

文章编号: 1672-8785(2024)11-0017-11

基于图形衬底表面化学水浴法的 硫化铅薄膜均匀性研究

马 睿^{1,2} 杨 冬² 冷重钱² 申 钧^{2*}

(1. 重庆邮电大学, 重庆 400700;

2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714)

摘 要: 硫化铅(PbS)等铅盐材料因较低的俄歇复合系数, 是非制冷红外探测领域中备受关注的材料。化学水浴法被广泛用于硫化铅等薄膜的制备。然而该方法在图形化衬底上存在薄膜生长不均匀的问题。基于多次曝光显影技术, 比较了不同预处理工艺对图形化衬底上薄膜生长均匀性的影响, 在金属和绝缘衬底表面上均实现了硫化铅薄膜的均匀生长。基于优选预处理方法制备的硫化铅探测器的结果表明, 图形衬底预处理可明显改善探测器在光电流、响应度和噪声等方面的性能, 其中响应度可提升 1.2 倍。本文提供的硫化铅薄膜制备方法, 不仅可在图形化衬底上生长均匀性一致的硫化铅薄膜, 还可以修复受损衬底, 有利于在读出电路表面实现硫化铅基焦平面阵列探测器的一体化加工。

关键词: 化学水浴法; 硫化铅; 生长均匀性; 光电探测器; 红外探测器

中图分类号: TN362 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.11.003

Study on Uniformity of Lead Sulfide Thin Films Based on Chemical Bath Deposition on Graphic Substrate Surface

MA Rui^{1,2}, YANG Dong², LENG Chong-Qian², SHEN Jun^{2*}

(1. Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400700, China;

2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

Abstract: Lead salt materials such as lead sulfide have attracted much attention in the field of uncooled infrared detection because of their low auger recombination coefficient. Chemical bath deposition method is widely used in the preparation of lead sulfide and other films. However, this method has the problem of uneven film growth on the graphical substrate. Based on the multi-exposure development technology, the influence of different pretreatment processes on the growth uniformity of the film on the graphical substrate was compared. The uniform growth of the lead sulfide film on the metal and insulating substrate surface was achieved. The results of the lead sulfide detector prepared by the optimal pretreatment method show that the photocurrent, responsivity and noise of the detector are significantly improved by the pretreatment of the graphic substrate, and the responsivity can be increased by 1.2 times. The preparation method of lead sulfide film provided in this

收稿日期: 2024-05-07

作者简介: 马睿(1999-), 女, 新疆巴州人, 硕士研究生, 主要从事红外探测器方面的研究。

*通讯作者: E-mail: shenjun@cigit.ac.cn

paper can not only grow lead sulfide film with consistent uniformity on the graphic substrate, but also repair the damaged substrate, which is conducive to the integrated processing of the lead-sulfide-based focal plane array detector on the readout circuit surface.

Key words: chemical bath deposition method; lead sulfide; growth uniformity; photodetector; infrared detector

0 引言

自红外探测技术问世以来,我国诸多领域的研究被成功开拓,比如医学检测、环境监测、生物成像、夜视成像等军事和民用领域^[1-2]。红外探测器是红外探测系统中的核心元件,本质上讲是一种能量转换器件。它可将红外辐射有效地转换为电能,再通过不同电子线路处理并运用^[3]。PbS 是 IV-VI 族直接带隙半导体材料,它具有较大的激子玻尔半径和较窄的禁带宽度。这些特性使其对红外辐射很敏感,非常适用于红外探测^[4]。采用多晶 PbS 薄膜制备的红外探测器在短波红外波段(1~3 μm)具有较高的响应度和探测率,制造工艺简单且价格低廉,易与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)工艺兼容,并且可在室温条件下正常工作,因此在红外测温、红外制导、红外预警和空间探测等领域具有广泛应用^[5-6]。

PbS 薄膜的质量与制备环境、衬底种类等因素紧密相关,其制备方法有电化学沉积法、微波加热法、化学气相沉积法以及化学水浴沉积(Chemical Bath Deposition, CBD)法等^[7]。CBD 法工艺简单、易操作,不需要复杂的设备,可生长大面积、高质量硫化铅薄膜,且只需在室温、常压下的水溶液中便可进行,因此受到广泛关注^[8]。然而该方法对衬底的选择性较高,在红外探测芯片制备过程中,基片通常会经过多重工艺处理。比如,光刻过程中需在衬底上旋涂有机光刻胶,要在曝光后浸泡弱碱溶液来进行显影,还需要浸泡弱酸溶液来进行湿法刻蚀等。金属电极的表面特性通常会在这些工艺过程中受到影响^[9]。因此在 CBD 沉积 PbS 的过程中,易在

金属表面形成大聚集体或稀疏的不均匀薄膜,导致在制作 PbS 光电探测器时金属电极与相邻 SiO_2 衬底上生长的 PbS 薄膜的均匀性不一致,造成 PbS 薄膜与电极之间的接触性变差、各个像元的生长情况不一致、光响应均匀性差等一系列问题,从而大大降低了探测器的良率。因此,探究出一种可使 CBD 法生长的硫化铅薄膜材料在 SiO_2 和金属衬底上实现均匀性生长的基片预处理方法,使 PbS 薄膜更好地与其他功能层结合,无需在后续芯片制造过程中进行复杂且昂贵的外延层减薄等工序是相当有意义的。

本文将带有金属的 SiO_2 图形化衬底表面经过多种方法处理,并基于 CBD 法在衬底上生长 PbS 薄膜,研究了这些处理方法对 CBD 法生长的 PbS 薄膜质量的影响,并分析讨论了这些方法影响 PbS 薄膜生长的机理。最后发现,双层胶工艺结合氧等离子体的预处理方法能实现在图形化衬底表面均匀生长 PbS 薄膜。另外,基于这些处理方法制备了 PbS 单元探测器件,并对比研究了这些探测器的光电性能差异。最后发现,经预处理工艺制备的 PbS 器件在光电流、响应度和噪声等性能上均有显著提升。

