T基于氢掺杂氧化铟微加热器的热光移相器

Weiyu Tong、*Erqi Yang*、*Yu Pang*、*Haobo Yang*、*Xin Qian*、*Ronggui Yang*、*Bin Hu**、*Jianji Dong** 和 *Xinliang Zhang*

W. Tong、E. Yang、B. Hu、J. Dong、X. Zhang 武汉国家光电实验室，华中科技大学，中国武汉 430074 电子邮箱：bin.hu@hust.edu.cn；jjdong@hust.edu.cn Y. Pang、H. Yang、X. Qian、R. Yang 华中科技大学能源与动力工程学院，中国武汉 430074

关键词：硅光子学、热光、移相器、透明导电氧化物、氢掺杂氧化铟

热光（TO）移相器是大规模有源硅光子集成电路（PICs）中的基本单元。然而，由于微加热器材料在加热效率与吸收损耗之间存在权衡，目前报道的设计通常存在响应时间慢、功耗高、良率低等问题。在此，我们通过引入氢掺杂氧化铟（IHO）薄膜作为微加热器，展示了一种高能效、快速响应、低损耗的热光移相器。经优化的电子浓度和增强的迁移率赋予 IHO 高电导率和高近红外（NIR）透明度，使其能够直接接触硅波导，无需任何绝缘层，从而实现高效调谐和快速响应。该热光移相器的响应时间低于微秒（970 ns/980 ns），移相功耗为 π 9.6 mW。IHO微加热器引入的插入损耗为 ~ 0.5 dB。所提出的基于 IHO 的微加热器采用兼容的加工技术，展现了这种材料在大规模硅光子集成电路应用中的巨大潜力。

1. 引言

硅光子集成电路（PIC）凭借低功耗、高速度和大带宽等优势，有望成为通信革命的核心，

并且兼容互补金属氧化物半导体（CMOS）。近年来，光学相控阵（OPA）、[1-3] 光学神经网络（ONN）、[4-6] 集成光子量子技术[7, 8] 等光子集成电路的新兴应用也日益受到关注。移相器凭借相位调谐能力，成为不可或缺的基础光子器件；上述各类应用均需要实现其大规模集成。由于硅具有较高的热光系数（1.84×10^{-4} K^{-1}），[9] 通过微加热器加热即可轻松实现硅波导的相位调谐。热光调谐作为一种高效的移相方式，凭借设计简单、易于制造、成本低和结构紧凑等优势，已广泛应用于大规模硅光子集成电路。[10-13] 遗憾的是，传统的金属热光调谐微加热器需要较厚的绝缘层（即 SiO_2 层）来避免较大的吸收损耗，但这会导致功耗高、响应速度慢，因而阻碍了其在需要快速热光调谐的应用场景中的应用，例如光学相控阵的快速光束扫描以及光学神经网络中的神经元快速切换。近年来，有研究提出将金属布置在非常靠近波导的位置，基于非厄米系统理论实现低损耗器件，从而提高热光调谐的效率和速度。[14, 15] 然而，这种方法需要高精度制造工艺，难以用于大规模光子集成电路。为去除绝缘层，研究人员已证明可将石墨烯、[16-18] 磷烯、[19, 20]MXene[21] 等新兴二维材料直接覆盖在波导上用作微加热器，并在热光调谐方面表现出优异性能；但由于成品率较低，二维材料复杂的制备和转移工艺在实际光子集成电路应用中也面临困难。掺杂硅微加热器可直接在波导内部产生热量，实现高速热光调谐，[22-25] 但自由载流子引起的损耗仍是一个棘手问题。

