

文章编号: 1002-1582(2025)04-0485-06

高折射率PDMS的溶胶-凝胶技术 制备及其光波导的研究

李新媛, 仝召民*

(山西大学 激光光谱研究所 光量子技术与器件国家重点实验室, 山西 太原 030000)

摘 要: 聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 光波导因其优异的生物相容性在生物医学上有广泛的应用。为了提高PDMS的折射率改善PDMS光波导的应用局限性, 以端羟基聚二甲基硅氧烷 (PDMS-OH) 和异丙醇钛 (TTIP) 为主要原料采用原位溶胶凝胶法制备了PDMS-TiO₂有机无机纳米复合材料。通过改变PDMS-OH与TTIP的质量比, 得到折射率不同的均匀透明的PDMS-TiO₂溶液, 溶液固化成膜后用椭偏仪对材料进行折射率的表征, 在589nm处折射率从1.40提高到了1.591。采用软压印技术, 用PDMS-TiO₂及PDMS分别作为波导的芯层和包层制备了截面为5cm×80μm的平板型多模波导, 测得当输入波长为633nm, 平均传输损耗为0.713dB/cm。研究为PDMS光波导在生物医学领域的应用提供了新参考。

关 键 词: 端羟基聚二甲基硅氧烷; 二氧化钛; 溶胶凝胶技术; 高折射率; 光波导

中图分类号: TN252

文献标识码: A

Sol-gel preparation of high refractive index PDMS and its optical waveguides

LI Xinyuan, TONG Zhaomin*

(Institute of Laser Spectroscopy, State Key Laboratory of Quantum Optics and
Quantum Optical Devices, Shanxi University, Taiyuan 030000, China)

Abstract: Polydimethylsiloxane (PDMS) optical waveguides have a wide range of biomedical applications due to their excellent biocompatibility. In order to improve the refractive index of PDMS to improve the application limitations of PDMS optical waveguides, PDMS-TiO₂ organic-inorganic nanocomposites were prepared by in situ sol-gel method using terminal hydroxyl polydimethylsiloxane (PDMS-OH) and titanium tetramethoxymethane isopropoxide (TTIP) as the main raw materials. By changing the mass ratio of PDMS-OH to TTIP, uniform and transparent PDMS-TiO₂ solutions with different refractive indices were obtained, and the refractive indices of the materials were characterized by ellipsometry after the curing of the solutions into films, and the refractive indices were increased from 1.40 to 1.591 at 589 nm. Using the soft embossing technique, the core and cladding layers of waveguides were made of PDMS-TiO₂ and PDMS, respectively. A flat plate-type multimode waveguide with a cross-section of 5 cm × 80 μm was prepared, and the average transmission loss was measured to be 0.713 dB/cm when the input wavelength was 633 nm. This study provides a new reference for the application of PDMS optical waveguides in biomedical fields.

收稿日期: 2025-03-03; 收到修改稿日期: 2025-04-14

基金项目: 山西省重点研发计划 (202102030201002); 教育部长江学者和高校创新团队 (IRT_17R70); 国家自然科学基金重点项 (11434007); 山西省“1331工程”重点学科建设基金; “111”项目 (D18001)

作者简介: 李新媛 (1999—), 女, 硕士研究生, 从事高折射率PDMS制备。lixinyuan0320@163.com

仝召民 (1982—), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事激光显示技术与微纳传感器研究。

* 通讯作者: zhaomim.tong@sxu.edu.cn

Keywords: terminated hydroxy polydimethylsiloxane; titanium dioxide; sol-gel technology; high refractive index; optical waveguide

0 引言

PDMS 光波导因其优异的生物相容性、透明性和加工简便性等优势,在生物医学领域中得到广泛关注和應用。例如微流控芯片中的细胞检测^[1]、医学成像内窥镜中的光传输^[2]、光信号传导装置中监测细胞刺激过程^[3]等。然而 PDMS 本身折射率低,在 589nm 处折射率为 1.40,为了避免因 PDMS 折射率过低导致的全内反射不完全,影响光波导的光传输效率和性能,因此提高 PDMS 的折射率是十分有必要的。相关研究人员通过热处理^[4]、有机物共聚合^[5]、引入金属氧化物纳米颗粒合成有机-无机纳米复合材料^[6]等多种方式提高 PDMS 的折射率,其中通过引入无机金属氧化物纳米颗粒的方式不仅使折射率显著提高,而且因为不同金属氧化物的加入增强了 PDMS 波导的光学性能,改善了波导的功能性。