1 实验部分

选择厚度为 300 nm 的 SiO_2 硅片作为衬底,并利用光刻剥离工艺和磁控溅射方法在其表面局域溅射一层 50 nm 的 Cr 和 100 nm 的 Au,形成带有金属层的图形化衬底。然后经过多种处理方法对衬底表面进行处理,具体的处理方法如表 1 所示。其中,双层胶工艺的处理步骤如下:(1)在基片表面旋涂两层光刻胶。第一层光刻胶为 LOR,旋涂速度为 1000~

6000 rpm；第二层光刻胶为 S1805，旋涂速度为 1000~6000 rpm。(2)对基片进行 8.5 s 无掩模曝光。(3)用 AZ300 显影液去除双层胶(显影时间为 2~5 min)。为了便于描述，本文后续将用表 1 中的编号代表经过不同预处理方法的基片。将衬底经过氨水、双氧水、盐酸、光刻胶以及氧等离子体处理，然后利用 CBD 法在处理过的衬底表面沉积 PbS 薄膜。所需原料及用途如表 2 所示。将 $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 、 NaOH 、 $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ 、 $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ 四种物质按照一定比例配置前驱体溶液，并将处理过的图形化衬底放入搅拌均匀的前驱体溶液中，在 40℃ 的水浴锅中加热 2 h 后得到 PbS 薄膜^[10]。

2 结果与讨论

2.1 图形衬底表面化学水浴法生长存在的问题

在采用底电极策略制备 8×8 阵列器件的过程中，我们观察到，采用 CBD 法在图形化衬底上生长的 PbS 薄膜呈现出显著的不均匀性。具体来说，如图 1 所示，底层电极几乎未见到 PbS 薄膜的生长，而在顶层电极上，我们发现了大面积的黑色团聚现象，二者与 SiO_2 衬底上的生长情况都不一致。通过对比

两层电极经过的工艺步骤，我们猜测弱碱性的显影液、光刻胶以及酸性刻蚀液等物质会使金属表面改性，导致在金属表面生长的 PbS 薄膜出现大量团聚或者无法在金属表面沉积的问题。这影响了 PbS 薄膜的形貌，使其在金属表面上的生长呈现出致密或稀疏的不同特征。这会使薄膜材料与电极接触性变差，严重影响 PbS 阵列探测器的响应度和均匀性等性能。因此探究以上制备器件的工艺步骤对 CBD 法生长的 PbS 薄膜质量的影响，并研究出一种基于 CBD 法在图形化衬底上均匀生长 PbS 薄膜的方法显得至关重要。

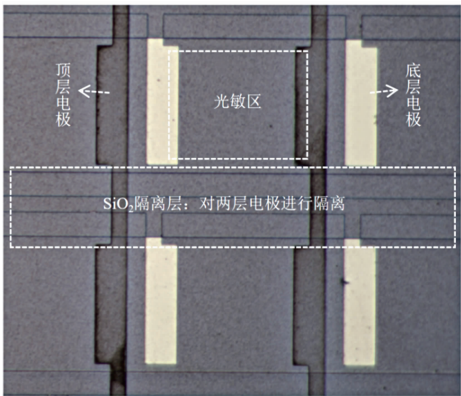


图 1 阵列器件 PbS 薄膜的光学图像

表 1 基片经过的处理

基片编号	处理方式
S1	未经过处理
S2	浸入 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 溶液 5 min
S3	浸入 H_2O_2 溶液 5 min
S4	浸入 HCL 溶液 5 min
S5	经过 1 次双层胶工艺
S6	经过 2 次双层胶工艺
S7	经过氧等离子体清洗机处理 5 min
S8	经过 2 次双层胶工艺+氧等离子体清洗机处理 5 min
S9	浸入 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 溶液 5 min+2 次双层胶工艺+氧等离子体处理 5 min
S10	浸入 H_2O_2 溶液 5 min+2 次双层胶工艺+氧等离子体处理 5 min
S11	浸入 HCL 溶液 5 min+2 次双层胶工艺+氧等离子体处理 5 min

表 2 CBD 法制备 PbS 所需原料

药品	化学式	用量	用途
乙酸铅	$\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$	25 mL@0.4 mol/L	反应物，提供 Pb^{2+} 源
柠檬酸钠	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$	25 mL@0.3 mol/L	反应物，作为络合剂
氢氧化钠	NaOH	25 mL@1.14 mol/L	反应物，营造碱性溶液环境
硫脲	$\text{SC}(\text{NH}_2)_2$	25 mL@0.3 mol/L	反应物，提供 S^{2-} 源

