

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 碲化镉片上集成波导的自相位调制特性研究

龙哲, 杨航, 吴函, 李阳, 梁厚昆

#### 引用本文:

龙哲, 杨航, 吴函, 等. 碲化镉片上集成波导的自相位调制特性研究[J]. *光电工程*, 2023, 50(2): 220313.

Zhe L, Hang Y, Wu H, et al. Self-phase modulation in integrated cadmium telluride polycrystalline waveguide[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(2): 220313.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220313>

收稿日期: 2022-11-27; 修改日期: 2023-01-30; 录用日期: 2023-01-31

### 相关论文

#### 基于片上超表面的多路方向复用全息术

杨睿, 于千茜, 潘一苇, 陈思涵, 张宸, 叶宏, 周鑫尧, 时阳阳, 万帅, 刘阳, 李仲阳  
*光电工程* 2022, 49(10): 220177 doi: [10.12086/oe.2022.220177](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220177)

#### Low-loss chip-scale programmable silicon photonic processor

Yiwei Xie, Shihan Hong, Hao Yan, Changping Zhang, Long Zhang, Leimeng Zhuang, Daoxin Dai  
*Opto-Electronic Advances* 2023, (): doi: [10.29026/oea.2023.220030](https://doi.org/10.29026/oea.2023.220030)

#### 基于相关性选择的微型计算光谱探测技术

杨港, 郭迎辉, 蒲明博, 李雄, 罗先刚  
*光电工程* 2022, 49(10): 220130 doi: [10.12086/oe.2022.220130](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220130)

#### All-optical computing based on convolutional neural networks

Kun Liao, Ye Chen, Zhongcheng Yu, Xiaoyong Hu, Xingyuan Wang, Cuicui Lu, Hongtao Lin, Qingyang Du, Juejun Hu, Qihuang Gong  
*Opto-Electronic Advances* 2021, 4(11): 200060 doi: [10.29026/oea.2021.200060](https://doi.org/10.29026/oea.2021.200060)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程  
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE\_Journal



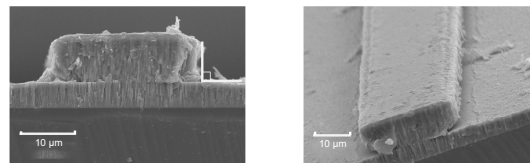
Website

DOI: 10.12086/oe.2023.220313

## 碲化镉片上集成波导的自相位调制特性研究

龙哲, 杨航, 吴函, 李阳\*, 梁厚昆

四川大学电子信息学院, 四川成都 610064



**摘要:** 中红外 (2.5  $\mu\text{m}$ ~25  $\mu\text{m}$ ) 波段包含许多重要的原子和分子共振峰, 因此中红外超连续谱广泛应用于生物医学、光谱学和环境科学等领域。碲化镉 (cadmium telluride, CdTe) 在中红外波段具有超宽的透射光谱范围 0.86  $\mu\text{m}$ ~25  $\mu\text{m}$ , 同时 CdTe 具有较大的三阶非线性系数, 是实现中红外超连续谱的理想材料。本文设计并加工了一种基于 CdTe 为芯层、低折射率介质硫化镉为缓冲层、硅为衬底的波导。采用广义非线性薛定谔方程仿真了该波导以中心波长为 5.5  $\mu\text{m}$  中红外激光作为泵浦, 能够实现 4.1  $\mu\text{m}$ ~9.7  $\mu\text{m}$  的超连续谱输出。实验中通过湿法刻蚀制作 CdTe 多晶波导, 并采用中心波长为 1030 nm, 脉冲宽度为 250 fs 的激光器作为泵浦源, 观察到在波导中发生明显的自相位调制而产生的光谱展宽。该工作为 CdTe 集成波导应用于中红外超连续谱及中红外波段的片上光学器件提供了新的可能。

**关键词:** 集成波导; 超连续谱; 中红外激光; 超快激光

**中图分类号:** TN454; TN248

**文献标志码:** A

龙哲, 杨航, 吴函, 等. 碲化镉片上集成波导的自相位调制特性研究 [J]. 光电工程, 2023, 50(2): 220313

Zhe L, Hang Y, Wu H, et al. Self-phase modulation in integrated cadmium telluride polycrystalline waveguide[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(2): 220313

## Self-phase modulation in integrated cadmium telluride polycrystalline waveguide

Long Zhe, Yang Hang, Wu Han, Li Yang\*, Liang Houkun

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

**Abstract:** The mid-infrared (MIR) wavelength coincides with various molecular resonances and spectroscopy. It is a universal way to identify chemical and biological substances. Thus, the MIR supercontinuum generation (SCG) is widely used in biomedicine, spectroscopy, and environmental science. Cadmium telluride (CdTe) has an ultra-broad transparent spectral range, from 0.86  $\mu\text{m}$  to 25  $\mu\text{m}$ , and one of the largest third-order nonlinear coefficients. It makes CdTe become an excellent candidate for long-wavelength MIR on-chip SCG. As an important material of solar cells, there is a well-established thin film growth technology for CdTe. We designed a CdTe integrated waveguide on a low-refractive-index CdS film with a silicon substrate. The simulation results solved by the nonlinear Schrödinger equation manifest that the MIR SCG covering 4.1  $\mu\text{m}$  to 9.7  $\mu\text{m}$  can be generated from a 1 cm CdTe waveguide pumped by a 5.5  $\mu\text{m}$  femtosecond laser. We experimentally fabricated the waveguide via

收稿日期: 2022-11-27; 修回日期: 2023-01-30; 录用日期: 2023-01-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62075144, 62005187); 四川省杰出青年科技人才项目 (2022JDJQ0031); 四川大学工科特色团队项目 (2020SCUNG105)

\*通信作者: 李阳, li.yang@scu.edu.cn.

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

the lithography and wet-etching techniques. The spectral broadening based on self-phase modulation from the large-core CdTe integrated waveguide is demonstrated by a femtosecond laser at the central wavelength of 1030 nm with a pulse width of 250 fs. The numerical simulations match well with the experimental results. These results pave the way for long-wavelength mid-infrared light sources and provide abundant new opportunities for MIR micro photonics.