透明导电氧化物（TCO）可作为微加热器的替代材料，其成熟可靠的大规模生产工艺使其能够实际应用于大型硅光子集成电路。迄今为止，主流透明导电氧化物——锡掺杂氧化铟（ITO）已广泛应用于光伏电池、显示器、触摸屏等光电子器件中。[26, 27] 大多数具有较高自由载流子浓度（$n > 5 \times 10^{20}$ cm^{-3}）的透明导电氧化物在可见光谱范围内具有透明性，但由于近红外波段的等离子体振荡，总会表现出强吸收，[28] 从而增加移相器的插入损耗。虽然降低透明导电氧化物的掺杂量、减小n，可以缓解这一问题，但近红外透射率的提升会伴随透明导电氧化物电导率（σ）的降低，可能削弱其加热性能。幸运的是，

电导率由载流子浓度和载流子迁移率（μ）共同决定，可表示为$\sigma = en\mu$ （e为元电荷）。因此，提高μ 但降低n，可以有效平衡电导率与近红外透明度。如今，研究人员已证明，可用其他金属替代 ITO 中的锡以提高μ，例如钛、[29, 30] 钨、[31, 32], 和钼，[33-35] 并证实所得透明导电氧化物薄膜在近红外波段具有更高的透明度，同时仍能保持相当的σ 。然而，这些透明导电氧化物的生长温度要求相对较高（> 300 ℃），超过了微图案制造所用光刻胶的熔点。

本文提出并通过实验验证了一种基于氢掺杂氧化铟（IHO）微加热器的热光相移器。我们通过室温磁控溅射并结合高温后退火处理，为移相器制备了 IHO 微加热器。沉积的 IHO 薄膜具有较高的 μ 和适中的 n，因此能够同时实现适当的方块电阻和较高的近红外透明度。兼容的制造工艺使 IHO 更适合采用成熟的剥离工艺进行图案化，并展现出巨大的片上应用潜力。该 IHO 微加热器经过设计，可直接接触硅波导，无需任何绝缘层，从而实现高效的热光调谐和快速响应。IHO 的高近红外透明度确保了移相器具有较低的插入损耗。我们通过传统的马赫–曾德尔干涉仪（MZI）结构测量了所提出移相器的热光调谐性能。其最快响应时间的上升时间为 970 ns，下降时间为 980 ns，π 移相功耗为 9.6 mW，相应 IHO 微加热器引入的插入损耗约为 0.5 dB。我们的研究表明，IHO 作为一种新型微加热器材料，在大规模硅光子集成电路中具有巨大潜力。

2. 结果

2.1. 芯片设计与制造

基于 IHO微加热器的移相器设计在绝缘体上硅（SOI）衬底上，顶部硅层厚度为 220 nm。**图 1**a 展示了移相器完整制造工艺的详细步骤。首先，我们采用电子束光刻（EBL）和电感耦合等离子体（ICP）刻蚀制造 MZI结构。条形波导的宽度为 550 nm，厚度为 220 nm。随后，通过磁控溅射将 IHO微加热器直接沉积在波导上，并可精确控制图案的几何形状

