

深紫外激光光发射与热发射电子显微镜在热扩散阴极研究中的应用

任峰 阴生毅 卢志鹏 李阳 王宇 张申金 杨峰 卫东

Applications of deep ultraviolet laser photo- and thermal-emission electron microscope in thermal dispenser cathode research

Ren Feng Yin Sheng-Yi Lu Zhi-Peng Li Yang Wang Yu Zhang Shen-Jin Yang Feng Wei Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 187901 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.187901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.187901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

反射式变掺杂负电子亲和势 GaN 光电阴极量子效率研究

Quantum efficiency for reflection-mode varied doping negative-electron-affinity GaN photocathode

物理学报.2017, 66(6): 067903 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.067903>

磁控管用新型 $Y_2O_3-Gd_2O_3-HfO_2$ 浸渍 W 基直热式阴极研究

A novel $Y_2O_3-Gd_2O_3-HfO_2$ impregnated W base direct-heated cathode in magnetron tube

物理学报.2016, 65(5): 057901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.057901>

变组分 AlGaAs/GaAs 透射式光电阴极分辨力特性分析

Resolution characteristic of graded band-gap AlGaAs/GaAs transmission-mode photocathodes

物理学报.2014, 63(16): 167902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.167902>

用于真空电子太赫兹器件的微型热阴极电子束源研究

Study of mini-themionic electron sources for vacuum electron THz devices

物理学报.2014, 63(5): 057901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.057901>

等离子喷涂含钪氧化物阴极制备及发射特性研究

Preparation and emission characteristic study of plasma-sprayed scandia-doped oxide cathode

物理学报.2012, 61(7): 077901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.077901>

深紫外激光光发射与热发射电子显微镜在热扩散 阴极研究中的应用*

任峰¹⁾²⁾ 阴生毅^{1)†} 卢志鹏¹⁾²⁾ 李阳¹⁾ 王宇¹⁾ 张申金³⁾
杨峰³⁾ 卫东⁴⁾

1)(中国科学院电子学研究所, 高功率微波源与技术实验室, 北京 100190)

2)(中国科学院大学, 北京 100039)

3)(中国科学院理化技术研究所, 功能晶体与激光技术重点实验室, 北京 100190)

4)(北京中科科仪股份有限公司, 北京 100190)

(2017年5月4日收到; 2017年5月27日收到修改稿)

对热扩散阴极表面微区发射状态进行原位观察和分析一直是热阴极研究的重要课题. 本文着重介绍深紫外激光光发射电子/热发射电子显微镜的基本原理及其在热扩散阴极研究中的典型实例. 系统配备了高温激活所用的加热装置, 样品可被加热至 1400 °C. 系统具有光发射电子、阴极热发射电子、光发射电子和阴极热发射电子联合三种电子成像模式. 应用表明, 对于热扩散阴极而言, 深紫外激光光发射电子像适于呈现阴极表面的微观结构形貌; 热发射电子像适于反映阴极表面的本征热电子发射及均匀性; 光电子和热电子联合成像适于对阴极表面的有效发射点做出精确定位.

关键词: 深紫外激光, 光发射电子显微镜, 热发射电子显微镜, 扩散阴极

PACS: 79.40.+z, 79.60.-i, 79.60.Cn

DOI: 10.7498/aps.66.187901

1 引言

热扩散阴极是目前电真空器件领域应用最广泛的一类阴极^[1,2]. 针对热扩散阴极表面的研究是热扩散阴极研究中一个重要的分支^[3-12]. 20世纪80年代研究者就指出采用高分辨的发射式电子显微镜对阴极表面热电子发射进行研究, 有助于深入理解电子发射机理^[13,14]. 然而, 对热扩散阴极表面的发射状态的分析, 特别是局部发射微区的精确定位以及发射特征分析, 一直都难以进行. 首先, 热扩散阴极的激活温度一般需要达到 1150 °C, 并在高真空环境下保持一段时间, 大部分的常规表面分析仪器无法在系统内完成此任务; 其次, 具备阴极激活条件的热发射电子显微镜 (TEEM) 由于缺乏

精密电子光学系统设计和先进的制造技术, 其空间分辨率不够, 只能得到几十到几百倍的表面热电子发射图像, 因此同样无法获得发射点或发射微区在阴极表面的精确位置和微观发射特征.

为了搞清热扩散阴极热电子发射微区的准确位置和发射特征, 由中国科学院理化技术研究所牵头, 北京中科科仪股份有限公司承制, 中国科学院电子学研究所参与, 共同研制了一套全新的深紫外激光光发射电子/热发射电子显微镜 (DUV-PEEM/TEEM) 系统.

光发射电子显微镜 (PEEM) 是样品表面光电子原位、实时、动态的成像技术, 在表面化学、表面物理、薄膜生长等领域有重要应用价值. 紫外光发射电子显微镜 (UV-PEEM) 对样品表面局域功函数差异较为敏感, 且成像具有纳米级的空间分辨

* 国家科技重大专项 (批准号: 2012YQ120048) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ysy210@163.com

率, 被广泛应用于材料的表面科学研究^[15-20].

