

文章编号: 1672-8785(2025)06-0015-09

In 掺杂 CdSe 中红外透明导电薄膜 温度特性研究

苏雷生[#] 薛奔驰[#] 邱继军^{*}

(大连理工大学集成电路学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 在红外透明导电薄膜研究领域, 缓解高透光率与低电阻率之间的矛盾是一个重大的科学挑战。采用分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)技术研究了生长温度对铟掺杂硒化镉(CdSe:In)薄膜电学性能的影响, 制备出兼具 $204 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 高迁移率以及 $6.95 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ 低电阻率的透明导电薄膜。该薄膜在 $1 \sim 4 \mu\text{m}$ 波段表现出大于 87% 的高透光率。温变特性研究结果表明, 薄膜电导率存在三个温度区间, 它们是根据载流子传输机制的转变而区分的。与已报道的其他中红外透明导电薄膜对比后可知, CdSe:In 薄膜在载流子迁移率及透光率方面展现了明显的优势。本研究为 CdSe:In 薄膜在中红外探测器中的应用奠定了实验与理论基础。

关键词: 铟掺杂硒化镉; 分子束外延; 红外透明导电膜; 载流子传输机制

中图分类号: TN21; O484 **文献标志码:** A

DOI: 11.3969/j.issn.1672-8785.2025.06.003

Study on Temperature Characteristics of In-Doped CdSe Mid-Infrared Transparent Conductive Film

SU Lei-sheng[#], XUE Ben-chi[#], QIU Ji-jun^{*}

(School of Integrated Circuits, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In the research field of infrared transparent conductive films, alleviating the contradiction between high transmittance and low resistivity is a major scientific challenge. The molecular beam epitaxy (MBE) technique is used to study the effect of growth temperature on the electrical properties of indium-doped cadmium selenide (CdSe:In) films, and a transparent conductive film with a high mobility of $204 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ and a low resistivity of $6.95 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ is prepared. The film exhibits a high transmittance of more than 87% in the $1 \sim 4 \mu\text{m}$ waveband. The results of the temperature-dependent characteristics study show that there are three temperature ranges for the conductivity of the film, which are distinguished by the transition of the carrier transportation mechanism. Compared with other reported mid-infrared transparent conductive films, it can be

收稿日期: 2025-03-21

[#]第一作者: 苏雷生(1993-), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事 IV-VI 族铅盐红外探测器结构设计及相关材料研究; 薛奔驰(2000-), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要从事红外透明导电薄膜的生长与性能研究。

^{*}通讯作者: E-mail: jjqiu@dlut.edu.com

seen that the CdSe:In film shows obvious advantages in carrier mobility and transmittance. This study lays an experimental and theoretical foundation for the application of CdSe:In films in mid-infrared detectors.

Key words: indium-doped cadmium selenide; molecular beam epitaxy; infrared transparent conductive film; carrier transportation mechanism

0 引言

红外透明导电薄膜在红外波长范围内具有优异的透光性和导电性,在红外探测器中具有重要的应用价值。首先,作为导电电极材料,红外透明导电薄膜直接与红外焦平面器件集成,需要其具备高导电性以提高器件探测能力^[1]。其次,作为探测器窗口材料,它需具备高红外透过率,以便接收红外辐射,同时要有良好的稳定性^[2]。因此,开发高性能宽波段红外透明导电薄膜对未来红外成像系统的发展具有非常重要的意义。

目前最常见的红外透明导电薄膜为透明导电氧化物(Transparent Conductive Oxide, TCO),根据掺杂类型可以分为 N 型与 P 型两种。其中, N 型薄膜主要包括锡掺杂氧化铟、氟掺杂氧化锡等材料^[3-4],其在可见光和近红外波段具有高透射率;然而当波长大于 2 μm 时,其透射率急剧下降,限制了 TCO 在中波和长波红外波段的应用^[5]。P 型薄膜主要包括 CuAlO₂、LaCuOS 等材料^[6-7],其中长波红外波段具有高透射率。然而多数 P 型薄膜的迁移率(小于 3 cm²·V⁻¹·s⁻¹)和导电性并不理想,同时在大多数情况下其需要高温退火和后处理而不适用于红外探测系统^[8]。此外, P 型薄膜通常都是多元化合物,导致其化学性质不稳定且制备条件苛刻。

现有材料体系难以兼顾宽光谱、高透光性以及高导电性的根本原因在于等离子共振效应:

$$\omega_p = (n_e e^2 / m^* \epsilon_0)^{1/2} = 2\pi c_0 / \lambda_p \quad (1)$$

式中, ω_p 为等离子共振频率; n_e 为载流子浓度; m^* 为有效质量; e 为电子电荷; c_0 为真空光速; ϵ_0 为真空介电常数; λ_p 为等离子共振波长^[9-12]。可以看出, λ_p 随着 n_e 的增大而减