**Keywords:** integrated waveguide; supercontinuum; mid-infrared laser; ultrafast laser

## 1 引言

中红外波段 (2.5  $\mu\text{m}$ ~25  $\mu\text{m}$ ) 包含绝大多数分子的振动和旋转吸收谱线, 该波段也称为指纹吸收区, 这使得中红外波段在分子光谱应用方面 (如气体传感、环境监测和疾病诊断等) 具有重要意义。分子指纹吸收区中 3  $\mu\text{m}$ ~4  $\mu\text{m}$ 、5  $\mu\text{m}$ ~7.5  $\mu\text{m}$  和 8  $\mu\text{m}$ ~11  $\mu\text{m}$  波段分别属于氢键、碳键、碳-氧与碳-氮键的特征吸收区, 长波长 13  $\mu\text{m}$ ~20  $\mu\text{m}$  波段是有机分子如有机金属键、卤化键和芳香族键的特征吸收区<sup>[1]</sup>。中红外光子学的应用还包括工业过程控制<sup>[2]</sup>, 激光雷达领域超连续谱光源反映目标的光谱强度信息<sup>[3]</sup> 以及光通信领域的自由空间光通信、切片光谱用于波分复用系统<sup>[4-6]</sup>。中红外激光光源可通过量子级联激光器、光参量放大、产生超连续谱等方法实现。其中量子级联激光器通常用于 13  $\mu\text{m}$ ~20  $\mu\text{m}$  的波段, 然而量子级联激光器的发射带宽相对较窄, 这限制了其在中红外分子振动区的光谱应用。另一种思路是在磷锗锌 (ZnGeP<sub>2</sub>)、硒镓铷 (LiGaSe<sub>2</sub>) 和硒化镓 (GaSe) 等非线性晶体中通过光参量放大的方式输出相干中红外激光, 但 ZnGeP<sub>2</sub>、LiGaSe<sub>2</sub> 和 GaSe 等非线性晶体的吸收边界分别为 11  $\mu\text{m}$ 、12  $\mu\text{m}$  和 17  $\mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>, 限制了更长波长中红外激光的产生。除此之外, 还可以在非线性晶体波导中产生中红外超连续谱, 该方法具有光谱覆盖范围广、不需要种子光和成本低等优点。例如近年在单模和多模硫化物光纤中, 分别以 7  $\mu\text{m}$  和 6.3  $\mu\text{m}$  泵浦可以获得 1.4  $\mu\text{m}$ ~16  $\mu\text{m}$  的超连续谱输出<sup>[8-9]</sup>。可通过半导体集成技术对中红外波长无吸收的材料加工, 制作片上非线性波导, 进一步拓展光谱覆盖范围, 增强设计自由度, 降低阈值, 缩小尺寸, 提高可靠性和降低成本等。

目前, 有许多关于超连续谱片上集成系统的研究, 例如硫族氧化物玻璃波导<sup>[10-11]</sup>、铌酸锂波导<sup>[12]</sup> 和周期性极化铌酸锂波导<sup>[13]</sup>。成熟的半导体生长工艺为片上器件的研究提供了有力保障<sup>[14]</sup>。Kippenberg 等人采用

先进的半导体生长技术, 在硅 (Si) 衬底上生长高质量的氮化硅 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 薄膜, 并结合 CMOS 集成技术, 实现了 2.5  $\mu\text{m}$ ~4  $\mu\text{m}$  的中红外超连续谱输出<sup>[15]</sup>。除此之外, 利用 Si 集成波导可以产生 2  $\mu\text{m}$ ~6  $\mu\text{m}$  的超连续谱<sup>[16-17]</sup>。然而, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 Si 分别对超过 5.5 和 8  $\mu\text{m}$  的波长具有强吸收特性, 这限制了它们的超连续谱光谱向更长波长展宽。在 IV 族半导体材料中, 锗 (Ge) 具有较大的非线性系数, 同时透射范围可以延伸到 15  $\mu\text{m}$ , 这使得 Ge 有望成为 Si 的替代材料<sup>[18-20]</sup>。近年来, Ballester 等人报道了在 Si 基底上制作 Si-Ge 混合材料的波导结构, 通过改变两种材料的混合比例来控制折射率, 将模场束缚在 Ge 占比高的波导层内, 实现了 3  $\mu\text{m}$ ~13  $\mu\text{m}$  的超连续谱输出<sup>[14]</sup>。迄今为止, 没有波长超过 13  $\mu\text{m}$  的片上超连续谱的报道。

碲化镉 (CdTe) 是 II-VI 族半导体材料, 具有 0.86  $\mu\text{m}$ ~25  $\mu\text{m}$ <sup>[21]</sup> 超宽的透射范围, 同时具有较大的非线性系数, 在 1.55  $\mu\text{m}$  和 5.5  $\mu\text{m}$  处的非线性系数  $n_2$  分别为  $\sim 5 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ <sup>[22]</sup> 和  $2 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ <sup>[23]</sup>, 比 Si 的非线性系数大接近一个量级, 且比 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的非线性系数大两个量级<sup>[24]</sup>, 这使 CdTe 成为产生中红外超连续谱的理想材料。L. Tong 等人使用中心波长 1550 nm、脉冲宽度为 100 fs 的激光作为泵浦, 在直径为 500 nm 的 CdTe 纳米线中产生了 1200 nm~1800 nm 的超连续谱, 该工作证明了在 CdTe 波导中产生超连续谱的可行性<sup>[25]</sup>。但该 CdTe 纳米线具有较小的纤芯直径, 并且第二个零色散波长位于 1800 nm 附近, 这决定了该波导无法应用于中红外波段。幸运的是片上集成波导可以通过灵活的改变波导形状控制波导色散, 在近期的理论模拟工作中, 设计了基于低折射介质硫化镉 (cadmium sulfide, CdS) 衬底的一个宽 20  $\mu\text{m}$ 、高 8  $\mu\text{m}$  的中红外 CdTe 片上集成波导, 其中红外波段具有平坦且较小的反常色散。通过仿真发现, 采用中心波长为 9  $\mu\text{m}$ 、脉宽为 200 fs、峰值功率为 15 kW 的激光器作为泵浦, 仅需要 2.5 mm 长的波导就可以产生 3.5  $\mu\text{m}$ ~20  $\mu\text{m}$  的超宽带超连续谱, 光谱强度大于



-34 dB<sup>[26]</sup>。生长高质量 CdTe 薄膜的工艺以较为成熟, 通过磁控溅射法能够短时间内沉积较厚的 CdTe 多晶薄膜, 由于该生长工艺具有成本低、生长速度快和生长均匀等特点, 被广泛应用于太阳能电池等领域<sup>[27]</sup>。结合先进的半导体制造工艺可以制造出超宽透射范围的中红外波导, 这为突破 13  $\mu\text{m}$  的中红外片上超连续谱的瓶颈带来了希望。

本文考虑薄膜生长与半导体加工工艺限制, 设计并加工了一种基于 CdTe 为芯层、低折射率介质 CdS 为缓冲层、Si 为衬底的波导。采用有限元法和广义非线性薛定谔方程 (generalized nonlinear Schrödinger equation, GNLS) 仿真了宽和高分别为 20  $\mu\text{m}$  和 8  $\mu\text{m}$  的 CdTe 波导的传输损耗、色散曲线及超连续谱展宽光谱。当 CdS 层厚度为 5  $\mu\text{m}$  时, 以中心波长为 5.5  $\mu\text{m}$ , 脉冲宽度为 250 fs, 峰值功率为 15 kW 的中红外激光泵浦该 CdTe 波导, 能够实现 4.1  $\mu\text{m}$ ~9.7  $\mu\text{m}$  的超连续谱。实验中采用磁控溅射法在 Si 衬底上依次生长 4.7  $\mu\text{m}$  厚的硫化镉 (CdS) 层和 8.5  $\mu\text{m}$  厚的 CdTe 层; 之后利用湿法刻蚀制作宽度为 22  $\mu\text{m}$  的

