先进中红外等离激元波导，用于片上集成光子学

Mauro David*、Davide Disnan、Elena Arigliani、Anna Lardschneider、Georg Marschick、Hanh T. Hoang、Hermann Detz、Bernhard Lendl、Ulrich Schmid、Gottfried Strasser、Borislav Hinkov*

M. David、E. Arigliani、A. Lardschneider、G. Marschick、H. T. Hoang、H. Detz、G. Strasser、B. Hinkov 固态电子学研究所，维也纳工业大学 Gußhausstrasse 25-25a，1040 维也纳，奥地利 电子邮件地址：mauro.david@tuwien.ac.at 电子邮件地址：borislav.hinkov@tuwien.ac.at

D. Disnan，U. Schmid 传感器与执行器系统研究所，维也纳工业大学，Gußhausstrasse 27-29，1040 维也纳，奥地利

H. Detz CEITEC，布尔诺理工大学 Žerotínovo nám. 617/9，601 77 布尔诺，捷克共和国

B. Lendl 化学技术与分析研究所
Getreidemarkt 9，1060 维也纳，奥地利

摘要——长波红外（LWIR，8–14 μm）光子学是中红外领域快速发展的研究方向，应用涵盖分子光谱学和光学自由空间通信。长波红外应用通常依赖体积较大的桌面式自由空间光学系统，这限制了快速时间尺度实验等先进光子学应用的发展。要革新中红外光子学，关键在于将器件微型化为光子集成电路（PIC），同时保持其光学性能。等离激元结构中的亚波长模式约束，使可见光至近红外光谱范围内的此类微型化方案成为可能。然而，要将等离激元学应用于长波红外，需要采用合适的低损耗、低色散材料，并制定与现有中红外技术兼容的集成策略。本研究通过将有机聚合物的光刻图案化与介质负载表面等离激元极化激元（DLSPP）波导相结合，进一步拓展长波红外／中红外光子集成电路领域。特别是，聚乙烯具有良好的光学性质，包括低折射率以及在 ~2-200 μm 范围内的宽透明窗口。我们考察了完整的价值链，包括聚乙烯基 DLSPP 波导的设计、制造和表征，并首次展示其等离激元工作特性，以及沿 S 形弯曲结构的模式导引能力。~1.3 dB 的低弯曲损耗和 ~1 mm 的直线段传播长度，为前所未有的复杂片上中红外光子器件铺平了道路。此外，DLSPP 可全面控制模式参数（传播长度和导引能力），从而利用芯片尺度器件精确满足先进传感和电信应用的需求。

关键词：等离激元波导、中红外集成光子学、聚乙烯、聚合物、长波红外

1. 引言

长波红外（LWIR）光谱区（8-14 μm）是电磁波谱的一部分，涵盖众多备受关注的应用，从高性能光谱分析[1–4] 到光学自由空间通信[5]。特别是，芯片级长波红外光子学在实现前所未有的微型化器件方面潜力巨大。通过专门定制其特性，可以解锁新颖的器件概念，以实现例如对（生物）化学样品的实时反应监测[6–8]、利用（医疗）可穿戴设备进行原位健康监测[3], 以及超高速光学数据通信[9–11]。当今最有前景的长波红外相干光源——量子级联激光器（QCL）——已实现商业化，可提供高功率、室温和连续波运行[12–14]；而其单片对应器件——量子级联探测器（QCD）——在这一波长范围内仍处于研发阶段[15,16]。作为第一步集成，可将二者结合成专门定制的器件，使同一有源区能够发射和探测相同波长的光[13,17,18], ，从而为一类新型单片光子集成电路（PICs）铺平道路[6,19]。然而，与成熟度较高的近红外PICs不同[20], ，中红外（2-20 μm）PICs仍处于开发初期[21], ，现有集成光子学解决方案的实施仍是一项艰巨任务[21,22]。这需要采用新材料[23] ，并开发先进的制造方案，以在芯片尺度上实现低损耗、低色散的长波红外无源光子结构。尤其是，目前缺少能够实现高效模式导引和定向的方案，而这对于构建具备多样能力和复杂功能的全集成器件至关重要。其主要原因之一是，大多数常用材料在长波红外波段都会产生损耗[22],，而按波长缩放几何参数也并不理想，因此无法将其用于单片集成[24]。例如，基于锗[25,26], 、硅[27,28],、卤化物[29], 、硫属化物[30] 或重金属氧化物[31]的介质波导便是如此。尽管如此，近期研究通过将InGaAs/InP无源介质波导与基于InP的中红外QCL集成，取得了显著进展[24,32]。然而，这种集成方法需要复杂的再生长后制造工艺，可能会降低制造良率[33]。另一种颇具前景且更为简便的中红外PIC单片集成方案，是采用介质负载表面等离激元波导（DLSPP）[34,35]。这种方案兼具多项优势，包括可调节的传播长度和亚波长模式约束，便于进一步缩小器件尺寸，同时还可采用兼容且现成的集成方法。

与传统介质波导相比，等离激元波导具有多项优势，例如更强的模式约束和更高的场强[36]。它们还表现出增强的光与物质相互作用，因此在传感[37], 光谱学[38], 和非线性光学[39]等应用中展现出良好的应用前景。在制造方面，基于表面等离激元（SPP）波导的器件受益于使用通常也用于器件电接触的相同金属来传输光信号（例如金）。这显著简化了其单片集成[40]。事实上，基于沉积在金上的200–300 nm厚硅$_3$氮化物$_4$ 条带的DLSPP波导，已经在~6.2 μm处成功实现，用作QCL与QCD之间的新型中红外传感器中的线性光耦合器[6,19,41]。然而，由于在高于7 μm[42]的波长处存在强吸收，在长波红外中使用硅$_3$氮化物$_4$ 作为约束层受到限制。此外，所述结构的有效模式折射率（N_{eff} ≈1.008）过低，无法提供高效的片上导引，而这对于具备先进功能的更复杂芯片级光学电路而言是必不可少的。在这种情况下，能够沿预先定义的路径导引长波红外光信号，相较于通过控制QCL等单个离散元件的光发射方向所能实现的效果，有望实现对模式传播方向更高程度的控制[43]。

尽管基于例如先前开发的锗/金架构[44]的半导体负载表面等离激元极化激元（SLSPP）波导能够在整个中红外光谱（2-14 μm）范围内实现宽带低损耗透射率，但仍存在类似的局限性。由于锗具有宽广的透明性，可以通过适当调整脊形横截面来提高 N_{eff} 。然而，这会显著缩短传播长度[44]。因此，长波红外光谱范围需要具有高透明性和低折射率（RI）的新材料，从而实现与其近红外对应器件相似的性能。

由于成本低、生物相容性好、机械柔性佳、光学损耗低、易于调谐，且

与成熟的纳米制造工艺兼容[45,46]。遗憾的是，与许多无机材料类似，最常用且在近红外波段具有优异光学性质的聚合物（如聚甲基丙烯酸甲酯和SU-8）无法用于更长波长，因为它们在长波红外区域具有很强的吸收[47,48]。相比之下，聚乙烯（PE）最近被提议作为一种适用于中红外集成光子学应用的有前景材料[49]，其依据是它具有宽广的光学透明范围（~2-200 μm）[49,50]。此前已有研究报道了用于太赫兹（>20 μm）应用的基于聚乙烯的波导或天线的制造方法[52,51,53]。然而，迄今尚未有文献报道以微米级分辨率对聚乙烯薄膜进行光刻表面图案化；这对于制造高精度芯片级光互连至关重要。此外，文献中也尚未展示基于聚乙烯的DLSPP波导中长波红外等离激元的基础演示。