小,导致截止峰产生蓝移。

因此,为了得到宽光谱、高透光性的薄膜材料,载流子浓度不能过高。同时,根据电导率 σ 与载流子浓度 n 、迁移率 μ 的关系 $\sigma = nq\mu$,可以看出高电导率需要兼顾载流子浓度和迁移率的大小。综上所述,研发新的材料体系需要兼具较低的载流子浓度以及较高的迁移率。这样才能兼顾宽红外光谱、高透光性以及高导电性。

本文利用 MBE 技术制备出一种 CdSe:In 中红外透明导电薄膜,并通过研究生长温度与光电特性之间的物理关联,进一步提升 CdSe:In 红外透明导电薄膜的光电性能。同时,通过测试薄膜在不同温度下的性能参数,我们还研究了薄膜电学性能在不同工作温度(25~297 K)下的温变规律。与已报道的其他中红外透明导电薄膜对比后可知,这种 CdSe:In 薄膜在载流子迁移率和透光性方面展现了明显的优势,具有优异的导电性及中红外透光率。

1 实验步骤

1.1 材料生长

本文采用 MBE 技术在石英玻璃等红外透明衬底上沉积 CdSe:In 薄膜。在薄膜生长前,需要使用异丙醇、无水乙醇、去离子水分别对衬底进行超声清洗,然后用高纯氮气进行干燥处理。实验所用的源材料为高纯硒化镉、铟、硒,其纯度均高于 99.999%。通过控制铟与硒化镉的束流比来改变掺杂浓度,并将生长温度控制在 25~350 °C。由于生长过程中 Se 蒸气压较低,因此额外使用了 Se 源来保证薄膜质量。

1.2 材料表征

采用 X 射线光电子能谱仪(X-ray Photoe-

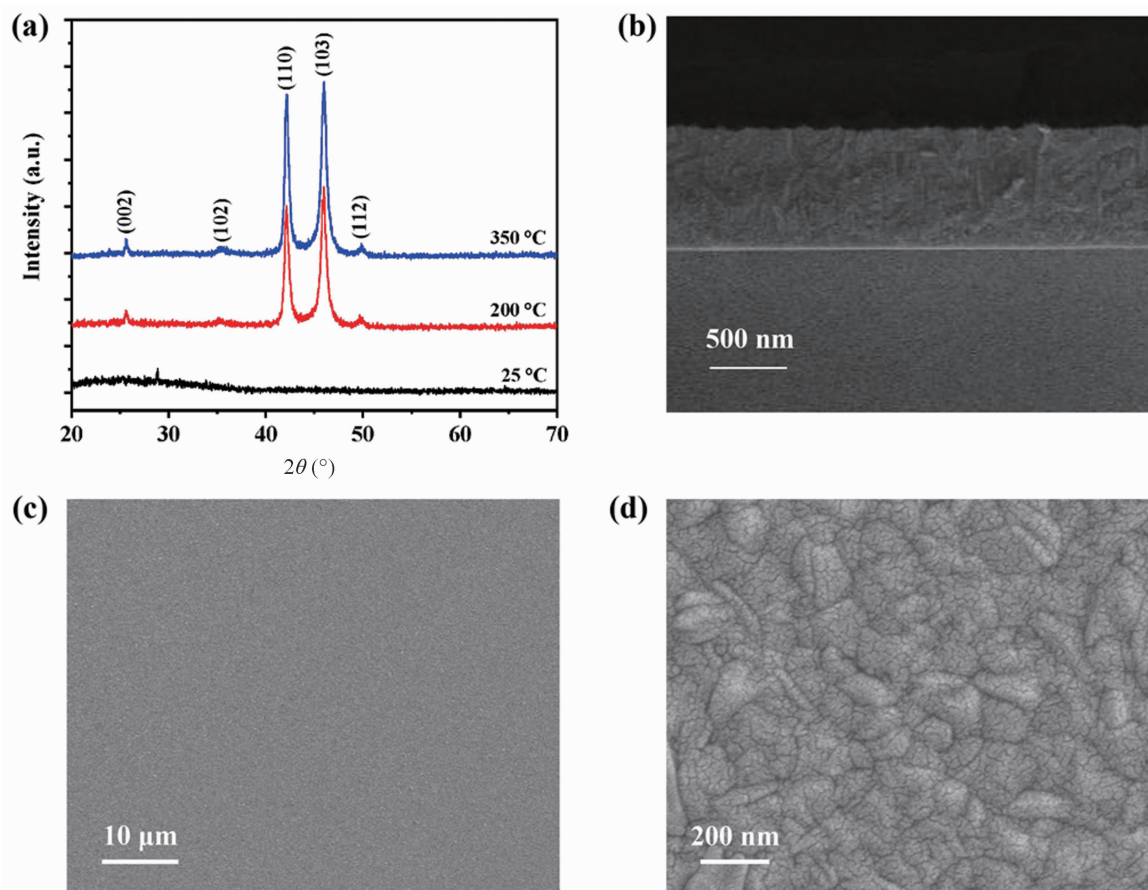


图 1 (a)不同温度下生长的 CdSe:In 薄膜的 XRD 图像; (b) 200 °C 下生长的 CdSe:In 薄膜的截面 SEM 图; (c)~(d) 200 °C 下生长的 CdSe:In 薄膜的表面 SEM 图(不同放大倍数)

