

# 光纤耦合间接电子探测器结构设计及其实验结果

彭华兴<sup>1</sup> 刘术林<sup>1,2\*</sup> 梁晶<sup>3</sup> 闫保军<sup>1</sup> 刘辉<sup>4</sup> 刘翔宇<sup>3</sup> 张斌婷<sup>1</sup> 王建铭<sup>3</sup> 焦朋<sup>4</sup> 张洋<sup>4,5</sup> 独雅婕<sup>4</sup>  
(1. 中国科学院高能物理研究所 核探测与核电子学国家重点实验室 北京 100049; 2. 中国科学院大学 核科学与技术学院 北京 100049; 3. 苏州博众仪器科技有限公司 苏州 215200; 4. 中国建筑材料科学研究总院有限公司 北京 100024; 5. 中建材光子科技有限公司 枣庄 277000)

## The Design and Experimental Results of Fiber Optic Plate Coupled Indirect Electron Detector

PENG Huaxing<sup>1</sup>, LIU Shulin<sup>1,2\*</sup>, LIANG Jing<sup>3</sup>, YAN Baojun<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>4</sup>, LIU Xiangyu<sup>3</sup>,  
ZHANG Binting<sup>1</sup>, WANG Jianming<sup>3</sup>, JIAO Peng<sup>4</sup>, ZHANG Yang<sup>4,5</sup>, DU Yajie<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, The Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Suzhou Bozhong Instruments Technology Co., Ltd, Suzhou 215200, China; 4. China Building Materials Academy Co., Ltd, Beijing 100024, China; 5. CNBM Photonics Technology Co., Ltd, Zaozhuang 277000, China)

**Abstract** According to the characteristics of transmission electron imaging in the transmission electron microscope, an indirect electron imaging detector coupling a fiber optics plate with a CMOS camera was designed. By varying the thickness of the phosphor layer and the aluminum film, respectively, it was found that under the same conditions, thinner phosphor layers could obtain brighter images than the thicker ones. Within a small range, changing the thickness of the aluminum film had little effect on image brightness. Considering the detection efficiency of the microchannel plate (MCP) for high-energy electrons, attempts were made to place the MCP in front of the phosphor screen. Test results showed that the MCP effectively increased image brightness, with a 30-fold increase in screen brightness at a working voltage of 700 V compared to the situation without the MCP. Considering the ability of the MCP to shield X-rays and its relatively low replacement cost, it may be a new choice for indirect electron detectors.

**Keywords** Phosphor, Aluminum film, Microchannel plate, Fiber optic plates coupled, Transmission electron microscope

**摘要** 依据透射电子显微镜中透射电子成像的特点,设计出纤维光学面板耦合 CMOS 相机的间接电子成像探测器,分别改变荧光粉层和铝膜的厚度,发现在相同条件下,薄荧光粉相较于厚荧光粉可以得到更亮的图像;在较小范围内,铝膜厚度的改变对图像亮度几乎无影响;考虑到微通道板对高能电子有一定的探测效率,尝试在荧光屏前放置微通道板,测试结果表明微通道板能够有效提高图像亮度,其在 700 V 工作电压下,荧光屏亮度较未安装微通道板的情况提高了 30 倍,并且微通道板能够屏蔽 X 射线,更换成本较低,可能是间接电子探测器的一个新选择。

**关键词** 荧光粉 铝膜 微通道板 光纤耦合 透射电子显微镜

中图分类号: TG115.21<sup>+</sup>5.3

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202405011

基于高能电子的德布罗意波长远小于可见光波长而设计的电子显微镜,其分辨率远超传统的光学显微镜。自 1931 年 Ernst Ruska 发明了第一台透

射电镜(TEM)以来,其在诸多领域得到了广泛应用,而这些应用也促进了透射电镜自身的发展。早期的高真空度条件以及样品制备等技术限制了其使

用范围,但随着技术的发展,透射电镜所需要的高真空度不再是其应用的阻碍,而聚焦离子束法、电抛光减薄法、离子轰击减薄法<sup>[1]</sup>等针对不同类型样品材料的制备方法也得到了广泛应用,这些进步使得透射电镜成为材料科学、物理学、化学和生物学重要的研究工具之一。世界上第一张透射电镜的照片展示了真核细胞丰富的细节<sup>[2-3]</sup>,极大地促进了生物细胞学科的发展,其超高的分辨率使得观察纳米量级的病毒成为可能<sup>[4]</sup>。在材料科学领域,透射电镜可以用来观察材料的辐照受损情况<sup>[5]</sup>,检测纳米颗粒材料的合成,以及研究催化机理等<sup>[6]</sup>。