再通过剥离工艺完成。整个器件采用标准硅光子学制造工艺制造（无需空气沟槽或底切工艺）。

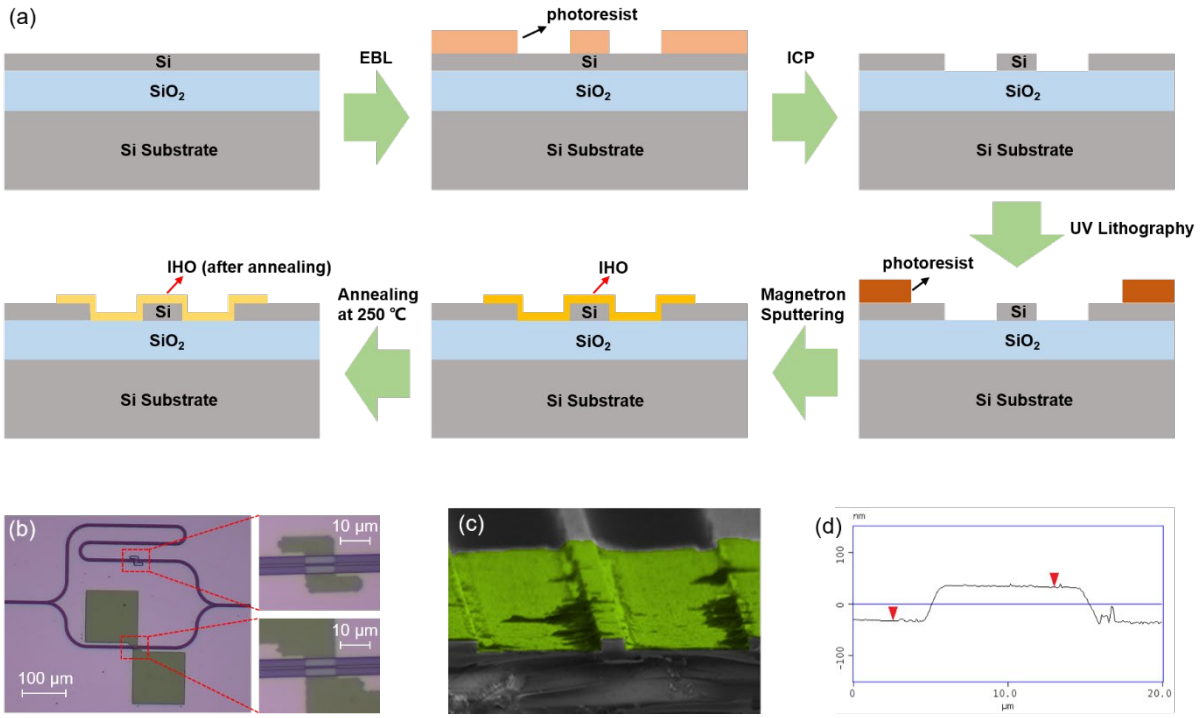


图 1。 a) 器件制造工艺示意图。b) 制造完成的 MZI结构显微镜图像。插图：IHO薄膜的放大图像。c) 移相器横截面的扫描电子显微镜图像。IHO薄膜以伪彩色显示。d) IHO薄膜的厚度测量结果。

图1b展示了所制备的马赫-曾德尔干涉仪结构的显微镜图像。插图展示了波导上 IHO 薄膜的放大图像。马赫-曾德尔干涉仪结构的两条臂均覆盖 IHO 薄膜，以平衡损耗；此外，在马赫-曾德尔干涉仪调谐臂的两侧还沉积了两个 IHO 焊盘，用于与探针接触。沿光传输方向，覆盖波导的 IHO 薄膜长度为 10 μm。一对专为横电偏振设计的光栅耦合器用于与输入/输出光纤耦合。图1c展示了移相器横截面的扫描电子显微镜图像。使用原子力显微镜测得 IHO 薄膜厚度为 66 nm，如图1d所示。