在本研究中，我们采用通过旋涂制备的高透明度聚乙烯薄膜作为长波红外 DLSPP 波导的脊形材料。我们使用商用软件 COMSOL 进行有限元模拟，以设计并优化各种脊形几何结构。随后，我们通过制备无机硬掩模并进行 O_2 等离子体刻蚀，采用一种新型紫外光刻工艺制造等离激元器件。我们通过实验研究器件的光学性能，并使用截断法提取传播损耗。我们的方案证明，通过简便的光刻制造工艺，可以将聚乙烯图案化为多种脊形几何结构。该方案可全面控制波导结构，使其能够针对各种特定应用进行精确设计。除了展示一种适用于长波红外的新型表面等离激元波导系统外，我们还为中远红外集成光子学开辟了一种新材料平台。由此，我们为新一类复杂的单片光子器件和网络开辟了途径，使其能够利用基于聚乙烯的波导结构与中红外及更远波段量子级联技术的结合。

2. 结果与讨论

2.1. 等离激元结构的模拟与设计

器件设计的第一步是利用 COMSOL Multiphysics 的本征模求解器，对各种器件结构进行仿真。由于计算精度在很大程度上取决于所涉及材料的光学参数，我们对薄膜制备技术进行了优化，以获得光学参数与块体材料相近的高质量薄层。有关聚乙烯（PE）薄膜的制备及其折射率数据的更多详细信息，请参阅其他文献[49]。仿真针对 9.26 μm 的目标波长进行，该波长位于适用于自由空间光通信的光谱窗口之一[5]。所研究的等离激元波导架构为 DLSPP 波导，如图 1a 所示。它由位于金属（金）层顶部的介质脊构成。图 1b 展示了尺寸为 3.6 × 3.6 μm^2 的聚乙烯脊的电场约束（$|E_y|$）。对于这些设计参数，模式局域于波导金属-介质界面处的介质芯中，表现出良好的传播长度（$L_P \sim 455$ μm），其有效模式折射率为 N_{eff}=1.20。这表明，该材料体系具有良好的性能潜力，能够兼顾较长的 L_P 和足够高的 N_{eff}，从而有望实现沿芯片表面的光学模式导引。

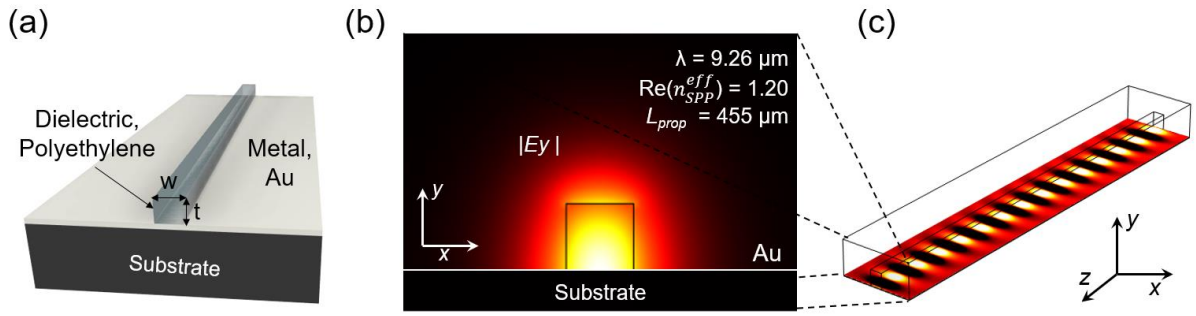

图1. a) DLSPP波导的横截面。b) 对于$|E_y|$ 2D TM_{00} SPP 模式在λ = 9.26 μm处、尺寸为3.6 x 3.6 μ m^2 的DLSPP波导中的场分布。c) 波导三维仿真的俯视图。

图2展示了脊部尺寸对不同性能指标的影响。图2a显示了不同厚度下仿真的有效模式折射率，并以脊部宽度为横坐标绘制。该图突出了 N_{eff} = 1.1 的数值，该数值产生了在周围空气包层中实现沿波导弯曲段有效模式导引所需的最小折射率差。随着脊部厚度的增加，N_{eff} 单调增大，从而实现更好的模式导引能力。图2b展示了相应的仿真结果，说明了脊部尺寸变化对传播长度 L_P的影响。总体而言，图2展示了等离激元波导的典型权衡关系：N_{eff}的增加会增强介质脊中的模式约束，但代价是波导损耗增大，即 L_P降低。对于较薄的脊形几何结构（t < 1.2 μm），传播长度约为1 mm，但 N_{eff} 过低，无法提供有效的模式导引。增加脊部厚度可以增大 N_{eff}，为光导引提供必要条件，但代价是传播长度缩短。

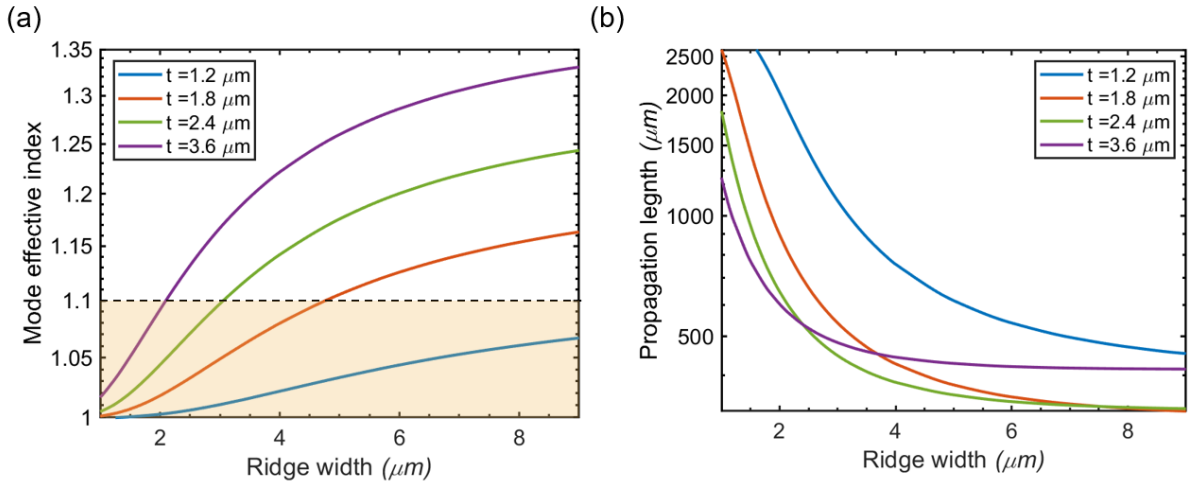

图 2. a) 不同脊部尺寸下的模式有效折射率 N_{eff}。b) 不同 t 脊部尺寸。

这些结果表明，与此前针对电信波段频率下基于PMMA的DLSPP波导开展的数值研究[34]相比，基于PE的DLSPP波导在性能方面具有相似性。

上述通过数值模拟对几何因素进行的分析，揭示了非常有利于集成光子学应用的特定脊部尺寸。具体而言，图3a显示，存在一个最佳脊部宽度（范围为2–5 μm），可使模式尺寸最小化，此处以归一化模式面积 A_{eff}/A_0 表示。与电信波段频率下基于PMMA的DLSPP波导的情况类似[54],，当脊部宽度小于最佳值时，模式会被推至介质脊之外，导致其延展范围增大。脊部宽度较大时，模式将占据全部可用的介质空间，因而模式约束程度再次降低（另见图7b中的插图）。值得注意的是，对于几何尺寸经过优化的PE脊，其传输性能可与广为人知的电信波段频率下基于PMMA的DLSPP波导相媲美。图3b展示了这一点：我们模拟了圆形波导段中90°弯曲段的透射率 $T_b = I_b/I_a$（见图3b中的插图）。对于λ = 9.26 μm的PE和λ = 1.55 μm的PMMA，图中给出了透射率随归一化半径 R/λ[55] 的变化关系。该图表明，两种聚合物在各自工作波长下的光学性质非常相似，只需按比例缩放几何尺寸，即可在长波红外光谱区的PE中重现PMMA在电信波段频率下的等离激元性能。我们以这些仿真结果作为设计指南，着手制造等离激元器件。