DUV-PEEM/TEEM是在紫外光发射电子成像的基础上, 采用中国科学院理化技术研究所自主研发成功的、国际上惟一用直接倍频法获得的深紫外激光光源(波长为177.3 nm, 对应光子能量7 eV), 以斜入射方式照射至样品表面. 一方面, 深紫外激光具有单色性, 十分纯净, 而汞灯所产生的紫外光是一束多波长的混合光束, 在成像时波长单一的深紫外激光所激发的电子具有更少的杂散信号, 有利于提高成像质量与空间分辨率; 另一方面, 根据光发射电子成像空间分辨率计算理论^[21], 高的光子能量所激发出的光发射电子能量分布差值 ΔE 更大, 所获得的空间分辨率也就越高. 另外, 系统通过配备样品高温激活所需的电子轰击加热装置, 使系统具备了加热激活阴极、利用阴极热发射电子成像的功能. 此功能即为TEEM分析功能.

系统建成后, 将其应用于浸渍钨钨阴极、M型阴极和新型高发射钨型阴极等热扩散阴极的分析, 获得了高温激活后阴极表面的光电子图像、热电子发射图像、光电子+热电子联合图像等, 首次观察到了加热过程中阴极微区热电子发射状态的变化, 并获得了热扩散阴极表面发射微区的精确位置及结构特征.

本文主要侧重于介绍DUV-PEEM/TEEM系统的工作原理和基本的系统组成, 并给出系统用于分析浸渍钨钨阴极和新型高发射钨型阴极的5个实例.

2 DUV-PEEM/TEEM工作原理和系统组成

2.1 基本原理

应用于阴极表面微区电子发射研究的DUV-PEEM/TEEM系统, 是基于PEEM框架的功能拓展型显微镜系统. 物镜是DUV-PEEM/TEEM系统重要的组成部分, 从热扩散阴极样品表面发出的热电子或光电子经物镜收集, 经过不同的光阑、狭缝和一系列的电磁透镜组件后, 最终被探测器接收并采集. 该系统与常见的扫描型电子显微镜成像原理有所不同, 属于投影型电子显微镜系统, 成像时无需扫描, 适合样品表面实时的动态成像观察和分析.

DUV-PEEM/TEEM系统做光电子显微镜工作时, PEEM所探测的大部分信号仅来自于样品表面2—5 nm厚度, 属于一种纯表面的光电效应.

光电子成像图像衬度与表面光电子发射的关系和数据采集方式有关. 该系统的电子光学数据采集由探测器完成, 探测器主要由微通道板(MCPs)、荧光屏和高性能电荷耦合器件(CCD)传感器组成. MCPs目的是提高电子检测的灵敏度. 荧光屏采用P43(Gd₂O₂S:Tb)标准荧光材料, 电子打到荧光屏上激发出光子, 一个电子在荧光屏上激发出的光子数表示为

$$n = \varepsilon \frac{E}{h\nu}, \quad (1)$$

式中 n 为光子数量, E 为电子的能量, $\varepsilon \approx 0.2$ 为荧光材料转换效率, $h\nu$ 为单个光子能量. CCD成像的基本过程是将光子输入转换为电子输出. 入射光信号与最终的数字信号输出之间的转换函数是与CCD上入射光量相关的线性函数. 该系统所配备的高性能CCD传感器, 线性的偏差在5个数量级内不超过百分之零点几, 如此高的线性度有利于图像定量分析. 相同光强度下, 基于光电效应的PEEM成像灰度值的高低则主要由样品表面的局部区域功函数差异决定(如图1).

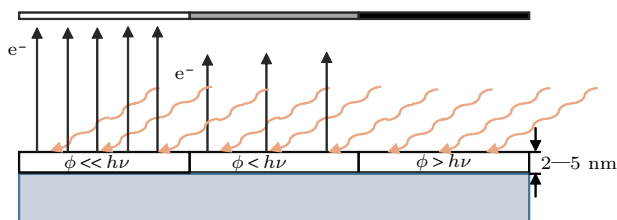


图1 光发射电子图像衬度差异形成示意图

Fig. 1. Diagram of contrast formation in the photoemission electron image.

系统作为TEEM使用时与PEEM最大的区别在于热发射电子是一个随温度变化的动态过程. 尤其对于热扩散阴极而言, 在加热状态下, 不仅表面电子发射随温度变化, 而且表面和内部也在进行着许多的物理化学反应, 包括内部活性物质的化学反应以及表面的发射活性物质的迁移、吸附和蒸发等. 加热时, 阴极温度升高, 自由电子动能增加, 克服功函数从阴极表面逸出. TEEM的图像衬度能直接显示出阴极表面局部有效热发射能力的相对强弱: 亮的区域热电子发射能力强, 有效功函数低; 暗的区域热电子发射能力弱, 有效功函数高.

DUV-PEEM+TEEM 是将热电子显微成像与光电子显微成像技术联合用于分析阴极表面, 由不同类型的电子携带不同的信息同时成像, 实现阴极表面发射状态与阴极表面形貌结构相结合, 对阴极表面发射点或发射微区研究更为有利.

2.2 系统组成

DUV-PEEM/TEEM 系统主要包括超高真空获取系统、激活装置、电子光学系统和数据采集系统四大组成部分. 其中超高真空获取系统为整个显微镜系统能够正常运行的基础, 而电子光学系统则对显微成像起着关键作用. 该系统的激励源与电子光学部分如图 2 所示.