electron Spectrometer, XPS)对样品元素组成和价态进行测试,采用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)测试了样品的微观形貌,采用 X 射线衍射仪(X-Ray Diffractometer, XRD)测试了薄膜的晶体结构,采用傅里叶变换红外(Fourier Transform Infrared, FT-IR)光谱仪测试了样品的红外透射光谱,采用霍尔效应测试系统测试了样品在不同工作温度下的载流子浓度、载流子迁移率、电导率等电学参数。

2 结果与讨论

2.1 生长温度对薄膜性能的影响

2.1.1 生长温度对薄膜晶体结构及形貌的影响

图 1(a)展示了不同生长温度下 CdSe:In 薄膜的 XRD 图谱。可以看出,当生长温度为 25 °C 时,所得到的薄膜没有明显的特征峰,说明该温度下薄膜为无定形态或者结晶度较

差。随着生长温度的升高,在 200 °C 时,样品开始出现多个衍射峰。峰值位置分别为 25.3°、35.1°、42.1°、45.9°和 49.8°,分别对应于 CdSe 纤锌矿结构的(002)、(102)、(110)、(103)和(112)晶面^[13],表明这些薄膜具有多晶性质,且朝着(110)和(103)面取向生长。随着温度继续升高到 350 °C,衍射峰强度增加,表明薄膜结晶度提高。此外,未发现 In、InSe 或 In₂Se₃ 等杂质的特征峰,说明 In 元素成功掺入 CdSe 晶格内部,而非 In₂Se₃ 晶体等杂质存在。图 1(b)为 200 °C 下薄膜的截面 SEM 图。可以看出,薄膜厚度在 800 nm 左右,厚度均匀且表面平整。图 1(c)和图 1(d)展示了 200 °C 下薄膜的表面 SEM 图。可以看出,薄膜是由一定大小的晶体颗粒组成,颗粒均匀且无明显裂纹和明显缺失,这有助于薄膜在红外探测器及钝化层等领域的应用。