Nasser 等借助有机溶剂采用机械式搅拌的方法将 BaTiO₃ 纳米颗粒分散到 PDMS 中^[7],此掺入方式造成颗粒分散不均匀出现大量团聚从而降低了 PDMS 自身的透明度; Hanjun Cho 等用 Stöber 方法将 ZrO₂ 纳米颗粒稳定分散在 PDMS 中^[8],该方法制备过程涉及多个步骤,包括溶液的配制、反应控制、颗粒收集和纯化等,每一步都需要精确的操作和控制,增加了实验的难度和时间成本。Sangkyu Lee 等利用化学相容性设计了硅基配体分子^[9],尽管用设计配体分子的方法能够有效将 ZrO₂ 纳米颗粒均匀分散到 PDMS 中,但其与 PDMS 之间的相容性并不理想,复合材料长时间稳定性会受到影响。

本文关于高折射率 PDMS 的制备,选用的金属氧化物纳米颗粒是具有高折射率和低吸收系数的 TiO₂ 材料。以端羟基聚二甲基硅氧烷 (PDMS-OH) 与异丙醇钛 (TTIP) 为主要原料进行原位溶胶凝胶聚合^[10,11],原位溶胶凝胶的过程就是 PDMS-OH 与 TTIP 在水的作用下发生水解和缩聚反应,直接在 PDMS 中原位生长出 TiO₂ 纳米颗粒的过程。制备出的 PDMS-TiO₂ 材料组分均匀性好、纯度高、粒径小且干燥之后不容易发生团聚。制备过程中不使用任何催化剂,操作简单且稳定性好。通过改变 PDMS-OH 与 TTIP 的质量比,在 589nm 处将合成的 PDMS-TiO₂ 材料的折射率提高到了 1.591。将制备出的高折射 PDMS-TiO₂ 材料作为波导芯层,

PDMS 作为波导包层,芯层折射率大于包层,满足光波导全内反射传输原理,设计了芯层横截面积为 5cm×80μm 的平板波导。搭建了波导的导光能力测试装置验证了此波导具有传输光的能力,并进行光波导的损耗测试,发现随着芯层材料中 TiO₂ 体积分数的增多,波导的损耗不断增加。

1 高折射率 PDMS-TiO₂ 材料的制备

1.1 试剂与仪器

PDMS-OH、TTIP, Aladdin; 异丙醇, 国药集团化学试剂有限公司; PDMS 预聚物和固化剂, Dow Corning; SU-8 2025 光刻胶, Dow Corning; SU-8 显影液 (PGMEA), 苏州义兰微电子有限公司; 去离子水, 实验室自制。

分析天平 (MS105DU), METTLER TOLEDO; 数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; 磁力搅拌器 (油浴), 上海捷昂仪器有限公司; 旋涂仪, 上海雷波科学技术有限公司; 热板, 东莞威铁克自动化科技有限公司; 椭偏仪, 武汉颐光科技有限公司; 行星式重力搅拌机, Sinomix。

1.2 实验流程及形貌表征

改变 PDMS-OH/TTIP 的质量比制备 PDMS-TiO₂ 溶液, 分别记为 PDMS-TiO₂-2:1、PDMS-TiO₂-1:1、PDMS-TiO₂-1:2、PDMS-TiO₂-1:3。以 PDMS-TiO₂-2:1 为例: 取 2g 的 PDMS-OH 与适量异丙醇 (异丙醇用作溶剂), 混合后超声 5min; 再取 1g TTIP 与适量异丙醇混合后超声 5min; 将上述两种溶液混合到一起超声 10min。密封后将混合溶液放入磁力搅拌 (油浴) 锅中 70℃ 加热 30min, 转速设置为 6000rpm 使混合溶液充分反应。加热完成待混合溶液冷却至室温后利用模具浇筑成如图 1 所示的薄膜, 图 1 (a)、(b)、(c)、(d) 是不同质量比相对应的 PDMS-TiO₂ 溶液固化后的图片, 薄膜厚度大约 3mm 左右, 呈透明状态, 随着 TiO₂ 体积分数的继续增加至 PDMS-TiO₂-1:3, 材料开始出现肉眼可见的透明度降低, 图 1 (e) 到图 1 (h) 分别是相对应的扫描电子显微镜 (SEM) 表征的 PDMS-TiO₂ 复合材料, 随着 PDMS-OH/TTIP 质量比增加, 材料出现团聚, 图 1 (h) 的 SEM 图片出现明显的颗粒团聚现象, 颗粒之间紧密接触, 形成了较大的聚集体。

