压下脉冲光电子束的时间展宽不同. 在偏压 0 V 下, 光电子剂量在时间上的分布为对称分布. 在高偏压状态下, 光电子剂量在时间上存在不对称性, 并且出现较大的拖尾, 这将直接导致时间分辨率降低. 不仅如此, 如图 6(d) 所示, 在不同电子发射角度的概率分布下 (如锥形均匀分布), 由于电子轨迹的不同, 离轴越远的电子需要更长的时间到达样品, 因此导致更大的时间展宽. 电子发射角度的概率分布往往不是均匀分布, 如朗伯分布或正态分布, 不同角度发射电子的概率不同, 会在时间轴上出现不对称性. 这也说明, 阴极材料的电子发射角度的分布, 不仅仅影响空间分辨率, 同样在一定程度影响时间分辨率.

由此也可得出, 偏压对 USEM 时间分辨率和空间分辨率的相关性是相反的. 较小的偏压可以得到更高的时间分辨率, 较大的偏压可以得到较小的交叉点光源获得较高的空间分辨率.

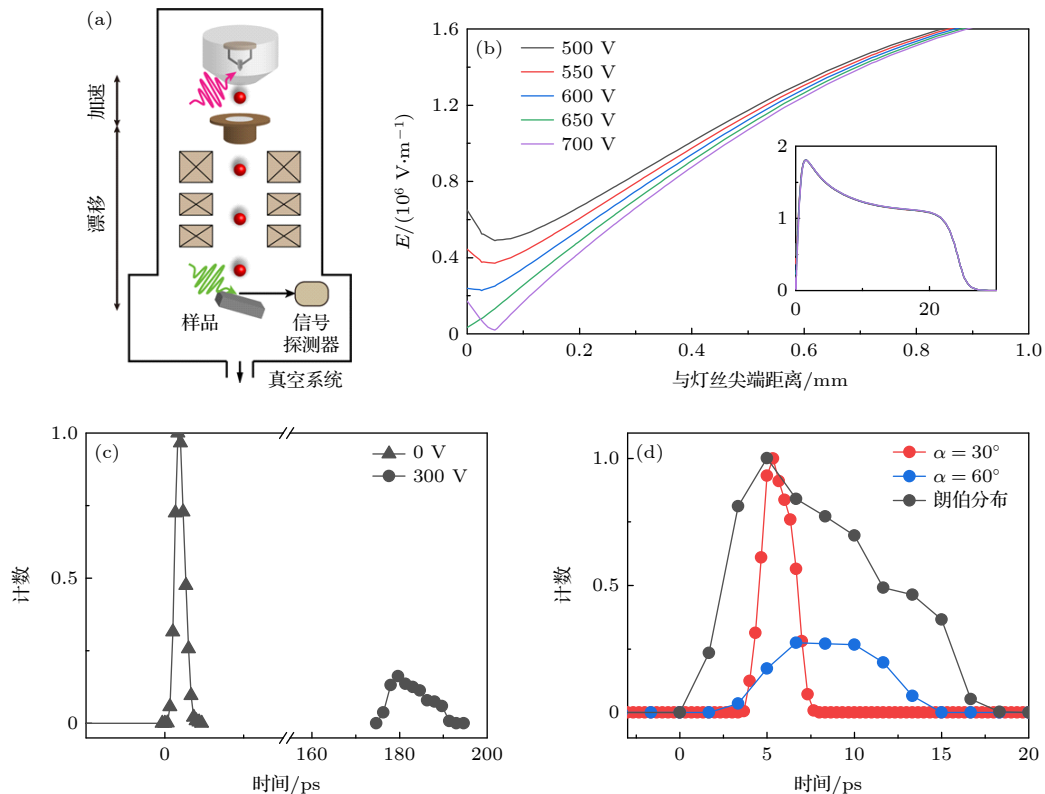


图 6 偏压对电子漂移时间的影响 (a) 电子漂移示意图; (b) 阴极附近光轴上的电场分布随偏压的变化, 插图为整个加速区间电场分布; (c) 偏压 $V_{\text{bias}} = 0, 300$ V 时的电子束时间展宽; (d) 偏压为 300 V 时, 不同发射分布下的电子束时间展宽

Fig. 6. Effect of bias voltages on electron drift time: (a) Schematic diagram of electron drift; (b) electric field distribution along the optical axis near the cathode as a function of bias voltage, with the illustration showing the electric field distribution across the entire acceleration region; (c) temporal broadening of the electron beam at $V_{\text{bias}} = 0, 300$ V; (d) temporal broadening of the electron beam under different emission distributions at $V_{\text{bias}} = 300$ V.