CdTe 中红外集成波导, 总长度为 1 cm, 波导侧壁与衬底之间的夹角为 90°, 本工作首次制作出了高质量大尺寸中红外片上 CdTe 波导。实验采用重复频率为 500 kHz, 中心波长为 1030 nm 的激光器作为泵浦源, 通过焦距为 40 mm 的凸透镜将泵浦耦合波导中, 观测到有明显的光谱展宽现象, 仿真的光谱形状与实验测得的光谱吻合。本工作为 CdTe 集成波导实现超过 13  $\mu\text{m}$  的超连续谱奠定了实验基础, 并为长波长中红外片上集成光学领域提供了新的思路。

## 2 波导设计

CdTe 是成熟的半导体材料, 能够生长出高质量的薄膜, 结合先进的半导体制造工艺, 可以制作出大尺寸的中红外波导。以 Si 作为衬底, 设计的 CdTe 集成波导结构如图 1(a) 所示。由于 CdTe 的折射率 ( $n\sim 2.68$ ) 小于 Si 的折射率 ( $n\sim 3.6$ ), 无法满足全反射条件, 因此需要在 CdTe 与 Si 之间添加一层低折射率介质层作为缓冲层。CdS ( $n\sim 2.4$ ) 具有比 CdTe 低的折射率, 同时也是太阳能电池的常用材料, 能够生长出

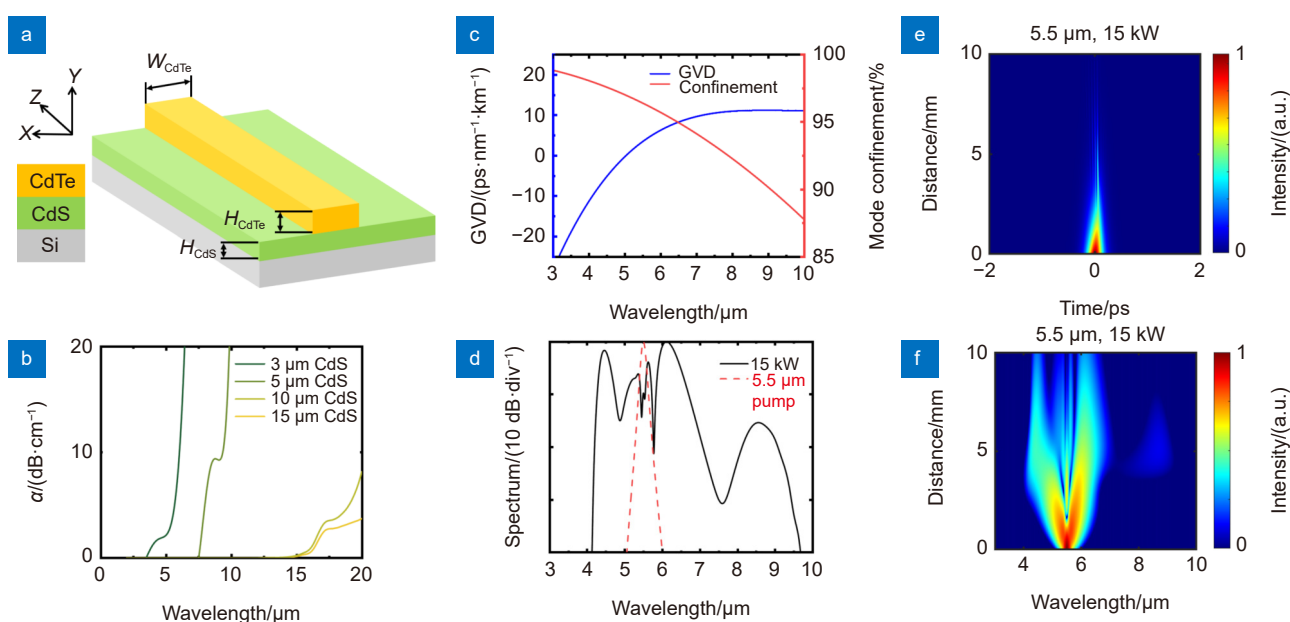


图 1 片上集成 CdTe 波导的设计与仿真。(a) 基于 CdTe/CdS/Si 的波导三维结构图, CdTe 波导的宽度 ( $W_{\text{CdTe}}$ )、高度 ( $H_{\text{CdTe}}$ ) 和 CdS 层的厚度 ( $H_{\text{CdS}}$ ) 分别为 20  $\mu\text{m}$ 、8  $\mu\text{m}$  和 5  $\mu\text{m}$ ; (b) 不同厚度 (3  $\mu\text{m}$ 、5  $\mu\text{m}$ 、10  $\mu\text{m}$ 、15  $\mu\text{m}$ ) CdS 层造成的传输损耗; (c) 高和宽分别为 20  $\mu\text{m}$  和 8  $\mu\text{m}$  的 CdTe 内 TE 模式的总色散和模场束缚比例; (d) 以 5.5  $\mu\text{m}$ 、15 kW 脉冲作为泵浦, 波导内产生的超连续谱光谱; (e)、(f) 分别为脉冲在长为 1 cm 的 CdTe 波导内传输的时域脉冲和频域光谱演化图

Fig. 1 Design and simulation of the on-chip integrated CdTe waveguide. (a) The 3D structure diagram of the CdTe/CdS/Si waveguide. The width ( $W_{\text{CdTe}}$ ), height ( $H_{\text{CdTe}}$ ), and thickness ( $H_{\text{CdS}}$ ) of the CdTe waveguide are 20  $\mu\text{m}$ , 8  $\mu\text{m}$ , and 5  $\mu\text{m}$ , respectively; (b) The propagation loss caused by the CdS layers with different thickness (3  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , and 15  $\mu\text{m}$ ); (c) Total dispersion and mode confinement ratio of the TE mode in CdTe with 20  $\mu\text{m}$  height and 8  $\mu\text{m}$  width; (d) The SCG in the waveguide pumped with 5.5  $\mu\text{m}$ , 15 kW pulse; (e) and (f) are the time-domain pulse and frequency-domain spectral evolution diagrams of the pulse propagated in a 1 cm-long CdTe waveguide, respectively

高质量薄膜<sup>[21]</sup>。在最近的通过 CdTe 波导实现中红外超连续谱的理论研究中, 我们了解到采用 15  $\mu\text{m}$  厚的 CdS 层能够有效地降低波长在 20  $\mu\text{m}$  附近因 Si/CdS/CdTe 结构引起的传输损耗, 实现宽带的中红外超连续谱展宽。宽度为 20  $\mu\text{m}$  左右、高度为 8  $\mu\text{m}$  的 CdTe 波导中的 TE 模式在 6  $\mu\text{m}$ ~20  $\mu\text{m}$  具有平坦的群速度色散 (< 30 ps/nm/km), 因此能够实现中红外超连续谱输出<sup>[26]</sup>。

