

离子辅助电子束蒸发SnSe薄膜的研究进展

张 驰, 周金辉, 李昕洋, 赵志斌, 张美阳, 谭付越洋, 郭钰杰, 杨璨源, 陈 洁, 孙康迅,
邱美叶, 孔惠颖, 郑照轩, 罗 薇, 张林玉, 徐东昕, 曲 轶, 李再金*

海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南省院士团队创新中心, 半导体激光海南省国际联合研究中心, 海南师范大学物理与电子工程学院, 海南 海口

收稿日期: 2024年12月17日; 录用日期: 2025年1月10日; 发布日期: 2025年1月21日

摘 要

硒化锡(SnSe)作为一种环保型二维层状材料, 其带隙特性通常被认为接近于直接带隙半导体, 表明它的导带极小值和价带极大值非常接近或完全重合, 具有优异的光电特性以及不错的光吸收系数。因此, SnSe薄膜适合用作光电材料, 在光伏和光电器件中具有广泛的应用前景。本文首先介绍了SnSe材料的光电特性, 其次探究了近几年国内外SnSe薄膜的研究进展, 总结分析了SnSe薄膜制备技术, 最后总结并展望了SnSe薄膜在太阳能电池、光电探测器等领域的应用状况。SnSe薄膜会在未来光伏和光电器件中发挥不可替代的作用。

关键词

SnSe薄膜, 光电特性, 太阳能电池, 光电探测器

Research Progress on ion Assisted Electron Beam Evaporation of SnSe Thin Films

Chi Zhang, Jinhui Zhou, Xinyang Li, Zhibin Zhao, Meiyang Zhang, Fuyueyang Tan,
Zhengjie Guo, Canyuan Yang, Jie Chen, Kangxun Sun, Meiye Qiu, Huiying Kong,
Zhaoxuan Zheng, Wei Luo, Linyu Zhang, Dongxin Xu, Yi Qu, Zaijin Li*

Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, Academician Team Innovation Center of Hainan Province, Hainan International Joint Research Center for Semiconductor Lasers, College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

Received: Dec. 17th, 2024; accepted: Jan. 10th, 2025; published: Jan. 21st, 2025

Abstract

Tin selenide (SnSe), as an environmentally friendly two-dimensional layered material, is generally

*通讯作者。

文章引用: 张驰, 周金辉, 李昕洋, 赵志斌, 张美阳, 谭付越洋, 郭钰杰, 杨璨源, 陈洁, 孙康迅, 邱美叶, 孔惠颖, 郑照轩, 罗薇, 张林玉, 徐东昕, 曲轶, 李再金. 离子辅助电子束蒸发 SnSe 薄膜的研究进展[J]. 材料化学前沿, 2025, 13(1): 27-37. DOI: 10.12677/amc.2025.131005

considered to have bandgap characteristics similar to direct bandgap semiconductors, indicating that its conduction band minimum and valence band maximum are very close or completely overlapped, and it has excellent optoelectronic properties and good light absorption coefficient. Therefore, SnSe thin films are suitable for use as optoelectronic materials and have broad application prospects in photovoltaics and optoelectronic devices. This article first introduces the optoelectronic properties of SnSe materials, then explores the research progress of SnSe thin films at home and abroad in the past years, summarizes thin film preparation technologies suitable for SnSe thin films, and finally summarizes and prospects the application status of SnSe thin films in solar cells, photodetectors and other fields. SnSe thin films will play an irreplaceable role in photovoltaic and optoelectronic devices in the future.

Keywords

SnSe Thin Film, Photoelectric Characteristic, Solar Cells, Photodetector

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在当今社会, 能源需求的迅猛增长与环境保护的日益重要性之间的矛盾愈发显著。全球范围内, 化石燃料的过度使用不仅导致了资源的枯竭, 还造成了严重的环境污染和气候变化。因此, 开发高效、可再生的能源材料成为了科学研究的迫切需求。光伏技术和光电转换技术作为重要的可再生能源利用方式, 已经吸引了众多研究者的关注。

然而, 目前在这些领域仍然面临着材料性能不足、生产成本低以及环境适应性差等一系列挑战, 针对这些问题, 开发新型的半导体材料显得尤为重要。理想的半导体材料不仅应具备优异的光电性能, 还需要具备丰富的地球储量和良好的环境友好性。SnSe 作为一种环保型二维层状材料, 恰好满足了这些要求, 其光电性能主要体现在较高的光吸收系数与良好的光学带隙。光吸收系数是描述材料吸收光的能力的重要参数, 其定义式为:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (1)$$

式(1)中, α 是光吸收系数, I_0 是入射光强度, I 是透射光强度, d 是材料的厚度。SnSe 薄膜在可见光和近红外波段具有较高的光吸收系数 α , 通常可达到 10^4 cm^{-1} 以上。这意味着 SnSe 能够有效地吸收太阳光的能量, 有助于其在太阳能电池中的应用。

SnSe 的光学带隙范围为 1.0 eV (体相)到 1.3 eV (纳米薄膜), 这个范围非常适合光伏材料(理想带隙为 1.1~1.4 eV), 这使其能够吸收可见光和部分近红外光。光学带隙是材料吸收光的能力的重要指标, 影响其光电性能。光学带隙可以通过光吸收数据的温度变化来确定, 用 Tauc 公式表示:

$$(ah\nu)^n = A(h\nu - E_g) \quad (2)$$

其中, α 是光吸收系数, h 是普朗克常数, ν 是光频率, A 是常数, E_g 是光学带隙, n 的值取决于材料的类型(对于直接带隙半导体, $n = 1/2$; 对于间接带隙半导体, $n = 2$)。因此, SnSe 作为准直接带隙半导体, 兼具直接带隙的部分优点, 尤其是高光吸收系数, 使其在光伏和光电器件中具有潜在应用价值。