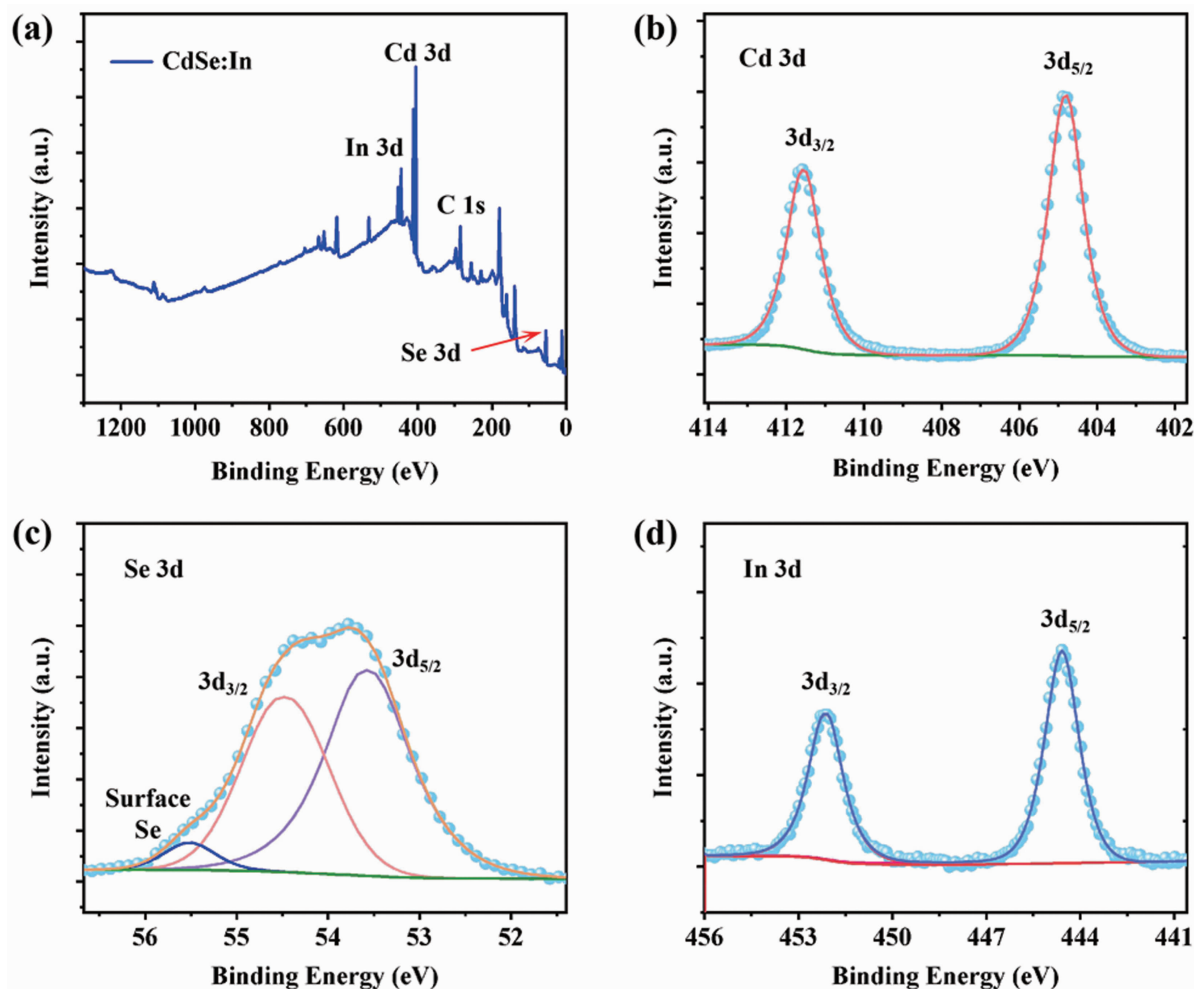


图 2 在 200 °C 温度下生长得到的 CdSe:In 薄膜的 XPS 谱: (a) XPS 全谱; (b) Cd 3d 谱; (c) Se 3d 谱; (d) In 3d 谱

2.1.2 CdSe:In 的化学元素分析

通过 XPS 分析了 CdSe:In 薄膜中元素的组成和价态, 如图 2 所示。所有光谱的结合能都用 C 1s 校准。图 2(b)、图 2(c)和图 2(d)分别显示了 CdSe:In 薄膜的 Cd 3d、Se 3d 和 In 3d 的高斯分布拟合光谱。从图 2(b)的 Cd 3d 光谱中观察到 404.8 eV(Cd 3d_{5/2})和 411.6 eV(Cd 3d_{3/2})这两个不同的特征峰。根据之前的研究可知, Cd 以 Cd²⁺形式存在^[14]。图 2(c)显示了高斯拟合的 Se 3d 光谱。可以看出, 两个相邻的强特征峰为 53.6 eV 和 54.4 eV, 分别对应于 Se 3d_{5/2}峰和 Se 3d_{3/2}峰。与 NIST XPS 数据库对比, 硒的价态可以确定为 -2 价^[15]。此外, 通过拟合分析, 在 55.5 eV 位置上也有一个小的特征峰。根据 XPS 数据库发现它代表

了与表面硒原子相关的能级^[16-17]。这是因为在薄膜生长过程中使用了额外的硒单质源, 导致 CdSe:In 薄膜表面存在微量的硒残留。同时, 还从薄膜中测量了 In 元素。如图 2(d)所示, 在 444.6 eV 和 452.1 eV 处有两个不同的特征峰, 分别代表 In 3d_{5/2}峰和 In 3d_{3/2}峰。这表明 In 元素主要由 In³⁺形式存在^[18], 证实 In 离子成功掺杂到 CdSe 晶格中, 而不是简单地附着在 CdSe 薄膜内部及表面, 与前面的 XRD 分析一致。

2.1.3 生长温度对薄膜电学性能的影响

图 3 展示了不同生长温度下薄膜的电学性能变化。结果表明, 所有薄膜都是 n 型掺杂半导体。可以发现, 当薄膜生长温度为 25 °C 时, 薄膜的电导率和电阻率分别为 5.6×10^3 S/m