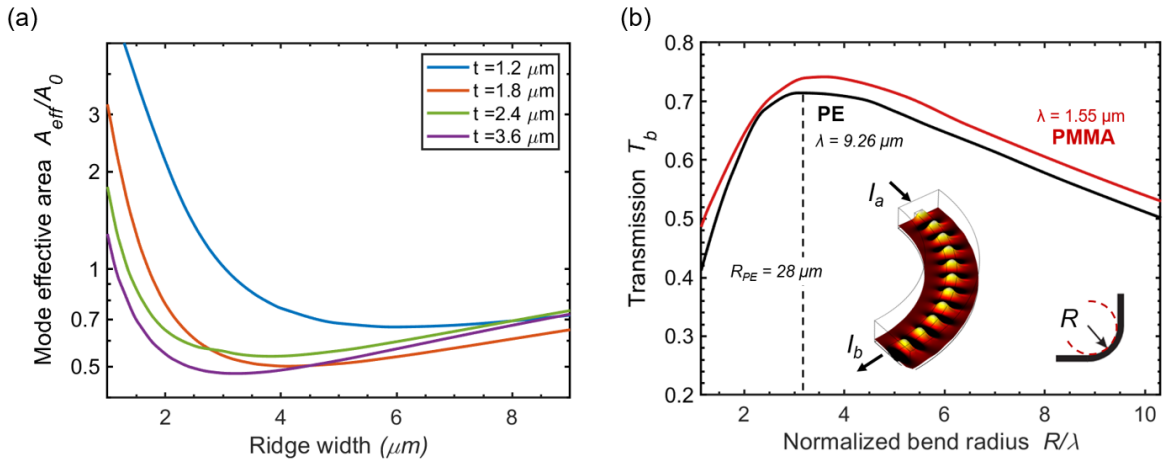

图3. a) 聚乙烯脊形几何结构对有效模式面积（A_{eff}/A_0）的影响。b) 90°聚乙烯DLSPP波导弯曲结构（横截面为3.6 x 3.6 μm^2）在λ = 9.26 μm处与PMMA DLSPP波导（横截面为600 x 600 nm^2）在λ = 1.55 μm处的透射率（I_b/I_a）比较，作为其归一化半径（R/λ）的函数。插图：聚乙烯波导模式的三维建模。

2.2. 等离激元器件的制造

金是中远红外光子器件电接触中最常用的金属之一，因此如前文所述，它是等离激元层的合适选择。采用基于金属的等离激元学的另一项重要优势是其不受基底材料限制，从而能够实现更加灵活的集成。换句话说，这为光子器件基底材料的选择提供了更大的灵活性。实际上，对于长波红外频率，倏逝场在金属中的穿透深度仅约为13 nm。这使得可以使用涂覆有100 nm等离激元金层的硅基底，同时也可以使用基于量子级联技术的材料体系，例如InP或GaAs。作为DLSPP 波导芯层材料使用的聚乙烯薄膜，是通过从浓度为 wt=10% 的溶液中旋涂沉积而成的，所得薄膜厚度为5.0 μm。对于9.26 μm的目标波长，通过椭偏测量[49] 测得聚乙烯薄膜折射率的实部和虚部分别为1.48和0.0001。图4展示了等离激元器件制造步骤的示意流程图。由于聚乙烯并非本征的UV敏感聚合物[56],，我们采用了与有机PVDF基MEMS中使用的类似方法[57],，即定义一个无机硬掩模。在采用金硬掩模的情况下（图4a），必须将光刻工艺重复第二次，以便在不损伤底部金层的情况下安全去除顶部金层。在后续尝试中，使用铬硬掩模进一步优化了制造工艺（图4b），由于铬蚀刻剂不会侵蚀底部金层，波导底部的“鼠咬型”缺陷数量显著减少。此外，这一方法还避免了进行第二次光刻步骤的需要。有关薄膜和脊形结构制造的更多细节，参见实验部分。器件制造完成后，通过将等离激元波导切割成不同长度（范围为1至2.3 mm）来完成芯片制备，以进行切回测量。

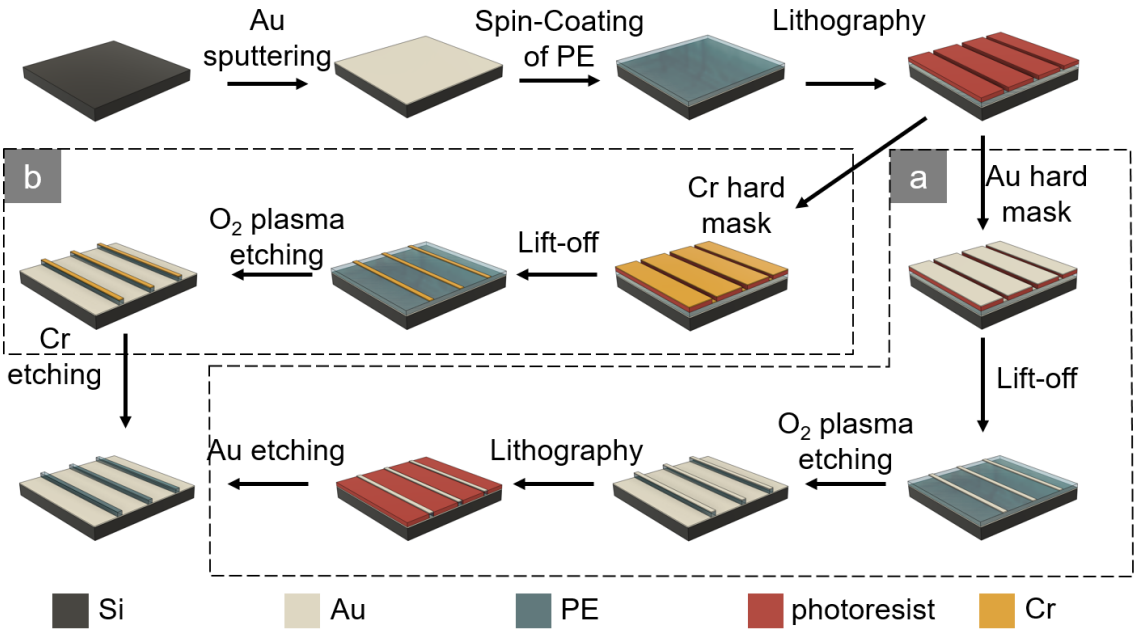

图 4. 芯片制造工艺的示意流程图：a) 使用金硬掩模；b) 使用铬硬掩模。

随后使用原子力显微镜（AFM）表征旋涂薄膜的表面形貌。图 5 显示了旋涂后聚乙烯层的均方根（rms）面粗糙度。测得聚乙烯层的 rms 粗糙度为 10.4 nm，表明旋涂工艺形成的表面较为平滑。值得注意的是，在表面图案化之前，制成器件的顶部与旋涂薄膜之间未观察到明显的表面形貌差异（Sq = 10.7 nm）。