2.2 图形化衬底的预处理方法

为了研究酸碱等溶液处理衬底对 CBD 法生长 PbS 薄膜质量的影响,我们首先在 S2、S3、S4 三种基片上进行 PbS 薄膜的生长,并利用光学显微镜及扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)对薄膜表面形貌进行表征,如图 2 所示。结果显示,经过酸、碱和双氧水等溶液浸泡处理后,基片对金属表面特性的影响显著,导致在三种衬底上生长的 PbS 薄膜均匀性较差。光学显微镜图像清晰地展示了在图形化衬底上 PbS 薄膜颜色的差异。具体而言,S2 基片上的 PbS 薄膜在金属表面形成了较多的大面积黑色沉积物,如图 2(a)所示;S3 基片上的 PbS 薄膜在金属表面颜色更深,表面覆盖着密集的黑色颗粒团聚,如图 2(d)所示;S4 基片的金属电极中间部分出现了大面积连续黑色沉积物,沉积物向电极边缘逐渐变稀疏,最终暴露出底层金属电极,如图 2(g)所示。SEM 图像进一步揭示了两种衬底上 PbS 薄膜形貌的差异。通过对比图 2(b)与图 2(c)、图 2(e)与图 2(f)可以看出,基片 S2 和 S3 上金属表面的 PbS 薄膜与 SiO_2 衬底上的相比,其晶体形貌更杂乱且表面凹凸不平。通过对比图 2(h)与图 2(i)可以看出,基片 S4 上金属边缘部分的 PbS 薄膜生长的连续性较差,主要以离散的立方晶体形式出现。最重要的是,金属上的 PbS 薄膜形貌与 SiO_2 上的存在明显差异,均匀性很差。

为了研究光刻胶处理衬底对 CBD 法生长 PbS 薄膜质量的影响,我们在 S5 和 S6 两种经过光刻胶处理的基片上进行了 PbS 薄膜生长,薄膜形貌如图 3 所示。结果表明,经过双层胶工艺处理后,在金属表面上不易沉积 PbS 薄膜,且这一现象随着处理次数的增加而变得更加显著。可能的原因是有机污染物影响了金属表面的润湿性,改变了金属的接触角,导致金属表面呈现一定程度的疏水性,使 PbS 在金属表面的成核几率大大降低,抑制了 PbS 薄膜的生长^[11-12]。在光学显微镜下观察到,经过一次

双层胶工艺处理后,金属表面几乎未形成 PbS 薄膜,仅在金属边缘部位存在少量的 PbS 团聚,如图 3(a)所示;而经过两次双层胶工艺处理后,金属光泽更加显著,说明没有 PbS 材料附着,且在金属边缘部位也未观察到黑色的 PbS 团聚,如图 3(b)所示。图 3(b)和图 3(e)分别为经过一次和两次双层胶工艺处理的金属表面的 PbS 薄膜 SEM 图,只能在金属表面看到些许 PbS 晶粒,尤其是在图 3(e)中,此现象更显著。从图 3(c)和图 3(f)中可以看出,在两种基片的 SiO_2 上生长的 PbS 薄膜形貌并无明显差异,说明两种光刻胶处理方法并不会对 SiO_2 表面生长的 PbS 薄膜质量造成显著影响,只会影响金属表面的 PbS 生长。这严重阻碍了 PbS 薄膜在金属和 SiO_2 表面的均匀生长。

除了上述几种处理方法外,我们在基片 S1、S7 和 S8 上生长的 PbS 薄膜形貌如图 4 所示。可以观察到,在这三种情况下,PbS 薄膜在两种不同衬底上都呈现出相对均匀的生长,其中基片 S8 上的 PbS 薄膜的均匀性最优异。通过光学显微镜的观察,发现基片 S1 上的 PbS 薄膜在金属电极上的颜色比在 SiO_2 上更深,如图 4(a)所示;基片 S7 上的 PbS 薄膜在金属电极上仍存在一些较小的黑色颗粒,如图 4(d)所示;而基片 S8 上的 PbS 薄膜在两种衬底金属和 SiO_2 上都呈现出均匀的银灰色,且没有明显的黑色团聚颗粒和颜色的差异,如图 4(g)所示。通过对比图 4(b)与图 4(c)可以看出,基片 S1 金属电极上的 PbS 薄膜比 SiO_2 上的更尖锐。通过对比图 4(e)与图 4(f)可以看出,基片 S7 在两种衬底上的 PbS 薄膜形貌较为一致,但晶粒大小不一,表面不够平整。通过对比图 4(h)与图 4(i)可以看出,基片 S8 的 PbS 薄膜在两种衬底上的形貌几乎一致,呈现出规整的立方晶体结构:晶粒大小均匀,表面平整。这说明基片 S8 的处理方法(经过 2 次双层胶工艺+氧等离子体处理 5 min)可以使 PbS 薄膜在金属和 SiO_2 衬底上实现优异的均匀生长。可能的原因是,经过 2 次双层胶工艺处理,

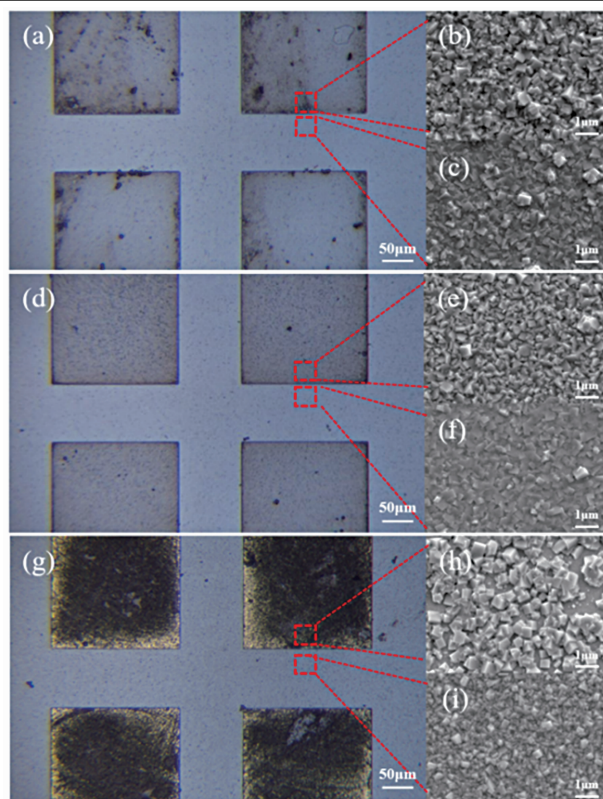


图 2 不同基片上 PbS 薄膜的生长形貌图：(a) 基片 S2 上生长的 PbS 薄膜的光学图；(b) 基片 S2 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(c) 基片 S2 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(d) 基片 S3 上生长的 PbS 薄膜的光学图片；(e) 基片 S3 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(f) 基片 S3 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(g) 基片 S4 上生长的 PbS 薄膜的光学图片；(h) 基片 S4 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(i) 基片 S4 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图