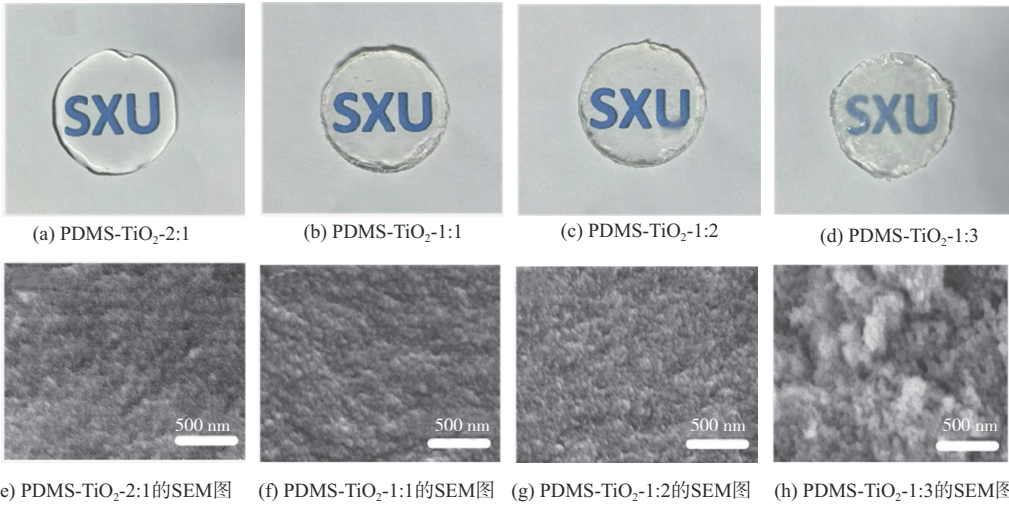


图 1 PDMS-TiO₂材料的实物及微观形貌图

1.3 折射率的测量与分析

另取制备好的 PDMS-TiO₂ 溶液，用旋涂仪将其旋涂到洁净的硅片上，将硅片转移到热板上设置加热温度 60℃，固化 8h 后形成 PDMS-TiO₂ 薄膜。用椭偏仪测量薄膜的折射率得到一组数据如图 2 所示。

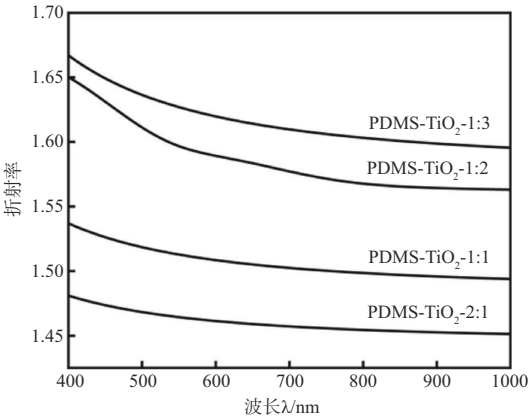


图 2 PDMS-TiO₂薄膜的折射率
随不同 PDMS-OH/TTIP 质量比的变化

从图 2 中可以看出，由于 TiO₂ 的高折射率使复合材料的整体折射率提高，且随 PDMS-OH/TTIP 质量比的增加即 TiO₂ 体积分数的增加材料的折射率也不断增加。对同一质量比的材料其折射率随波长的增加而减小。

PDMS-TiO₂ 纳米复合材料折射率的理论值通过表 1 中给出的 TiO₂ 的体积分数得出，计算公式为

$$n_{\text{理论值}} = \Phi_{\text{TiO}_2} n_{\text{TiO}_2} + \Phi_{\text{PDMS-OH}} n_{\text{PDMS-OH}} \quad (1)$$