透射电镜通过电子枪发射电子束,利用多级磁透镜的磁场组合来对电子束进行聚焦或放大,电子束与样品相互作用并以透射方式穿透样品,经逐级放大最终打在电子探测器上得到样品微观结构的图像。目前透射电镜上常用的探测器分为直接电子探测器和间接电子探测器,前者探测机理是电子直接打在特殊设计的 CMOS 或 CCD 相机上形成图像,其优点是没有光电转化的中间过程,具有更高的探测效率和信噪比,但制作成本较高,目前市面上仅有 Gatan, Direct Electron 和 FEI<sup>[7-9]</sup> 几家公司能够生产制作;而后者则是通过荧光粉或闪烁体等材料将探测到的电子转化为可见光,再通过透镜或者光纤面板(Fiber optic plates FOP)将荧光图像传输到 CMOS 或 CCD 相机上,通过优化荧光屏的制作工艺和采用高性能 FOP,并高效耦合到 sCMOS 相机上,也能获得较好的成像质量,同时在 FOP 中添加某些抗辐射的材料<sup>[10]</sup>,能够减轻 X 射线对 CMOS 相机和 FOP 的影响,最后由于其制作成本较低,在电镜领域中得到了广泛的应用。

间接电子探测器中荧光屏亮度与入射电子能量以及荧光粉层厚度存在一定的依赖关系,对于通用的 P43 荧光粉来说,大多数研究<sup>[11-13]</sup>都集中在十几 keV 以下入射能量的电子束对荧光亮度的影响,考虑到主流透射电镜产品中电子的能量最高能达到 300 keV<sup>[14]</sup>,而在高能电子范围内相关研究较少,为了获得高能电子与荧光屏相互作用后的效果,我们开展不同荧光粉层和铝膜厚度对荧光屏亮度影响的初步研究;另外考虑到透射电镜中的高能电子在与物质发生相互作用过程会产生 X 射线,这些 X 射线有可能会穿透荧光屏和常规的 FOP 直接作用在 CMOS 芯片上产生辐照损伤<sup>[15]</sup>,在使用常规 FOP

的条件下,改进了间接电子探测器的结构,在荧光屏前放置 MCP,通过实验测试该方案的可行性,并分析对比其最终的成像效果。

针对透射电镜和 X 射线医疗影像需求,美国 INCOM 公司及 SCHOTT 美国公司相继开发出 24A 系列材料制备的含铅和铈的耐辐照 FOP;在国内,中国建筑材料科学研究总院从本世纪初开始开发耐辐照光纤面板,其子公司中建材光芯科技有限公司目前已有市售的耐辐照 FOP 产品,主要应用于医学影像领域。但是光纤耦合间接电子探测器用耐辐照光纤面板的技术数据未见有公开报道。使用耐辐照 FOP 替代常规 FOP 后能够吸收高能电子与物质作用产生的 X 射线,有效避免 X 射线对 CMOS 芯片的辐照损伤。但是,在耐辐照 FOP 对 X 射线的吸收效率、耐久性以及对 CMOS 芯片的防护效果方面还需要进行进一步的探究。

## 1 测试装置组成

透射电镜使用的是苏州博众仪器科技有限公司自研样机。该样机配备钨灯丝热发射电子枪,工作时电子束能量可在 80 keV 到 200 keV 范围内调节。透射电镜样机实物和光路原理如图 1 所示。该光路由两级聚光镜 CL1 和 CL2 构成照明系统,并于物镜 OL 前场的前焦面附近形成交叉斑,电子束以近似平行束形式垂直入射样品。该透射电镜采用侧插式样品架,待测样品位于物镜前后场之间。成像系统由物镜 OL、两级中间镜 IL 和投影镜 PL 组成。物镜后场形成样品的第一个像,通过中间镜 IL1、IL2,以及投影镜 PL 不同的电流激励组合可以