然而 Si, CdS 和 CdTe 的晶格常数分别为 0.543 nm, 0.583 nm 和 0.6477 nm, 因此衬底与各薄膜之间存在一定的晶格失配, 这使得薄膜之间存在着大量应力。若薄膜生长过厚则会导致在后续刻蚀加工中薄膜发生脱落, 为了避免这种情况的发生, 实际制作中我们适当减少 CdS 层的厚度至 5  $\mu\text{m}$ 。通过有限元法仿真宽和高分别为 20  $\mu\text{m}$  和 8  $\mu\text{m}$  的 CdTe 波导在不同的 CdS 层厚度下 TE 模式的传输损耗如图 1(b) 所示, 当 CdS 层厚度为 5  $\mu\text{m}$  时, 在 CdTe 波导的传输波长能够延伸到 10  $\mu\text{m}$ 。在产生超连续谱的过程中, 波导的色散和非线性系数对光谱的展宽宽度取决定性作用。利用有效折射率可以计算出波导在波长为 3  $\mu\text{m}$ ~10  $\mu\text{m}$  范围内的总色散, 该色散包括波导色散和材料色散, 其中材料色散由 Sellmeier 方程提供<sup>[28-31]</sup>。波导总色散与有效折射率的关系式为

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \lambda^2}, \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为波长,  $c$  为真空中的光速,  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率。如图 1(c) 中所示, 波导的零色散点在波长为 5  $\mu\text{m}$  处, 同时在中红外波段有较平的总色散。由于 CdTe 具有很高的三阶非线性电极化率  $\chi^{(3)}$ , 在波长 5.5  $\mu\text{m}$  处非线性折射率  $n_2$  约为  $2 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ , 因此 CdTe 波导具有较大的非线性系数。非线性系数定义为

$$\gamma = \frac{\omega_0 n_2}{c A_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

式中:  $\omega_0$  为光波的角频率,  $n_2$  为 CdTe 的非线性折射率,  $A_{\text{eff}}$  为有效模场面积。计算可得 CdTe 波导的非线性系数为  $0.28 \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 。当使用零色散波长附近 5.5  $\mu\text{m}$  处泵浦 CdTe 波导时, 反常色散会平衡自相位效应而形成孤子传输, 可以在传输过程中保持高的峰值功率并持续产生新的频率成分展宽光谱形成超连续谱, 采用分步傅里叶法求解 GNLSE 仿真 CdTe 波导产生的超连续谱<sup>[31]</sup>。GNLSE 为<sup>[32]</sup>

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A - \sum_{k \geq 2} \frac{i^{k+1}}{k!} \beta_k \frac{\partial^k A}{\partial T^k} = i\gamma \left( 1 + \frac{i}{\omega} \frac{\partial}{\partial T} \right) |A|^2 A, \quad (3)$$

式中:  $A$  为脉冲包络,  $\alpha$  为波导的传输损耗,  $\beta_k$  为色散系数。

图 1(d) 中展示了为以泵浦波长、峰值功率和脉冲宽度分别为 5.5  $\mu\text{m}$ 、15 kW 和 250 fs 的激光经过 1 cm 的 CdTe 波导后输出的超连续谱光谱。如图 1(e) 所示, 脉冲在 CdTe 波导中传输进行自压缩, 随后在 3 mm 处发生孤子裂变产生超连续谱。图 1(f) 展示了脉冲在 CdTe 波导传输过程中的频谱演化过程, 最终产生了 4.1  $\mu\text{m}$ ~9.7  $\mu\text{m}$  宽的超连续谱。波长大于 10  $\mu\text{m}$  的中红外激光能量在以 5  $\mu\text{m}$  厚的 CdS 层作为缓冲层时具有较大损耗, 因此很难展宽到更长波长中红外波段。若继续增加 CdS 层的厚度到 15  $\mu\text{m}$ , 能够实现 3.5  $\mu\text{m}$ ~20  $\mu\text{m}$  超宽的中红外超连续谱激光输出。

## 3 实验与结果

### 3.1 薄膜生长与波导加工

在实验中, 我们通过磁控溅射法在 Si 衬底上依次生长了厚度为 4.7  $\mu\text{m}$  和 8.5  $\mu\text{m}$  的 CdS 和 CdTe 薄膜, 生长温度均为 230  $^\circ\text{C}$ , 生长时间分别为 6 h 和 5 h。CdTe 中红外集成波导制作流程如图 2(a) 所示, 具体制作流程如下: 第一步, 采用酒精和丙酮依次清洗 CdTe 样品表面, 去除表面污染物; 第二步, 在 CdTe 样品表面均匀涂抹光刻胶 (AZ1500); 第三步, 在 110  $^\circ\text{C}$  温度下前烘 90 s, 然后冷却到室温; 第四步, 采用光刻机 (URE-2000/35) 曝光 7 s, 曝光辐照强度为  $17 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ; 第五步, 将样品在 110  $^\circ\text{C}$  温度下后烘 90 s, 使光刻胶坚固地附着在样品表面, 以免刻蚀中途脱胶; 第六步, 将样品浸入刻蚀液中, 刻蚀大约 30 min, 刻蚀液由水、磷酸和硝酸组成, 其成分比例为 29 : 70 : 1<sup>[33]</sup>; 第七步, 用丙酮清洗样品表面残留的光刻胶。最后切割波导两端, 得到较为平整的波导截面。实验做出的波导尺寸与仿真设计的略有差异, 波导的长、高、宽分别为 1 cm、8.5  $\mu\text{m}$  和 22  $\mu\text{m}$ 。如图 2(b) 所示, 波导端面较为平整, 表面存在细长的晶粒。由于晶粒排布特性, 纵向刻蚀速率远大于横向刻蚀速率, 这使得 CdTe 波导侧壁与 CdS 层之间的夹角接近 90 $^\circ$ 。波导表面形貌如图 2(c) 所示, 多晶 CdTe 波导上表面和侧壁存在凹凸不平的微小结构, 直径大小为 100 nm~200 nm, 这种粗糙的表面会造成瑞利散