式中， Φ 和 n 分别表示 TiO₂ 与 PDMS-OH 的体积分数和折射率，TiO₂ 折射率取 2.49，PDMS-OH 折射率取 1.406（589nm 处，由 Aladdin 官网给出）。从表 1 中可以看出不同质量比下最终材料折射率的理论值与实验值有较好的吻合。

表 1 PDMS-OH 与 TTIP 不同质量比下 TiO₂ 所占的体积比和复合材料折射率的理论值(589nm 处)

PDMS-OH 与 TTIP 的质量比	TiO ₂ 的体积分数/%	折射率 (理论值)	折射率 (实验值)
2:1	3.2	1.441	1.462
1:1	6.2	1.473	1.491
1:2	11.5	1.537	1.591
1:3	16.5	1.585	1.619

1.4 散射角的测试与分析

在实验过程中，发现通过调节 PDMS-OH/TTIP 的质量比可以调控 PDMS-TiO₂ 材料折射率大小，随着加入的 TTIP 的量增加，生成的 TiO₂ 纳米颗粒出现团聚。为了进一步了解 TiO₂ 纳米颗粒的分散性，表征不同质量比下 PDMS-TiO₂ 纳米复合薄膜的散射光强度的角度分布，搭建了散射角测量系统。测试中，选用 520nm 的激光器作为光源，利用带有探头（光阑孔径为 2mm）的光功率计测量不同质量比的 PDMS-TiO₂ 材料的散射光强度。为了测量散射光强度的角度分布，使用 300mm 长的接杆将光功率计探头固定到旋转台上，通过改变旋转台的角度来改变探测头的接收角度：在测试过程中从旋转台零度开始依次每两度（旋转台上可分辨的最小刻度）记录下光通过薄膜后在光功率上的功率数值，直到光功率计中的示数为零。图 3 为不同观察角度下归一化散射光强度的角度分布。

从图 3 中可以观察出质量比在 PDMS-TiO₂-1:2 时，归一化散射光强度的角度分布仍是一个“尖峰”的形状，散射角很小，表明材料的团聚程度不高。随着 PDMS-OH/TTIP 质量比的增加，材料的散射角也逐渐增大，在质量比为 PDMS-TiO₂-1:3 时，散射角出现大幅度增加，这是因为 TiO₂ 纳米颗粒出现团聚，较多的 TiO₂ 纳米颗粒聚集体会引起更强的光

散射。散射角的增大与 TiO_2 纳米颗粒在复合材料中的分布、形貌以及颗粒间相互作用的变化密切相关。因此可以得出 TiO_2 纳米颗粒的增加不仅增加了材料的折射率, 还改变了材料的光学散射特性。这与图 1 中 PDMS- TiO_2 材料的 SEM 微观形貌图相对应。

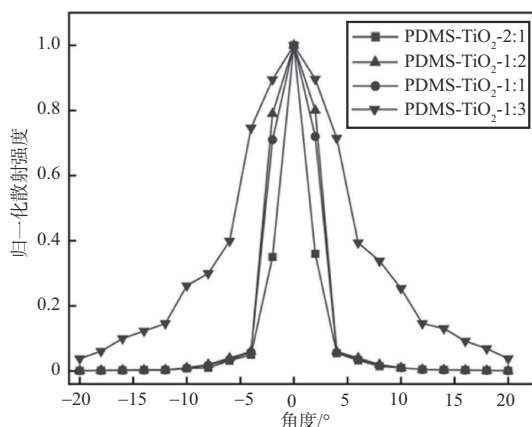


图 3 不同 PDMS-OH/TTIP 质量比下 PDMS- TiO_2 薄膜的归一化散射强度与光功率计探头的观察角度之间的关系

2 射率 PDMS- TiO_2 材料光波导的制作与测试

2.1 平板波导的制作

制作聚合物多模波导的方法有光刻、激光直写、电子束蒸发、压印、软压印等, 在这些方法中, 软压印技术具有成本低、不需要大规模设备等优势, 且没有旋转涂层的要求, 适用于 PDMS- TiO_2 这种低粘度材料^[12,13]。将上述 4 组 PDMS- TiO_2 溶液分别作为光波导芯层材料。如图 4 所示的软压印技术包括三个主要步骤: (1) SU-8 主模具的制作, (2) PDMS 模具的制作, (3) 使用 PDMS 模具制作光波导。