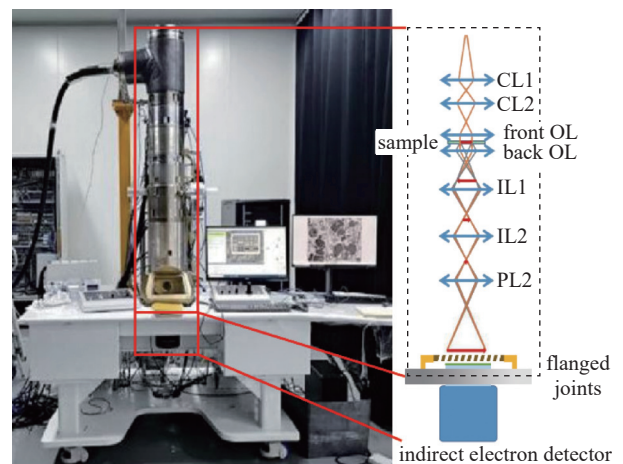


图1 透射电镜系统和电子光学示意图

Fig. 1 TEM system and electron optics diagram

实现多种放大倍数下的成像,所成图像由间接电子探测相机记录。

间接电子探测器安装在透射电镜正下方,通过真空法兰与透射电镜连接,其主体结构如图2所示,整个装置的制作流程如下:首先,将FOP封接在一个小的法兰上,然后在其一端制作荧光屏,制作工艺是:用喷涂或刷涂工艺制作具有一定质量厚度的荧光粉(P43)层,然后涂有机膜并蒸镀铝膜,最后烧掉有机膜,由此制作出荧光屏;其次带有小法兰的FOP(一端已做好荧光屏)封接到CF35法兰上,另一端与CMOS相机通过光学胶直接耦合;最后通过转接法兰安装在透射电镜底部。考虑到后续实验方便安装MCP,荧光屏一侧设计一种特殊装置,通过压簧来固定MCP,并连接好馈线。

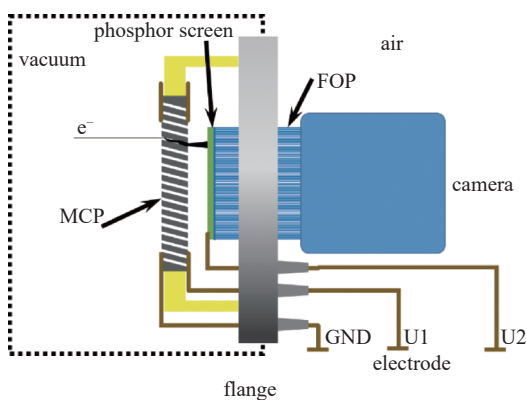


图2 间接电子探测器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the indirect electron detector

在上面的结构中,采用的FOP是由丝径为 $6\mu\text{m}$ 的玻璃纤维阵列经过高温融合在一起,其气密性符合真空器件标准,相机为海康威视工业相机,型号MV-CS200-10GM,主要技术指标是:分辨率为 $5472 \times 3648$ (1996万),帧速率为5.9 fps,采用卷帘快门的曝光方式,芯片尺寸1",相关配套的控制软件中曝光时长和图像增益均可调节。在荧光屏前放置MCP并通过夹具固定,本实验中采用长径比为50:1,孔径为 $6\mu\text{m}$ 的标准型MCP。在未安装MCP的情况下,装置的加压电极接地,当安装MCP时,上述结构加电方式为:MCP的输入面接地,输出面和荧光屏分别加正高压。

实验测试了三种不同荧光屏结构的电子探测器,其基本结构均为带有荧光屏的组件一端与CF35法兰气密性钎焊在一起(见图3(a)),另一端则与CMOS通过FOP直接耦合(图3(b)),最后通

过转接法兰与真空系统相连接,不同编号对应的结构参数如下表1所示,整个电子探测器垂直安装在透射电镜底部,相机采用自然冷却的方式,透射电镜电子枪能量固定80 keV。