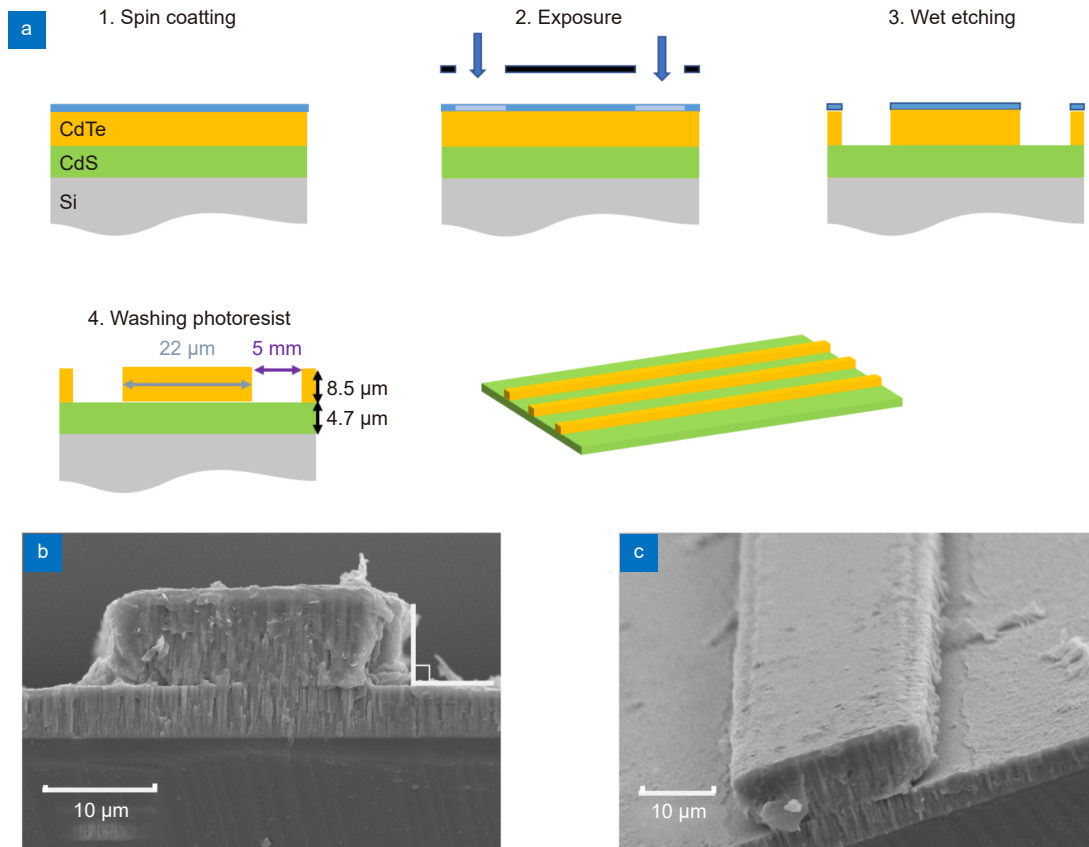


图 2 波导制作流程图和波导电镜表征图。(a) 波导制作流程图; (b) 波导端面形貌图, 波导高度和宽度分别为  $8.5 \mu\text{m}$  和  $22 \mu\text{m}$ , 波导侧壁与 CdS 层之间夹角为  $90^\circ$ ; (c) 波导侧面与顶面形貌图

Fig. 2 Waveguide fabrication flow chart and scanning electron microscope images. (a) The waveguide fabrication flow chart; (b) The waveguide surface topography. The height and width of the waveguide are  $8.5 \mu\text{m}$  and  $22 \mu\text{m}$ , respectively. The angle between the side wall of the waveguide and the CdS layer is  $90^\circ$ ; (c) The side and top topography of the waveguide

射从而导致传输损耗, 边界散射造成的传输损耗对于长波长的影响要远小于短波长。例如, 宽  $0.3 \mu\text{m}$ 、高  $0.25 \mu\text{m}$  的多晶  $\text{TiO}_2$  波导表面存在  $50 \text{ nm} \sim 100 \text{ nm}$  大小的粗糙晶粒, 波长在  $826 \text{ nm}$  处的传播损耗为  $2 \text{ dB/mm}$ , 而  $1550 \text{ nm}$  处的传播损耗仅为  $0.42 \text{ dB/mm}$ <sup>[34]</sup>。由于 CdTe 具有很大的非线性系数, 这使得 CdTe 波导能够在很短的作用距离内实现较宽的光谱展宽, 因此该 CdTe 波导的粗糙度导致的散射损耗对于中红外波段影响微弱。

### 3.2 实验结果

实验装置如图 3(a) 所示。采用中心波长为  $1030 \text{ nm}$ 、重复频率为  $500 \text{ kHz}$ 、脉冲宽度为  $250 \text{ fs}$  的飞秒激光器 (奕力科技, YF-FL-50-200-IR) 作为泵浦源, 光谱宽度为  $15 \text{ nm}$ 。通过焦距为  $40 \text{ mm}$  的  $\text{CaF}_2$  透镜 (LBTEK, CX70609) 聚焦到波导端面, 聚焦后光斑直

径约为  $20 \mu\text{m}$ 。波导被固定在特殊的夹具上, 可以实现  $x, y, z$  三个方向的调节。由于 CdTe 具有较强的二阶非线性性, 波长为  $1030 \text{ nm}$  的飞秒激光在波导中传输时会产生波长为  $515 \text{ nm}$  的倍频信号, 同时由于波导侧壁存在散射损耗, 实验时能观察到波导发出明亮的绿光。在波导的输出端后使用焦距为  $40 \text{ mm}$  的  $\text{CaF}_2$  透镜收集信号, 并使用焦距为  $100 \text{ mm}$  的  $\text{CaF}_2$  透镜 (LBTEK, CX70613) 将产生的超连续谱聚焦进光纤中, 利用光谱仪 (YOKOGAWA, AQ6370D) 实时观测光谱展宽情况。

由于 TE 模具有较小的群速度色散和较小的传输损耗, 因此调节泵浦光偏振与波导的长边平行, 使得在波导内传输的是 TE 模。然而 CdTe 在近红外波段具有巨大的正常色散, 通过仿真得到该波导在波长为  $1 \mu\text{m}$  附近的群速度色散为  $-3510 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ , 因此飞秒脉冲在波导内传输时, 首先通过自相位调制效应

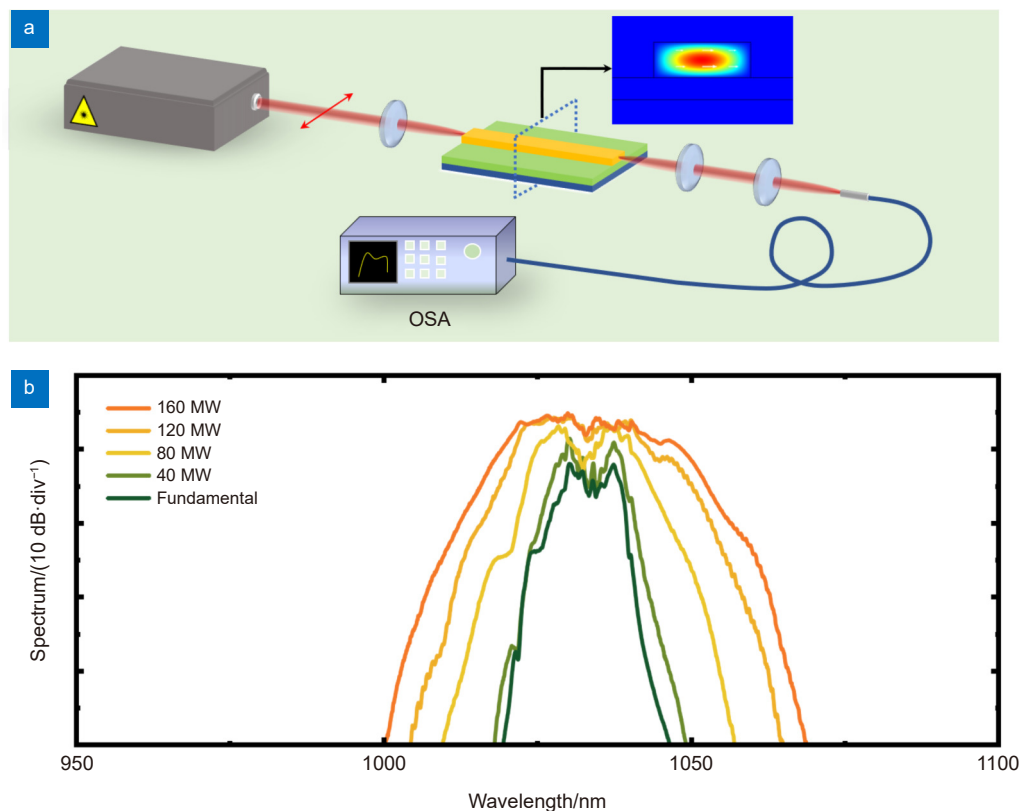


图 3 (a) 实验装置图, 插图为波导内波长为 1030 nm 的 TE 模式图; (b) 不同泵浦功率下波导输出的展宽光谱  
Fig. 3 (a) The experimental setup diagram. The inset shows the field distribution of the TE mode at 1030 nm wavelength in the waveguide; (b) The broadened spectrum from the waveguide at different pump power