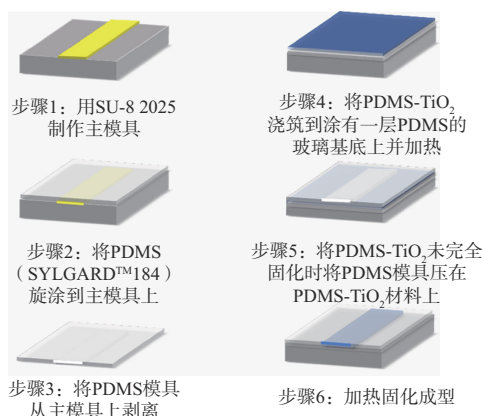


图 4 PDMS- TiO_2 平板波导软压印技术的详细步骤

取洁净的玻璃片清洗后进行氧气等离子体处理, 目的是活化玻璃片表面, 增强玻璃片与光刻胶之间的粘附。在处理好的玻璃片上旋涂厚度为 $80\mu\text{m}$ 的 SU-8 2025 光刻胶, 将其转移到热板上 85°C 软烘 4min 蒸发掉 SU-8 中的溶剂, 再继续设置

115°C 进行 6min 加热固化。将玻璃片上的光刻胶转移到紫外灯下, 借助提前设计好的掩模版进行紫外曝光, 设置曝光功率密度 $300\text{mJ}/\text{cm}^2$, 时间 10s。将曝光后的玻璃片放到热板上后烘, 分别先后设置参数 85°C 加热 4min 和 115°C 加热 6min。将后烘好的玻璃片放入 PGMEA 显影液中 5min, 使光刻胶未曝光区域被显影液逐渐溶解掉, 最终玻璃基底上会出现与掩模版一样的图案。最后用去离子水缓慢冲洗, 直到玻璃表面上没有显影液或残留物, 并使用氮气枪进行干燥处理, 这样 SU-8 主模具制作完成如图 4 中步骤 1 所示。

PDMS 模具的制作思路是将步骤 1 中制备的 SU-8 主模具转移到 PDMS 上。首先将上面得到的 SU-8 光刻胶主模具先进行气体硅烷化处理, 使模具的表面具有疏水性: 把玻璃片放在培养皿中, 并在其周围滴加适量三甲基氯硅烷 (TMCS) 密封 15min, 随后打开培养皿并等待 15min, 直到 TMCS 被全部蒸发掉。使用分析天平按质量比 10:1 准确称取 PDMS 预聚物和固化剂, 借助磁力搅拌器和磁力转子在常温下将混合物以转速 500rpm 搅拌 30min, 获得均匀的 PDMS 混合物, 搅拌过程中产生的大量气泡采用行星式重力搅拌仪彻底消除。将获得的 PDMS 混合物, 用旋涂仪均匀旋涂到已经硅烷化处理过的 SU-8 主模具上, 厚度为 $100\mu\text{m}$, 旋涂结束后, 将玻璃片转移到热板上加热温度为 75°C , 固化时间为 30min, 待 PDMS 固化结束冷却至室温后, 用镊子轻轻撕掉上层的 PDMS 模具, 至此已经将 SU-8 模具图案转移到 PDMS 上。如图 4 中步骤 2、3 所示。

接下来进行最后光波导的制作, 取一块洁净的玻璃片, 直接在上面旋涂 PDMS 混合物, 厚度为 $100\mu\text{m}$, 作为波导的下包层, 75°C 放到热板上加热固化 30min。冷却后在上面浇筑已经制备好的 PDMS- TiO_2 -1:2 溶液, 放到热板上使溶剂蒸发掉, 待溶液未完全固化时, 将之前制作好的 PDMS 模具按压到上面, 随后放到热板上 75°C 加热固化 30min。如图 4 中步骤 4、5、6 所示。这样就形成了一个上下包层是厚度为 $100\mu\text{m}$ 的 PDMS 膜层, 芯层是折射率较高的厚度为 $80\mu\text{m}$ 的 PDMS- TiO_2 溶液, 形成 PDMS/PDMS- TiO_2 /PDMS 对称型平板光波导。