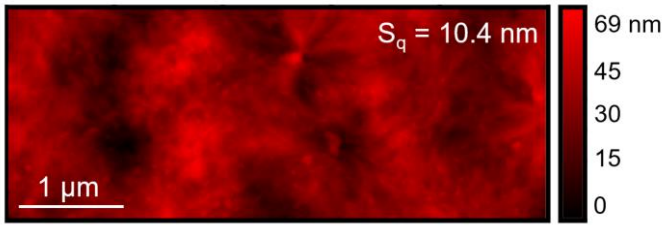

图 5. 旋涂后立即获取的典型聚乙烯薄膜 AFM 图像。均方根面粗糙度为 S_q = 10.4 nm。

制造完成后，使用扫描电子显微镜（SEM）对这些结构进行分析，以评估其物理特性（图6）。SEM图像显示，波导的侧壁存在一定程度的粗糙度，这可能导致散射损耗增加，并降低器件的效率。然而，波导的上边缘看起来相对平坦，表明制造工艺能够实现较高的精度。

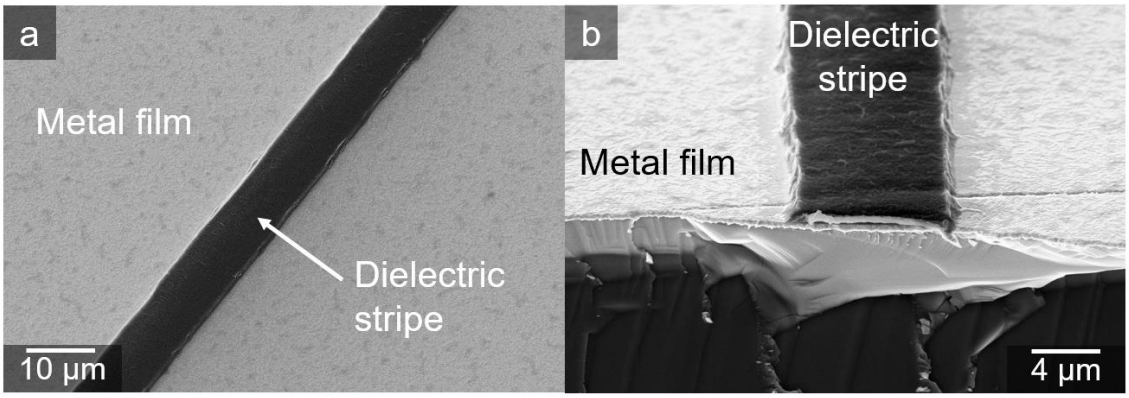

图 6. DLSPP PE 波导结构的扫描电子显微镜（SEM）图像。a）等离激元波导；b）宽 8 μm、高 1 μm 的 PE 条带局部放大图。

研究了多种几何结构，宽度范围为 3 至 20 μm。采用等离子体刻蚀系统（STS 320PC——未配备温度控制功能）对器件进行刻蚀。在等离子体刻蚀工艺完成后，我们观察到每次刻蚀步骤后厚度均出现不均匀的减小。由于该聚合物的熔点相对较低（110°C–135°C），我们认为这是刻蚀过程中腔室内达到的不可控温度与低压环境共同作用所致。具体而言，与采用 100 nm 金作为掩模的器件相比，采用 20 nm 铬硬掩模制备的器件厚度减小幅度较小，这表明聚合物薄膜在刻蚀过程中可能达到了软化点（~110°C），并受到硬掩模重量的影响。然而，由于这些意料之外的厚度变化，我们获得了几何参数范围更加广泛的器件，从而能够对实验结果与理论预测结果进行更具普遍性和完整性的比较。

2.3. 透射测量

通过使用定制测量装置[44]进行透射测量，确定了等离激元器件的光学性能。对于每种制造的波导几何结构[58–61]，均采用有效截断法确定传播损耗。图 7a 展示了波导损耗和耦合损耗方面的结果汇总。研究还利用 COMSOL 对制造的器件进行了建模，损耗和归一化面积结果以虚线表示。图 7a 的测量数据与模型之间的偏差可归因于制造缺陷，这些缺陷导致器件性能存在差异。总体而言，测量结果与仿真结果高度吻合。图 7b 展示了不同尺寸对应的模式横截面。

在表面等离激元波导中，所支持的垂直和横向模式约束强烈依赖于几何因素，如图 7b 所示。通过将测得的耦合损耗与模拟得到的归一化有效模式面积（A_{eff}/A_0）进行比较，可以从实验上验证这种关系。在端面耦合实验中，当输入光模式与接收光学元件所支持的模式尺寸不完全匹配时，就会产生耦合损耗。因此，有效模式面积越大，耦合损耗越高（如本例所示，对于焦斑尺寸较小的透镜而言），因为透镜与波导模式之间的空间重叠会减小。相反，有效模式面积越小，两个元件之间的空间重叠越大，耦合损耗也越低。总之，我们的测量结果与模拟结果吻合良好。

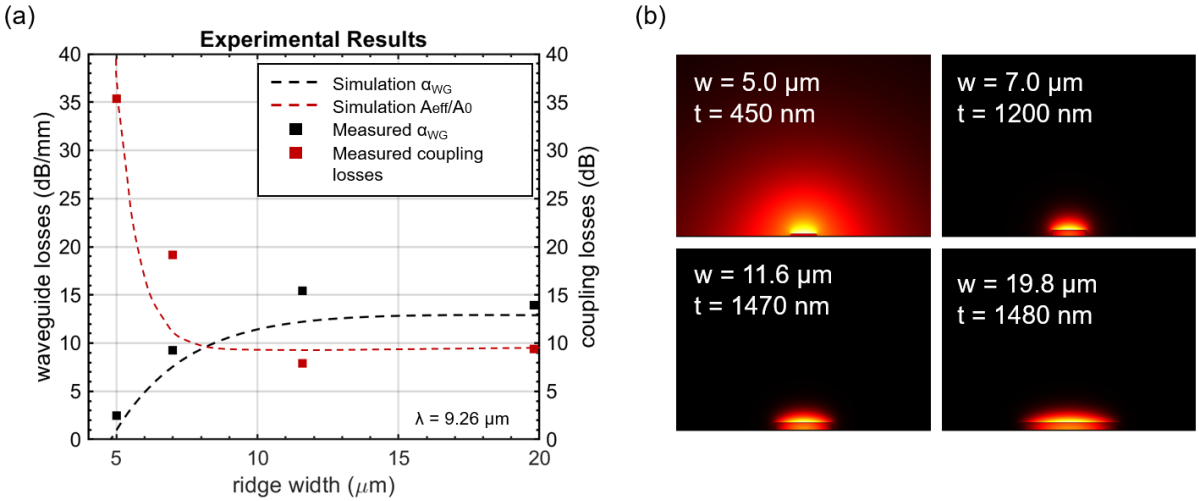

图 7. a）采用有效截断法提取的波导损耗（左）和耦合损耗（右）测量数据汇总。方形数据点表示采用截断法提取的各波导宽度对应的损耗。虚线表示对仿真结果进行指数拟合所得的曲线。b）制备的 DLSPP 波导的模式分布仿真，并标示出用轮廓仪测得的相应宽度（w）和厚度（t）。

这种聚合物较低的折射率，使其首次能够在长波红外波段实现与电信波长下聚甲基丙烯酸甲酯相似的 DLSPP 波导性能。相比之下，使用硅或锗等透明高折射率材料，则需要采用小得多的几何尺寸（宽度和厚度约为 1 x 1 μm^2），才能实现相似的路由性能。然而，在后一种情况下，由于约束程度更高，会放大金层造成的光学模式损耗，因此无法实现如此低损耗的传播。此外，尺寸如此之小时，在同一芯片上制造波导并将其与有源器件集成也颇具挑战性。