由中心波长向两侧对称地展宽光谱, 然后在波导内巨大的正常色散作用下, 脉冲宽度被迅速展宽导致峰值功率迅速降低, 从而抑制光谱持续展宽。图 3(b) 绘制了光谱仪收集到的信号光谱, 可以发现随着入射的泵浦功率逐渐增加, 非线性展宽效应愈发明显, 光谱对称地由中心波长向两侧展宽, 泵浦的峰值功率为 160 MW 时, 能够获得 1000 nm~1070 nm 的展宽光谱。

### 3.3 理论验证

在此采用前文使用的非线性薛定谔方程仿真在 CdTe 中的自相位调制光谱展宽与实验进行对比, CdTe 在波长 1030 nm 处非线性折射率  $n_2$  约为  $5 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ , 计算可得 CdTe 波导在 1030 nm 波长处的非线性系数为  $3.97 \text{ W}^{-1}\text{m}^{-1}$ 。采用 GNLS 仿真 CdTe 波导内基于自相位调制产生的光谱展宽, 设定以波长 1030 nm 作为泵浦时的波导传播损耗为  $5 \text{ dB/mm}$ <sup>[34]</sup>。峰值功率为  $5 \text{ kW} \sim 20 \text{ kW}$  下的光谱输出如图 4(a) 所示, 光谱从中心波长对称地向两侧展宽, 该形状与实验测

得的光谱形状几乎一致。图 4(b, d, f, h) 与 4(c, e, g, i) 分别反应了光脉冲在波导中传播和光谱演化过程, 由于光谱展宽仅在波导前端很短的距离内发生, 因此图 4 中仅展示了波导长度为 2 mm 内的脉冲和光谱演化。随着新的频率分量产生, 由于巨大的群速度色散, 初始脉冲被迅速展宽, 同时伴随着传输损耗, 峰值功率迅速下降, 能够产生 SPM 的有效距离约为 0.2 mm 左右。由于我们采用的泵浦光带有一定的啁啾, 同时实验采用的是多晶 CdTe 波导, 这与仿真中的单晶 CdTe 波导略有差距, 因此光谱细节略有差异, 但总体趋势一致。

由于该波导在中红外波段具有平坦的反常色散, 并且理论上具有更小的传输损耗, 若采用中红外激光泵浦该片上集成 CdTe 波导能够产生宽带的中红外超连续谱。然而, 要实现中红外超连续谱不仅需要稳定高效的中红外飞秒激光光源, 同时需要有效的中红外光谱收集手段, 目前仍有诸多挑战。本文验证了 CdTe 波导加工的可行性, 为通过其实现超越  $13 \mu\text{m}$



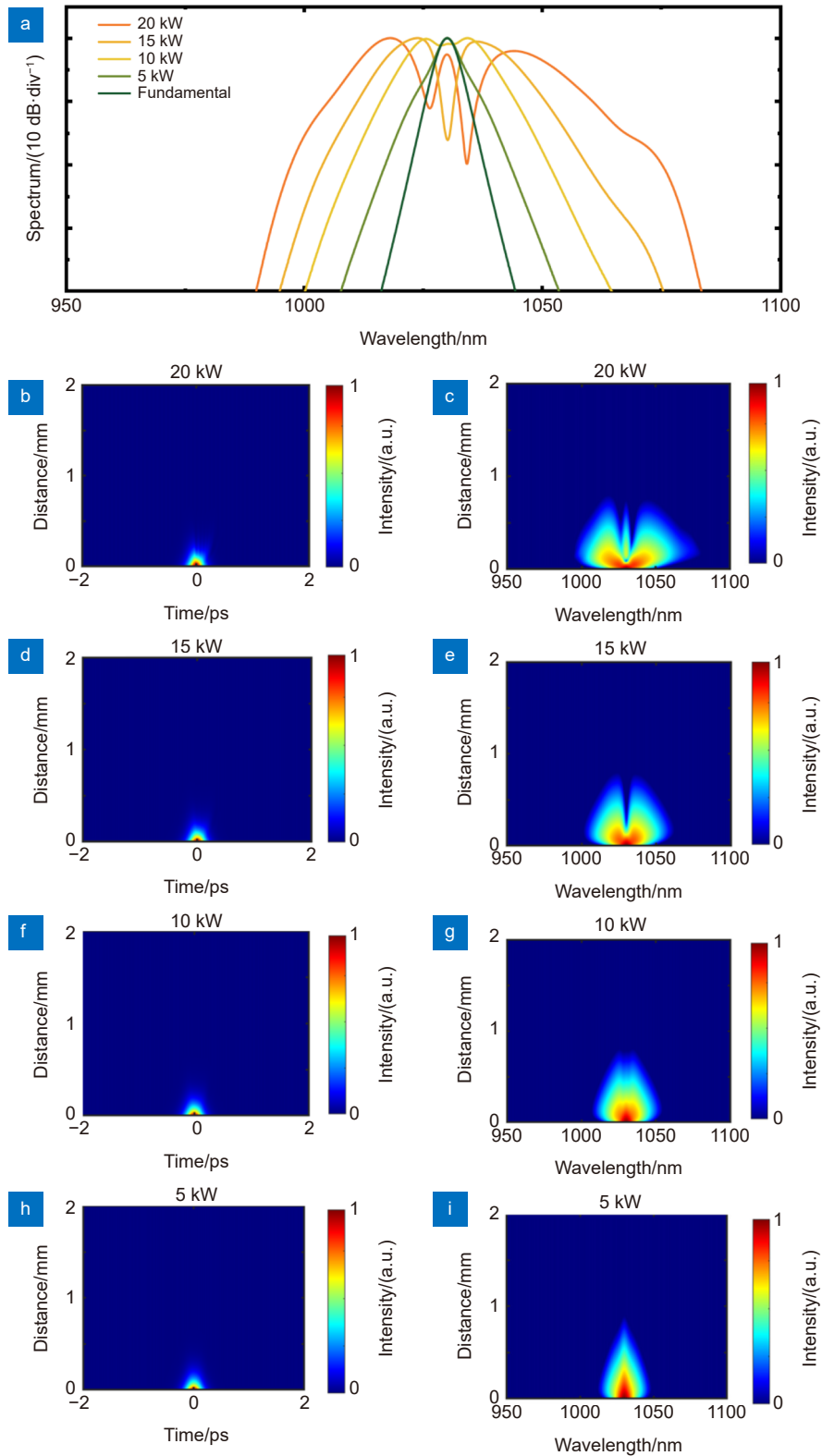


图 4 基于 GNLSE 求解在 CdTe 波导内的自相位调制导致的光谱展宽。(a) 使用 1030 nm 波长进行泵浦, 不同峰值功率 (5 kW~20 kW) 下波导的输出的光谱; (b), (d), (f), (h) 是超连续谱产生过程的时域演化图; (c), (e), (g), (i) 是超连续谱产生过程的频域演化图