2.2 波导的导光测试与分析

为了对波导进行导光能力测试, 在测试过程中, 激光光源选用 633nm 的 He-Ne 激光器, 用聚焦耦合的方式将激光器的光耦合进入平板波导中。

波导的数值孔径 NA 计算公式表示为

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

式中, n_1 和 n_2 分别表示波导芯层与包层的折射率。PDMS-TiO₂-2:1 到 PDMS-TiO₂-1:3 这 4 组材料在 633nm 处由式 (2) 计算出的波导数值孔径值分别为 0.42、0.57、0.69 和 0.8。通过非球透镜将光束耦合进入 80μm 厚的平板波导中, 由几何光学成像理论计算出非球面透镜的焦距范围表示为

$$\frac{y}{\tan \theta_1} \leq f \leq \frac{d}{2 \tan \theta_2} \quad (3)$$

式中, y 表示激光器的入射半径; d 表示波导的厚度; θ_1 表示波导的数值孔径角; θ_2 表示激光器的发散半角。He-Ne 激光器发散角为 1.7mrad, 光束直径为 0.48mm。光束入射角度 θ 为

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \quad (4)$$

式中, λ 表示入射光波长; ω_0 表示光束通过透镜后在焦点的束腰半径 ω_0 , 计算公式为

$$\omega_0 = \frac{\lambda f}{\pi \omega_{in}} \quad (5)$$

式中, f 表示透镜焦距; ω_{in} 为初始光束半径。理论上, 若光波导的数值孔径与透镜的数值孔径相匹配, 直接聚焦耦合效率接近 100%。对 4 组材料选择的非球面透镜的数值孔径值分别为 0.4、0.6、0.7 和 0.8 确保入射光斑可以进入到波导中去。图 5 是波导的输出光束轮廓图, 验证了波导的导光能力^[14]。由于前三组材料散射角较小, 所呈现出的轮廓图相似, 因此选取 PDMS-TiO₂-1:2 与 PDMS-TiO₂-1:3 材料作为光波导芯层为例, 图 5 (a) 是在无团聚情况下, 光波导的输出光束会呈现较为清晰、稳定的轮廓, 且光束的形态保持较好。当纳米颗粒发生团聚时如图 5 (b) 所示, 颗粒之间的相互作用发生变化, 形成较大的颗粒或颗粒群, 这些团聚区域的折射率与周围介质的折射率可能存在较大差异, 导致光在波导中的传播受到较大的扰动, 这种不均匀的折射率分布会使光束发生散射。

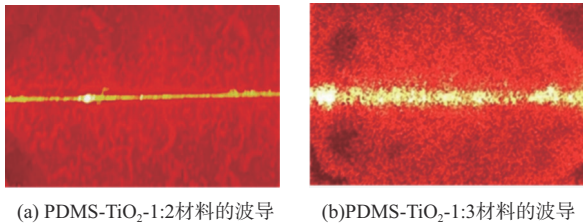


图 5 两种不同质量比的 PDMS-TiO₂ 波导材料的输出光束轮廓图

2.3 波导的损耗测试与分析

光波导损耗 (包括吸收损耗、散射损耗等) 直接影响波导的传输性能和信号质量, 高损耗会导致光信号在传输过程中逐渐衰减, 影响系统的传输距离和效率。实验中在导光测试装置后面增加光功率计探头来接收从波导中发出的光, 通过在光功率计上得到的功率数据, 利用光波导损耗公式, 得到不同情况下波导的损耗情况。实验中利用截断法测量波导的传输损耗^[15], 基本思想是通过测量不同长度波导上的传输损耗, 从而推算出单位长度的损耗。实验中对光路耦合后测量波导的输入和输出光功率, 对波导进行截断处理获得不同长度的波导, 分别对每个长度的波导进行光路耦合后测量其输入和输出光功率, 在测量过程中输入功率保持恒定, 计算得到波导的插入损耗, 插入损耗的计算公式表示为

$$a_i = 10 \lg \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) = 2\alpha_c + \alpha L \quad (6)$$