为了通过实验研究等离激元波导的弯曲损耗，我们制造了宽 5 μm、厚 3 μm 的波导结构（图 4b），其形式为双 S 形弯曲（图 8a 中“A”与“B”之间）。弯曲结构的设计基于图 3b 所示的仿真结果进行了优化，目标弯曲半径为 28 μm，并确保模式在整个弯曲过程中绝热演化。我们制造了两种器件，其弯曲偏移量（即两条臂之间的差值）分别为 d_1 = 50 和 d_2 = 75 μm。结果汇总于表 1。实验和理论透射值吻合良好，如图 8b 所示。这些结果表明，聚乙烯作为一种有前景的材料，在用于中长波红外集成光子应用的 DLSPP 波导方面具有巨大潜力。

表 1. 106 μm 长 S 形弯曲的模拟与实测 S 形弯曲损耗对比表。由制造缺陷引起的散射损耗通过实测损耗减去模拟损耗计算得出。

偏移 [μm]	模拟 [dB]	S 形弯曲损耗 [dB]	散射（缺陷）[dB]	带损耗 [dB]
50	2.30	3.18	0.88	1.31
75	3.45	5.22	1.77	2.33

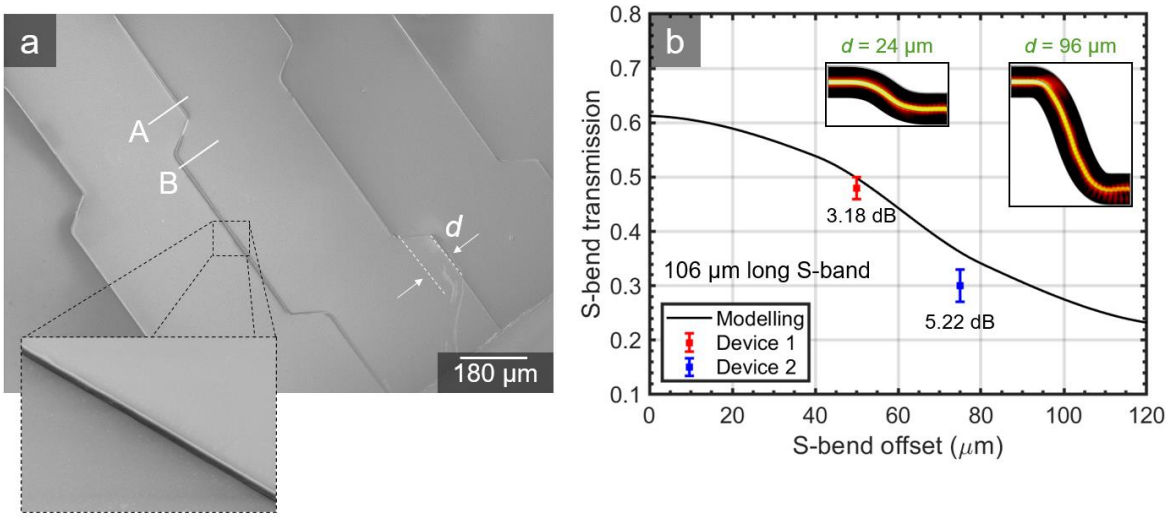

图 8. a) S形弯曲结构的扫描电子显微镜图像（宽度 w = 5 μm，厚度 t = 3 μm），偏移量为 d = 75 μm。b) 通过数值建模和测量获得的 S 形弯曲结构透射率与两臂之间偏移距离（A-B 段）的关系。（插图）偏移量分别为 d = 24 μm 和 d = 96 μm 时三维仿真的俯视图。

本研究结果对开发基于有机材料的生物相容性光子集成理念具有重要意义；这些理念利用等离激元或其他面向长波红外的光子波导设计，包括传统介质波导、光子晶体波导和光纤。因此，本研究所用聚乙烯表现出的低损耗特性及其成功制造，为实现完全集成的复杂光子系统提供了极具前景的途径。此外，用于对聚乙烯薄膜进行图案化的紫外光刻工艺取得成功，为实现中远红外范围内的其他低损耗波导架构带来了新的可能性。此外，同一制造流程还可用于制造具有微米级特征尺寸的透明微流控芯片，为片上流体输运和光学传感提供新的平台。该方法可用于开发完全集成的芯片实验室系统，使其在可见光和中红外波段均具有高度透明性，同时为广泛的生物和化学传感应用开辟新途径。此外，该方法还可助力开发适用于长波红外以外波段及太赫兹范围的新型低损耗波导架构。

3. 结论

我们首次展示了基于聚乙烯的等离激元波导在长波红外波段的应用。这为在芯片尺度上实现更复杂的长波红外单片光子集成电路和网络开辟了亟需的途径，并可提供多种可调特性。对基于有机材料的聚乙烯薄膜进行旋涂后，我们开发了适用的制造工艺，利用等离子体刻蚀和金属硬掩模对等离激元结构进行图案化。透射测量结果表明，波导损耗与仿真结果吻合良好。实验测得，所制造器件的波导传播损耗介于 0.00248 和 0.01545 dB μm^{-1} 之间，弯曲损耗为 ~1.3–2.3 dB。通过优化制造工艺，还可进一步降低这些数值。这种聚合物具有优异的材料特性，将为基于有机材料的集成光子器件开辟新的途径。其应用并不限于等离激元概念，还覆盖从中红外到远红外的宽广光谱范围。

4. 实验部分

等离激元器件的仿真与设计：为仔细研究基于PE的DLSPP波导的导波特性，我们使用成熟的 COMSOL Multiphysics 光学模式求解器进行了数值模拟。根据获得的折射率数据

来自我们此前发表的椭偏测量文献数据[49], 我们针对 9.26 μm 的目标波长进行了数值模式分析。仿真结果为器件制造提供了设计指南，并用于后续估算由结构缺陷和表面粗糙度等制造缺陷引起的散射损耗。采用的设计参数包括有效模式折射率 N_{eff}、传播长度 Lp 和归一化面积 A_{eff}/A_0。传播长度定义为 $L_p = 1/(2\alpha)$，其中α 为衰减常数。归一化面积定义为有效模式面积 A_{eff} 与衍射极限 $A_0 = \lambda^2/4$ 之比，其中，

$$\boldsymbol{A_{eff} = \frac{1}{Max\{W(r)\}} \int_{A_\infty} W(r)\, dA} \tag{1}$$

其中，位置 r 处的能量密度 W(r),

$$\boldsymbol{W(r) = \frac{1}{2} Re\left\{\frac{d[\omega \varepsilon(r)]}{d\omega}\right\} |E(r)|^2 + \frac{1}{2}\mu_0 |H(r)|^2} \tag{2}$$

聚乙烯薄膜的合成：非晶态聚乙烯薄膜在湿度和温度受控的手套箱中通过旋涂制备。薄膜由线性低密度聚乙烯粉末（Sigma-Aldrich，$\rho = 0.906$ g mL^{-1}，平均 $M_w \sim 35000$ 和 $M_n \sim 7700$）分散于甲苯（Sigma-Aldrich，无水，纯度 99.8%）中制备，质量分数为 10%。采用动态滴涂法，在热溶液（100°C）中以 1000 rpm 的转速旋涂 35 s，加速时间为 5 s。旋涂前，样品在热板上预热至 120°C，并在旋涂结束后立即于 120°C 下进行 15 分钟的后烘烤。有关薄膜合成及其光学和结构表征的详细信息，请参阅我们此前的工作[49]。