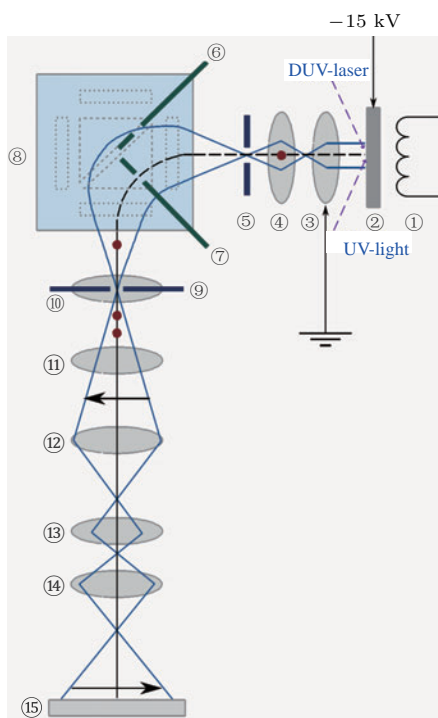


图 2 DUV-PEEM/TEEM 系统的电子光路结构图
Fig. 2. Electron lens structure of the DUV-PEEM/TEEM system.

紫外光 (UV-light)、深紫外激光 (DUV-laser) 和①加热灯丝属于激励源部分, ②为样品位置. 电子光学部分包括: ③物镜; ④传送透镜; ⑤电子入射狭缝; ⑥微区衍射光阑; ⑦选区光阑; ⑧ 90° 偏转棱镜室 (实现电子束分离、电子束偏转); ⑨ 衬度光阑; ⑩—⑭投影透镜 P1, P2, P3, P4a, P4b; ⑮探测器 (MCP 微通道板、荧光屏和 CCD 传感器).

整个电子光学系统都是为了 15 keV 电子能量而设计, 样品②的电压为 -15 kV, 所有的透镜和其

他真空组件都处于地电位. 在系统中电子通过如下步骤实现成像:

- 1) 深紫外激光或紫外光斜入射样品表面或对样品加热, 样品表面发出电子;
- 2) 物镜③接地, 光/热电子在样品与物镜之间的强电场下加速到 15 keV;
- 3) 电子被物镜收集并在物镜的后焦面 (传送电磁透镜④) 上形成第一个图像;
- 4) 接着电子束穿过电子入射狭缝⑤, 并在棱镜室被偏转 90° 后进入投影电磁透镜系统⑩—⑭, 最终在一个二维探测器上成像.

在电子光学系统中投影电磁透镜 P1—P4b 都具有不同的功能; P1 透镜能够获取在棱镜阵列的对角平面的样品图像并在 P3 透镜进一步放大前再次成像; P2 透镜被用于实空间与 k -空间之间的转化, 光/热电子显微成像时 P2 透镜电流为零, 处于关闭状态; P3 透镜可以实现在大范围内调整图像的放大倍数; P4a, P4b 透镜工作时紧密耦合在一起, 相互配合得到正立或倒置放大图像. 该系统还采用了不同种类的光阑, 其中 PEEM/TEEM 显微成像时常用的包括选区光阑⑦和衬度光阑⑨: 选区光阑分布有几个不同孔径的小孔, 分别对应着样品表面不同大小的区域. 成像时引入选区光阑, 将成像区域以外的电子屏蔽, 实现小区域成像, 可提高成像衬度; 对于衬度光阑, 选择过大或过小的衬度光阑孔径都会对空间分辨产生不利影响, 该系统的最优值为 40 μm . 除各电磁透镜和光阑外, 还有一些其他修正装置: 传送电磁透镜④中安装有消像散装置; 在投影电磁透镜 P1 和投影电磁透镜 P2 前方的是修正电子轨道的偏转线圈.

3 应用实例

我们采用 DUV-PEEM/TEEM 系统开展了两种类型热扩散阴极的观察和分析. 两种阴极为浸渍钨钨阴极和新型高发射钨型阴极.

所有阴极试样均为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 尺寸的圆片. 具体制备过程为: 制备 $\Phi 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的钨铜饼并抛光其端面, 对钨铜饼做高温真空去铜后得到多孔钨海绵基体; 通过高温浸渍, 将活性物质浸渍在基体孔隙中, 完成浸渍后去除试样表面的多余盐渍. 试样制作过程中, 应防止试样抛光表面被硬物划伤.

将阴极试样装入 DUV-PEEM/TEEM 系统后, 如需激活, 可在预处理室中做电子轰击加热处理. 一般情况下, 选用的激活规范为 $1150\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h}$. 阴极表面温度用红外温度计进行监控.

样品分析在分析室中进行, 根据需要, 可选深紫外激光 (DUV)、紫外光 (UV) 或加热等单一电子源分析或选任意两种不同类型电子源 (光电子 + 热电子) 联合分析.

3.1 热扩散阴极激活前后的表面光电子形貌

DUV-PEEM 系统配备了深紫外激光和高压汞灯 (光子能量最大 4.9 eV) 两套光源. 高压汞灯产生

的紫外光作为 PEEM 的激发光源比较常见, 它足以使大部分材料激发出光电子并成像. 下面以浸渍 612 盐的钨阴极为例, 比较两种光源对阴极表面成像的特点.