式中, α 表示波导的传输损耗, 单位为 dB/cm, α_c 是波导端面的耦合损耗, α_i 表示波导的插入损耗; P_{in} 是输入功率, P_{out} 是输出功率, 将不同组的插入损耗数据带入计算可得到波导传输损耗 α 与波导长度 L 之间的关系式

$$\alpha = \frac{\alpha_{i1} - \alpha_{i2}}{L_1 - L_2} \quad (7)$$

式中, α_{i1} 与 α_{i2} 分别是波导长度为 L_1 、 L_2 时的波导插入损耗, 通过式 (6) 可以发现波导插入损耗 α_i 与波导长度 L 是一次函数关系, 拟合曲线斜率就得到波导在单位长度下传输损耗。在测量过程中, 先选取一根较长的波导进行损耗测量, 再将其截断进行损耗测量, 由于每次截断过程中端面的不同会对测试结果带来一定影响, 因此在对每组波导进行损耗测量时要进行多次测量取平均值。

实验中分别测量了每组波导材料的长度分别为 1cm、2cm、4cm。图 6 表示的是不同质量比下波导的插入损耗情况。根据得到的插入损耗值, 由式 (7) 计算出不同质量比下的传输损耗值。从图中可以得出: 在相同实验工艺条件下, 输入光波长为 633nm 时, 芯层材料的质量比从 PDMS-TiO₂-2:1 到 PDMS-TiO₂-1:2 时, 波导传输损耗分别为 0.771dB/cm、0.735dB/cm、0.713dB/cm。这是由于 TiO₂ 的体积分数增加导致折射率提升有利于增强光场约束使传输损耗降低。但是在选择 PDMS-TiO₂-1:3 做芯层时, 得到的波导传输损耗值增加到 1.106dB/cm。PDMS-TiO₂-1:3 材料折射率高但是波导损耗增大的结果分析其原因存在如下三种可能: (1) 由于

PDMS-TiO₂材料中出现 TiO₂纳米颗粒的聚集, 纳米颗粒的团聚会在PDMS基体中形成折射率不均匀的区域。光在折射率不均匀的介质中传播时, 会发生随机的折射和散射, 导致光程变长, 光能量在传播过程中不断损失导致损耗增加。(2) 折射率不均匀性会破坏光波导中光的传输模式, 使光无法以稳定的模式在波导中传播, 进一步加剧了光损耗。(3) 当TiO₂颗粒均匀分散且粒径远小于光波长, 在波导中瑞利散射占主导地位, 但是当颗粒团聚形成微米级的聚集体, 光出现米氏散射^[16]使损耗显著增加。尽管高折射率有利于约束光传播, 但团聚引起的散射和不均匀性会抵消这种优势。因此对4组材料进行对比分析认为在应用到高透明度低损耗的波导PDMS-TiO₂-1:3的材料可适当舍弃。

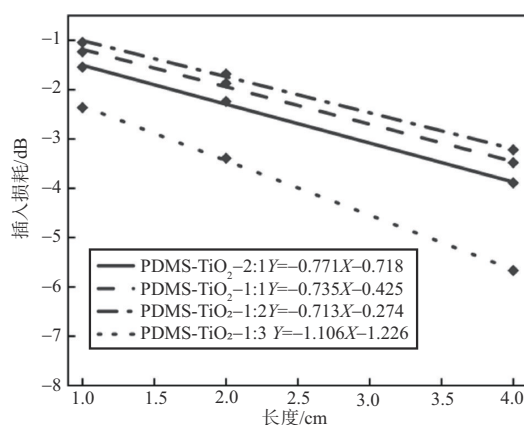


图 6 不同PDMS-OH/TTIP质量比下PDMS-TiO₂波导的插入损耗值

3 结 论

用原位溶胶凝胶法以PDMS-OH与TTIP为主要原料合成了均匀透明的有机无机纳米PDMS-TiO₂材料, TiO₂纳米颗粒直接在PDMS中原位生成。通过调控PDMS-OH与TTIP的质量比PDMS的折射率由原来的1.40提升到了1.591; 当TiO₂体积分数继续增加时溶液出现团聚现象, 归一化散射光强度的角度分布也体现出随着TiO₂体积分数的增加散射角增大的情况; 将该材料用软压印技术应用可以用于可以进行高数据传输的光波导中, 制备出上下包层为PDMS材料, 芯层材料为PDMS-TiO₂三层对称型平板光波导, 当PDMS-TiO₂-1:2时, 折射率达到了最高值, 并且没有出现明显的团聚现象或结构不均匀且波导的损耗最小为0.713 dB/cm, 这一比例提供了最佳的折射率与波导的光传输性能。此PDMS-TiO₂材料为将来高折射率PDMS波导的加工制造提供一定参考意义。