2. SnSe 薄膜的国内外研究进展

SnSe 作为一种环保型二维层状材料,在光电和光伏领域展现出巨大的应用潜力。其带隙特性通常被认为接近于直接带隙半导体,光学带隙范围为 1.0~1.3 eV,非常接近光伏材料理想带隙范围(1.1~1.4 eV)。这使得 SnSe 能够高效吸收大部分波段的太阳光,并具有较高的光吸收系数。本节将通过近年来国内外研究进展,总结不同的制备方法、基底材料、带隙条件以及不同温度条件下对 SnSe 薄膜的影响。

2.1. SnSe 薄膜的国外研究进展

2017 年, H. Sutrisno 等人[1]采用真空蒸发法在 773 K 条件下制备了 SnSe 薄膜,发现其具有较高结晶度和 1.63 eV 带隙,但薄膜厚度不均匀可能影响性能。相比之下,电子束蒸发法制备的 SnSe 薄膜在电学性能上更稳定,通过优化退火条件可提高结晶度和迁移率[2]。2019 年, Mohan Reddy Pallavolu 等人[3]采用磁控溅射法制备 SnSe 薄膜,在 673 K 及以上温度硒化下获得单相正交结构的 SnSe,带隙为 1.2 eV,适用于高效太阳能电池。2020 年, Pinaki Mandal 等人[4]通过化学气相沉积法在室温下制备 SnSe 薄膜,显示出在可见光下对染料的显著光催化降解效果,尤其是孔雀石绿。两者的研究表明,磁控溅射法更适用于太阳能电池,而化学气相沉积法更适合光催化应用。2022 年, Shivam Tyagi 等人[5]发现,使用化学气相沉积法在不同基板上制备的 SnSe 薄膜,玻璃基板上的薄膜具有较低的热激活能,而氧化铝基板上的薄膜则表现出更好的光响应性能,表明基板材料对薄膜性能有显著影响。2023 年, Pawan Kumar 等人[6]结合离子辅助沉积技术优化了电子束蒸发法制备的 SnSe 薄膜,调整 Sn/Se 比例可改变导电类型并优化太阳能电池性能。2024 年, Prosenjit Sarkar 等人[7]通过电子束蒸发法掺杂 Te 改善 $\text{SnSe}_{1-x}\text{Te}_x$ 薄膜的结晶质量、表面结构及光学带隙,为提升 SnSe 基太阳能电池性能提供了新的方法。两者均展示了电子束蒸发法在提升 SnSe 薄膜性能中的重要作用,且掺杂与工艺优化为提高薄膜的电学和光学特性提供了可行方案。

通过对以上文献的分析可以看出,SnSe 薄膜的制备方法直接影响其性能和应用。不同的制备方法(如真空蒸发法、电子束蒸发法、磁控溅射法等)在薄膜的结晶度、光电性能以及稳定性方面表现出差异。例如,电子束蒸发法和化学气相沉积法通常能获得较好的结晶质量,而真空蒸发法和磁控溅射法在结晶度和电学性能上存在一定差异。此外,退火温度、基底选择以及掺杂等因素也显著影响薄膜的性能。未来的研究应关注如何通过优化制备工艺,改善薄膜的均匀性、结晶度以及光电性能,以推动 SnSe 薄膜在太阳能电池和光催化等领域的应用。

2.2. SnSe 薄膜的国内研究进展

近年来,SnSe 薄膜的研究在国内逐渐成为热点。2015 年,哈尔滨工业大学郝润豹[8]采用脉冲激光沉积法制备了 SnSe 薄膜,并发现生长温度对薄膜质量有显著影响,室温下也能获得良好结晶性。2016 年,宋波等人[9]进一步研究了铁电极化方向对 SnSe 薄膜电阻的影响,发现极化方向对电阻有显著调控作用,且激光照射可引起光电导效应,为光电调控提供新策略。2018 年,北京航空航天大学王雯婷等人[10]采用热蒸发法制备 n 型 SnSe 薄膜,发现退火处理能显著提升薄膜的热电性能,最大功率因子在 473 K 时达到 $120 \mu\text{W}/\text{mK}^2$ 。2020 年,曾砺团队[11]通过电子束蒸发法研究了薄膜厚度和蒸发速率对 SnSe 薄膜光伏性能的影响,优化后太阳能电池效率提升至 1.02%。同年,崔树松团队[12]采用电子束蒸发法再硒化 SnSe 薄膜,发现薄膜在近红外光下具有良好的光电响应性能。2021 年,崔岩等人[13]通过磁控溅射法研究了沉积温度对 SnSe 薄膜热电性能的影响,发现沉积温度对薄膜微观结构和功率因子有显著调控作用。2022 年,叶斌等人[14]利用化学气相沉积法制备 SnSe_2 薄膜,研究了超快光电效应和光生载流子的特性,揭示了 SnSe_2 薄膜的潜在应用价值。2024 年,赵康等人[15]通过化学气相沉积法制备掺 SnSe 的 SnS 薄膜,研究表明掺杂后薄膜的热电性能显著提高,为提高 SnS 基薄膜热电性能提供了新的思路。

总的来说, SnSe 薄膜由于其优异的光电性能和可调结构, 展现了在光伏、光电探测器及光调制器件中的广阔应用前景, 为低成本高效太阳能电池和光电器件的开发提供了有力支持。见表 1, 我们可以看出不同的制备方法、基底材料、温度选择都会对 SnSe 薄膜的带隙产生影响, 从而影响到薄膜的光吸收能力, 就目前的研究进展来看, SnSe 薄膜的光吸收能力还可以再更进一步。

