文章编号:1001-5078(2022)03-0414-08

·光纤传感及光通讯技术 ·

新型双纤芯大模场光纤传感特性研究

张辉,周仁龙,杨飒,李勇

(广东第二师范学院物理与信息工程学院,广东广州 513030)

摘 要:为了提高有效模场面积,降低光纤中光功率密度,减小非线性效应,提出了一种杂化石 墨烯-金属等离子体传感薄膜双芯光纤,可应用在等离子体波导生物传感器。侧面抛光纤维 的横截面包含有两个折射率 $n_1 = 1.4478$ 的均匀纤芯,抛光面上涂覆 30 nm 金膜。金膜进一步 涂覆有 0.34 nm 的石墨烯层。通过对双芯光纤的有效模式指数,泄漏损耗和有效模场面积的 研究,证实了单层石墨烯对电介质的变化提供了最佳的灵敏度。实验结果表明基本纤芯模 LP₀₁模的有效模场面积增长速率比高阶纤芯模式 LP₁₁模的增长速率要快,并且当纤芯折射率 是 1.4460,波长为 600 nm 时,基模的有效模场面积为 275 μ m²,大于同等条件下其他的纤芯折 射率值时的有效模场面积,取得了大模场模式,能减小光纤的非线性效应。在医疗设备、激光 武器、遥感测控、光纤通信等重要领域都有着广泛的应用前景。

关键词:有限元法;表面等离子体;衰减率;有效模式指数;纤芯折射率 中图分类号:TN253 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2022.03.017

Research on the characteristics of a novel large mode area fiber with double core

ZHANG Hui, ZHOU Ren-long, YANG Sa, LI Yong

(School of Physics and Electronics Engineering, Guangdong University of Education, Guangzhou 510303, China)

Abstract: In order to improve the effective mode field area, reduce the optical power density and reduce the nonlinear effect in the fiber, a graphene-metal plasma double core sensor is proposed, which can be applied to a plasma waveguide biosensor. The cross section of the side polished fiber contains two cores with refractive index $n_1 = 1.4478$, and the polished surface is coated with 30 nm gold film. The gold film is coated with a 0.34 nm graphene layer. Through the study of effective mode index, leakage loss and effective mode field area of the dual-core fiber, it is confirmed that the monolayer graphene provides the best sensitivity to dielectric changes. The experimental results show that the effective mode area growth rate of the basic core mold LP_{01} is faster than that of the high-order core mode LP_{11} , and when the core refractive is 1.4460, the wavelength is 600 nm, the effective mode area of the base mode is obtained, and the nonlinear effect is reduced. In medical equipments, laser weapons, remote measurement and control, optical fiber communication and other important fields have a broad application prospect.

Keywords: finite element method; surface plasma; attenuation rate; effective mode index; core refractive index

收稿日期:2021-10-26

基金项目: 广东省自然科学基金项目(No. 2018A030313684); 广东省教育厅科学重点研究基金项目(Nos. 2019KZDXM061; No. 2019KQNCX099; No. 2020ZDZX2059)资助。

作者简介:张 辉(1975-),男,讲师,硕士,主要研究方向为光纤传感技术. Email: zhanghui@ gdei. edu. en

通讯作者:周仁龙(1975-),男,教授,博士,主要研究方向为二维材料石墨烯等材料及其电子器件光电特性测试与研究。 E-mail:zhourenlong@gdei.edu.cn

1 引 言

随着纳米技术的发展,表面等离子体(Surface Plasmon Polaritons, SPPs) 越来越引起纳米光子学的 兴趣^[1]。由于粒子的可操纵性^[2],自成像^[3],学术 界已经提出了各种非衍射表面等离子体束,例如艾 里光束^[4-5],贝塞尔光束^[6]和余弦高斯光束^[7]。石 墨烯作为新型的二维(2D)材料,在太赫兹和远红外 频率中其表面电导率几乎是纯虚数,其化学势可通 过化学掺杂或控制栅极电压来动态调节^[8-9]。石墨 烯的单一碳原子层能通过外部施加的电压来吸引其 独特的光电性能,具有极宽的波长范围。这些优异 性能显示石墨烯是实现包括光电探测器^[10],宽带宽 的光学偏振器[11],高速光调制器[12-13]等光子和光 电器件的良好材料。此外,石墨烯还是用作等离子 体应用的材料。混合涂覆的等离子体微腔和石墨烯 在实现可调光调制上有着非常好的前景。表面等离 子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)是电磁 波在金属界面出现全反射时激发的自由电子密度振 荡^[14-16],因其检测周围介质的折射率(Refractive Index.RI)变化的高灵敏度而备受关注。这些属性 提供了动态操控基于石墨烯平台中光纤表面等离子 体共振传感器的可能性。因此,将石墨烯材料集成 到传统的光学等离子体波导传感器中[17-18],形成的 光纤表面等离子体共振传感器不仅体积小,能耗低, 检测速度快,抗电磁干扰强,支持实时在线检测,还 具备 SPR 检测技术的高效灵敏^[19],检测时无需标记 即可进行实时动态检测的优点,日益成为生化检测 传感领域的研究热点。