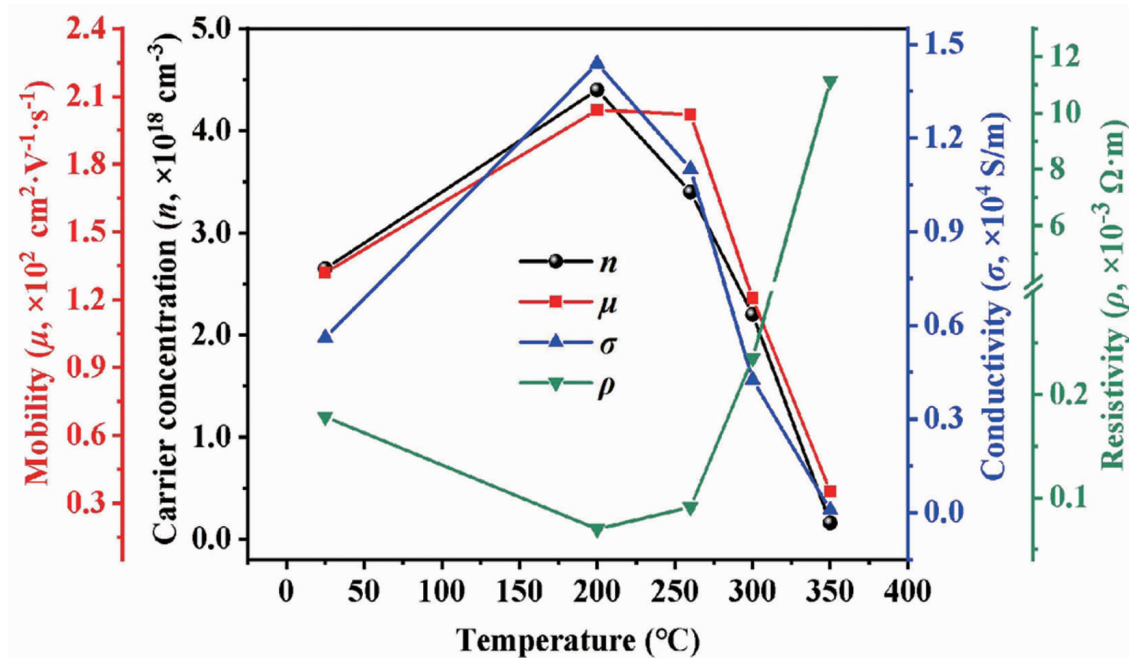


图 3 生长温度对 CdSe:In 薄膜电学性能的影响

和 $1.78 \times 10^{-4} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 。如图 1 中的 XRD 图所示, 较高的电阻是由于在较低生长温度下结晶度较差造成的。

随着生长温度的升高, 薄膜的载流子浓度与载流子迁移率都是先上升后下降, 在 200°C 下达到最大值。这是由于当生长温度从 25°C 升至 200°C 时, 在较高温度下有助于 In 原子成功掺入 CdSe 薄膜内部而提供更多的自由电子。同时更高的温度有助于材料重结晶, 从而提高薄膜的结晶质量, 降低薄膜缺陷, 导致电荷载流子的晶界散射下降。以上综合作用造成载流子浓度与载流子迁移率的增加, 最终导致电导率和电阻率也在此刻达到最优值, 分别为 $1.438 \times 10^4 \text{ S/m}$ 和 $6.95 \times 10^{-5} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 。

随着生长温度继续升高, 薄膜的载流子浓度和载流子迁移率都开始急剧下降, 电导率也降低。这是由于过高温下硒元素过量流失, 同时也与过高温下晶体发生团聚导致的晶粒间散射有关。

2.1.4 最优条件下 CdSe:In 薄膜的光学特性

使用 FTIR 光谱仪测试了最优电学性能下 CdSe:In 薄膜在 $1.2 \sim 5.0 \text{ } \mu\text{m}$ 波长范围内的透射光谱, 如图 4 所示。可以看出, 薄膜在近红

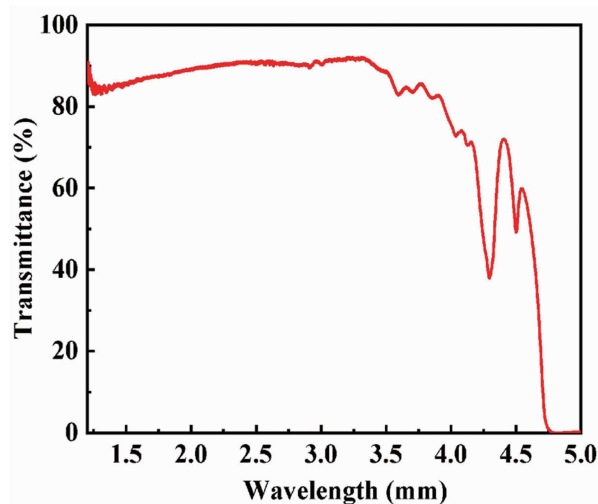


图 4 最优条件下 CdSe:In 薄膜样品的透射光谱

外-中红外波长范围($1 \sim 4 \text{ } \mu\text{m}$)内的平均透光率超过 87%。 $4 \sim 4.5 \text{ } \mu\text{m}$ 波长处的明显特征吸收峰由石英衬底的光学性质决定, 与 CdSe:In 薄膜的特性无关。该结果表明 CdSe:In 薄膜不仅具有优异的导电性能, 而且在中红外波段具有良好的透光率。