Table 1. Research progress of SnSe thin films at home and abroad in recent years
表 1. 近几年 SnSe 薄膜的国内外研究进展

年份	制备方法	基底	温度	带隙	吸收系数 α
2015	脉冲激光沉积法[8]	MgO	473 K	1.3 eV	/
2016	脉冲激光沉积法[9]	LiNbO ₃	423 K	0.86 eV	/
2017	真空蒸发法[1]	玻璃	773 K	1.35 eV	104 cm ⁻¹
2018	电子束蒸发法[2]	玻璃	423 K	1.53 eV	/
2018	热蒸发法[10]	BK7 玻璃	750 K	1.3 eV	/
2019	溅射退火法[3]	玻璃	300 K~450 K	1.38~0.94 eV	104 cm ⁻¹
2020	电化学沉积法[4]	FTO 玻璃	300 K	1.44 eV	/
2020	共蒸发法[11]	钼涂层玻璃	773 K	0.87~1.13 eV	105 cm ⁻¹
2020	电子束蒸发法[12]	玻璃	723 K	0.93 eV	104 cm ⁻¹
2021	磁控溅射法[13]	Si/SiO ₂	300 K~773 K	/	/
2022	化学气相沉积法[5]	玻璃/氧化铝	623 K/1073 K	1~1.3 eV	/
2022	化学气相沉积法[14]	蓝宝石	523 K/823 K	0.714 eV	/
2024	热蒸发法[7]	玻璃	/	1.75~1.89 eV	105 cm ⁻¹
2024	化学气相沉积法[15]	TO-3P 柔性云母	923 K/973 K	1.1~1.7 eV	/

3. SnSe 薄膜的制备技术

SnSe 薄膜作为一种新兴的光电材料, 因其独特的光学特性而备受关注。通过调控 SnSe 的层数与带隙, 可以显著改变其光吸收范围与吸收强度, 从而满足不同光电器件的需求。尤其是层数较少的 SnSe 薄膜, 展现出优异的光吸收效率和带隙灵活性, 为光伏器件、光电探测器等应用提供了广阔的空间。此外, 薄膜性能不仅受到材料层数和结构的影响, 基底类型以及制备工艺也起到至关重要的作用。目前, SnSe 薄膜的制备方法主要有化学气相沉积(CVD) [16]、物理气相沉积(PVD) [17]、分子束外延法(MBE) [18]及溶液法[19]等方法。其中, CVD 方法包括常压化学气相沉积(APCVD) [20]和原子层沉积(ALD) [21], 而 PVD 方法则包括离子辅助电子束蒸发[22]、脉冲激光沉积(PLD) [23]及磁控溅射[24]等工艺。由于不同制备方法得到的 SnSe 薄膜在光电特性上各具优势, 本节将着重分析化学气相沉积法以及物理气相沉积技术中的磁控溅射法和离子辅助电子束蒸发法。

3.1. 化学气相沉积法

化学气相沉积法(CVD)在 SnSe 薄膜的制备中因其成分精确可控、结构致密且与衬底黏附性好而被广泛应用。如图 1 所示, 该方法可以通过调节沉积温度、沉积室压力和反应气体比例, 实现对 SnSe 薄膜性质的精确控制。在 CVD 制备的薄膜中, SnSe₂ 的晶粒通常垂直于衬底生长, 而 SnSe 的晶粒取向则平行于衬底。在常压条件下(如氮气氛围中), 控制加热温度在 400℃~650℃之间, 以 SnCl₄ 和二乙基硒化物作为反应气体, 可成功沉积出高质量的 SnSe 薄膜[25]。

2020 年, Yuyu Feng 等人[26]通过 CVD 成功合成 SnSe 薄膜, 研究发现该薄膜具有正交结构的多晶

形态,并在 600 K 时表现出高达 $3.98 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$ 的热电性能因子,这一成果为热电 IV-VI 化合物的研究和应用提供了新途径。同年,Boxing An 等人[27]通过化学气相沉积法合成了高质量的少层 SnSe_2 薄膜,研究人员通过优化前驱体和衬底的位置,成功避免了混合产物的形成,使得该材料在热电和光电领域具有广阔的应用前景。CVD 作为一种成熟的薄膜制备技术,具有较高的控制性和可扩展性,能够在大面积上制备均匀性较好的薄膜;此外,它对薄膜的厚度、形貌和晶体结构具有较强的可调性。然而,CVD 法也存在一些缺点,如前驱体的选择性要求较高,设备和工艺控制较为复杂,并且反应温度较高可能会对某些材料产生热损伤。