2.2. 芯片表征与测量

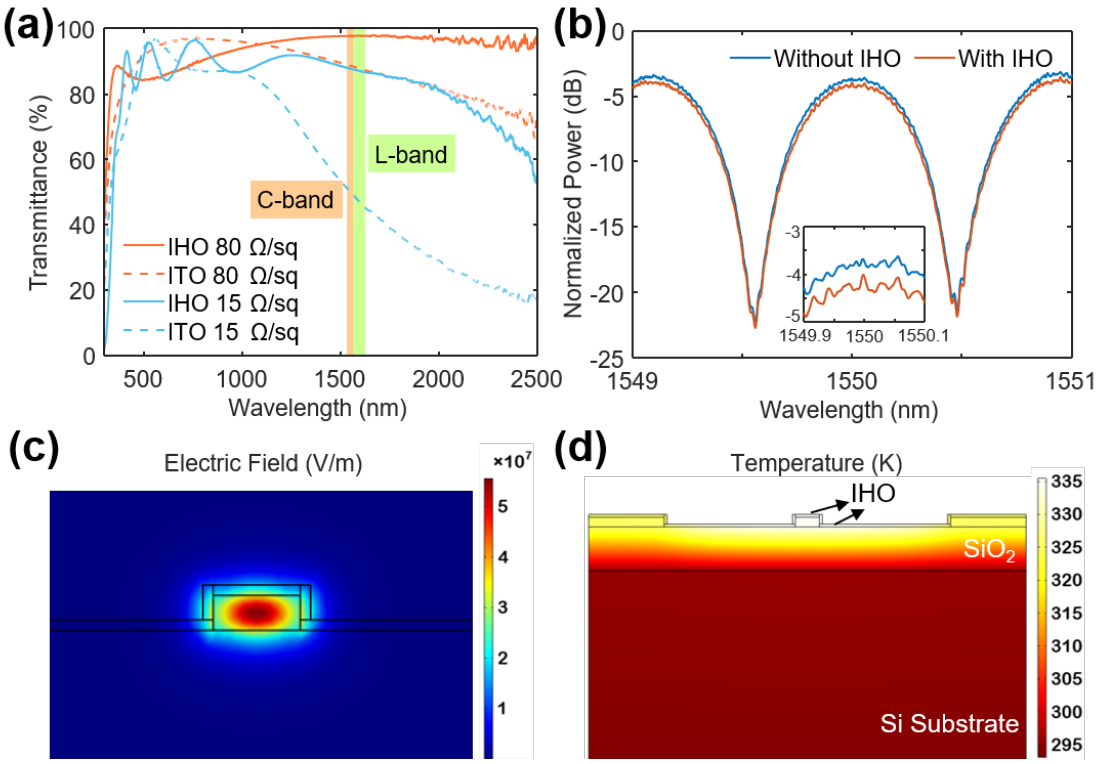


图2。 a) IHO 与 ITO 的透射率对比。b) 有 IHO 和无 IHO 时马赫-曾德尔干涉仪的归一化透射光谱。插图：1550纳米附近的放大图像。c) 波长为 1550纳米时基模的模拟光学电场分布。d) 加热功率为 9.6 mW 时的模拟温度分布。

图2a 对比了所制备的 IHO 薄膜与商用 ITO 薄膜的透射率。可以看出，在方块电阻相同的条件下，IHO 在近红外波段的透射率显著高于 ITO。具体而言，对于厚度为 66 nm 的 IHO 薄膜（对应橙色实线），其在 C+L 波段（1530 nm - 1565 nm 和 1565 nm - 1625 nm）的透射率超过 97%。图2b展示了所制备的、带有和不带 IHO 微加热器的马赫-曾德尔干涉仪结构的实测透射光谱（分别对应橙线和蓝线）。结果已相对于参考条形波导归一化，以排除光栅耦合器的耦合损耗。IHO 微加热器引入约 0.5 dB 的附加损耗（如插图所示），且对马赫-曾德尔干涉仪结构的消光比影响很小。图2c、d 分别展示了基于有限元法（FEM）模拟得到的移相器横截面光学电场分布和温度分布图像。