2.2 最优条件下 CdSe:In 薄膜的温变特性

图 5(a)展示了最优条件下生长的 CdSe:In 薄膜的电导率随环境温度的变化曲线。电导率随环境温度的变化是由载流子传输机制的转变而加以区分的, 其本质是载流子从价带的子带

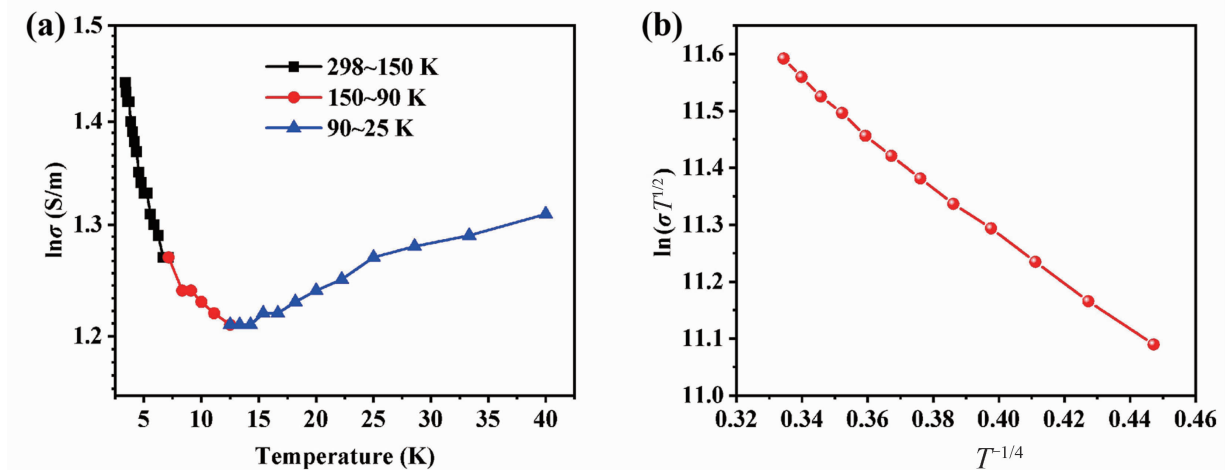


图 5 (a)最优条件下 CdSe:In 薄膜在 25~298 K 温度范围内的 $\ln\sigma$ 与 $1000/T$ 关系曲线;
(b)在 25~80 K 温度范围内的 $\ln(\sigma T^{1/2})$ 与 $T^{-1/4}$ 关系曲线

表 1 几种中红外透明导电薄膜的性能对比

材料	波长范围/ μm	透光率	迁移率/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	电阻率/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	载流子浓度/ cm^{-3}	参考文献
LaCuOS	2~5	>35%	0.2588	7.315×10^{-5}	3.296×10^{21}	[5]
$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$	3~5	60.81%	20	6.24×10^{-6}	4.99×10^{20}	[24]
InHfO	1.35~4	48.6%	>5	$\sim 2.0 \times 10^{-5}$	$> 5.0 \times 10^{20}$	[1]
ZnO:Hf	3~5	83.87%	13.4	1.66×10^{-4}	2.82×10^{19}	[25]
Bi_2Te_3	1~5	80%	27.4	1.448×10^{-5}	1.573×10^{20}	[26]
$\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Ru}$	2.5~5	>30%	/	3.36×10^{-5}	/	[27]
LaSe_2	1.5~3.5	>60%	~ 2	2.71×10^{-3}	1.18×10^{19}	[28]
$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$	2~3.5	<40%	40	1.8×10^{-6}	8.7×10^{20}	[29]
CdSe:In	1~4	>87%	204	6.95×10^{-5}	4.4×10^{18}	本文

向导带的跃迁。从图中可以发现曲线主要分为三个部分：当温度高于 150 K 时，其斜率是近似于线性变化的；在 90~150 K 时，斜率开始变为明显的非线性变化；当温度低于 90 K 时，电导率随温度的变化范围极小。这与 Pathinetam P D 等人的实验现象基本一致^[19]。较高温度下电导率随温度的变化可由式(2)表示^[20]：

$$\sigma = \sigma_1 \exp\left(-\frac{\Delta E_1}{kT}\right) + \sigma_2 \exp\left(-\frac{\Delta E_2}{kT}\right) \quad (2)$$

式中， σ_1 与 σ_2 代表前指数因子； ΔE_1 与 ΔE_2 代表激发所需能量； k 代表玻尔兹曼常数； T 代表温度(单位为 K)。

当温度高于 150 K 时，载流子从价带被激发到导带，造成电导率的变化(被视为本征区

间)。因此在该温度区间内，载流子的漂移和热激发是主要的导电途径。

当温度为 90~150 K 时，电导率的变化主要是由于钢的掺杂导致费米能级 E_F 周围局域态的存在，使电荷载流子跳跃传导造成的(被视为非本征区间)。

在温度低于 90 K 以后，电导率的变化极小，这是由于低温导致的载流子的冻结效应造成的。从式(2)可以发现，当温度低于 90 K 时，极低的电导率意味着激发所需能量极低。极低的激发能量可能是由载流子的可变范围跳跃 (Variable-Range Hopping, VRH) 传导所致^[19,21-23]。