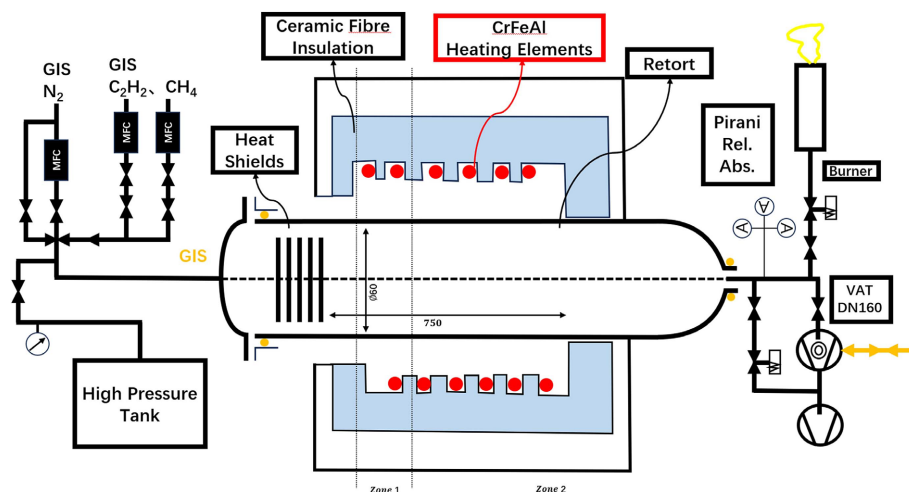


Figure 1. Schematic diagram of chemical vapor deposition technology

图 1. 化学气相沉积技术原理图

3.2. 磁控溅射法

磁控溅射法是一种从传统溅射系统发展而来的真空镀膜技术,其工作原理如图 2 所示。磁控溅射可进一步细分为直接溅射、直流反应磁控溅射和射频反应磁控溅射等。该方法的主要特点是沉积速度较快(比其他溅射法高出一个数量级),且在溅射过程中衬底温度较低。

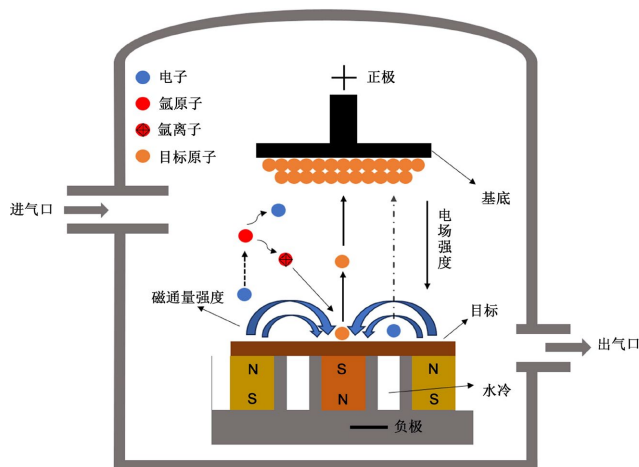


Figure 2. Schematic diagram of magnetron sputtering

图 2. 磁控溅射原理图

与其他薄膜制备方法相比，磁控溅射法制备 SnSe 薄膜具有以下优势：工作参数的动态调节范围广，有助于改善 SnSe 薄膜的晶体质量；镀膜速度和厚度易于控制，适合多层和低维结构的制备；材料选择范围广，有利于 SnSe 薄膜的掺杂及载流子浓度的调节等[28]。2018 年，Greta Lindwall 等人[29]通过硒化磁控溅射法制备了 α -SnSe 薄膜太阳能电池，研究表明在硒重量为 1.0 克、基底温度为 400℃的条件下可获得单相 α -SnSe 薄膜，并通过光电产额谱分析确定薄膜具有“类型 I”的能带排列，光电转换效率达到 1.42%。2024 年，Krzysztof Mars 等人[30]通过改进磁控溅射法成功解决了因材料低热导率导致的电弧和开裂问题，并通过调节溅射功率提高了锡硒化物薄膜的热电性能，达到高 ZT 值 0.5，展示了磁控溅射技术在热电领域的应用潜力。磁控溅射法具有高质量薄膜制备的优势，能够在低温下沉积具有良好附着力和均匀性的薄膜，且适用于大面积制备；然而，它的主要缺点包括设备复杂、过程控制要求高，以及在溅射过程中可能引起材料的应力积累，影响薄膜的稳定性。

3.3. 离子辅助电子束蒸发法

离子辅助电子束蒸发法(Ion-Assisted Electron Beam Evaporation, IA-EBE)是一种先进的薄膜制备技术，常用于制备高质量的半导体薄膜，如 SnSe 薄膜。

IA-EBE 是一种高效的薄膜制备技术，适合制备高质量的 SnSe 薄膜。结构示意图如图 3，在这一过程中，首先在真空环境下利用电子束对固体材料(如 SnSe)进行加热，使其转变为气相并沉积在基底上。同时通过引入离子源，施加高能量离子轰击正在沉积的薄膜，进一步改善其晶体结构和物理特性。离子轰击不仅能够增加薄膜的致密性，还能增强薄膜与基底之间的结合力。整个过程的关键在于通过调节电子束功率、离子能量和气压等多种参数，精确控制薄膜的厚度、结构和成分，以获得最佳的薄膜性能。

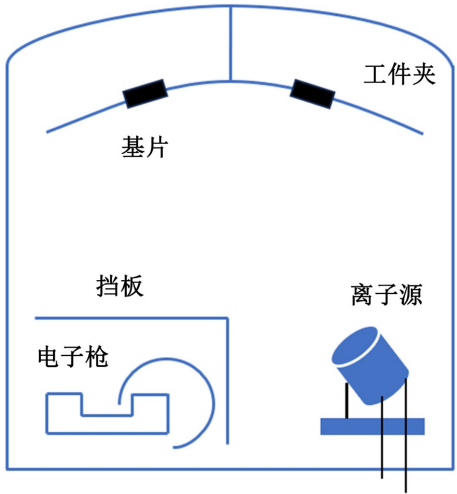


Figure 3. Schematic diagram of ion assisted electron beam evaporation structure
图 3. 离子辅助电子束蒸发结构示意图