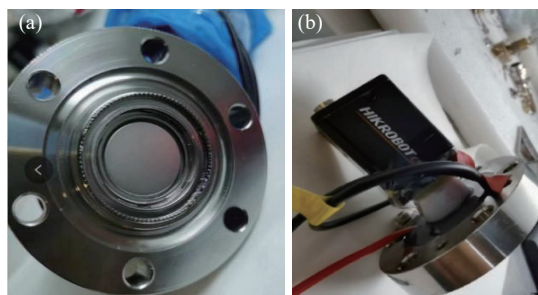


图3 间接电子成像探测器装配图。(a)为直接接收电子的荧光屏一侧,(b)是与相机耦合的一侧

Fig. 3 Schematic diagram of the indirect electron detector. (a) is the side of fluorescent screen for direct electron, and (b) is the side coupled with the camera

表1 间接电子探测器编号以及对应参数

Tab. 1 Indirect electron detector numbers and corresponding parameters

探测器编号	荧光粉厚度	铝膜厚度	MCP
#8013	$\sim 10\mu\text{m}$	80 nm	无
#8014	$\sim 20\mu\text{m}$	40 nm	无
#8015	$\sim 20\mu\text{m}$	80 nm	无

## 2 测试结果与分析

### 2.1 荧光屏和铝厚度对成像的影响

实验过程中相机的曝光时长设定为自动调节模式,保证图像不至于过曝光或者欠曝光。相机曝光时长自动调节范围从 $1\mu\text{s}$ – $168724\mu\text{s}$ ,更长的曝光时长需要手动调节,若曝光时长达到自动调节最大值时图像仍然偏暗,则相机会自动调节增益,调节范围为从0 dB–20 dB。

通过调节电镜励磁线圈内电流大小,可以改变电镜中电子束的偏转和缩放等行为。测试过程中维持电子枪电流不变,只改变电镜的放大倍率,放大倍率越大,电子束流密度越小,导致荧光屏越暗,对整个成像系统的要求越高。图4是使用#8013电子探测器拍摄的不同放大倍率下的样品表面,该样品为TED PELLA, INC公司的穿孔碳支持膜上蒸镀致密的铂/铱微粒,微粒直径多在0.5–10 nm



之间。

由于不同放大倍率下的图像, 拍摄参数不同, 无法直接进行比较。所以需要将相机的曝光时长和增益进行归一化处理, 采用如下公式:

$$I_{\text{Normal}} = \frac{I_{\text{Average}}}{T \times 10^{G/20}} \quad (1)$$

公式中  $I_{\text{Average}}$  是原图像的平均灰度值 (范围 0~255)。  $T$  是相机曝光时长, 单位为 ms,  $G$  代表相机增益, 单位是 dB。通过上面的公式, 可以消除相机拍照时不同的参数对图像亮度的影响, 对于 #8013, #8014, #8015 探测器, 由此得到的数据分别见见表 2、表 3 和表 4。

根据上面的数据可以得到如图 5 所示的曲线。

图中横坐标是透射电镜放大倍率, 纵坐标是图像的归一化亮度。采用公式  $y=ax^2$  对数据点进行拟合, 参数  $a$  在一定程度上可以表征在不同的测试条件下成像系统对电子的灵敏度。通过分析可知, #8013 电子探测器对于 80 keV 的入射电子经样品透射后

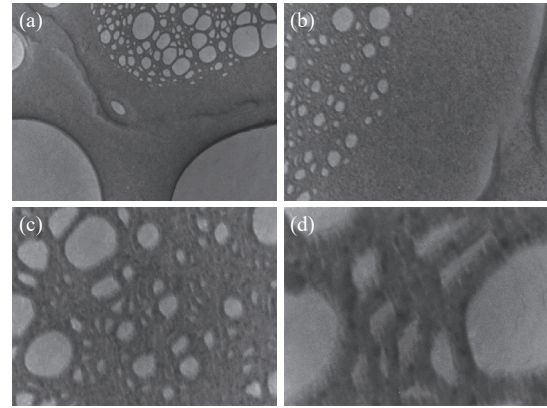


图4 #8013 电子探测器采集不同放大倍率下样品图像, (a), (b), (c), (d)的放大倍率分别为 2 k, 5 k, 10 k, 20 k

Fig. 4 The images with #8013 electron detector at different magnifications with magnifications of (a), (b), (c), and (d) being 2 k, 5 k, 10 k, and 20 k, respectively