图 3(a) 和图 3(b) 给出了浸渍 612 盐阴极高温激活前的表面光电子图像, 视野范围均为 $70\text{ }\mu\text{m}$. 图 3(a) 与图 3(b) 分别对应深紫外激光和紫外光两种激发光源. 两种光电子图像均显示出阴极表面是由钨颗粒和孔隙构成, 属于典型的多孔钨基体结构. 比较发现, 对于激活前的阴极, 深紫外激光对应的图像上显示阴极表面有许多微颗粒 (应为残余盐渍), 成像很清晰; 而汞灯紫外光对应的图像虽然也显示出有一些微颗粒, 但在清晰度上则次之.

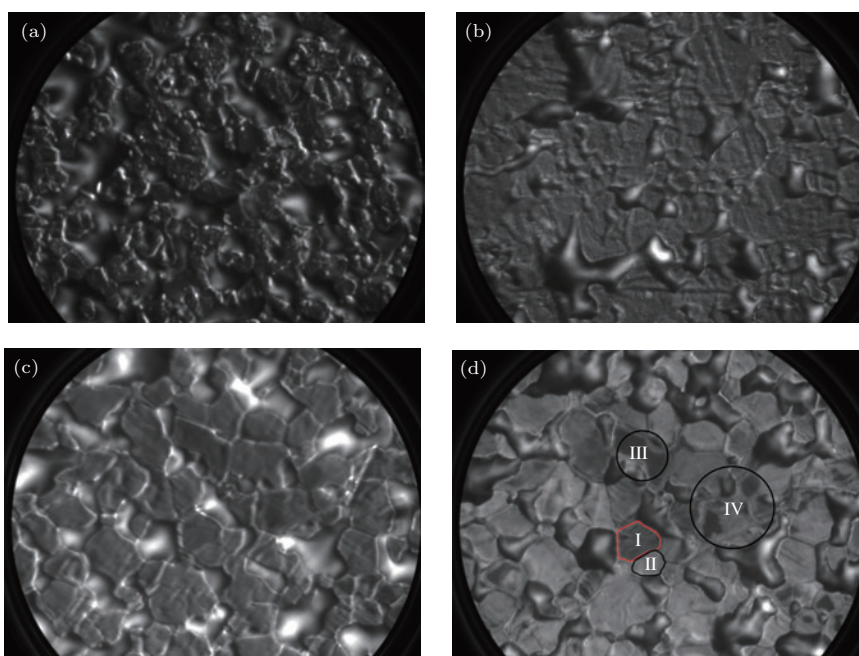


图 3 浸渍 612 盐阴极表面的 PEEM 图像, 视野范围 $70\text{ }\mu\text{m}$ (a), (b) 分别为阴极激活前的 DUV-PEEM 图像和 UV-PEEM 图像; (c), (d) 分别为阴极激活后的 DUV-PEEM 图像和 UV-PEEM 图像

Fig. 3. PEEM images of the 612 impregnated cathode surface, visual field $70\text{ }\mu\text{m}$: (a) DUV-PEEM image and (b) UV-PEEM image of the cathode before activated; (c) DUV-PEEM image and (d) UV-PEEM image of the cathode after activated.

图 3(c) 和图 3(d) 为阴极激活后的表面光电子图像, 视野范围也同为 $70\text{ }\mu\text{m}$. 可以看出, 经过高温激活作用, 阴极表面残留盐渍明显减少、表面的微颗粒大量消失, 阴极表面相较于之前变得较为平整, 光电子图像质量得到显著提高. 究其原因, 光发射电子是一个极其表面的电子发射过程, 样品表面的洁净程度则对光发射电子成像质量有较大影响, 阴极高温激活处理, 正好除去了样品制备和转移过程中样品表面的吸附物或其他

杂质.

对比可见, 无论激活前还是激活后, 与汞灯紫外光相比, 对应的阴极表面成像具有立体感更强、成像更为清晰的特征. 深紫外激光对应的光电子成像与扫描电镜获得的二次电子像相比有很大的相似性.

需要指出的是, 高压汞灯 UV-PEEM 对于热阴极激活后表面局域功函数差异十分敏感, 例如, 从图 3(d) 看出, 不仅相近的钨颗粒表面在常温下的

功函数会显现不同(图3(d)中I, II区域), 而且在一些单个颗粒表面的边缘和颗粒较为中心的区域, 功函数也存在明显差别(图3(d)中III, IV区域). 这是UV-PEEM的一个重要特点, 但为何汞灯这种非单色光反而可以获得高的功函数敏感性, 还有待进一步分析.

3.2 热阴极电子发射随温度变化的动态过程

激活后的热扩散阴极, 其表面热发射状态与加热温度密切相关. 利用DUV-PEEM/TEEM系统

分析室内置加热装置, 可以将高温激活后的阴极加热至不同温度, 从而获得阴极表面热电子发射随温度变化的动态过程.

图4(a)—(d)给出了浸渍612钡钨阴极温度由640 °C升至700 °C的表面热电子发射状态变化过程. 图像中亮的区域为热电子发射集中的区域, 暗的区域为热电子发射能力相对较低或不发射区域. 可以看出, 浸渍612钡钨阴极表面发射区域面积随温度升高而扩大, 由最开始的一些发射中心逐渐扩展为片状发射区域, 并有部分片状发射区域开始连接贯通.