2020 年，长春理工大学的刘文成等人[31]通过离子辅助沉积技术在玻璃基底上制备了 ITO 透明半导体薄膜，研究表明，离子源辅助沉积显著提高了薄膜的光电性能，制备出的 20 nm 厚薄膜具有 91.42% 的透过率。2022 年，李晓雪等人[32]采用离子束辅助电子束蒸镀技术制备 H4 薄膜，发现适当提高基底温度和离子束流密度能改善薄膜的质量和折射率，最终优化的 H4 薄膜在 980 nm 高反射膜中的应用显示出优异的抗激光损伤特性。离子辅助电子束蒸发法的优点在于能够精确控制薄膜的厚度、结构和光电性能，

且有助于提高薄膜的质量和稳定性，特别是在低温下制备高质量薄膜。然而，该方法的缺点包括工艺控制要求较高、设备复杂以及可能导致薄膜内部应力较大，影响长期稳定性和性能。

4. SnSe 薄膜的应用前景及进展

SnSe 薄膜因其较高吸收系数、适中的直接带隙和优良的载流子迁移率，在太阳能电池和光电探测器领域展现出广阔应用前景。在太阳能电池中，其高效光吸收和低成本制备助力开发高效光伏器件；在光电探测器领域，凭借宽光谱响应和快速响应特性，可实现高灵敏度光探测。当前研究集中于优化制备工艺、提升效率和稳定性，未来有望推动其在能源和信息技术中的大规模应用。

4.1. 太阳能电池领域

随着社会对清洁能源需求的不断增加,2023 年,太阳能电池(光伏电池)产量 5.4 亿千瓦,增长 54.0%。太阳能作为可再生和清洁能源的重要组成部分,已成为实现能源转型和可持续发展的关键。然而,如何提高太阳能发电的效率和可靠性,是当前亟待解决的问题[33]。近年来,SnSe 及其相关材料在太阳能电池领域取得了显著进展。2011 年, M. T. Santhamma Nair [34]等人通过化学沉积法制备 SnS 和 SnSe 薄膜,发现其作为 p 型吸收层材料具有潜力。2017 年, Enue Barrios-Salgado 等人[35]使用化学气相沉积法制备了立方结构的 SnS 和 SnSe 薄膜,证明了这些薄膜在太阳能电池应用中具有更高的光电转换效率和更好的电导率。如图 4, Yong Yan 等人[36]利用退火处理 SnSe₂ 粉末改善了 CIGS 薄膜的光伏性能。2018 年, TM Razykov 等人[37]通过化学分子束沉积法制备 SnSe 薄膜,优化了其光电性能。同年, F. Jamali-Sheini 等人[38]通过电沉积法制备的掺杂 Zn 纳米结构的 SnSe 薄膜, Zn 掺杂的 SnSe 薄膜表现出更高的载流子浓度和光电转换效率。2020 年, Behnaz Jalalian-Lark 等人[39]通过电沉积法制备了 In 掺杂的 SnSe 薄膜,提高了 SnSe 薄膜的电导率和载流子浓度,从而增强了太阳能电池的效率。2022 年, Raju Nandi 等人[40]采用气相传输沉积法制备 α -SnSe 薄膜,成功实现 2.51% 的电池效率,进一步验证了 SnSe 薄膜在太阳能电池中的潜力。

在多种类型的太阳能电池中, SnSe 是一种具有窄带隙的 IV-VI p 型半导体[41]。SnSe 薄膜太阳能电池具有优异的光吸收性能,在较薄的材料层上也能有效吸收光子,这使得 SnSe 薄膜太阳能电池可以使用更薄的吸光层,从而降低材料消耗和成本。SnSe 的带隙大约在 1.0~1.3 eV, 接近理想的光电转换带隙范围(约 1.34 eV),使其具备更高的光电转换潜力[42]。SnSe 薄膜因其丰富的元素资源、低毒性[43]、稳定性及可调带隙特性,正逐渐成为太阳能电池领域的研究热点。

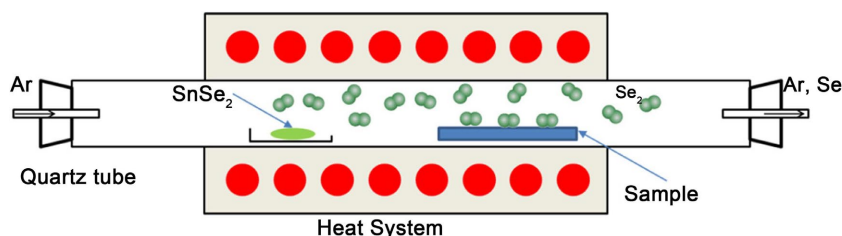


Figure 4. Schematic diagram of SnSe₂ powder generation device [36]

图 4. SnSe₂ 粉末生成装置原理图[36]

4.2. 光电探测器领域

随着科技的迅速发展,光电探测器在智能驾驶、智能家居、AI 机器人和人脸识别等领域发挥着关键作用。它能够将光信号转换为电信号,广泛应用于光通信、生物医学、激光雷达、军事和环境监测等[44]。

光电探测器的性能依赖于响应度、响应速度和探测范围，科研人员不断尝试新材料和新结构以提升其性能。例如，纳米材料提高了灵敏度和响应速度[45]；基于量子点的光电探测器扩大了光谱响应范围并提升了量子效率[46]；而超导材料制成的光电探测器则同时具备高灵敏度和快速响应能力[46]。此外，各种新型结构的光电探测器也不断涌现，如基于干涉效应的光学干涉型探测器[47]、利用超材料表面增强效应的超表面光电探测器[47]，以及通过微纳加工技术实现的高精度光电探测器[48]。SnSe 作为第 IV 主族金属硫化物，因其窄带隙结构、优异的热电性能及高载流子迁移率。如图 5，用制备的 SnSe 薄膜去构筑光电导器件[49]。