载流子的 VRH 传导机制可解释为低温环

境中载流子在邻近 E_F 的固定态之间跳跃。载流子的 VRH 传导机制可由式(3)给出^[19]:

$$\sigma T^{1/2} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{T_0}{T}\right)^S \quad (3)$$

式中, σ_0 代表前指数因子。指数 S 的值由跳跃过程的本质决定: 优化跳跃概率并假设在 E_F 附近缓慢变化的状态密度, 若 E_F 的态密度是常数, 则 $S=1/4$ 。 T_0 代表特征温度系数, 由态密度与 E_F 决定^[19]:

$$T_0 = 16a^3/kNE_F \quad (4)$$

式中, a 代表与局部状态相关的波函数 $\exp(-ax)$ 的空间扩展的度量。图 5(b) 显示了低于 90 K 的温度范围内电导率 $\ln(\sigma T^{1/2})$ 与 $T^{-1/4}$ 之间的关系曲线, 能够更清楚地揭示载流子的 VRH 传导机制。从图中可以看出, 其斜率是线性变化的。这与 Mott-VRH 模型高度相符, 证实了样品中载流子的 VRH 传导机制的存在。图中直线的斜率即为特征温度系数的数值。

最后, 为了评估所获得的 CdSe:In 红外透明导电薄膜的性能优势, 我们将其与文献中已报道的几种典型的红外透明导电薄膜进行了对比, 如表 1 所示。可以看出, 本文研究的 CdSe:In 红外透明导电薄膜在载流子迁移率和载流子浓度方面具有明显的优势, 同时透光率和电阻率也能与其他薄膜保持同等的水平。该对比证明了本文所获得的 CdSe:In 红外透明导电薄膜在中红外波段具有优异的电学性能, 有利于其在红外探测器等领域的实际应用。

3 结束语

本文利用 MBE 技术生长出了高性能 CdSe:In 红外透明导电薄膜, 并研究了生长温度对薄膜电学性能的影响。结果表明, 当生长温度为 200 °C 时, 薄膜的综合性能最佳, 电阻率可达 $6.95 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$, 在 $1 \sim 4 \mu\text{m}$ 近红外-中波红外波段表现出大于 87% 的高透光率。CdSe:In 薄膜电学性能的温变规律表明存在三个不同的温度区间, 它们是根据载流子传输机制的转变而区分的。最后, 通过与已报道的其

他红外透明导电薄膜进行对比, 发现 CdSe:In 红外透明导电薄膜保持高透光率和低电阻率的同时, 在载流子迁移率和载流子浓度方面也具有明显的优势。

本文得到的高性能 CdSe:In 红外透明导电薄膜以及对其温变规律的研究为在红外探测器上实际应用打下了坚实的理论基础。后续会将 CdSe:In 透明导电薄膜与 PbSe 中红外探测材料相结合, 研究其在中红外探测器方面的实际应用。

参考文献

- [1] Bi R, Li Y, Wu Y, et al. Visible and infrared transparent conductive films with passive cooling capabilities [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, **132**: 104765.
- [2] Chuai Y, Wang Y, Bai Y. Enhanced conductivity of infrared transparent Bi_2Se_3 thin films as anti-interference coatings for infrared detectors [J]. *Optical Materials*, 2023, **140**: 113804.
- [3] Reed P J, Mehrabi H, Schichtl Z G, et al. Enhanced electrochemical stability of TiO_2 -protected, Al-doped ZnO transparent conducting oxide synthesized by atomic layer deposition [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, **10** (50): 43691-43698.
- [4] Liu Y, Peng Q, Zhou Z, et al. Effects of substrate temperature on properties of transparent conductive Ta-doped TiO_2 films deposited by radio-frequency magnetron sputtering [J]. *Chinese Physics Letters*, 2018, **35**(4): 48101.
- [5] Gao G, Li K, Yang L, et al. $1.37 \times 10^2 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ p-type conductivity LaCuOS films with a very wide optical transparency window of 400-6000 nm [J]. *Materials Today Physics*, 2023, **35**: 101089.
- [6] Zhang N, Shi D, Liu X, et al. High performance p-type transparent LaCuOS thin film fabricated through a hydrogen-free method [J]. *Applied Materials Today*, 2018, **13**: 15-23.
- [7] Sun Z, Jiang X, Li J, et al. Effect of Al components on the properties of CuAlO_2 thin films de-