成像效果较好, #8014 和#8015 电子探测器对于透射电子的响应差异较小, 这两组电子探测器的对比结果表明:

表 2 #8013 电子探测器图像采集参数以及图像归一化亮度

Tab. 2 Images acquisition parameters and normalized brightness with #8013 electron detector

放大倍率	励磁电流/A	曝光时长/ms	增益/dB	灰度均值	灰度均方差	归一化亮度
×2 k	0.20274	168.72	2.836	102.01	25.54	0.4361
×5 k	0.20274	168.72	14.683	97.99	18.93	0.1071
×10 k	0.20274	1500.00	6.749	104.59	25.64	0.0320
×20 k	0.20274	2499.23	19.278	97.96	29.05	0.0042

表 3 #8014 电子探测器图像采集参数以及图像归一化亮度

Tab. 3 Images acquisition parameters and normalized brightness with #8014 electron detector

放大倍率	励磁电流/A	曝光时长/ms	增益/dB	灰度均值	灰度均方差	归一化亮度
×2 k	0.20274	168.72	7.467	97.52	20.99	0.2446
×5 k	0.20274	168.72	21.647	97.13	21.31	0.0476
×10 k	0.20274	1500.00	13.965	97.26	21.83	0.0130
×20 k	0.20274	2499.23	23.981	75.03	20.55	0.0019

表 4 #8015 电子探测器图像采集参数以及图像归一化亮度

Tab. 4 Images acquisition parameters and normalized brightness with #8015 electron detector

放大倍率	励磁电流/A	曝光时长/ms	增益/dB	灰度均值	灰度均方差	归一化亮度
×2 k	0.20274	168.72	8.041	98.69	17.30	0.2317
×5 k	0.20274	168.72	21.899	99.91	25.03	0.0476
×10 k	0.20274	1500.00	13.713	95.09	22.91	0.0131
×20 k	0.20274	2499.23	23.981	85.14	25.09	0.0022

1. 本次实验中荧光屏的铝膜厚度对于 80 keV 入射电子衰减效果可以忽略不计。为了更进一步

说明铝膜厚度对于入射电子能量衰减的影响, 使用 Geant4 软件对相关的物理过程进行模拟, 建模如

图6所示。在真空中建立一个直径3 cm厚度分别是40 nm和80 nm铝材质的圆盘,入射电子能量恒为80 keV,统计透射后电子的能量分布。模拟结果如图7所示。

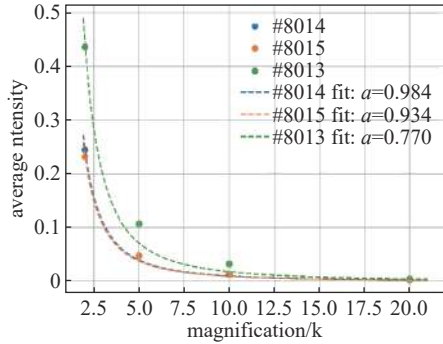


图5 三种电子探测器成像亮度与电镜放大倍率关系曲线  
Fig. 5 The relationship between the imaging brightness of three types of electron detectors and the magnification

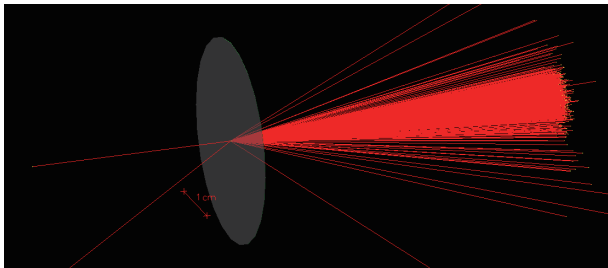


图6 Geant4中几何模型,图中红线代表电子径迹  
Fig. 6 The geometry model in Geant4 software, electron trajectory is presented by red line

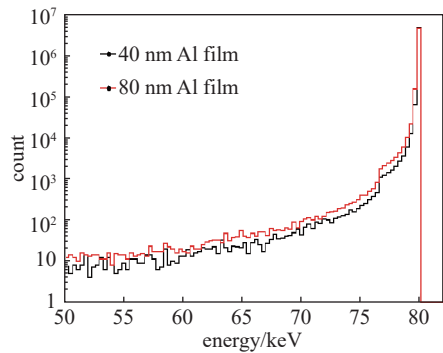


图7 电子穿过铝膜后的能量分布  
Fig. 7 Energy distribution of electrons after passing through aluminum film