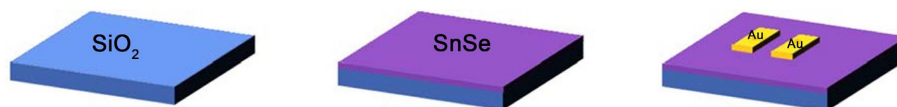


Figure 5. Process diagram for preparing photoconductive devices [49]

图 5. 光电导器件制备流程图[49]

近年来，SnSe 薄膜在光电探测器领域的研究取得了显著进展。2021 年，Manoj Kumar 等人[50]通过热蒸发技术在钠钙玻璃基板上沉积 SnSe 薄膜，研究发现该薄膜在近红外(1064 nm)和可见光(532 nm)区域具有快速响应和恢复时间，分别为 5/28 毫秒和 9/34 毫秒。然而，电子-空穴复合限制了器件的响应度，这为提高光电探测器性能指明了方向。2023 年，Pargam Vashishtha 等人[51]采用热生长法制备 SnSe 薄膜，成功开发出具有高响应性、空气稳定性和自供电能力的宽带光电探测器。该探测器在自供电模式下对红外和可见光的响应性表现优异，并在测试过程中展现出低噪声等效功率和稳定性，为光电探测器在成像、传感、通信和能量收集等领域的应用提供了新的前景。

总结来看，SnSe 薄膜在光电探测器领域的研究主要集中在提高响应速度、增强稳定性和降低噪声等方面。通过不同的制备技术(如热蒸发和热生长法)，研究者取得了在可见光和红外光区域的高响应性，并探索了自供电和稳定性等新型光电探测器的应用潜力。这些研究成果为 SnSe 基光电探测器在实际应用中的优化和发展提供了重要参考。

5. 总结与展望

本文综述了 SnSe 薄膜的光电特性及研究进展，介绍了三种常用的制备技术(化学气相沉积法、磁控溅射法和 IA-EBE)及其在太阳能电池和光电探测器中的应用。SnSe 薄膜因其优异的光吸收系数和带隙调节性，在光电探测器领域具有显著潜力，且在光伏应用中理论上具备较高的光电转换效率。然而，制备过程中常出现晶格错配、表面粗糙等缺陷，影响光电性能。科研人员正通过优化制备工艺、选择合适衬底材料、调节温度与沉积速率等方式提高薄膜质量，减少缺陷，推动其在能源和光伏领域的应用。

基金项目

海南师范大学 2023 年度“大学生创新训练计划”项目(202311658033)、海南师范大学 2024 年“大学生创新训练计划”项目(X11658061, X11658199)和国家自然科学基金项目(62174046, 62064004, 61964007, 61864002)。

参考文献

- [1] Sutrisno, H.A. and Prasetyawati, R. (2017) Crystal Structure, Optical, and Electrical Properties of SnSe and SnS Semiconductor Thin Films Prepared by Vacuum Evaporation Techniques for Solar Cell Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **202**, Article 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/202/1/012042>