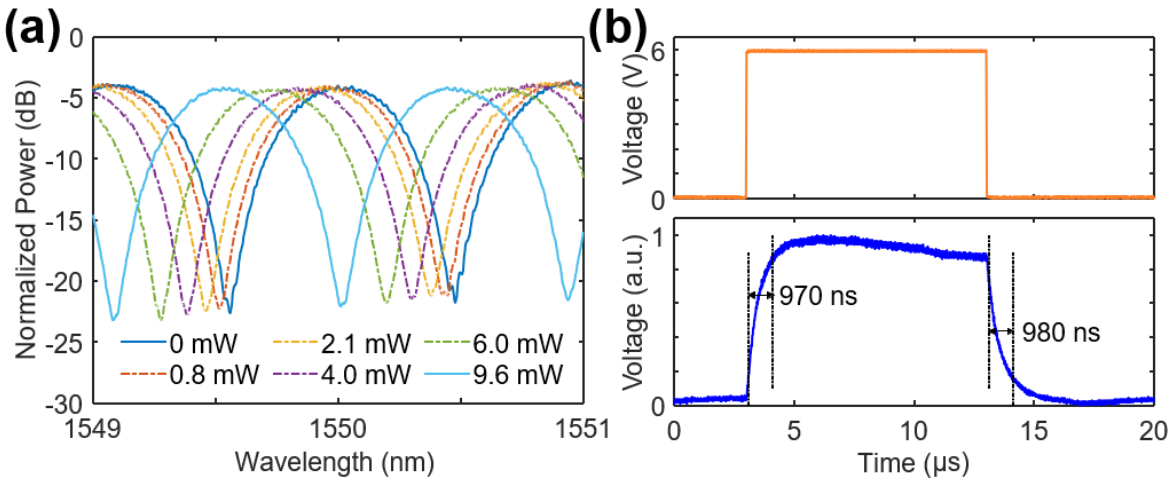


图3。a）不同加热功率下的透射光谱。b）驱动信号（橙色曲线）及其对应输出信号（蓝色曲线）的波形。

为测量光谱响应，对 IHO 微加热器施加不同的驱动功率。测得的光谱如**图3**a所示。波长约为 1550.48 nm 处的干涉谷偏移达到 1/2 个自由光谱范围（FSR），对应的调谐功率为 9.6 mW。随后，通过向 IHO 加热器施加方波电信号，并将输入波长固定在 1550.47 nm，对器件的响应时间进行进一步表征。驱动信号的频率设为 50 kHz，峰峰值电压（V_{pp}）为 6.0 V。6.0 V 的 V_{pp} 对应的加热功率为 9.6 mW。通过光电探测器和示波器测量输出信号的波形。驱动信号及其对应的输出信号如图 3b 所示。测得 10–90% 的上升时间和下降时间分别为 970 ns 和 980 ns。

2.3. 性能比较

我们将所提出的移相器与近年来先进的热光调制器件进行了性能比较，[14-16, 18, 20, 22-25, 36-39] 如**图 4**所示。该移相器较低的π 移相功耗（P_π）更有利于降低大规模光子集成电路的整体功耗，而较短的响应时间则意味着更好的系统性能。作为比较，我们重点考察了马赫-曾德尔干涉仪结构，且与我们的工作一样，器件制造过程中不涉及空气沟槽或底切工艺。此外，如果未提供相关参数，则通过$\tau = 0.35/BW$估算响应时间。[24] 与其他方案相比，我们的工作兼具低功耗和快速响应，在整体调制性能方面仅次于二维材料微加热器。此外，