从图中可以发现两者分布差异极小,通过计算可知,对于40 nm厚度铝膜而言,约有99.57%的透射电子能量在79 keV-80 keV之间,对于80 nm厚度的铝膜,约有99.29%的透射电子能量分布在上述区间范围内,再一次验证了铝膜厚度对成像几乎无影响。

2. 对比#8013和#8015可知在相同厚度的铝膜条件下10 μm厚度的荧光粉层成像效果较20 μm荧光粉层成像效果更好。结论1可以理解,因为对于80 keV的电子而言,几十个纳米厚度的铝膜,对其阻挡作用可以忽略不计,对于前者,与我们的常规认知和10 keV下的测试结果相反,也许是高能电子与荧光粉作用机制不同,或者是我们样品数量有限,差异性不多,没有普适性,后续实验可以弥补本轮实验的不足。

### 2.2 MCP对成像的影响

透射电镜中的高能电子与物质发射相互作用会产生穿透性较强的X射线,对周围人员和探测器都会产生不利的影响。此外根据表2,表3,表4的测试数据,在透射电镜放大倍率达到20 k的情况下,需要将曝光时长调节到2.5 s,才能得到足够明亮的图像,此时已经严重影响到透射电镜调焦,寻找观测目标等操作。并且在低亮度的条件下,相机自动提高增益则会引入噪声,降低图像的信噪比。针对上述的两个问题,在荧光屏前放置一个MCP,如图8所示。一方面可以起到屏蔽防护的作用,另一方面经过电子倍增器的放大,增加了轰击在荧光屏上的电子束流密度,提高了荧光屏亮度,有效减小相机的曝光时长。

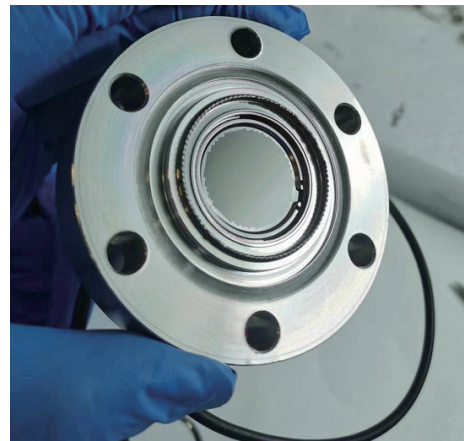


图8 间接电子探测器内,放置在荧光屏前的MCP  
Fig. 8 The MCP placed in front of phosphor screen in an indirect electron detector

下表5是安装了MCP的#8014电子探测器在透射电镜的不同放大倍率下的成像测试结果,具体结构可参考图1,MCP输入面接地,输出面接700 V正高压,保持荧光屏与MCP输出面压差为4000 V正高压。

表 5 带有 MCP 电子探测器图像采集参数以及图像归一化亮度

Tab. 5 Images acquisition parameters and normalized brightness with #8014 MCP electron detector

放大倍率	曝光时长/ms	增益/dB	灰度均值	灰度均方差	归一化亮度	相对于#8014 亮度
×2 k	15.56	0	98.69	18.51	6.3421	25.92
×5 k	73.62	0	103.36	17.03	1.4039	29.48
×10 k	168.72	2.908	98.45	15.02	0.4174	32.14
×20 k	168.72	19.888	100.28	27.01	0.0602	31.71

根据测试结果可以发现, 荧光屏前置的 MCP 能明显提高了成像的亮度, 通过对比图像的归一化亮度。可知, 入射电子经过 MCP 倍增大后可将荧光亮度提高 30 倍左右。图 9 是使用带有 MCP 的 #8014 电子探测器采集的样品图像。