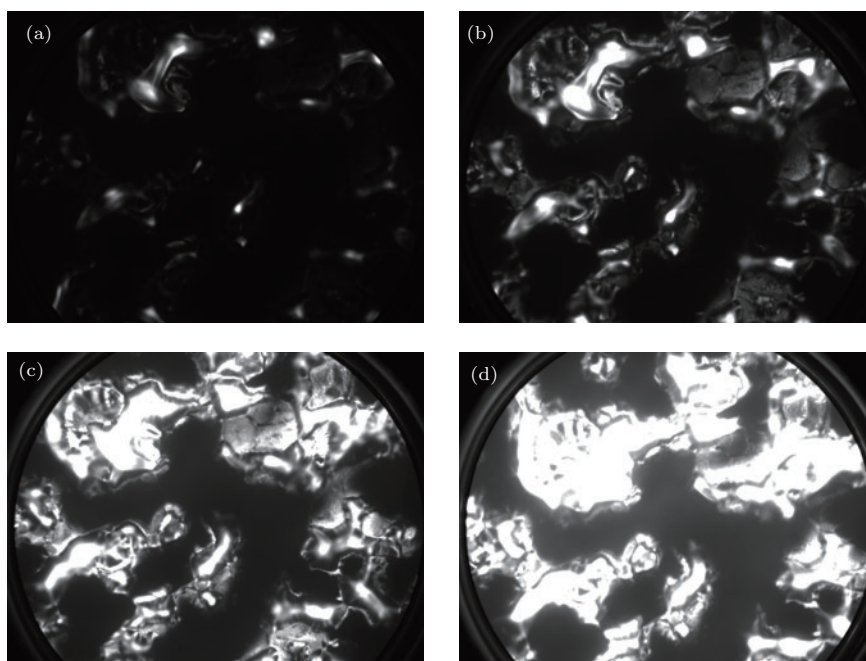


图4 不同温度下浸渍612盐钨阴极表面的TEEM图像, 视野范围均为50 μm (a) 640 °C; (b) 660 °C; (c) 680 °C; (d) 700 °C

Fig. 4. The different temperatures TEEM images of 612 impregnated cathode surface, visual field 50 μm : (a) 640 °C; (b) 660 °C; (c) 680 °C; (d) 700 °C.

3.3 热扩散阴极的发射能力与发射均匀性

阴极作为真空电子器件的核心部件, 不仅要求阴极具有高的电流发射密度, 还需要有高的发射均匀性. 具体而言, 关于热扩散阴极的发射均匀性研究对改善电子注质量十分重要. 而DUV-PEEM/TEEM的热发射电子成像模式所获得的TEEM图像及其对应的灰度值图谱, 可以定性地对阴极的本征发射能力和发射均匀性做出对比.

以新型高发射钨型阴极^[22]和浸渍612盐钨钨阴极为例: 图5(a)和图5(b)分别为在670 °C时获得的高发射钨型阴极表面TEEM图像及其对应的

灰度值图谱; 图5(c)和图5(d)分别在670 °C时获得的浸渍612钡钨阴极表面TEEM图像及其对应的灰度值图谱. 需要说明的是, 对高发射钨型阴极因发射较大, 其对应的探测电压比浸渍612钡钨阴极的探测电压低200 V. 即便如此, 由三维立体的图像灰度值图谱(图5(b)和图5(d))所反映出情况来看, 新型高发射阴极发射能力仍要高出浸渍612钡钨阴极许多, 这与之前关于高发射阴极性能研究的结果完全相符. 除此之外, 浸渍612钡钨阴极本征发射图像所对应的灰度值高度分布一致性远不及新型高发射钨型阴极, 这就意味着新型高发射钨型