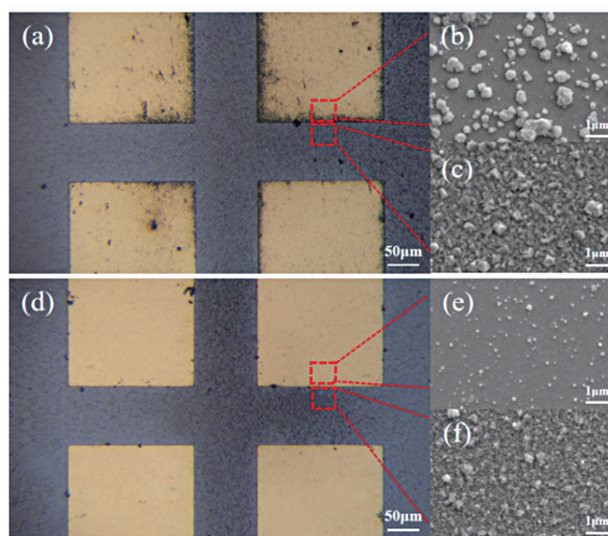


图 3 不同基片上 PbS 薄膜的生长形貌图：(a) 基片 S5 上生长的 PbS 薄膜的光学图片；(b) 基片 S5 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(c) 基片 S5 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(d) 基片 S6 上生长的 PbS 薄膜的光学图片；(e) 基片 S6 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(f) 基片 S6 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图

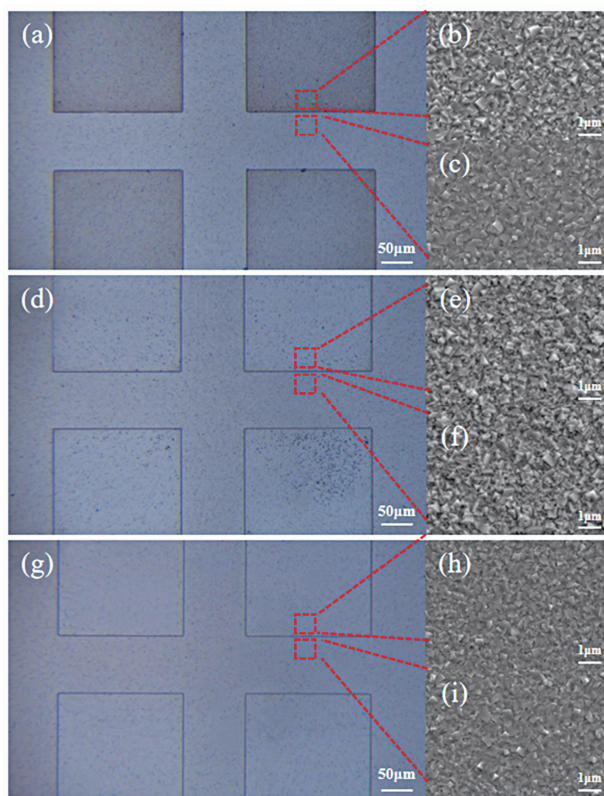


图 4 不同基片上 PbS 薄膜的生长形貌图：(a)基片 S1 上生长的 PbS 薄膜的光学图片；(b)基片 S1 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(c)基片 S1 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(d)基片 S7 上生长的 PbS 薄膜的光学图片；(e)基片 S7 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(f)基片 S7 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(g)基片 S8 上生长的 PbS 薄膜的光学图片；(h)基片 S8 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图；(i)基片 S8 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图

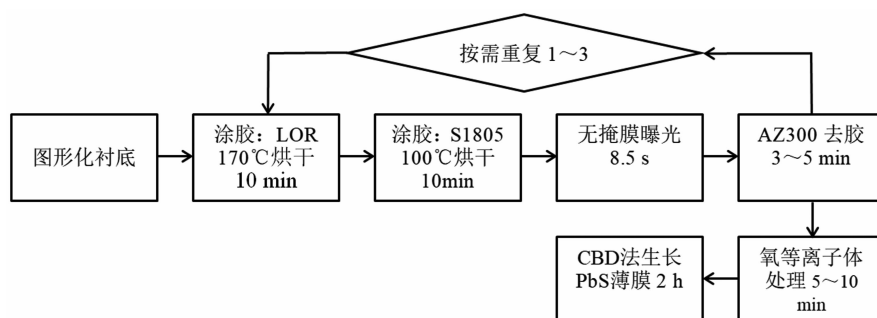


图 5 预处理方法的具体工艺流程

金属和 SiO_2 表面均呈现了疏水性，而经氧等离子体清洗处理图形化衬底的表面，使这两种衬底表面均呈现亲水性，从而更有利于参与水浴化合反应，有助于生长出形貌良好的 PbS 薄膜^[13-14]。

通过对基片进行不同的处理，观察到用 CBD 法在图案化衬底上生长的 PbS 薄膜的形貌与基片表面处理密切相关，尤其是金属衬底

受到的影响最为显著。在对基片 S1~S8 进行的实验中，我们初步确定了一种基片预处理方法，以确保在图形化衬底上用 CBD 法生长的 PbS 薄膜具有一致的均匀性。具体的工艺流程如图 5 所示。