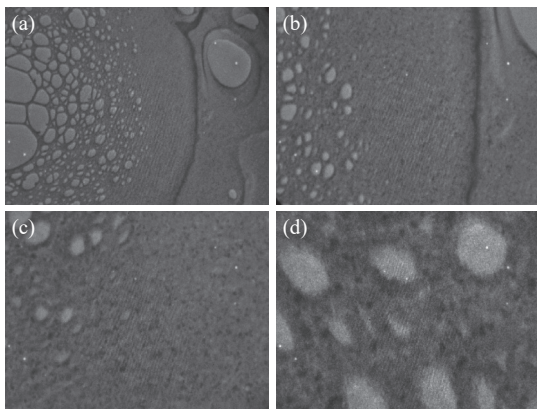


图9 带有 MCP 的#8014 电子探测器采集不同放大倍率下样品图像, (a)–(d)的放大倍率分别为 2 k、5 k、10 k、20 k  
Fig. 9 The images of #8014 MCP electron detector at different magnifications, with magnifications of (a), (b), (c), and (d) being 2 k, 5 k, 10 k, and 20 k, respectively

另外 MCP 对电子的倍增能力和工作电压有密切的关系, 在 MCP 未达到饱和前, 其增益, 即输出电子与输入电子数量之比, 和工作电压成指数关系。

实际中作者在透射电镜放大倍率为 20 k 的条件下, 测试了不同工作电压的成像的数据, 结果如表 6 所示。

测试过程中 MCP 两端电压从 500 V 一直增加到 900 V, 且保持 MCP 输出面和荧光屏压差恒定为

4000 V。根据下面的对数坐标图(见图 10)可以发现, 图像的归一化亮度, 或是说荧光屏的亮度和 MCP 工作电压成指数关系, 与未饱和状态下的 MCP 增益电压关系相一致。并且当 MCP 工作在 900 V 时, 在 20 k 倍放大倍率的电子流密度的条件下, 相机也仅仅需要 40 ms 便可完成成像, 与之前的成像系统相比, 极大缩短了成像时间。

### 3 结论与展望

根据实验测试得到的数据, 对比#8013, #8014 和#8015 三种不同荧光粉厚度和铝膜厚度的间接电子探测器, 发现对于 80 keV 入射的电子而言几十纳米厚度的铝膜, 对成像效果几乎没有任何影响, 而荧光粉层厚度则对最终的成像效果有较大的影响, 并且可以确定~10 μm 厚度 P43 荧光粉层在 80 keV 的电子轰击下亮度比多层荧光粉层亮度更高。

对于 MCP 而言, 入射电子能量在 400~500eV 时探测效率最高, 而对#MCP\_8014 的测试则验证了入射电子能量即使达到 80 keV, MCP 依旧有较好的探测效率, 这也保证了这种方案的可行性。测试结果表明 MCP 工作在 700 V 电压的条件下, 能够提高荧光屏亮度 30 倍左右。MCP 在不同工作电压条件下增益不同, 导致成像的亮度也不同, 并且与预期相同, 在荧光屏未饱和前, 成像亮度与施加电压成指数关系。考虑到 MCP 本身是高铅铋硅酸盐玻璃制成的, 其对高能电子轰击 MCP 表面产生的 X 射线有一定的屏蔽效应, 因此, 采用 MCP 来接受高能入射电子, 将其转换并倍增成低能电子, 然后在

表 6 MCP 在不同工作电压下成像亮度

Tab. 6 The imaging brightness of #8014 MCP electron detector at different operating voltages

MCP 输出面电压	荧光屏电压/V	曝光时长/ms	增益/dB	灰度均值	灰度均方差	归一化亮度
500	4500	2000.00	23.981	95.84	27.32	0.0030
600	4600	168.72	23.981	56.28	16.87	0.0211
700	4700	168.72	13.821	98.39	26.59	0.1188
900	4900	41.96	0	101.36	29.72	2.4155



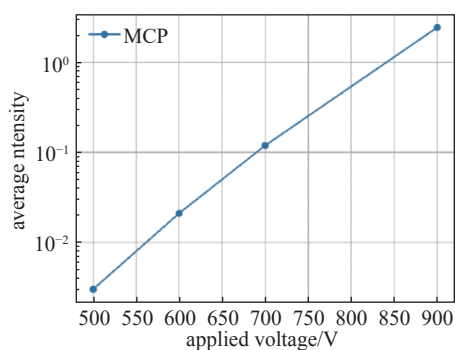


图10 电子探测器图像归一化亮度和MCP工作电压关系曲线

Fig. 10 The relationship between imaging normalized brightness and MCP operating voltage