Fig. 4 Spectral broadening caused by self-phase modulation (SPM) in the CdTe waveguide based on GNLSE. (a) The output spectrum of the waveguide at different peak power (5 kW~20 kW) pumped at 1030 nm wavelength; (b), (d), (f), (h) The time-domain evolution diagrams of SCG process; (c), (e), (g), (i) The frequency-domain evolution diagrams of the SCG process



的超连续谱奠定了基础, 由于该波导同时具有良好的透过率与巨大的非线性效应, 可应用于其他片上中红外非线性器件中。

## 4 结 论

综上所述, 本文设计并首次制作了 CdTe 中红外片上集成波导。采用有限元法求解模式理论仿真, 设计了在中红外波段具有较小且平坦的反常色散曲线的 CdTe 集成波导。进一步采用分步傅里叶法求解 GNLSE 模拟了以泵浦波长为 5.5  $\mu\text{m}$ , 脉冲宽度为 250 fs, 峰值功率为 15 kW 时波导产生的 4.1  $\mu\text{m}$ ~9.7  $\mu\text{m}$  宽的超连续谱。实验采用磁控溅射法生长出高质量的 CdTe 薄膜, 通过湿刻工艺成功制作了 CdTe 多晶波导, 并在中心波长为 1030 nm 的激光器泵浦下观测到明显的自相位调制效果, 在 160 MW 泵浦功率下能获得 1000 nm~1070 nm 的展宽光谱, 并且仿真与实验结果吻合。该工作为 CdTe 集成波导实现中红外超连续谱提供了实验基础, 进一步改善镀膜工艺, 增加中间层解决 CdS 与 CdTe、Si 材料的晶格失配问题, 解决中红外飞秒泵浦光源问题, 有望实现波长长至 20  $\mu\text{m}$  的超连续谱, 产生中红外光频梳, 实现不同分子的高灵敏度、高分辨率中红外指纹谱探测, 应用于复杂材料甄别、组份定量分析、痕量探测等。同时, 中红外超连续谱光源的实现很多领域都有重要应用, 如生物医学领域的光学相干断层扫描实现组织病变检测和三维立体成像等, 环境监测领域的气相探测, 激光雷达领域的识别目标光谱强度信息, 光通信领域的波分复用系统等。

## 参考文献

- [1] Nakamoto K. *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds*[M]. 6th ed. Hoboken: Wiley, 2009.
- [2] Soref R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium[J]. *Nat Photonics*, 2010, 4(8): 495–497.
- [3] Hakala T, Suomalainen J, Kaasalainen S, et al. Full waveform hyperspectral LiDAR for terrestrial laser scanning[J]. *Opt Express*, 2012, 20(7): 7119–7127.
- [4] Takara H, Ohara T, Yamamoto T, et al. Field demonstration of over 1000-channel DWDM transmission with supercontinuum multi-carrier source[J]. *Electron Lett*, 2005, 41(5): 270–271.
- [5] Corrigan P, Martini R, Whittaker E A, et al. Quantum cascade lasers and the Kruse model in free space optical communication[J]. *Opt Express*, 2009, 17(6): 4355–4359.
- [6] Nakasyotani T, Toda H, Kuri T, et al. Wavelength-division-multiplexed millimeter-waveband radio-on-fiber system using a supercontinuum light source[J]. *J Lightwave Technol*, 2006, 24(1): 404–410.
- [7] Petrov V. Parametric down-conversion devices: the coverage of the mid-infrared spectral range by solid-state laser sources[J]. *Opt Mater*, 2012, 34(3): 536–554.
- [8] Zhao Z M, Wu B, Wang X S, et al. Mid-infrared supercontinuum covering 2.0–16  $\mu\text{m}$  in a low-loss telluride single-mode fiber[J]. *Laser Photonics Rev*, 2017, 11(2): 1700005.
- [9] Petersen C R, Møller U, Kubat I, et al. Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4–13.3  $\mu\text{m}$  molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre[J]. *Nat Photonics*, 2014, 8(11): 830–834.
- [10] Yu Y, Gai X, Ma P, et al. Experimental demonstration of linearly polarized 2–10  $\mu\text{m}$  supercontinuum generation in a chalcogenide rib waveguide[J]. *Opt Lett*, 2016, 41(5): 958–961.
- [11] Wang P, Huang J P, Xie S R, et al. Broadband mid-infrared supercontinuum generation in dispersion-engineered  $\text{As}_2\text{S}_3$ -silica nanospire waveguides pumped by 2.8  $\mu\text{m}$  femtosecond laser[J]. *Photonics Res*, 2021, 9(4): 630–636.
- [12] Yu M J, Desiatov B, Okawachi Y, et al. Coherent two-octave-spanning supercontinuum generation in lithium-niobate waveguides[J]. *Opt Lett*, 2019, 44(5): 1222–1225.
- [13] Iwakuni K, Okubo S, Tadanaga O, et al. Generation of a frequency comb spanning more than 3.6 octaves from ultraviolet to mid infrared[J]. *Opt Lett*, 2016, 41(17): 3980–3983.
- [14] Hu Y T, Liang D, Beausoleil R G. An advanced III-V-on-silicon photonic integration platform[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, 4(9): 200094.
- [15] Guo H R, Herkommer C, Billat A, et al. Mid-infrared frequency comb via coherent dispersive wave generation in silicon nitride nanophotonic waveguides[J]. *Nat Photonics*, 2018, 12(6): 330–335.
- [16] Nader N, Maser D L, Cruz F C, et al. Versatile silicon-waveguide supercontinuum for coherent mid-infrared spectroscopy[J]. *APL Photonics*, 2018, 3(3): 036102.
- [17] Singh N, Hudson D D, Yu Y, et al. Midinfrared supercontinuum generation from 2 to 6  $\mu\text{m}$  in a silicon nanowire[J]. *Optica*, 2015, 2(9): 797–802.
- [18] Sinobad M, Monat C, Davies B L, et al. Mid-infrared octave spanning supercontinuum generation to 8.5  $\mu\text{m}$  in silicon-germanium waveguides[J]. *Optica*, 2018, 5(4): 360–366.
- [19] Della Torre A, Sinobad M, Armand R, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in a low-loss germanium-on-silicon waveguide[J]. *APL Photonics*, 2021, 6(1): 016102.
- [20] Ballester M M, Lafforgue C, Frigerio J, et al. On-chip mid-infrared supercontinuum generation from 3 to 13  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(12): 3423–3429.
- [21] Palik E D. *Handbook of Optical Constants of Solids*[M]. San Diego: Academic Press, 1998.
- [22] Tatsuura S, Matsubara T, Mitsu H, et al. Cadmium telluride bulk crystal as an ultrafast nonlinear optical switch[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(25): 251110.
- [23] Sheik-Bahae M, Hagan D J, van Stryland E W. Dispersion and band-gap scaling of the electronic Kerr effect in solids associated with two-photon absorption[J]. *Phys Rev Lett*, 1990, 65(1): 96–99.
- [24] Gaeta A L, Lipson M, Kippenberg T J. Photonic-chip-based frequency combs[J]. *Nat Photonics*, 2019, 13(3): 158–169.
- [25] Xin C G, Zhang J B, Xu P Z, et al. Self-phase modulation in single CdTe nanowires[J]. *Opt Express*, 2019, 27(22): 31800–31809.
- [26] Long Z, Yang H, Li Y, et al. Cadmium telluride waveguide for coherent MIR supercontinuum generation covering 3.5–20