2.3 预处理方法的可修复性

为了探究这种预处理方法的适用性，我们设计了四组对照实验(见表 3)。其中第一组实

验中的基片 S1 与 S8 已在前述实验中验证了该方法的效果, 具体效果见图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)以及图 4(g)、图 4(h)、图 4(i)。这些结果表明, 未经处理的基片通过该预处理方法能成功获得均匀且结晶良好的 PbS 薄膜。然而, 对于已经过初步处理的基片(如 S2、S3、S4), 使用该预处理方法是否仍能保持薄膜的均匀性和高质量, 需要作进一步的实验探究。这将有助于确定这种预处理方法的广泛适用性和潜在局限性。

由图 2 已知, 基片 S2、S3、S4 上生长的 PbS 薄膜在图形化衬底上显示出较差的均匀性。

表 3 对照实验分组

组号	对照组	实验组
1	S1	S8
2	S2	S9
3	S3	S10
4	S4	S11

对此, 基片 S9、S10、S11 作为对照实验组(分别对应 S2、S3、S4), 其光学和 SEM 图像如图 6 所示。光学显微镜观察结果表明, 这三种基片上的 PbS 薄膜在两种衬底上的颜色一致且分布均匀, 没有黑色聚团现象, 具体可见图 6(a)、图 6(d)和图 6(g)。进一步地, SEM 图像揭示了这些基片上 PbS 晶粒大小的一致性和高晶格条纹清晰度, 且在金属和 SiO₂ 表面上生长的 PbS 薄膜的均匀性良好, 如图 6(b)、图 6(c)、图 6(e)、图 6(f)、图 6(h)和图 6(i)所示。这与基片未处理前的形貌(见图 2)形成了鲜明对比, 从而证实了该预处理方法在修复处理后(酸碱等溶液)的图案化衬底方面的有效性和广泛适用性。经过预处理的基片上的 PbS 薄膜显示出较好的结晶性能, 其在图形化衬底上的形貌均匀性和电极接触的良好性能有可能优化载流子的传输效率, 从而提高 PbS 探测器的性能。

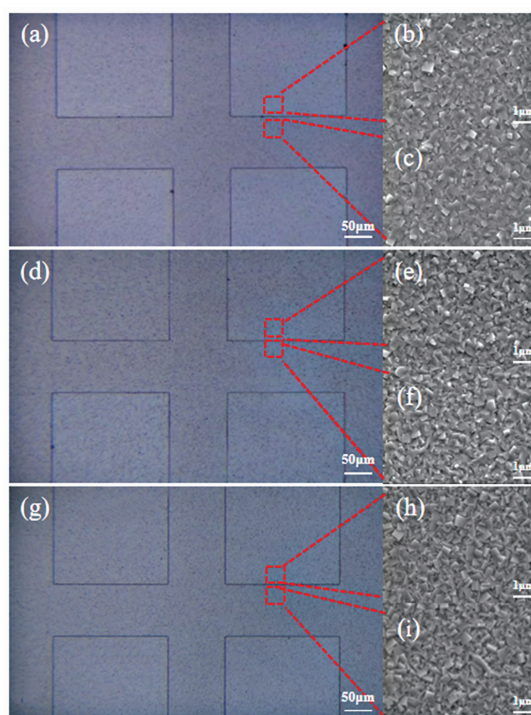


图 6 不同基片上 PbS 薄膜的生长形貌图: (a)基片 S9 上生长的 PbS 薄膜的光学图片; (b)基片 S9 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图; (c)基片 S9 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图; (d)基片 S10 上生长的 PbS 薄膜的光学图片; (e)基片 S10 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图; (f)基片 S10 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图; (g)基片 S11 上生长的 PbS 薄膜的光学图片; (h)基片 S11 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图; (i)基片 S11 金属表面上生长的 PbS 薄膜的 SEM 图