等离激元器件的制造：采用厚度为 275 μm 的双面抛光 2" 硅 (100) 晶圆作为基底。劈裂后，将 11 x 11 mm^2 样品置于丙酮浴中进行超声清洗，然后使用标准射频溅射设备（LS 320S，Von Ardenne）沉积 8 nm 的钛和 100 nm 的金。随后，在镀金样品上旋涂聚合物，目标厚度为 5 μm。为进行图案化，在聚合物顶部直接以 4000 rpm 的转速旋涂 AZ5214E 光刻胶 30 s，随后在 100°C 下烘烤 1 min，形成厚度为 1.5 μm 的光刻胶层。接着，使用紫外掩模对准仪（Karl Suess，MJB4）系统进行接触式光刻，曝光时间为 4 s，随后在 AZ726MIF 中显影 37 s。为将图案从光刻胶转移到聚合物上，采用电子束蒸发沉积 100 nm 的金层（或 20 nm 的铬）覆盖样品。经过剥离工艺（在丙酮中进行 30 min）后，使用等离子体刻蚀系统（STS 320PC——无温度控制）对样品进行刻蚀。所采用的刻蚀配方基于标准氧等离子体（功率：150 W，O2 流量：49.5 sccm，压力：150 mTorr，时间：4 个周期，每周期刻蚀 5 min，并冷却 10 min），还可进一步优化，以控制刻蚀速率、侧壁粗糙度并减少基底上的再沉积。所得刻蚀速率为 250 nm min^{-1}。制造器件的表面形貌如图 6 所示。刻蚀后，按照上述类似方法进行第二次光刻工艺，以去除金硬掩模。最后，使用 KI/I_2 金刻蚀液刻蚀金硬掩模 30 s，随后在丙酮浴中去除光刻胶。制造工艺流程如图 4 所示，通过采用铬硬掩模可进一步改进，具体如结果与讨论部分所述。通过将最终器件劈裂成不同长度，为其光学表征做好准备。

透射测量：采用定制搭建的端面耦合测试装置对器件进行表征，该装置由双透镜结构（C037TME-F，Thorlabs）组成。待测器件放置在压电位移台上。在$\lambda = 9.26$ μm波长下，使用 HHL501 DFB-QCL 对波导进行测试。激光光束被引导至中红外相机（Tau 2，Teledyne FLIR LLC，美国），以检查光束轮廓，并通过抛物面反射镜聚焦，最终利用热电制冷型 MCT 探测器（PVI-4TE-10.6，Vigo Systems S.A.，波兰）进行检测。

硒化锌分束器（BSW711，Thorlabs）。为提取波导损耗，采用有效截断法[44, 58–61]。测量过程包括将波导置于透镜之间，并仔细调整样品的位置，以使信号强度达到最大值。每次读数前后均进行参考测量，并对每个波导的强度测量三次后取平均值。随后，通过从测量得到的损耗中减去模拟的传播损耗，即可计算出由制造缺陷引起的散射损耗。

致谢

我们感谢欧盟“地平线2020”框架计划（cFlow项目，编号：828893）提供的资助。B.H.感谢奥地利科学基金会（FWF）提供的资助（M2485-N34）。我们谨此感谢由捷克教育、青年和体育部资助的CzechNanoLab项目LM2018110，为在CEITEC纳米研究基础设施开展测量提供了经费支持。我们谨此感谢与Werner Schrenk、Aaron M. Andrews和Benedikt Schwarz进行的富有成效的讨论。我们还要感谢Alicja Dabrowska、Sandro Dal Cin、Cem I. Doganlar和Andreas Linzer提供的专业技术协助。

参考文献

(1) Brown, S. S. 用于大气研究的高精细度腔吸收光谱。《化学评论》2003, 103 (12), 5219–5238. https://doi.org/10.1021/cr020645c. (2) Webber, M. E.; Pushkarsky, M.; Patel, C. K. N. 化学战剂和有毒工业化学品的光学检测：模拟。《应用物理学杂志》2005, 97 (11), 113101. https://doi.org/10.1063/1.1900931. (3) Kasahara, R.; Kino, S.; Soyama, S.; Matsuura, Y. 基于少数波数的中红外吸收光谱无创血糖监测。《生物医学光学快报》, BOE 2018, 9 (1), 289–302. https://doi.org/10.1364/BOE.9.000289. (4) Jernelv, I. L.; Milenko, K.; Fuglerud, S. S.; Hjelme, D. R.; Ellingsen, R.; Aksnes, A. 连续血糖监测的光学方法综述。《应用光谱学评论》2019, 54 (7), 543–572. https://doi.org/10.1080/05704928.2018.1486324. (5) Flannigan, L.; Yoell, L.; Xu, C. 用于光卫星通信的中波和长波红外发射器与探测器——综述。《光学杂志》2022, 24 (4), 043002. https://doi.org/10.1088/2040-8986/ac56b6. (6) Hinkov, B.; Pilat, F.; Lux, L.; Souza, P. L.; David, M.; Schwaighofer, A.; Ristanić, D.; Schwarz, B.; Detz, H.; Andrews, A. M.; Lendl, B.; Strasser, G. 用于动态反应监测的中红外芯片实验室。《自然·通讯》2022, 13 (1), 4753. https://doi.org/10.1038/s41467-022-32417-7. (7) Dabrowska, A.; Schwaighofer, A.; Schwaighofer, A.; Lindner, S.; Lendl, B.; Lendl, B. 采用基于外腔量子级联激光器的马赫-曾德尔干涉仪检测蛋白质的中红外折射率传感器。《光学快报》, OE 2020, 28 (24), 36632–36642. https://doi.org/10.1364/OE.403981. (8) Dabrowska, A.; David, M.; Freitag, S.; Andrews, A. M.; Strasser, G.; Hinkov, B.; Schwaighofer, A.; Lendl, B. 采用量子级联探测器的宽带激光中红外光谱用于乳蛋白分析。《传感器与执行器B：化学》2022, 350, 130873. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130873. (9) Martini, R.; Whittaker, E. A. 基于量子级联激光器的自由空间光通信。《光通信报告》2005, 2 (4), 279–292. https://doi.org/10.1007/s10297-005-0052-2. (10) Pang, X.; Ozolins, O.; Zhang, L.; Schatz, R.; Udalcovs, A.; Yu, X.; Jacobsen, G.; Popov, S.; Chen, J.; Lourdudoss, S. 量子级联激光器赋能的自由空间通信。《固体物理学报A辑》2021, 218 (3), 2000407. https://doi.org/10.1002/pssa.202000407. (11) Dely, H.; Bonazzi, T.; Spitz, O.; Rodriguez, E.; Gacemi, D.; Todorov, Y.; Pantzas, K.; Beaudoin, G.; Sagnes, I.; Li, L.; Davies, A. G.; Linfield, E. H.; Grillot, F.; Vasanelli, A.; Sirtori, C. 10 Gbit