- posited by RF magnetron sputtering [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, **581**: 488–493.
- [8] Azmat Ali M, Khan A, Haider Khan S, et al. First principles study of Cu based delafossite transparent conducting oxides CuXO_2 ($X = \text{Al, Ga, In, B, La, Sc, Y}$) [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015, **38**: 57–66.
- [9] Ramanathan G, Murali K R. Dip coated indium oxide films and their optical constants [J]. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 2020, **21**(5): 513–518.
- [10] Kalkan N. Influence of metallic indium concentration on the properties of indium oxide thin films [J]. *High Temperature Materials and Processes*, 2016, **35**(9): 949–954.
- [11] Devi K R, Meetei S D, Singh S D. Role of Eu^{2+} on the blue-green photoluminescence of In_2O_3 : Eu^{2+} nanocrystals [J]. *Materials Characterization*, 2016, **114**: 197–203.
- [12] Yamada N, Yamada M, Toyama H, et al. High-throughput optimization of near-infrared-transparent Mo-doped In_2O_3 thin films with high conductivity by combined use of atmospheric-pressure mist chemical-vapor deposition and sputtering [J]. *Thin Solid Films*, 2017, **626**: 46–54.
- [13] Santhosh T C M, Bangera K V, Shivakumar G K. Effect of Bi doping on the properties of CdSe thin films for optoelectronic device applications [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2017, **68**: 114–117.
- [14] Liyanage D, Spera D Z, Sarkar R, et al. CdSe/Ag hybrid aerogels: Integration of plasmonic and excitonic properties of metal-semiconductor nanostructures via sol-gel assembly [J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, **2**(9): 2100084.
- [15] Chuai Y, Zhu C, Yue D, et al. Epitaxial growth of Bi_2Se_3 infrared transparent conductive film and heterojunction diode by molecular beam epitaxy [J]. *Frontiers in Chemistry*, 2022, **10**: 1–8.
- [16] Huang M, Li X, Gao Y, et al. Surface stoichiometry manipulation enhances solar hydrogen evolution of CdSe quantum dots [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, **6**(14): 6015–6021.
- [17] Shao E, Liu K, Xie H, et al. New alloy of an Al-chalcogen system; AlSe surface alloys on Al(111) [J]. *ACS Omega*, 2022, **7**(49): 45174–45180.
- [18] Zhao Z, Wang Z, Zhang J, et al. Interfacial chemical bond and oxygen vacancy-enhanced $\text{In}_2\text{O}_3/\text{CdSe}$ -DETA S-scheme heterojunction for photocatalytic CO_2 Conversion [J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, **33**(23): 2214470.
- [19] Pathinettam P D, Marikani A, Murali K R. Influence of thickness and substrate temperature on electrical and photoelectrical properties of vacuum-deposited CdSe thin films [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, **78**(1): 51–58.
- [20] Sharma K, Al-Kabbi A S, Saini G S S, et al. Indium doping induced modification of the structural, optical and electrical properties of nanocrystalline CdSe thin films [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, **564**: 42–48.
- [21] Yellaiah G, Nagabhushanam M. Variable range hopping (VRH) conductivity, ac conductivity and dielectric studies on Sm^{3+} doped $\text{Cd}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{S}$ semiconductor compounds [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2015, **421**: 33–38.
- [22] Errai M, El Kaaouachi A, Idrissi H E. Variable range hopping conduction in n-CdSe samples at very low temperature [J]. *Journal of Semiconductors*, 2015, **36**(12): 14–17.
- [23] Al-Kabbi A S, Sharma K, Saini G S S, et al. Effect of doping on transport properties of nanocrystalline CdSe thin film [J]. *Thin Solid Films*, 2015, **586**: 1–7.
- [24] 吕博凡, 武永梅. 中红外透明导电 ITO 薄膜的制备 [J]. *物联网技术*, 2017, **7**(1): 48–51.
- [25] 赵雯媛, 张梦瑶, 毕然, 等. 掺铅氧化锌红外透明导电薄膜 [J]. *光学学报*, 2021, **41**(20): 224–229.
- [26] 吴易豪, 肖雪华, 毕然, 等. 碲化铋红外透明导电薄膜的制备与光电性能 [J]. *光子学报*, 2023, **52**(10): 157–165.
- [27] Yang L, Han J, Zhu J, et al. Chemical bonding and optoelectrical properties of ruthenium doped yttrium oxide thin films [J]. *Materials Research Bulletin*, 2013, **48**(11): 4486–4490.

- [28] Gao G, Tong L, Yang L, et al. A P-type mid-infrared transparent semiconductor LaSe_2 film with small hole effective mass and high carrier concentration [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, **118** (26): 261602.
- [29] Chen Z, Zhuo Y, Tu W, et al. High mobility indium tin oxide thin film and its application at infrared wavelengths: model and experiment [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(17): 22123–22134.