- [2] El-Menyawy, E.M., Azab, A.A., El-Khalawany, L.M., Okasha, N. and Terra, F.S. (2018) Influence of Annealing Temperatures on the Structural, Optical and Electrical Properties of SnSe Films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **29**, 8354-8363. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8846-1>
- [3] Pallavolu, M.R., Minnam Reddy, V.R., Guddeti, P.R. and Park, C. (2019) Development of SnSe Thin Films through Selenization of Sputtered Sn-Metal Films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **30**, 15980-15988. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01968-9>
- [4] Mandal, P., Show, B., Ahmed, S.T., Banerjee, D. and Mondal, A. (2020) Visible-Light Active Electrochemically Deposited Tin Selenide Thin Films: Synthesis, Characterization and Photocatalytic Activity. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **31**, 4708-4718. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03027-0>
- [5] Tyagi, S., Yadav, S., Wani, V., Singh, S., Biswas, S., Prajapati, K.N., *et al.* (2022) CVD Growth of Tin Selenide Thin Films for Optoelectronic Applications. 2022 *IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, Mumbai, 1-3 July 2022, 1-6. <https://doi.org/10.1109/tensymp54529.2022.9864375>
- [6] Sarkar, P., Nisha, Kumar, P. and Katiyar, R.S. (2023) The Role of Vast Off-Stoichiometry of SnSe Thin Film on Structural, Morphological, Optical, and Electrical Properties for Photovoltaic Applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **34**, Article No. 1372. <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10805-z>
- [7] Sarkar, P. and Nisha, (2024) Substitution of an Isovalent Te-Ion in SnSe Thin Films for Tuning Optoelectrical Properties. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, **194**, Article 112226. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2024.112226>
- [8] 郝润豹. SnSe 薄膜制备及其光电性质研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [9] 宋波, 韩杰才, 郝润豹, 等. 铁电极化调控 SnSe 薄膜光电性质研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(11): 1-6.
- [10] Wang, W., Zheng, Z., Li, F., Li, C., Fan, P., Luo, J., *et al.* (2018) Synthesis Process and Thermoelectric Properties of N-Type Tin Selenide Thin Films. *Journal of Alloys and Compounds*, **763**, 960-965. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.021>
- [11] Li, Z., Guo, Y., Zhao, F., Nie, C., Li, H., Shi, J., *et al.* (2020) Effect of Film Thickness and Evaporation Rate on Co-Evaporated SnSe Thin Films for Photovoltaic Applications. *RSC Advances*, **10**, 16749-16755. <https://doi.org/10.1039/d0ra01749c>
- [12] 崔树松, 沈鸿烈, 李树兵, 江耀华, 刘睿, 孙李鸿. SnSe 薄膜的两步法制备与光电性能研究[J]. 半导体光电, 2020, 41(3): 374-378.
- [13] 崔岩, 乔吉祥, 赵洋, 等. 磁控溅射沉积制备 SnSe 薄膜及其热电性能研究[J]. 功能材料, 2021, 52(4): 4012-4017.
- [14] 叶斌, 游冠军. SnSe₂ 薄膜的载流子与声子动力学研究[J]. 光学仪器, 2022, 44(6): 44-51.
- [15] 赵康, 张权辉, 陈上峰, 等. SnSe 掺杂 SnS 薄膜的制备及热电性能研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2024, 43(6): 61-66.
- [16] 南亚新, 坚佳莹, 董芑凡, 等. SnS₂ 的化学气相沉积法制备及光电特性[J]. 西安工业大学学报, 2023, 43(3): 268-276.
- [17] Yoon, Y., Lee, J., Lee, S., Kim, S. and Choi, H.C. (2021) Ultrasoother Organic Films via Efficient Aggregation Suppression by a Low-Vacuum Physical Vapor Deposition. *Materials*, **14**, Article 7247. <https://doi.org/10.3390/ma14237247>
- [18] Roitman, A., Pfaff, C., Hauet, T., Shaulov, A. and Yeshurun, Y. (2024) Microwave Kinetic Inductance Detector Made of Molecular Beam Epitaxy (MBE)-Grown MgB₂ Film. *Nanomaterials*, **14**, Article 1731. <https://doi.org/10.3390/nano14211731>
- [19] 潘明奥. 溶液法制备大面积钙钛矿太阳能电池吸光层薄膜[J/OL]. 石油化工, 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2361.TQ.20241202.1443.030.html>, 2024-12-14.
- [20] 李浩, 付志兵, 王红斌, 等. 铜基底上双层至多层石墨烯常压化学气相沉积法制备与机理探讨[J]. 物理学报, 2017, 66(5): 307-312.
- [21] Marques, V.E.C., Manfro, L.A., Vieira, A.A., de Jesús Pereira, A.L., das Chagas Marques, F. and Vieira, L. (2023) Crystalline Structure, Morphology, and Adherence of Thick TiO₂ Films Grown on 304 and 316L Stainless Steels by Atomic Layer Deposition. *Coatings*, **13**, Article 757. <https://doi.org/10.3390/coatings13040757>
- [22] Kozyrev, A.A. and Lebedev, A.D. (2019) Effect of the Amount of Argon in an Oxygen Ion Beam on the Optical Characteristics of Titanium Dioxide Films Obtained via Ion-Assisted Electron Beam Evaporation. *Journal of Optical Technology*, **86**, 666-670. <https://doi.org/10.1364/jot.86.000666>
- [23] 郑皓天, 张立建, 陈超, 等. 脉冲激光沉积法制备 Sb₂S₃ 薄膜太阳能电池[J]. 中国科学技术大学学报, 2020, 50(6): 733-737.
- [24] 夏丰田, 王东博, 曹伽牧, 等. 基于磁控溅射法制备的大面积高质量硒化铂薄膜及其在红外探测中的应用(英文)[J]. *Science China (Materials)*, 2024, 67(7): 2293-2301.