所提出的器件结构简单易于制造，在大规模光子集成电路应用中具有巨大潜力。

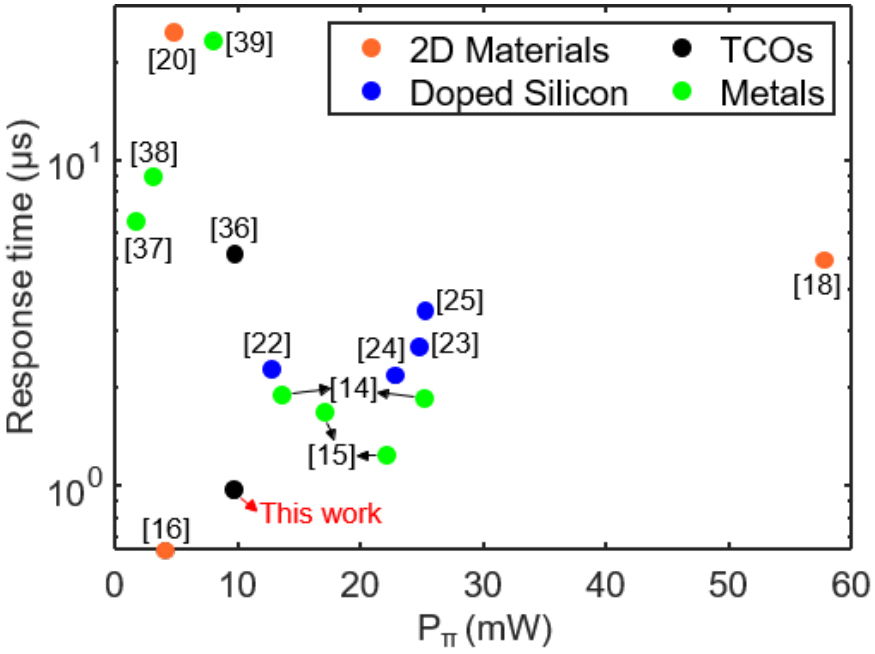


图 4. 当前先进热光调制器件的性能比较。

3. 结论

总之，我们提出并通过实验展示了一种基于IHO微加热器的热光相移器，该微加热器直接覆盖在硅波导上。该移相器的插入损耗低至约0.5 dB。基于MZI结构，其移相功耗仅为9.6 mW，响应速度也很快，上升时间为970 ns，下降时间为980 ns。此外，IHO薄膜易于在芯片上图案化。因此，我们的工作不仅展示了一种高效、响应快速且低损耗的热光相移器，也为大规模光子集成电路中的光调制器件提供了一种新颖的设计方案。

4. 实验部分

材料：通过磁控溅射沉积IHO薄膜。首先，使用高纯度陶瓷 In_2O_3靶材（纯度为99.99%，由中诺先进材料科技有限公司提供）作为溅射靶材。将靶材放入射频（RF）磁控溅射系统（北京科技有限公司）中。当本底压力低于10^{-4} Pa时，向系统中通入氩气和氢氩混合气体（95%Ar和5%H2），并采用不同的Ar和Ar/H_2。气压稳定在0.16 Pa后，在室温（300 K）下以150 W的溅射功率溅射210秒。最后，将沉积后的IHO薄膜

分别在N_2 气氛中于250 °C退火150秒。所有ITO薄膜均由佛山市源晶美玻璃有限公司提供。

器件表征：我们使用放大自发辐射光源（OS8143）产生 C 波段宽带信号，并使用电源（罗德与施瓦茨 HMP4040）提供静态电信号，最后通过光谱分析仪（Yokokawa AQ6319）记录马赫-曾德尔干涉仪结构的光谱响应。测量动态响应时，以任意波形发生器（RIGOL DG4202）替代电源，并使用可调谐激光光源（ID-Photonics CoBriteDX4）发射输入光。输出信号由光电探测器（Discovery DSC40S）测量，随后输入示波器（RIGOL DG4022）。在输入光注入芯片之前，使用偏振控制器选择其 TE 偏振态。所有测量均在室温环境条件下进行。使用紫外-可见-近红外分光光度计（岛津 UV-3600 Plus）表征样品的镜面透射率（范围为 0.3 μm 至 2.5 μm）。

致谢

本研究得到国家自然科学基金（U21A20511、62274071）、国家重点研发计划（2022YFB2804200）和光谷实验室创新项目（项目编号：OVL2021BG001）的资助。作者感谢武汉国家光电实验室光电子微纳加工与表征平台在器件制造方面提供的支持。Weiyu Tong 和 Erqi Yang 对本研究的贡献相同。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

数据可用性声明

支持本研究结论的数据可应合理请求向通讯作者获取。

参考文献

[1] **2013**, 493, J. Sun, E. 195
Timurdogan, A. Yaacobi, E. S. Hosseini, M. R. Watts, 《自然》.[2] D. N. Hutchison, J. Sun, J. K. Doylend, R. Kumar, J. Heck, W. Kim, C. T. Phare, A. Feshali, H. Rong, 《*Optica*》 **2016年**, 3, 887.