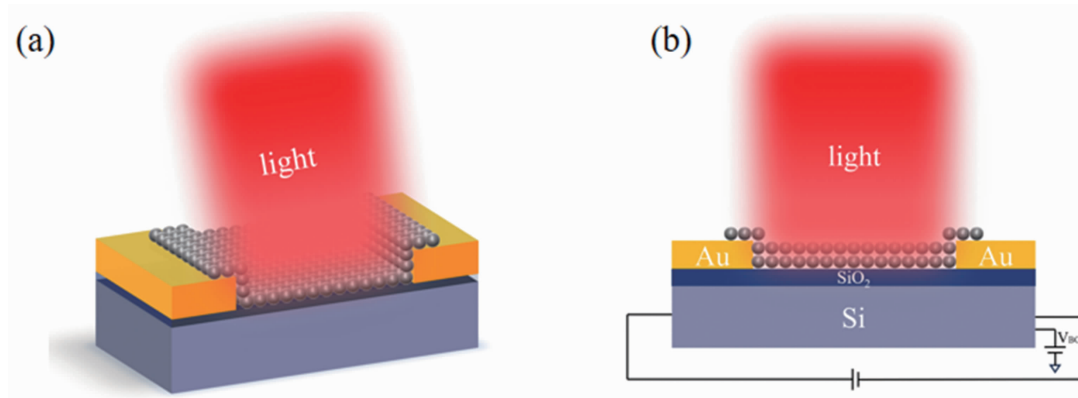


图 7 PbS 光电探测器：(a) 三维结构示意图；(b) 工作原理图

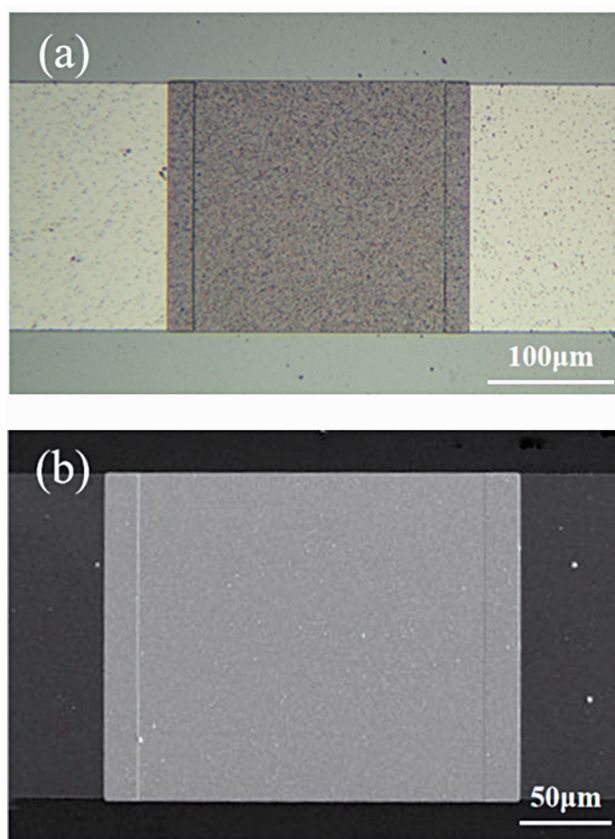


图 8 PbS 光电探测器的微观形貌图：(a) 光学图像；(b) SEM 图像

2.4 器件制备及光电性能测试验证

为了探究以上预处理方法对器件光电性能的影响，将表 3 中的四组对照试验，分别做成了尺寸为 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 的 PbS 单元探测器件。其三维结构示意图如图 7 所示，微观形貌图像如图 8 所示。以 $1550\ \text{nm}$ 激光器作为光源，使用半导体参数测试系统 (Keithley 4200-SCS) 在室温环境下测试了探测器在偏压 $V_{\text{DS}} = 1\ \text{V}$ 条件下的光电性能。

首先探究了四组对照试验器件的电学特性区别。图 9 展示了表 3 中四组对照试验器件在暗态条件下的电学特性曲线对比。结果显示，所有器件的电极与 PbS 薄膜之间均形成了良好的欧姆接触，符合 PbS 光电导型器件的典型特性。值得注意的是，经过图 5 所示的预处理方法处理的器件表现出更低的电阻值。图 10 所示为四组器件噪声性能曲线的对比情况。结果表明，经过预处理的器件的噪声均低于未经预