6 结 论

本文基于首台全国产化 USEM 的研发工作, 详细介绍了其中光发射电子枪的研制部分. 利用有限元分析方法, 系统地阐述了偏置电压、灯丝阴极、韦氏极、阳极的空间位置以及反射镜分布等因素对电子光路的影响. 在增加阴阳极间距的情况下, 通过调整灯丝深度实现对韦氏极聚焦能力的调控, 将截止偏压调节到电源可调范围, 并调控保障 USEM 的原有热发射分辨能力, 同时有效地提高光发射剂量. 通过关于光轴对称排布反射镜并升高阳极平面高度的方法, 消除反射镜对电场的影响, 解决了反射镜引入带来的像散问题. 通过计算在不同偏压下电子运动时间的变化, 定量地获得光发射时间零点位置与时间展宽. 这一结果将为后续 USEM 的发展以及光发射电子源的设计、加工奠定基础.

参考文献

- [1] Mohammed O F, Yang D S, Pal S K, Zewail A H 2011 *J. Am. Chem. Soc.* **133** 7708
- [2] Yang D S, Mohammed O F, Zewail A H 2010 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **107** 14993
- [3] Zhang Y, Chen X, Yu Y, Huang Y, Qiu M, Liu F, Feng M, Gao C, Deng S, Fu X 2024 *Adv. Sci.* **11** 2400633
- [4] Perez C, Ellis S R, Alcorn F M, Smoll E J, Fuller E J, Leonard F, Chandler D, Talin A A, Bisht R S, Ramanathan S, Goodson K E, Kumar S 2024 *Sci. Adv.* **10** eadn8980
- [5] Tian Y, Yang D, Ma Y, Li Z, Li J, Deng Z, Tian H, Yang H, Sun S, Li J 2024 *Nanomaterials* **14** 310
- [6] Najafi E, Ivanov V, Zewail A, Bernardi M 2017 *Nat. Commun.* **8** 15177
- [7] Najafi E, Scarborough T D, Tang J, Zewail A 2015 *Science* **347** 164
- [8] Ellis S R, Bartelt N C, Leonard F, Celio K C, Fuller E J, Hughart D R, Garland D, Marinella M J, Michael J R, Chandler D W, Liao B, Talin A A 2021 *Phys. Rev. B* **104** L161303
- [9] Pan J H, Liu S, Tang J 2021 *Phys. Rev. B* **104** 045309
- [10] Liao B, Najafi E, Li H, Minnich A J, Zewail A H 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 871
- [11] Liao B, Zhao H, Najafi E, Yan X, Tian H, Tice J, Minnich A J, Wang H, Zewail A H 2017 *Nano Lett.* **17** 3675
- [12] Bose R, Adhikari A, Burlakov V M, Liu G Y, Haque M A, Priante D, Hedhili M N, Wehbe N, Zhao C, Yang H Z, Ng T K, Goriely A, Bakr O M, Wu T, Ooi B S, Mohammed O F 2018 *ACS Energy Lett.* **3** 476
- [13] Shaheen B S, El-Zohry A M, Yin J, De Bastiani M, De Wolf S, Bakr O M, Mohammed O F 2019 *J. Phys. Chem. Lett.* **10** 1960
- [14] Shaheen B S, El-Zohry A M, Zhao J, Yin J, Hedhili M N, Bakr O M, Mohammed O F 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 7760
- [15] Sun J, Adhikari A, Shaheen B S, Yang H, Mohammed O F 2016 *J. Phys. Chem. Lett.* **7** 985
- [16] Najafi E, Liao B, Scarborough T, Zewail A 2018 *Ultramicroscopy* **184** 46
- [17] Kozak M, McNeur J, Schonenberger N, Illmer J, Li A, Tafel A, Yousefi P, Eckstein T, Hommelhoff P 2018 *J. Appl. Phys.* **124** 023104
- [18] Shiloh R, Chlouba T, Hommelhoff P 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 235301
- [19] Arashida Y, Jeong S, Kawasaki K, Emoto Y, Noyama G, Hada M, Kishibe Y, Shigekawa H, Akada K, Yoshida S, Fujita J ichi 2024 *ACS Photonics* **11** 2171
- [20] Haine M E, Cosslett V E, Marton L 1961 *Phys. Today* **14** 52
- [21] Bigelow W C 2010 *Microsc. Today* **18** 26

COVER ARTICLE

Photo-emission electron gun and electron optical simulation
for ultrafast scanning electron microscope^{*}