MCP和荧光屏之间加上4000V的电压,比直接采用荧光屏,至少有以下好处:即(1)提高在高倍率下的亮度;(2)无需采用抗辐射的FOP,节省成本,而且这种FOP对光子的透过率没有常规FOP好;(3)更换更为方便,如MCP的倍增能力下降,则直接换一款新的MCP即可,成本不高,而一旦荧光屏受损,由于其与FOP以及CMOS相机直接耦合,制作成本高得多,而且技术难度非常高。

本实验仅对80 keV透射电子成像效果进行测试,但由于各种原因,尚未开展更高能量的透射电子测试,也未来得及对传递函数进行深入研究,所有这些遗憾,将在以后的实验中将逐步完善。

#### 参 考 文 献

- [1] Chen X C, Yang D Y. Ion bombardment etching device and its applications[J]. *Physics*, 1979(3): 232–235+284 (陈希成, 杨天宇. 离子轰击减薄装置及其应用[J]. *物理*, 1979(3): 232–235+284 (in Chinese))
- [2] Masters B R. History of the electron microscope in cell biology[J]. *eLS*, 2009
- [3] Hitchcock-DeGregori S E, Irving T C, Hugh E. Huxley: the compleat biophysicist[J]. *Biophysical Journal*, 2014, 107(7): 1493–1501
- [4] Goldsmith C S, Miller S E. Modern uses of electron microscopy for detection of viruses[J]. *Clinical microbiology reviews*, 2009, 22(4): 552–563
- [5] Qian J, Bian W, Guo Y, et al. TEM examination of M5 zirconium alloy cladding of spent fuel rod[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2024, 58(1): 149–156 (钱进, 卞伟, 郭一帆, 等. 乏燃料棒M5锆合金包壳的透射电镜分析[J]. *原子能科学技术*, 2024, 58(1): 149–156 (in Chinese))
- [6] Guo S Q, Zhang J L, Cheng N Y, et al. In situ transmission electron microscopy study of bi-metallic alloy nanoparticles[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2022, 41(4): 459–471 (郭思齐, 张佳琳, 程宁燕, 等. 双金属合金纳米颗粒的原位透射电镜研究[J]. *电子显微学报*, 2022, 41(4): 459–471 (in Chinese))
- [7] Levin B D A. Direct detectors and their applications in electron microscopy for materials science[J]. *Journal of Physics: Materials*, 2021, 4(4): 042005
- [8] McMullan G, Faruqi A R, Henderson R. Direct electron detectors[J]. *Methods in enzymology*, 2016, 579: 1–17
- [9] Kuijper M, van Hoften G, Janssen B, et al. FEI's direct electron detector developments: Embarking on a revolution in cryo-TEM[J]. *Journal of structural biology*, 2015, 192(2): 179–187
- [10] Wang P P, Jia M, Tian Y Y, et al. Study on radiation-resistant characteristics of cerium/erbium co-doped optical fiber for space applications[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2023(6): 11–13+42 (王朴朴, 贾明, 田云云, 等. 空间用铈/铒共掺光纤抗辐照特性研究[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2023(6): 11–13+42 (in Chinese))
- [11] Izumi N, Emig J, Moody J, et al. Measurement of cathode luminescence efficiency of phosphors for micro-channel plate based x-ray framing cameras[C]//Target Diagnostics Physics and Engineering for Inertial Confinement Fusion. SPIE, 2012, 8505: 127–132
- [12] Balakin V, Meshkov O, Uliantitsky V, et al. P43 for manufacturing of large area scintillating screens[J]. *Journal of Instrumentation*, 2022, 17(8): P08020
- [13] Wang P C, Cargill III G S. Optimization of phosphor screens for charge coupled device based detectors and 7–34 keV x-rays[J]. *Journal of applied physics*, 1997, 81(3): 1031–1041
- [14] Franken L E, Grünewald K, Boekema E J, et al. A technical introduction to transmission electron microscopy for soft-matter: Imaging, possibilities, choices, and technical developments[J]. *Small*, 2020, 16(14): 1906198
- [15] Clarke R. CCD x-ray detectors: opportunities and challenges[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1994, 347(1-3): 529–533