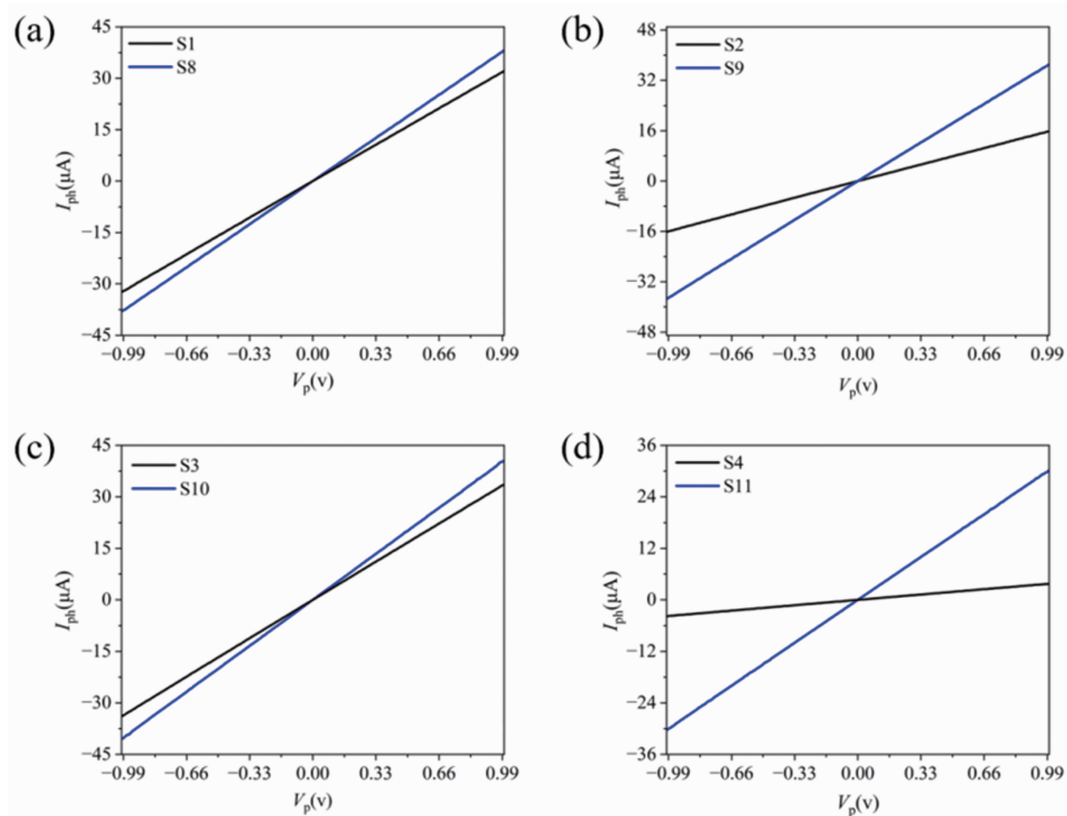


图 9 PbS 薄膜的暗电流: (a)对照组 1; (b)对照组 2; (c)对照组 3; (d)对照组 4

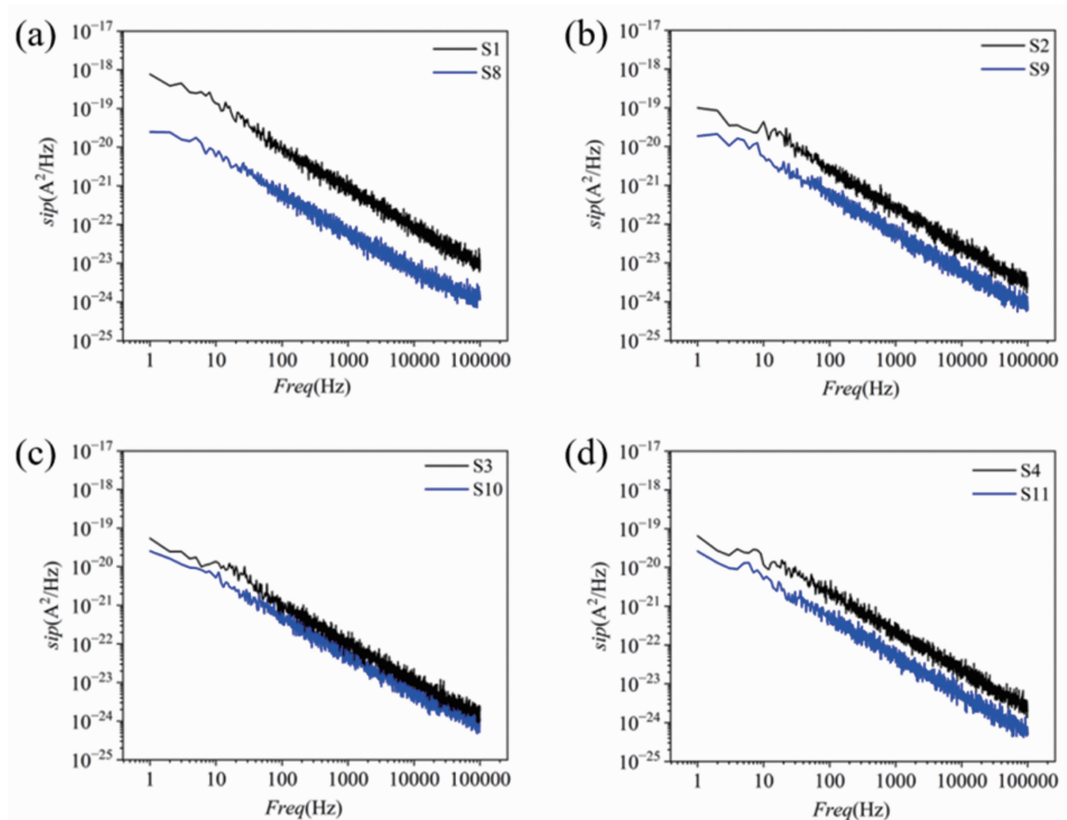


图 10 在 1550 nm 光源下的噪声特性: (a)对照组 1; (b)对照组 2; (c)对照组 3; (d)对照组 4

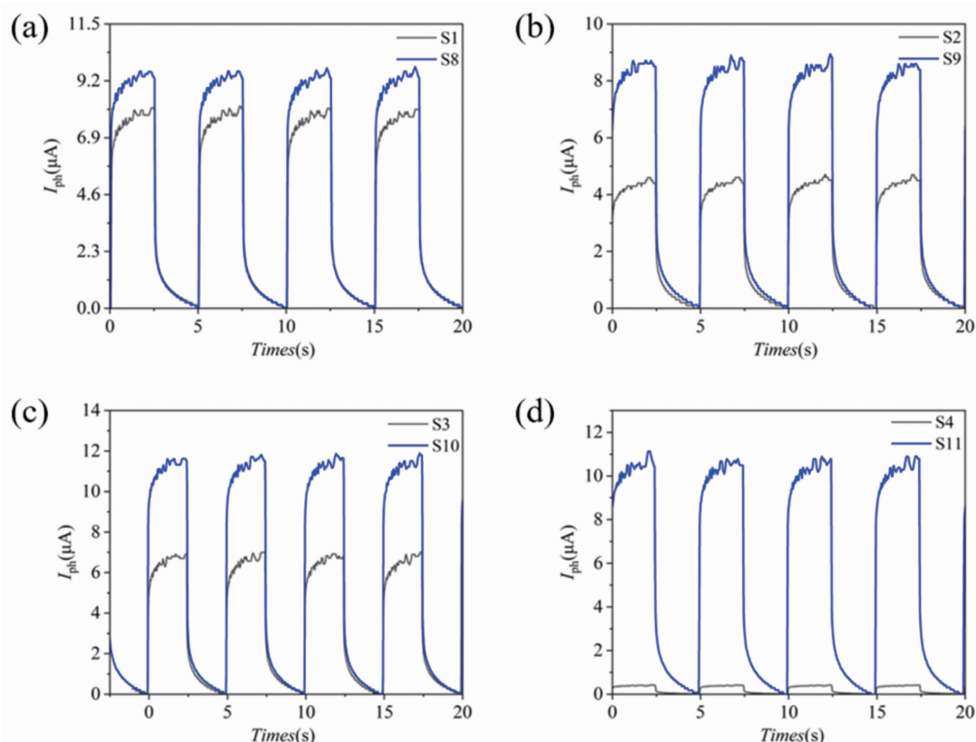


图 11 在 1550 nm 光源下的光电流响应曲线：(a)对照组 1；(b)对照组 2；(c)对照组 3；(d)对照组 4 处理的器件。

然后探究了四组对照试验器件的光响应特性的区别。图 11 对比了四组器件在周期性光照条件下的光电流响应曲线。结果表明，不论是否经过预处理，所有器件均展现出微安量级的光电流，并且具备良好的重复性和稳定性。然而，经过预处理的器件的光电流普遍优于未经处理的器件，这突显了预处理方法对光电性能的提升作用。