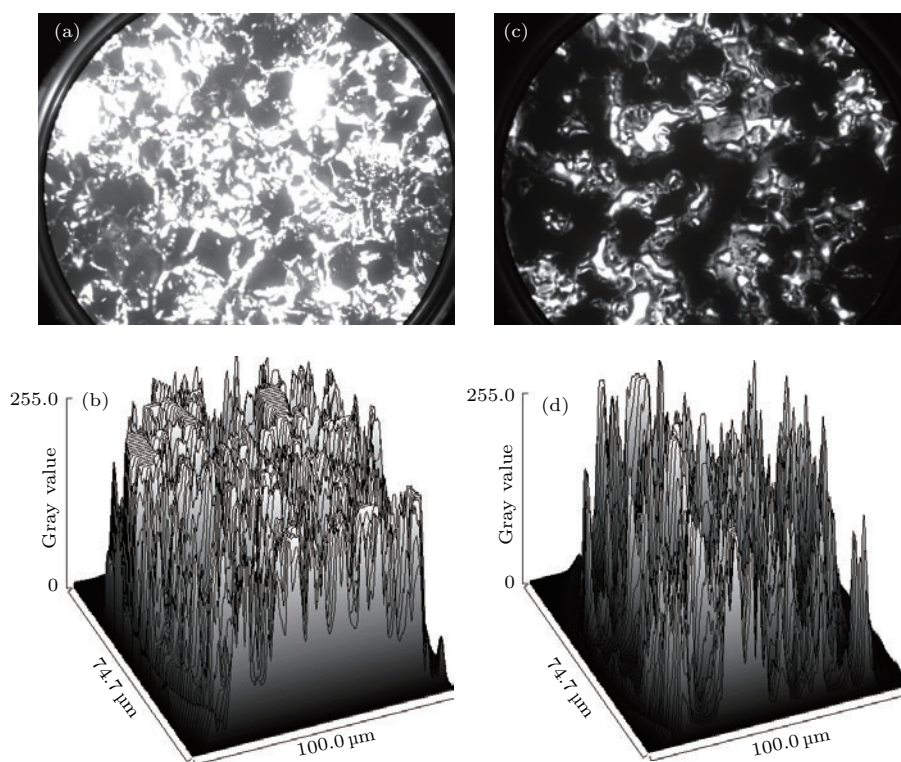


图5 (a), (b) 分别为 670 °C 高发射钪型阴极表面的 TEEM 图像及其对应的灰度值图谱, 视野范围 100 μm; (c), (d) 分别为 670 °C 浸渍 612 盐钨钨阴极的 TEEM 图像及其对应的灰度值图谱, 视野范围 100 μm
 Fig. 5. (a) 670 °C TEEM image of the high emission impregnated dispenser scandium cathode surface, visual field 100 μm; (b) the related gray value map of (a); (c) 670 °C TEEM image of 612 impregnated cathode surface, visual field 100 μm; (d) the related gray value map of (c).

阴极的发射均匀性也明显优于浸渍 612 钨钨阴极。观察两种阴极的 TEEM 图像(图 5(a) 和图 5(c)) 可以得出, 新型高发射钪型阴极发射能力和发射均匀性, 均远胜于传统的浸渍钨钨阴极。

3.4 阴极热电子成像的分辨率

深紫外激光的采用, 加上 PEEM 系统本身较为先进的电子光学系统, 使 DUV-PEEM/TEEM

系统具备了对热扩散阴极表面在微米尺度下成像和进行纳米尺度分析的能力。

以高发射钪型阴极分析为例, 将阴极加热至 800 °C, 引入选区光阑, 在图像视野范围为 5 μm 尺度下观察到阴极发射表面。首次发现了图 6(a) 所示的钨颗粒表面发射微区及发射特征, 该发射区域处于三个钨颗粒交界位置, 颗粒表面分布着不同形状和取向的热电子发射条纹束, 这些条纹束宽度多

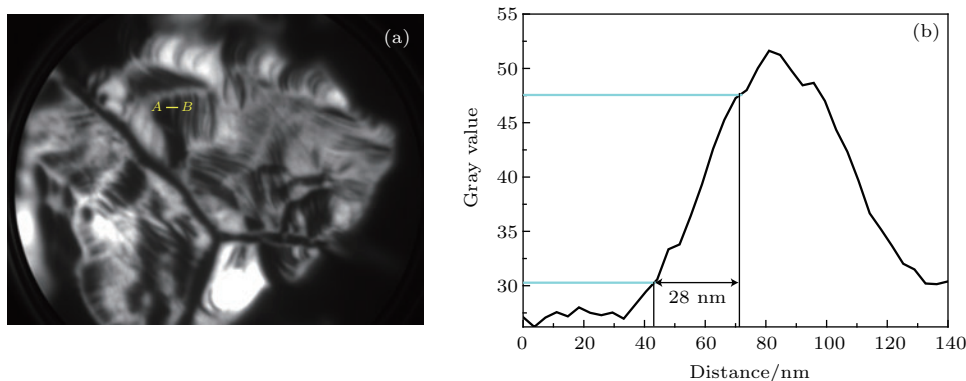


图6 高发射钪型阴极微区 (a) 800 °C 时 TEEM 图像, 视野 5 μm; (b) AB 直线间灰度值分布曲线
 Fig. 6. Micro-area of high emission impregnated dispenser scandium cathode: (a) 800 °C TEEM image, visual field 5 μm; (b) the related gray value curve of AB.

为100 nm左右. 统计图6(a)中标注出A和B间直线掠过位置的灰度值, 得到图像中AB直线的灰度值分布曲线如图6(b)所示, 参考常用的PEEM分辨率测试方法: 取最高灰度值的84%和16%分别作为分辨率测量的最高点和最低点, 计算两点间的距离即为测量的分辨率值. 通过统计和计算, 得到阴极TEEM的空间分辨率为28 nm.

3.5 热扩散阴极发射点的精确定位

阴极热发射电子图像是一种发射亮区和发射暗区并存的图像. 在热电子发射成像基础上, 若叠加紫外光或深紫外激光光电子的原位激发, 不仅可对亮区成像, 也可以对暗区成像, 因此可获得比单纯热发射电子成像更为丰富的表面信息.