参考文献:

- [1] Fei P, Chen Z, Men Y, et al. A compact optofluidic cytometer with integrated liquid-core/PDMS-cladding waveguides[J]. Lab on a Chip, 2012, 12(19):3700—3706.
- [2] Konishi S, Kobayashi T, Muramatsu Y. Integration of optical waveguide on pneumatic balloon actuator for flexible scanner in endoscopic imaging diagnosis applications[J]. Advanced Robotics, 2016, 30(15):1004—1013.
- [3] Rudmann L, Scholz D, Alt M T, et al. Fabrication and characterization of PDMS waveguides for flexible electrodes[J]. Advanced Healthcare Materials, 2024, 13(16):2304513.
- [4] Chang-Yen D A, Eich R K, Gale B K. A monolithic PDMS waveguide system fabricated using soft-lithography techniques [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(6):2088.
- [5] 冯向华, 季家谔, 窦文华. 聚硅氧烷改性及多模光波导制备[J]. 光学学报, 2012, 32(05):311—315
Feng Xianghua, Ji Jiarong, Dou Wenhua. Preparation of Poly-Siloxane modified and multimode optical waveguides[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(05):311—315.
- [6] Zimmermann C A, Amouzou K N, Ung B. Recent advances in PDMS optical waveguides: Properties, fabrication, and applications[J]. Advanced Optical Materials, 2025, 13(1):2401975.
- [7] Mohamed-Noriega N, Hinojosa M, González V, et al. Polymer-based composite with outstanding mechanically tunable refractive index[J]. Optical Materials, 2016, 58:18—23.
- [8] Cho H, Lee D, Hong S, et al. Surface modification of ZrO₂ nanoparticles with TEOS to prepare transparent ZrO₂@ SiO₂-PDMS nanocomposite films with adjustable refractive indices [J]. Nanomaterials, 2022, 12(14):2328.
- [9] Lee S, Shin H J, Yoon S M, et al. Refractive index engineering of transparent ZrO₂ - polydimethylsiloxane nanocomposites [J]. Journal of Materials Chemistry, 2008, 18(15):1751—1755.
- [10] Lu Q, Mullins M E. In situ synthesis of high refractive index PDMS/Metal oxide nanocomposites[J]. MRS Online Proceedings Library, 2012, 1400(1):23—28.
- [11] Tang C, Li X, Tang Y, et al. Agglomeration mechanism and restraint measures of SiO₂ nanoparticles in meta-aramid fibers doping modification via molecular dynamics simulations[J]. Nanotechnology, 2020, 31(16):165702.
- [12] Zhou Q, Lan L, Li Y, et al. Simple isopropanol-assisted direct soft imprint lithography for residue-free microstructure patterning[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(21):27560—27565.
- [13] Hosseinzadeh A, Middlebrook C T, Mullins M E. Optical waveguides using PDMS-metal oxide hybrid nanocomposites [C]//Organic Photonic Materials and Devices XVII. San Francisco, California, United States:SCI-E, 2015:45—50.
- [14] Hegeman I, Dijkstra M, Segerink F B, et al. Development of low-loss TiO₂ waveguides[J]. Optics Express, 2020, 28(5):5982—5990.
- [15] 方依明. ZnSe脊型光波导器件制备[D]. 浙江:宁波大学 2021: 47—48.
Fang Yiming. Preparation of ZnSe ridge-type photonic waveguide devices [D]. Ningbo University, Zhejiang Province, 2021: 47—48.
- [16] Araújo J C R, Monte A F G, Lora-Serrano R, et al. On the quantitative optical properties of nanoparticles embedded in biological tissue phantoms[J]. Optical Materials, 2021, 114:110924.