S−1 采用单极量子光电子学在 9 μm 波长下实现自由空间数据传输。《激光与光子学评论》2022，16 (2)，2100414。https://doi.org/10.1002/lpor.202100414。(12) Lu, Q. Y.; Bai, Y.; Bandyopadhyay, N.; Slivken, S.; Razeghi, M. 分布反馈量子级联激光器在室温下实现 2.4 W 连续波运行。《应用物理快报》2011，98 (18)，181106。https://doi.org/10.1063/1.3588412。(13) Schwarz, B.; Wang, C. A.; Missaggia, L.; Mansuripur, T. S.; Chevalier, P.; Connors, M. K.; McNulty, D.; Cederberg, J.; Strasser, G.; Capasso, F. 双功能量子级联激光器/探测器实现瓦级连续波发射。《ACS光子学》2017，4 (5)，1225–1231。https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b00133。(14) Knötig, H.; Hinkov, B.; Weih, R.; Höfling, S.; Koeth, J.; Strasser, G. 垂直发射环形带间级联激光器在室温下的连续波运行。《应用物理快报》2020，116 (13)，131101。https://doi.org/10.1063/1.5139649。(15) Delga, A. 量子级联探测器：综述。载于《中红外光电子学》；爱思唯尔，2020；第 337–377 页。https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102709-7.00008-5。(16) Marschick, G.; David, M.; Arigliani, E.; Opačak, N.; Schwarz, B.; Giparakis, M.; Delga, A.; Lagree, M.; Poletti, T.; Trinite, V.; Evirgen, A.; Gerard, B.; Ramer, G.; Maulini, R.; Butet, J.; Blaser, S.; Andrews, A. M.; Strasser, G.; Hinkov, B. 量子级联探测器在 9 Mm 下的高响应度运行。《光学快报》2022，30 (22)，40188–40195。https://doi.org/10.1364/OE.470615。(17) Schwarz, B.; Reininger, P.; Detz, H.; Zederbauer, T.; Maxwell Andrews, A.; Kalchmair, S.; Schrenk, W.; Baumgartner, O.; Kosina, H.; Strasser, G. 一种用于同频激射与探测的双功能量子级联器件。《应用物理快报》2012，101 (19)，191109。https://doi.org/10.1063/1.4767128。(18) Schwarz, B.; Ristanic, D.; Reininger, P.; Zederbauer, T.; MacFarland, D.; Detz, H.; Andrews, A. M.; Schrenk, W.; Strasser, G. 高性能双功能量子级联激光器与探测器。《应用物理快报》2015，107 (7)，071104。https://doi.org/10.1063/1.4927851。(19) Schwarz, B.; Reininger, P.; Ristanić, D.; Detz, H.; Andrews, A. M.; Schrenk, W.; Strasser, G. 利用等离激元学和量子级联结构实现单片集成中红外芯片实验室。《自然·通讯》2014，5 (1)，4085。https://doi.org/10.1038/ncomms5085。(20) Soref, R. 硅光子学的过去、现在与未来。《IEEE量子电子学精选主题期刊》2006，12 (6)，1678–1687。https://doi.org/10.1109/JSTQE.2006.883151。(21) Lin, H.; Luo, Z.; Gu, T.; Kimerling, L. C.; Wada, K.; Agarwal, A.; Hu, J. 硅基中红外集成光子学：展望。《纳米光子学》2018，7 (2)，393–420。https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0085。(22) Yadav, A.; Agarwal, A. M. 用于中红外的集成光子材料。《应用玻璃科学国际期刊》2020，11 (3)，491–510。https://doi.org/10.1111/ijag.15252。(23) Lavchiev, V. M.; Jakoby, B. 中红外光子学：单芯片集成与吸收传感面临的挑战。《IEEE量子电子学精选主题期刊》2017，23 (2)，452–463。https://doi.org/10.1109/JSTQE.2016.2619330。(24) Jung, S.; Palaferri, D.; Zhang, K.; Xie, F.; Okuno, Y.; Pinzone, C.; Lascola, K.; Belkin, M. A. 在磷化铟平台上实现中红外量子级联激光器与低损耗无源波导的均匀光子集成。《光学》2019，6 (8)，1023。https://doi.org/10.1364/OPTICA.6.001023。(25) Osman, A.; Nedeljkovic, M.; Penades, J. S.; Wu, Y.; Qu, Z.; Khokhar, A. Z.; Debnath, K.; Mashanovich, G. Z. 用于长波红外的悬空低损耗锗波导。《光学快报》2018，43 (24)，5997–6000。https://doi.org/10.1364/OL.43.005997。(26) Chang, Y.-C.; Paeder, V.; Hvozdara, L.; Hartmann, J.-M.; Herzig, H. P. 用于中红外的硅基低损耗锗条形波导。《光学快报》2012，37 (14)，2883–2885。https://doi.org/10.1364/OL.37.002883。(27) Penadés, J. S.; Sánchez-Postigo, A.; Nedeljkovic, M.; Ortega-Moñux, A.; Wangüemert-Pérez, J. G.; Xu, Y.; Halir, R.; Qu, Z.; Khokhar, A. Z.; Osman, A.; Cao, W.; Littlejohns, C. G.; Cheben, P.; Molina-Fernández, I.; Mashanovich, G. Z. 适用于长波红外波长的悬空硅波导。《光学快报》2018，43 (4)，795–798。https://doi.org/10.1364/OL.43.000795。

(28) Fedeli, J.-M.; Nicoletti, S. 基于硅的中红外（Mid-IR）光子学。《IEEE会刊》2018, 106 (12), 2302–2312. https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2844565. (29) Lewi, T.; Katzir, A. 用于中红外的卤化银单模条形波导。《光学快报》, OL 2012, 37 (13), 2733–2735. https://doi.org/10.1364/OL.37.002733. (30) Gutierrez-Arroyo, A.; Baudet, E.; Bodiou, L.; Lemaitre, J.; Hardy, I.; Faijan, F.; Bureau, B.; Nazabal, V.; Charrier, J. 基于硫系化物波导的集成平台在 7.7 Mm 处的光学表征，用于中红外传感应用。《光学快报》, OE 2016, 24 (20), 23109–23117. https://doi.org/10.1364/OE.24.023109. (31) Xin, C.; Wu, H.; Xie, Y.; Yu, S.; Zhou, N.; Shi, Z.; Guo, X.; Tong, L. CdTe 微线作为中红外光波导。《光学快报》, OE 2018, 26 (8), 10944–10952. https://doi.org/10.1364/OE.26.010944. (32) Wang, R.; Täschler, P.; Wang, Z.; Gini, E.; Beck, M.; Faist, J. 中红外量子级联激光器和频率梳与无源波导的单片集成。《ACS光子学》2022, 9 (2), 426–431. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.1c01767. (33) Billah, M. R.; Blaicher, M.; Hoose, T.; Dietrich, P.-I.; Marin-Palomo, P.; Lindenmann, N.; Nesic, A.; Hofmann, A.; Troppenz, U.; Moehrle, M.; Randel, S.; Freude, W.; Koos, C. 通过光子线键合实现硅光子电路与 InP 激光器的混合集成。《Optica》, OPTICA 2018, 5 (7), 876–883. https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.000876. (34) Holmgaard, T.; Bozhevolnyi, S. I. 介质负载表面等离激元极化激元波导的理论分析。Phys. Rev. B 2007, 75 (24), 245405. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.245405. (35) Holmgaard, T.; Bozhevolnyi, S. I.; Markey, L.; Dereux, A. 电信波长下介质负载表面等离激元极化激元波导的激发与表征。Appl. Phys. Lett. 2008, 92 (1), 011124. https://doi.org/10.1063/1.2825588. (36) Chu, H.-S.; Bai, P.; Li, E.-P.; Hoefer, W. R. J. 基于混合介质负载等离激元波导的功率分配器和环形谐振器：面向纳米光子电路的紧凑尺寸与优异光学性能。Plasmonics 2011, 6 (3), 591–597. https://doi.org/10.1007/s11468-011-9239-y. (37) Divya, J.; Selvendran, S.; Raja, A. S.; Sivasubramanian, A. 基于表面等离激元的等离激元传感器：过去、现在与未来综述。Biosensors and Bioelectronics: X 2022, 11, 100175. https://doi.org/10.1016/j.biosx.2022.100175. (38) Wang, X.; Huang, S.-C.; Hu, S.; Yan, S.; Ren, B. 对等离激元增强拉曼光谱的基本理解与应用。Nat Rev Phys 2020, 2 (5), 253–271. https://doi.org/10.1038/s42254-020-0171-y. (39) Panoiu, N. C.; Sha, W. E. I.; Lei, D. Y.; Li, G.-C. 等离激元纳米结构中的非线性光学。《光学杂志》2018, 20 (8), 083001. https://doi.org/10.1088/2040-8986/aac8ed. (40) Kumar, A.; Gosciniak, J.; Volkov, V. S.; Papaioannou, S.; Kalavrouziotis, D.; Vyrsokinos, K.; Weeber, J.-C.; Hassan, K.; Markey, L.; Dereux, A.; Tekin, T.; Waldow, M.; Apostolopoulos, D.; Avramopoulos, H.; Pleros, N.; Bozhevolnyi, S. I. 介质负载等离激元波导组件：迈向实用化。《激光与光子学评论》2013, 7 (6), 938–951. https://doi.org/10.1002/lpor.201200113. (41) Pilat, F.; Schwarz, B.; Baumgartner, B.; Ristanić, D.; Detz, H.; Andrews, A. M.; Lendl, B.; Strasser, G.; Hinkov, B. 超越卡尔·费休滴定：用于监测溶剂中残余水浓度的单片量子级联传感器。Lab Chip 2023, 23, 1816-1824. https://doi.org/10.1039/D2LC00724J. (42) Kischkat, J.; Peters, S.; Gruska, B.; Semtsiv, M.; Chashnikova, M.; Klinkmüller, M.; Fedosenko, O.; Machulik, S.; Aleksandrova, A.; Monastyrskyi, G.; Flores, Y.; Masselink, W. T. 氧化铝、二氧化钛、二氧化硅、氮化铝和氮化硅薄膜的中红外光学性质。Appl. Opt., AO 2012, 51 (28), 6789–6798. https://doi.org/10.1364/AO.51.006789. (43) Hinkov, B.; Fuchs, F.; Bronner, W.; Kohler, K.; Wagner, J. 电流和温度诱导的 7.8-\\mum 发射量子级联激光器中的光束转向。IEEE Journal of Quantum Electronics 2008, 44 (11), 1124–1128. https://doi.org/10.1109/JQE.2008.2003499. (44) David, M.; Dabrowska, A.; Sistani, M.; Doganlar, I. C.; Hinkelmann, E.; Detz, H.; Weber, W. M.; Lendl, B.; Strasser, G.; Hinkov, B. 基于半导体负载等离激元学的跨倍频程低损耗中红外波导