[3] C. V. Poulton, A. Yaacobi, D. B. Cole, M. J. Byrd, M. Raval, D. Vermeulen, M. R. Watts, Opt. Lett. 2017, 42, 4091. [4] Y. Shen, N. C. Harris, S. Skirlo, M. Prabhu, T. Baehr-Jones, M. Hochberg, X. Sun, S. Zhao, H. Larochelle, D. Englund, M. Soljačić, 《自然·光子学》 2017, 11, 441. [5] N. C. Harris, J. Carolan, D. Bunandar, M. Prabhu, M. Hochberg, T. Baehr-Jones, M. L. Fanto, A. M. Smith, C. C. Tison, P. M. Alsing, D. Englund, 《Optica》 2018, 5, 1623. [6] W. Bogaerts, D. Pérez, J. Capmany, D. A. B. Miller, J. Poon, D. Englund, F. Morichetti, A. Melloni, 《自然》 2020, 586, 207. [7] J. W. Wang, S. Paesani, Y. H. Ding, R. Santagati, P. Skrzypczyk, A. Salavrakos, J. Tura, R. Augusiak, L. Mancinska, D. Bacco, D. Bonneau, J. W. Silverstone, Q. H. Gong, A. Acin, K. Rottwitt, L. K. Oxenlowe, J. L. O'Brien, A. Laing, M. G. Thompson, 《科学》 2018, 360, 285. [8] X. Chen, Y. Deng, S. Liu, T. Pramanik, J. Mao, J. Bao, C. Zhai, T. Dai, H. Yuan, J. Guo, S.-M. Fei, M. Huber, B. Tang, Y. Yang, Z. Li, Q. He, Q. Gong, J. Wang, 《自然·通讯》 2021, 12, 2712. [9] R. L. Espinola, M. C. Tsai, J. T. Yardley, R. M. Osgood, 《IEEE 光子技术快报》 2003, 15, 1366. [10] H. L. Zhou, Y. H. Zhao, Y. X. Wei, F. Li, J. J. Dong, X. L. Zhang, 《纳米光子学》 2019, 8, 2257. [11] H. L. Zhou, Y. H. Zhao, X. Wang, D. S. Gao, J. J. Dong, X. L. Zhang, 《ACS 光子学》 2020, 7, 792. [12] H. L. Zhou, Y. H. Zhao, G. X. Xu, X. Wang, Z. P. Tan, J. J. Dong, X. L. Zhang, 《IEEE 量子电子学精选主题期刊》 2020, 26, 8300910. [13] J. W. Cheng, W. K. Zhang, W. T. Gu, H. L. Zhou, J. J. Dong, X. L. Zhang, 《ACS 光子学》 2022.[14] W. Y. Tong, Y. X. Wei, H. L. Zhou, J. J. Dong, X. L. Zhang, 《光子学》 2022, 9, 447. [15] Y. X. Wei, J. W. Cheng, Y. L. Wang, H. L. Zhou, J. J. Dong, D. M. Huang, F. Li, M. Li, P. K. A. Wai, X. L. Zhang, 《先进光子学研究》 2022, 3, 2200120. [16] S. Yan, X. Zhu, L. H. Frandsen, S. Xiao, N. A. Mortensen, J. Dong, Y. Ding, 《自然·通讯》 2017, 8, 14411.