另外，在对比以上三种基本的光电性能后，我们还计算了器件的响应度（结果见表 4）。响应度是表征探测器性能的重要指标。响应度越高，探测器的光电转换效率越高，反应灵敏度就越高。响应度 R 的计算公式为

$$R = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{SP_{\text{in}}} \quad (1)$$

式中， I_{light} 为光电流； I_{dark} 为暗电流； S 为红外光照明面积； P_{in} 为入射光功率^[15-16]。表 4 显示了四组对照试验器件的响应度数据。通过对比分析，经预处理后的器件在响应度上有显著提升。特别是第四组试验器件的性能提升最为突出，其响应度从 5.47 mA/W 显著增加至 149.20

表 4 对照组 1~4 的响应度

对照组	基片	响应度(mA/W)
1	S1	111.90
	S8	133.84
2	S2	64.29
	S9	124.91
3	S3	94.86
	S10	162.06
4	S4	5.47
	S11	149.20

mA/W。这种改善可能是因为，经过修复工艺处理的衬底更有益于 PbS 薄膜的沉积，进而提高了器件的性能。上述研究结果表明，所采用的预处理方法能够有效提升探测器的光电性能，并且具有推广的潜力。

3 结束语

本文采用一种基片预处理方法实现了基于 CBD 法的 PbS 薄膜在 SiO₂ 和金属表面上的均匀生长，并详细探讨了不同预处理条件下 PbS 薄膜的生长特性。研究结果表明，使用双层胶工艺时，金属表面较难生长 PbS 薄膜，在制作多层电极时可能会导致接触不良；而弱酸、弱

碱等溶液处理也会导致金属表面的变性, 从而影响 PbS 薄膜在图形化衬底上的均匀性。相比之下, 我们发现双层胶工艺结合氧等离子体清洗的预处理方法不仅可使图形化衬底上生长均匀且形貌良好的 PbS 薄膜, 还有效修复了经过不同处理的图形化衬底表面, 使其也可以均匀地生长 PbS 薄膜。

基于此预处理方法, 我们制备了光敏区尺寸为 $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 的器件, 并对比分析了其光电性能。结果显示, 在经过该方法处理过的衬底上制备的 PbS 器件的薄膜与电极接触普遍良好, 噪声水平均有所降低, 且响应度和探测率均有所提升。这说明该修复方法不仅可以生长形貌均匀的 PbS 薄膜, 还可以有效提升探测器的光电性能。本项研究为基片预处理提供了新的思路。未来我们将基于该预处理方法继续研究以底电极工艺为主的 x - y 寻址阵列的 PbS 红外探测器。

参考文献

- [1] Rogalski A. Infrared Detectors: An Overview [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, **43** (3-5): 187-210.
- [2] Shi L, Liang Q, Wang W, et al. Research Progress in Organic Photomultiplication Photodetectors [J]. *Nanomaterials*, 2018, **8**(9): 713.
- [3] 吕衍秋, 鲁星, 鲁正雄, 等. 碲化物红外探测器国内外发展综述 [J]. *航空兵器*, 2020, **27**(5): 1-12.
- [4] 胡巧玲, 孙喜桂, 吴晨希, 等. 化学浴沉积硫化铅薄膜及其晶体结构 [J]. *电镀与涂饰*, 2021, **40**(19): 1501-1506.
- [5] Senthil E S, Sangeetha R, Nirmala C, et al. Studies on Lead Sulphide (PbS) Thin Film Prepared by Chemical Bath Deposition Method [J]. *Solid State Phenomena*, 2023, **350**: 65-73.
- [6] 周哲, 付丙磊, 董天波, 等. 半导体工艺与制造装备技术发展趋势 [J]. *电子工业专用设备*, 2022, **51**(4): 1-7.
- [7] 兰慧琴. 利用化学溶液法制备硫化铅薄膜及其特性研究 [J]. *机电技术*, 2021, **33**(6): 55-58.
- [8] 陈壮. 化学浴沉积法制备硫化铅薄膜光电特性与敏化工艺研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [9] 韦涛, 陈建华, 陈晔. Au(100)表面亲/疏水性质的密度泛函理论研究 [J]. *矿产保护与利用*, 2022, **42**(1): 7.
- [10] 杨冬, 申钧, 高恺聪, 等. 化学水浴法合成硫化铅探测器的红外响应研究 [J]. *红外技术*, 2023, **45**(6): 559-566.
- [11] Zhu Y, Xu W, Cao Z, et al. Prediction of Contact Angle for Oriented Hydrophobic Surface and Experimental Verification by Micro-Milling [J]. *Coatings*, 2023, **13**(8): 356-378.
- [12] Gardner J R. The Hydrophilic Nature of Gold and Platinum [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry & Interfacial Electrochemistry*, 1977, **81**(2): 285-290.
- [13] Smith T. The Hydrophilic Nature of a Clean Gold Surface [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 1980, **75**(1): 51-55.
- [14] Bewig K W, Zisman W A. The Wetting of Gold and Platinum by Water [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1965, **69**(12): 4238-4242.
- [15] Konstantatos G, Clifford J, Levina L, et al. Sensitive Solution-processed Visible-wavelength Photodetectors [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(9): 531-534.
- [16] Yan S Y, Yang Q, Feng S L, et al. Effect of Air Atmosphere Sensitization on Formation of PbSe p-n Junctions for High-performance Photodetectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2020, **49** (8): 4929-4935.