《光学快报》2021, 29 (26), 43567. https://doi.org/10.1364/OE.443966. (45) Ma, H.; Jen, A. k.-Y.; Dalton, L. r. 聚合物基光波导：材料、加工与器件。Advanced Materials 2002, 14 (19), 1339–1365. https://doi.org/10.1002/1521- 4095(20021002)14:19<1339::AID-ADMA1339>3.0.CO;2-O. (46) Clark, J.; Lanzani, G. 面向通信的有机光子学。Nature Photon 2010, 4 (7), 438–446. https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.160. (47) Tsuda, S.; Yamaguchi, S.; Kanamori, Y.; Yugami, H. 聚合物谐振器中红外辐射的光谱与角度整形及其分子振动模式。《光学快报》, OE 2018, 26 (6), 6899–6915. https://doi.org/10.1364/OE.26.006899. (48) Motaharifar, E.; Pierce, R. G.; Islam, R.; Henderson, R.; Hsu, J. W. P.; Lee, M. 聚合物介电基底和封装材料的宽带太赫兹折射率色散与损耗。J Infrared Milli Terahz Waves 2018, 39 (1), 93–104. https://doi.org/10.1007/s10762- 017-0444-4. (49) David, M.; Disnan, D.; Lardschneider, A.; Wacht, D.; Hoang, H.; Ramer, G.; Detz, H.; Lendl, B.; Schmid, U.; Strasser, G.; Hinkov, B. 面向集成光子学应用而开发的旋涂聚乙烯薄膜的结构和中红外光学性质。Optical Materials Express 2022, 12 (6), 2168. https://doi.org/10.1364/OME.458667. (50) Smith, D. R.; Loewenstein, E. V. 远红外材料的光学常数 3：塑料。Appl. Opt. 1975, 14 (6), 1335. https://doi.org/10.1364/AO.14.001335. (51) Geiger, M.; Hitzler, M.; Iberle, J.; Waldschmidt, C. 由柔性介质波导馈电的 160 GHz 介质透镜天线。载于《2017年第11届欧洲天线与传播会议》（EUCAP）；2017；第3380–3383页。https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928163. (52) Song, H. I.; Jin, H.; Bae, H.-M. 塑料吸管：高速信号传输的未来。Sci Rep 2015, 5 (1), 16062. https://doi.org/10.1038/srep16062. (53) You, B.; Lu, J.-Y.; Liu, T.-A.; Peng, J.-L. 用于传感应用的混合太赫兹等离激元波导。《光学快报》, OE 2013, 21 (18), 21087–21096. https://doi.org/10.1364/OE.21.021087. (54) Krasavin, A. V.; Zayats, A. V. 基于介质负载等离激元波导的有源纳米光子电路。Advanced Optical Materials 2015, 3 (12), 1662–1690. https://doi.org/10.1002/adom.201500329. (55) Steinberger, B.; Hohenau, A.; Ditlbacher, H.; Aussenegg, F. R.; Leitner, A.; Krenn, J. R. 金表面的介质条带作为表面等离激元波导：弯曲结构与定向耦合器。Appl. Phys. Lett. 2007, 91 (8), 081111. https://doi.org/10.1063/1.2772774. (56) Nguyen, K. Q.; Cousin, P.; Mohamed, K.; Robert, M.; El-Safty, A.; Benmokrane, B. 紫外辐射对道路排水系统所用再生和原生高密度聚乙烯波纹管的影响。J Polym Environ 2022, 30 (8), 3391–3408. https://doi.org/10.1007/s10924-022-02437-x. (57) Hafner, J.; Teuschel, M.; Schrattenholzer, J.; Schneider, M.; Schmid, U. 有机微机电系统器件的优化批量加工工艺。Proceedings 2018, 2 (13), 904. https://doi.org/10.3390/proceedings2130904. (58) Nikolajsen, T.; Leosson, K.; Salakhutdinov, I.; Bozhevolnyi, S. I. 电信波长下的聚合物基表面等离激元极化激元条形波导。Appl. Phys. Lett. 2003, 82 (5), 668–670. https://doi.org/10.1063/1.1542944. (59) Berini, P.; Charbonneau, R.; Lahoud, N.; Mattiussi, G. 长程表面等离激元极化激元波导的表征。《应用物理学杂志》2005, 98 (4), 043109. https://doi.org/10.1063/1.2008385. (60) Huang, S.-T.; Lai, C.-C.; Sheu, F.-W.; Tsai, W.-S. 可见光至近红外波段长程等离激元波导的表征。AIP Advances 2017, 7 (12), 125221. https://doi.org/10.1063/1.5011716. (61) Zektzer, R.; Desiatov, B.; Mazurski, N.; Bozhevolnyi, S. I.; Levy, U. 兼容CMOS的长程介质负载表面等离激元极化激元波导（LR-DLSPPWs）的实验演示。《光学快报》, OE 2014, 22 (18), 22009–22017. https://doi.org/10.1364/OE.22.022009.