[17] **2017**, C. 7, 17046 Y. Qiu, Y. X. Yang, C. Li, Y. F. Wang, K. Wu, J. P. Chen, 《科学报告》 . [18] C. Y. Zhong, Z. B. Zhang, H. Ma, M. L. Wei, Y. T. Ye, J. H. Wu, B. Tang, P. Zhang, R. N. Liu, J. Y. Li, L. Li, X. Y. Hu, K. H. Liu, H. T. Lin, 《纳米材料》 2022, 12, 1083. [19] Z. Cheng, R. Cao, J. Guo, Y. Yao, K. Wei, S. Gao, Y. Wang, J. Dong, H. Zhang, 《纳米光子学》 2020, 9, 1973. [20] Y. J. Liu, H. D. Wang, S. Wang, Y. J. Wang, Y. Z. Wang, Z. N. Guo, S. M. Xiao, Y. Yao, Q. H. Song, H. Zhang, K. Xu, 《先进光学材料》 2020, 8, 1901526. [21] Y. H. Yao, X. F. Xia, Z. Cheng, K. K. Wei, X. T. Jiang, J. J. Dong, H. Zhang, 《IEEE 量子电子学精选主题期刊》 2020, 26, 5900306. [22] M. R. Watts, J. Sun, C. DeRose, D. C. Trotter, R. W. Young, G. N. Nielson, 《光学快报》 2013, 38, 733. [23] N. C. Harris, Y. J. Ma, J. Mower, T. Baehr-Jones, D. Englund, M. Hochberg, C. Galland, 《光学快报》 2014, 22, 10487.

[24] **2019**, M. 27, 10456 Jacques, A. Samani, E. El-Fiky, D. Patel, Z. Xing, D. V. Plant, 《光学快报》 . [25] C. Zhong, H. Ma, C. Sun, M. Wei, Y. Ye, B. Tang, P. Zhang, R. Liu, J. Li, L. Li, H. Lin, 《光学快报》 2021, 29, 23508. [26] D. S. Hecht, L. B. Hu, G. Irvin, 《先进材料》 2011, 23, 1482. [27] K. Ellmer, 《自然·光子学》 2012, 6, 809.

[28] D. S. Ginley, J. D. Perkins, 载于《透明导体手册》, （编者：D. S. Ginley）, Springer US, 美国马萨诸塞州波士顿, 2011年。[29] M. F. A. M. van Hest, M. S. Dabney, J. D. Perkins, D. S. Ginley, M. P. Taylor, 《应用物理快报》**2005年**, 87。[30] Y. Abe, N. Ishiyama, 《材料科学杂志》**2006年**, 41, 7580。[31] P. F. Newhouse, C. H. Park, D. A. Keszler, J. Tate, P. S. Nyholm, 《应用物理快报》**2005年**, 87。
[32] **2006**, 515, X. F. Li, Q. 2471
Zhang, W. N. Miao, L. Huang, Z. J. Zhang, 《薄固体膜》。.[33] Y. Meng, X. L. Yang, H. X. Chen, J. Shen, Y. M. Jiang, Z. J. Zhang, Z. Y. Hua, 《薄固体膜》**2001年**, 394, 219。[34] S. Parthiban, V. Gokulakrishnan, K. Ramamurthi, E. Elangovan, R. Martins, E. Fortunato, R. Ganesan, 《太阳能材料与太阳能电池》**2009年**, 93, 92。[35] J. E. N. Swallow, B. A. D. Williamson, S. Sathasivam, M. Birkett, T. J. Featherstone, P. A. E. Murgatroyd, H. J. Edwards, Z. W. Lebens-Higgins, D. A. Duncan, M. Farnworth, P. Warren, N. H. Peng, T. L. Lee, L. F. J. Piper, A. Regoutz, C. J. Carmalt, I. P. Parkin, V. R. Dhanak, D. O. Scanlon, T. D. Veal, 《材料视野》**2020年**, 7, 236。[36] J. Parra, J. Hurtado, A. Griol, P. Sanchis, 《光学快报》**2020年**, 28, 9393。[37] S. A. Miller, Y.-C. Chang, C. T. Phare, M. C. Shin, M. Zadka, S. P. Roberts, B. Stern, X. Ji, A. Mohanty, O. A. Jimenez Gordillo, U. D. Dave, M. Lipson, 《Optica》**2020年**, 7, 3。
[38] **2020**, 45, H. Qiu, Y. Liu, C. 4806
Luan, D. Kong, X. Guan, Y. Ding, H. Hu, 《光学快报》。.[39] H. Nejadriahi, S. Pappert, Y. Fainman, P. Yu, 《光学快报》**2021年**, 46, 4646。