- [25] Boscher, N.D., Carmalt, C.J., Palgrave, R.G. and Parkin, I.P. (2008) Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition of SnSe and SnSe₂ Thin Films on Glass. *Thin Solid Films*, **516**, 4750-4757. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.08.100>
- [26] Feng, Y., Zhang, X., Lei, L., Nie, Y. and Xiang, G. (2020) Rapid Synthesis of Thermoelectric SnSe Thin Films by MPCVD. *RSC Advances*, **10**, 11990-11993. <https://doi.org/10.1039/d0ra01203c>
- [27] An, B., Ma, Y., Zhang, G., You, C. and Zhang, Y. (2020) Controlled Synthesis of Few-Layer SnSe₂ by Chemical Vapor Deposition. *RSC Advances*, **10**, 42157-42163. <https://doi.org/10.1039/d0ra08360g>
- [28] Insawang, M., Ruamruk, S., Vora-ud, A., Singsoog, K., Inthachai, S., Chaarmart, K., *et al.* (2024) Investigation on Thermoelectric Properties of SnSe Thin Films as Prepared by RF Magnetron Sputtering. *Radiation Physics and Chemistry*, **222**, Article 111789. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111789>
- [29] Minnam Reddy, V.R., Lindwall, G., Pejjai, B., Gedi, S., Kotte, T.R.R., Sugiyama, M., *et al.* (2018) A-SnSe Thin Film Solar Cells Produced by Selenization of Magnetron Sputtered Tin Precursors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **176**, 251-258. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.12.003>
- [30] Mars, K., Sałęga-Starzecki, M., Zawadzka, K.M. and Godlewska, E. (2024) Influence of Sputtering Power on the Properties of Magnetron Sputtered Tin Selenide Films. *Materials*, **17**, Article 3132. <https://doi.org/10.3390/ma17133132>
- [31] 刘文成, 刘冬梅, 付秀华, 等. 射频离子辅助沉积对 ITO 薄膜光电性能的影响[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(5): 83-88.
- [32] 李晓雪, 黄玲程, 郝永芹. 离子束辅助电子束蒸发 H4 膜工艺及其抗激光损伤特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 391-396.
- [33] 陈星琳, 刘金华, 卢兵, 等. 电气自动化技术在太阳能发电中的应用[J]. 中国科技信息, 2024(24): 45-47.
- [34] Nair, M.T.S., Barrios-Salgado, E., García, A.R., Aragón-Silva, M.R., Campos, J. and Nair, P.K. (2011) Chemically Deposited Tin Chalcogenides as Absorbers in Thin Film Solar Cells. *ECS Transactions*, **41**, 177-183. <https://doi.org/10.1149/1.3628623>
- [35] Barrios-Salgado, E., Rodríguez-Guadarrama, L.A., Ramón García, M.L., Martínez, L.G., Nair, M.T.S. and Nair, P.K. (2017) Thin Film Solar Cells of Cubic Structured SnS-SnSe. *Physica Status Solidi (a)*, **214**, Article 1700036. <https://doi.org/10.1002/pssa.201700036>
- [36] Yan, Y., Guo, T., Song, X., Yu, Z., Jiang, Y. and Xia, C. (2017) Cu(In,Ga)Se₂ Thin Films Annealed with SnSe₂ for Solar Cell Absorber Fabricated by Magnetron Sputtering. *Solar Energy*, **155**, 601-607. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.068>
- [37] Razykov, T.M., Boltaev, G.S., Bosio, A., Ergashev, B., Kouchkarov, K.M., Mamarasulov, N.K., *et al.* (2018) Characterisation of SnSe Thin Films Fabricated by Chemical Molecular Beam Deposition for Use in Thin Film Solar Cells. *Solar Energy*, **159**, 834-840. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.053>
- [38] Jamali-Sheini, F., Cheraghizade, M. and Yousefi, R. (2018) Electrochemically Synthesis and Optoelectronic Properties of Pb- and Zn-Doped Nanostructured SnSe Films. *Applied Surface Science*, **443**, 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.03.011>
- [39] Jalalian-Larki, B., Jamali-Sheini, F. and Yousefi, R. (2020) Electrodeposition of In-Doped SnSe Nanoparticles Films: Correlation of Physical Characteristics with Solar Cell Performance. *Solid State Sciences*, **108**, Article 106388. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2020.106388>
- [40] Nandi, R., Pawar, P.S., Neerugatti, K.E., Cho, J.Y., Kim, S., Cho, S.H., *et al.* (2021) Vapor-Transport-Deposited Orthorhombic-SnSe Thin Films: A Potential Cost-Effective Absorber Material for Solar-Cell Applications. *Solar RRL*, **6**, Article 2100676. <https://doi.org/10.1002/solr.202100676>
- [41] Ling, L., Zhang, Q., Zhu, L., Wang, C. and Chen, S. (2015) Interfacial Synthesis of SnSe Quantum Dots for Sensitized Solar Cells. *RSC Advances*, **5**, 2155-2158. <https://doi.org/10.1039/c4ra10392k>
- [42] Abd El-Rahman, K.F., Darwish, A.A.A. and El-Shazly, E.A.A. (2014) Electrical and Photovoltaic Properties of SnSe/Si Heterojunction. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **25**, 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2013.10.003>
- [43] Franzman, M.A., Schlenker, C.W., Thompson, M.E. and Brutchey, R.L. (2010) Solution-Phase Synthesis of SnSe Nanocrystals for Use in Solar Cells. *Journal of the American Chemical Society*, **132**, 4060-4061. <https://doi.org/10.1021/ja100249m>
- [44] Ezhilmaran, B., Patra, A., Benny, S., M. R., S., V. V., A., Bhat, S.V., *et al.* (2021) Recent Developments in the Photodetector Applications of Schottky Diodes Based on 2D Materials. *Journal of Materials Chemistry C*, **9**, 6122-6150. <https://doi.org/10.1039/d1tc00949d>
- [45] Fang, J., Zhou, Z., Xiao, M., *et al.* (2020) Recent Advances in Low-Dimensional Semiconductor Nanomaterials and Their Applications in High-Performance Photodetectors. *InfoMat*, **2**, 291-317. <https://doi.org/10.1002/inf2.12067>

-
- [46] Barve, A.V., Lee, S.J., Noh, S.K. and Krishna, S. (2009) Review of Current Progress in Quantum Dot Infrared Photodetectors. *Laser & Photonics Reviews*, **4**, 738-750. <https://doi.org/10.1002/lpor.200900031>
- [47] Torrieri, D., Cheng, S. and Valenti, M.C. (2007) Robust Frequency-Hopping System for Channels with Interference and Frequency-Selective Fading. 2007 *IEEE International Conference on Communications*, Glasgow, 24-28 June 2007, 4481-4487. <https://doi.org/10.1109/icc.2007.740>
- [48] Li, Y. and Hong, M. (2020) Parallel Laser Micro/Nano-Processing for Functional Device Fabrication. *Laser & Photonics Reviews*, **14**, Article 1900062. <https://doi.org/10.1002/lpor.201900062>
- [49] Li, X., Chen, C., Yang, Y., Lei, Z. and Xu, H. (2020) 2D Re-Based Transition Metal Chalcogenides: Progress, Challenges, and Opportunities. *Advanced Science*, **7**, Article 2002320. <https://doi.org/10.1002/advs.202002320>
- [50] Kumar, M., Rani, S., Vashistha, P., Pandey, A., Gupta, G., Husale, S., *et al.* (2021) Low Bias Operated, Fast Response SnSe Thin Film Vis-Nir Photodetector on Glass Substrate Using One-Step Thermal Evaporation Technique. *Journal of Alloys and Compounds*, **879**, Article 160370. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160370>
- [51] Vashishtha, P., Goswami, P., Prajapat, P., Kumar Gangwar, A., Singh, P. and Gupta, G. (2023) Highly Efficient, Self-Powered, and Air-Stable Broadband Photodetector Based on SnSe Thin Film. *Materials Science and Engineering: B*, **297**, Article 116808. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116808>