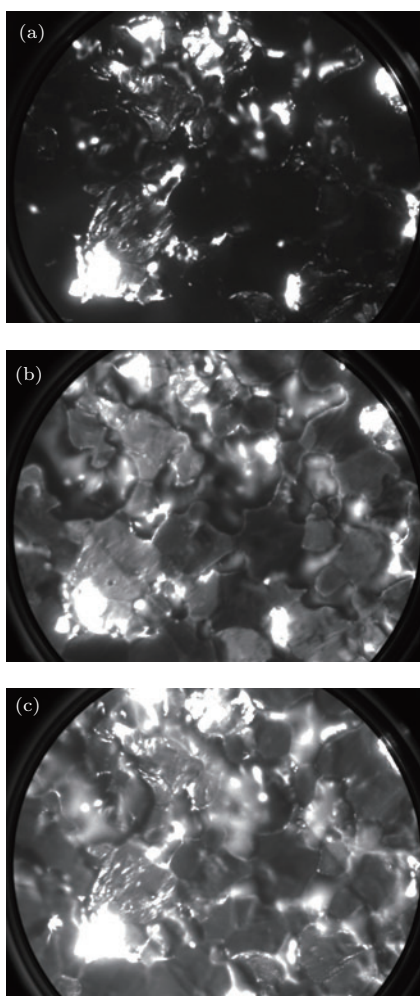


图7 670 °C高发射钪型阴极表面, 视野范围均为50 μm (a) TEEM图像; (b) UV-PEEM+TEEM图像; (c) DUV-PEEM+TEEM图像

Fig. 7. Surface of high emission impregnated dispenser scandium cathode at 670 °C, visual field 50 μm : (a) TEEM image; (b) UV-PEEM+TEEM image; (c) DUV-PEEM+TEEM image.

图7所示样品为经过暴露空气处理一段时间的高发射钪型阴极再次经过高温激活后670 °C时的表面图像.

观察可见, 在深紫外激光和紫外光辅助下, 阴极热电子发射图像上的暗区被清晰地显示出来. 借助于这种联合发射图像, 可以清楚地判断TEEM图像上的暗区到底是钨颗粒还是孔隙, 或者是其他什么位置. 同样地, 借助于联合发射图像, 也可以准确地判断出发射点所处的精确位置.

通过仔细比较发现, 与TEEM图像相比, UV-PEEM+TEEM图像中阴极的本征热发射点的形状变化相对较大, 而DUV-PEEM+TEEM所得到的联合图像更为清晰和完整地保留了阴极的本征热发射点, 将形貌结构和发射状态很好地融合到了一起.

4 结 论

通过将DUV-PEEM+TEEM系统应用于热扩散阴极研究, 证实该系统具备阴极激活、光电子成像、热电子成像、光电子+热电子联合成像等功能. 应用该系统可以获得阴极热电子发射动态过程, 可对阴极发射能力及均匀性、阴极发射点的位置做出比较和判断, 系统应用于阴极热电子成像, 其空间分辨率可达到28 nm. 应用表明, 该系统是目前研究热扩散阴极微观发射特征的先进和有效手段.

系统的热电子、光电子联合成像, 尤其是热电子与深紫外激光光发射电子联合成像, 很好地将发射微区结构形貌和阴极发射状态相结合, 有利于确定出发射点或发射微区的精确位置, 使得观察结果更加准确可信.

通过热扩散阴极TEEM图像对比及分析, 可迅速直观地获得阴极本征的热发射能力和发射均匀性, 这对于了解阴极发射性能及改进阴极制备工艺意义重大.

DUV-PEEM/TEEM系统除可用于研究热扩散阴极的热发射过程外, 还可应用于观察分析热扩散阴极的表面中毒和恢复过程, 相关数据及信息对器件的生产和使用同样具有重要意义.

目前DUV-PEEM/TEEM系统在热扩散阴极的研究中已经展现出其较强的实用价值, 今后若能在现有基础上增加元素、物相分析手段, 相信将对新型高性能阴极的研究以及阴极发射机理探索提