- $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Express*, 2022, **30**(2): 2265–2277.
- [27] Paudel N R, Wieland K A, Compaan A D. Ultrathin CdS/CdTe solar cells by sputtering[J]. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2012, **105**: 109–112.
- [28] Chenault D B, Chipman R A. Infrared birefringence spectra for cadmium sulfide and cadmium selenide[J]. *Appl Opt*, 1993, **32**(22): 4223–4227.
- [29] DeBell A G, Dereniak E L, Harvey J, et al. Cryogenic refractive indices and temperature coefficients of cadmium telluride from 6  $\mu\text{m}$  to 22  $\mu\text{m}$ [J]. *Appl Opt*, 1979, **18**(18): 3114–3115.
- [30] Marple D T F. Refractive index of ZnSe, ZnTe, and CdTe[J]. *J Appl Phys*, 1964, **35**(3): 539–542.
- [31] Edwards D F, Ochoa E. Infrared refractive index of silicon[J]. *Appl Opt*, 1980, **19**(24): 4130–4131.
- [32] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. 5th ed. Amsterdam: Academic Press, 2013.
- [33] Kraft D, Thissen A, Broetz J, et al. Characterization of tellurium layers for back contact formation on close to technology treated CdTe surfaces[J]. *J Appl Phys*, 2003, **94**(5): 3589–3598.
- [34] Bradley J D B, Evans C C, Choy J T, et al. Submicrometer-wide amorphous and polycrystalline anatase  $\text{TiO}_2$  waveguides for microphotonic devices[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(21): 23821–23831.

## 作者简介



龙哲 (1997-), 女, 硕士研究生, 目前就读于四川大学, 主要研究方向为中红外激光和非线性光学。

E-mail: 13551366094@163.com

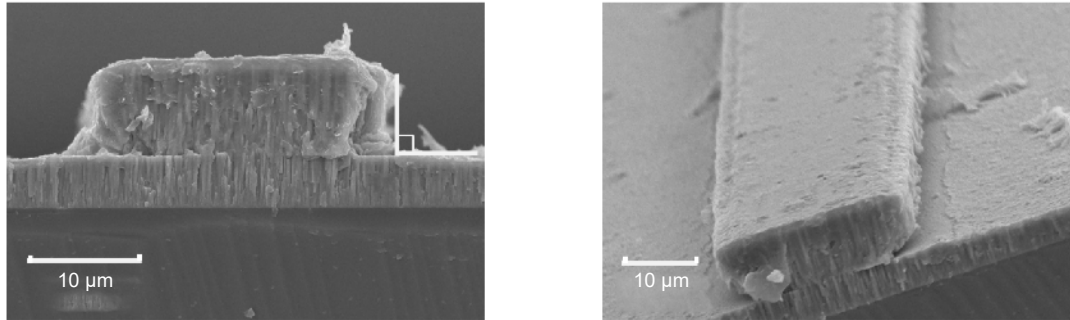


【通信作者】李阳 (1990-), 男, 博士, 四川大学电子信息学院特聘副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为超快激光、激光加工和微纳光学。

E-mail: li.yang@scu.edu.cn

# Self-phase modulation in integrated cadmium telluride polycrystalline waveguide

Long Zhe, Yang Hang, Wu Han, Li Yang\*, Liang Houkun



Surface topography of CdTe integrated waveguide

**Overview:** The mid-infrared (MIR) wavelength coincides with various molecular resonances and spectroscopy, which is universally used to identify chemical and biological substances. In particular, the 13  $\mu\text{m}$ ~20  $\mu\text{m}$  wavelength window has fingerprints of unique material groups such as organometallic, halogenated, and aromatic bonds. Thus, the MIR supercontinuum generation (SCG) is widely used in the fields of biomedicine, spectroscopy, and environmental science. Thanks to the mature semiconductor growth technology combined with the advanced CMOS integration technology, SCG in on-chip devices has been studied in recent years. Cadmium telluride (CdTe) has an ultra-broad transparent spectral range, from 0.86  $\mu\text{m}$  to 25  $\mu\text{m}$ , and one of the largest third-order nonlinear coefficients ( $n_2 \sim 5 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$  at 1.55  $\mu\text{m}$ ,  $2 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$  at 5.5  $\mu\text{m}$ , which are several times larger than that of silicon) among the MIR materials, which makes CdTe become an excellent candidate for long-wavelength MIR on-chip SCG. As an important material of solar cells, there is a mature film growth and etching technology for CdTe. In this work, we designed a large-core CdTe integrated waveguide on a low-refractive-index cadmium sulfide (CdS) film with a silicon substrate. The waveguide structure is designed with CdS as the intermediate cladding layer to achieve a low waveguide loss and high mode confinement. A large-core CdTe waveguide is tailored to generate a low and flat dispersion in the MIR spectral range, while balancing the large effective nonlinearity and the convenience of coupling. The effective refractive index in the CdTe waveguide is obtained by finite element method. Then, the simulated results solved by the nonlinear Schrödinger equation manifest that a CdTe waveguide with a propagation distance as short as 1 cm can broaden the MIR spectrum covering 4.1  $\mu\text{m}$  to 9.7  $\mu\text{m}$  pumped by a 5.5  $\mu\text{m}$  femtosecond laser. Experimentally, polycrystalline CdS and CdTe films were deposited by magnetron sputtering, and the CdTe waveguides were fabricated by photolithography followed by wet etching. In particular, the sidewall of the waveguide is almost perpendicular to the substrate due to the large difference in the longitudinal and transverse etching rates caused by the unique grain arrangement of the film. A near-infrared femtosecond laser centered at 1030 nm with a pulse width of 250 fs at a 500 kHz repetition rate is employed as the pump source, and an apparent spectral broadening based on self-phase modulation was observed. The numerical simulations match well with the experimental results. These results pave the way for long-wavelength mid-infrared light sources and provide abundant new opportunities for MIR microphotonics.

Zhe L, Hang Y, Wu H, et al. Self-phase modulation in integrated cadmium telluride polycrystalline waveguide[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(2): 220313; DOI: [10.12086/oe.2023.220313](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220313)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62075144, 62005187), Sichuan Outstanding Youth Science and Technology Talents (2022JDJQ0031), and Engineering Featured Team Fund of Sichuan University (2020SCUNG105)  
College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

\* E-mail: [li.yang@scu.edu.cn](mailto:li.yang@scu.edu.cn)