Yang Dong¹⁾²⁾ Li Zhong-Wen^{1)†} Tian Yuan¹⁾²⁾ Sun Shuai-Shuai¹⁾³⁾
 Tian Huan-Fang¹⁾ Yang Huai-Xin¹⁾²⁾ Li Jian-Qi^{1)2)3)‡}

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics,
 Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

3) (*Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China*)

(Received 5 September 2024; revised manuscript received 7 October 2024)

Abstract

Ultrafast scanning electron microscope (USEM) integrates pump-probe technique with microscopic imaging, enabling the visualizing of photon-induced surface charge dynamics with high spatial and temporal resolution. This capability is crucial for high-resolution detection of semiconductor surface states and optoelectronic devices. This work discusses the parametric design of a thermionic emission electron gun that has been modified into a photoemission electron gun, based on a home-built ultrafast scanning electron microscope. Given that the dose of the photoemitting electron beam is usually much lower than that of thermionic emission, the transition to photoemission requires the removal of the self-bias voltage function of the original electron microscope power supply to ensure the normal operation of the Wehnelt electrode. We quantitatively analyze the dependence of bias voltage, cathode, Wehnelt electrode, and anode on the position, size and divergence angle of crossover, which helps to improve the parameter adjustment of the modified electron gun. The analysis results indicate that if the distance between the Wehnelt electrode and the anode is adjusted from 8 to 23 mm, the distance between the filament and wehnelt can be changes from 0.65 to 0.45 mm to cooperate with the bias adjustment, so that the normal use of high-resolution thermionic emission mode, low voltage mode and photoemission mode can be realized. Subsequently, the effect of the mirror's position on the electron optical path is analyzed. It is found that when the anode is raised 1.4 mm above the mirror, the influence on the electron optical path can be ignored. Additionally, the zero-of-time and temporal broadening of the photo-electron pulse are further simulated. The results indicate that with the increase of bias voltage, the time zero of photoemission will be delayed and the temporal broadening will become larger. This study lays a foundation for the future development of ultrafast electron microscope and the design of photoemission electron sources.

Keywords: photo-emission electron gun, ultrafast scanning electron microscope, electron optics, finite element analysis methods

PACS: 29.25.Bx, 41.85.-p, 07.78.+s, 87.64.Ee

DOI: [10.7498/aps.73.20241245](https://doi.org/10.7498/aps.73.20241245)

CSTR: [32037.14.aps.73.20241245](https://cstr.cn/32037.14.aps.73.20241245)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U22A6005, 12074408, 52271195), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFA13011502), the Strategic Priority Research Program (B) of the Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. XDB25000000, XDB33000000), the Scientific Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. YJKYYQ20200055), the Synergetic Extreme Condition User Facility (SECUF), the Beijing Municipal Science and Technology Major Project, China (Grant No. Z201100001820006), and the IOP Hundred Talents Program, China (Grant No. Y9K5051).

† Corresponding author. E-mail: lizhongwen@iphy.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: ljq@iphy.ac.cn

用于超快扫描电子显微镜的光发射电子枪及电子光学模拟

杨冬 李中文 田源 孙帅帅 田焕芳 杨槐馨 李建奇

Photo-emission electron gun and electron optical simulation for ultrafast scanning electron microscope

Yang Dong Li Zhong-Wen Tian Yuan Sun Shuai-Shuai Tian Huan-Fang Yang Huai-Xin Li Jian-Qi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 222901 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20241245

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241245>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于深紫外激光-光发射电子显微技术的高分辨率磁畴成像

High resolution imaging based on photo-emission electron microscopy excited by deep ultraviolet laser

物理学报. 2020, 69(9): 096801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200083>

原位液相透射电子显微镜及其在纳米粒子表征方面的应用

In-situ liquid phase transmission electron microscope and its application in nanoparticle characterization

物理学报. 2021, 70(8): 086701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201899>

偏振调制扫描光学显微镜方法

Polarization modulation scanning optical microscopy method

物理学报. 2024, 73(15): 157801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240688>

用于扫描隧道显微镜的低噪声前置电流放大器

Low-noise preamplifier for scanning tunneling microscope

物理学报. 2024, 73(13): 130702 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240560>

苯乙炔分子电子激发态超快动力学研究

Ultrafast dynamics of electron excited states of phenylacetylene

物理学报. 2021, 70(5): 053302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201473>

原子尺度材料三维结构、磁性及动态演变的透射电子显微学表征

Atomic scale characterization of three-dimensional structure, magnetic properties and dynamic evolutions of materials by transmission electron microscopy

物理学报. 2021, 70(6): 066801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202072>