供更大的帮助。

参考文献

- [1] Gilmour Jr A S (Translated by Ding Y G, Zhang Z C) 2012 *Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers and Gyrotrons* (Beijing: National Defense Industry Press) pp39–40 (in Chinese) [Gilmour Jr A S 著 (丁耀根, 张兆传 译) 2012 速调管、行波管、磁控管、正交场放大器和回旋管 (北京: 国防工业出版社) 第39—40页]
- [2] Wang W X 2012 *Vacuum Electronic Devices* (Beijing: National Defense Industry Press) p11 (in Chinese) [王文祥 2012 真空电子器件 (北京: 国防工业出版社) 第11页]
- [3] Jones D, Mcneely D, Swanson L W 1979 *Appl. Surf. Sci.* **2** 232
- [4] Chen D S, Lindau I, Hecht M H, Viescas A J, Nogami J, Spicer W E 1982 *Appl. Surf. Sci.* **13** 321
- [5] Brion D, Tonnerre J C, Shroff A M 1983 *Appl. Surf. Sci.* **16** 55
- [6] Koenig M F, Grant J T 1985 *Appl. Surf. Sci.* **20** 481
- [7] Ares Fang C S, Maloney C E 1990 *J. Vac. Sci. Technol. A* **8** 2329
- [8] Li Y T, Zhang H L, Liu P K, Zhang M C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6677 (in Chinese) [李玉涛, 张洪来, 刘濮鲲, 张明晨 2006 物理学报 **55** 6677]
- [9] Yin S Y, Zhang H L, Yang J X, Urash I, Qian H J, Wang J O, Wang Y, Wang X X 2011 *J. Electron. Inf. Technol.* **33** 3040 (in Chinese) [阴生毅, 张洪来, 杨靖鑫, 奎热西, 钱海杰, 王嘉欧, 王宇, 王欣欣 2011 电子与信息学报 **33** 3040]
- [10] Wang J S, Wang Y M, Wang X, Zhang X Z, Yang F, Liu W, Zhou M L 2013 *Proceedings of the 14th IEEE International Vacuum Electronics Conference Paris, France, May 21–23, 2013* p1
- [11] Liang W L, Wang Y M, Liu W, Li H Y, Wang J S 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 057901 (in Chinese) [梁文龙, 王亦曼, 刘伟, 李洪义, 王金淑 2014 物理学报 **63** 057901]
- [12] Motta C C 2016 *Proceedings of the 17th IEEE International Vacuum Electronics Conference Monterey, USA, April 19–21, 2016* p1
- [13] Zhang E Q, Liu X Q 1984 *J. Electron. Inf. Technol.* **6** 89 (in Chinese) [张恩虬, 刘学恣 1984 电子科学学刊 **6** 89]
- [14] Fang H M, Su Q X, Su X C 1983 *J. Vac. Sci. Technol.* **3** 91 (in Chinese) [方厚民, 苏翘秀, 苏煦春 1983 真空科学与技术学报 **3** 91]
- [15] Bauer E 2001 *J. Phys. Condens. Matter* **13** 11391
- [16] Wlegmann L 1972 *J. Microsc.* **96** 1
- [17] Günther S, Kaulich B, Gregoratti L, Kiskinova M 2002 *Prog. Surf. Sci.* **70** 187
- [18] Turner D W, Plummer I R, Porter H Q 1984 *J. Microsc.* **136** 259
- [19] Guo F Z 2010 *Physics* **39** 211 (in Chinese) [郭方准 2010 物理 **39** 211]
- [20] Ning X Y, Fu Q, Bao X H 2016 *Acta Phys. -Chim. Sin.* **32** 171 (in Chinese) [宁艳晓, 傅强, 包信和 2016 物理化学学报 **32** 171]
- [21] Engel W, Kordesch M E, Rotermund H H, Kubala S, Oertzen A V 1991 *Ultramicroscopy* **36** 148
- [22] Yin S Y, Zhang Z C, Peng Z, Zheng Q, Wang Y 2013 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **60** 4258

Applications of deep ultraviolet laser photo- and thermal-emission electron microscope in thermal dispenser cathode research*

Ren Feng¹⁾²⁾ Yin Sheng-Yi^{1)†} Lu Zhi-Peng¹⁾²⁾ Li Yang¹⁾ Wang Yu¹⁾ Zhang Shen-Jin³⁾
Yang Feng³⁾ Wei Dong⁴⁾

1) (Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

3) (Key Laboratory of Functional Crystals and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

4) (KYKY Technology co., Ltd, Beijing 100190, China)

(Received 4 May 2017; revised manuscript received 27 May 2017)

Abstract

The research of micro-region emission state for thermal dispenser cathode surface, especially *in-situ* observation and analysis, is an important subject in the field of thermal cathode. A newly developed instrument aiming at meeting the special operation requirements of thermal dispenser cathode is used to carry out this research. This instrument combines the functions of deep ultraviolet laser photo-emission electron microscope and thermal-emission electron microscope, so it is called DUV-PEEM/TEEM. In this paper, its basic principle is introduced emphatically. In addition, the actual applications of the microscope system to the electron emission investigation of thermal dispenser cathode are displayed. This system is equipped with the heating unit, which is used for activating the thermal dispenser cathode sample, and the temperature of sample can reach 1400 °C. The system has three imaging modes, namely, photoemission electron imaging, cathode thermal emission electron imaging, and united imaging by integrating cathode thermal emission electron and photoemission electron. By applying new microscope system to traditional thermal dispenser cathode, we acquire the photoemission electron images of impregnated barium aluminate cathode surface at room temperature. In the heating process, we observe the thermal electron emission phenomenon originating from thermal dispenser cathode and record the variation process with temperature change. A high emission cathode which we developed before, is also studied with DUV-PEEM/TEEM. Fortunately, we find that some bright stripes appear on the surface of high emission cathode when the cathode temperature reaches 800 °C. The widths of these bright stripes are about 100 nm. We calculate the thermal emission electron imaging resolution of this system by using these thermal electron emission stripes and the obtained resolution reaches 28 nm. Conveniently, the emission performance and uniformity of this high emission cathode are compared with those of traditional impregnated barium aluminate cathode directly at same temperature. Using united imaging mode of the system, *in-situ* observation and analysis of thermal electron emission spots on high emission cathode surface are carried out successfully. The results indicate as follows. For thermal dispenser cathode, the deep ultraviolet laser photoemission electron imaging can be used to show the surface fundamental micro-morphology

* Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2012YQ120048).

† Corresponding author. E-mail: ysy210@163.com

of cathode; cathode thermal emission electron imaging is suitable for revealing the intrinsic emission uniformity of the thermal dispenser cathode; with the united imaging by integrating cathode thermal emission electron and photoemission electron, the positions of effective emission points on cathode surface can be fixed accurately. Based on these applications and findings, we believe that DUV-PEEM/TEEM also has ability to investigate the processes of cathode poisoning and recovery.

Keywords: deep ultraviolet laser, photo emission electron microscope, thermal emission electron microscope, dispenser cathode

PACS: 79.40.+z, 79.60.-i, 79.60.Cn

DOI: [10.7498/aps.66.187901](https://doi.org/10.7498/aps.66.187901)