作为典型应用之一的光纤激光器,其光束质量高,亮度高、阈值低,在医疗设备、激光武器、遥感测控、光纤通信等重要领域都有广泛的应用。2006年, John M. Fini 报道说,抛物面型纤维具有天然弯曲的 电阻特性,在弯曲下具有大模场面积和良好的抑制高 阶模特性^[20]。然而传统的制造技术难以制造很大面 积的纤芯。2013年,Deepak Jain等报道称,多沟道光 纤可以实现超大模场面积和良好的高阶模抑制^[21]。 然而,在弯曲的情况下,多沟道光纤的性能变差。随 着激光器功率的提升,非线性效应和模式不稳定的缺 点成为进一步提升光纤输出光功率的最大障碍。由 于非线性效应产生的阈值功率与光纤的有效模场面 积成正比,所以提高有效模场面积能降低光纤中光功 率密度,从而减小非线性效应。保持激光器的单模运行,可以提高激光器输出光束的质量。

在这项工作中,研究了二维材料对杂化等离子 体光子结构的表面等离子体极化激发的影响,以及 该杂化等离子体传感器的传感性能。具体地,提出 了一种由双纤芯的组成的等离子光纤模型,应用有 限元分析方法进行特征模型分析^[22],研究石墨烯层 附加在金属膜上引起的谐振耦合。探究了石墨烯 – 金属传感膜辅助光纤结构的详细特性,并计算了模 型的有效模场指数和有效模场面积。因光纤的性能 特征在于其泄漏损失,因此研究了泄漏损耗如何取 决于光纤的物理参数。结果揭示了石墨烯层强化了 表面等离子体极化(SPP)的电场。高阶的入射光波 模式会为传感器带来高的灵敏度,但同时也带来了 低的品质因子;在传感层厚度分布不均匀的情况下, 传感区长度对传感器性能的影响较为明显。

2 设备结构与理论分析

由于光纤的圆柱形形状不适合大面积单层石墨 烯的转移,所以采用侧面抛光的方式,抛光之后的平 坦面能够更好的保持完整性,防止石墨烯片的折皱。 对标准单模光纤进行侧面抛光,在其面上涂覆 30 nm的金属层 Au,然后将石墨烯层涂覆在金属层 的顶部,以增强激发 SPP。图 1 展示了侧面抛光纤 维的横截面。侧面抛光的光纤包括折射率 $n_1 =$ 1.4478 的均匀纤芯区域(0 < r < a)和折射率 $n_2 =$ 1.4453 的分段包层区域(r > a)。折射率差值的定 义为 $\Delta n = n_1 - n_2$ 。通过电子束蒸发在抛光面上进 一步涂覆 30 nm 金膜。金膜进一步涂覆有 0.34 nm 的石墨烯层。石墨烯 – 金属涂层的侧面抛光小面依 次浸入折射率匹配的液体中,这些液体是具有不同 浓度的 NaCl 溶液。石墨烯的高折射率定义为 3 +

 $i\frac{C}{3}\lambda$ 。在可见范围内, C 设置为 5.446 μ m⁻¹。



图 1 石墨烯 – 金属双纤芯结构的示意性结构图 Fig. 1 The double core structural diagram of graphene-metal

石墨烯 - 金属感测膜辅助纤芯结构的折射率分 布是通过径向有效折射率法(Radial Effective refractive Index Method, REIM)获得的。由于折射率差Δ*n* ≪1,因此电场的横向分量满足标量波。用有限元方 法(Finite Element Method, FEM)讨论光纤性能。有 限元是最广泛应用于建模复杂的、高精度的光纤结 构,因此,我们结合使用完整的矢量有限元方法与完 美匹配层(Perfect Matching Layer, PML)的边界条 件,将 20 μm 厚的圆形 PML 设置在包层外侧。方程 在圆柱坐标系中表示为^[18-19]:

$$r^{2} \frac{\partial^{2} \phi}{\partial r^{2}} + r \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^{2} \phi}{\partial \theta^{2}} + k_{0}^{2} r^{2} [n^{2}(r,\theta)] = 0 \quad (1)$$

其中, ϕ 是相关的电场或磁场; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 表示自由 空间波数; $n(r,\theta)$ 是折射率分布;r表示径向坐标。 模场分布可以用以下表达式表示:

$$\phi(r,\theta) = R(r)\Theta(r,\theta) \tag{2}$$

结合方程(2),方程(1)可以进一步简化为: $r^{2} \frac{\partial^{2} \Theta(r,\theta)}{\partial \theta^{2}} + k_{0}^{2} [n^{2}(r,\theta) - n_{\text{eff}}^{2}(r)] \Theta(r,\theta) = 0 \quad (3)$

光纤的两个主要性能分别是模场面积和模式 损耗,主要指的是基模的模场面积,在入射功率恒 定的前提下,可以反应光纤的功率密度值。大模 场面积可以有效地减小受激拉曼散射之类的非线 性效应。有效模场面积 *A*_{eff}是用于描述的光纤激 光器的功率密度的重要参数。它可以通过公式 (4)计算:

$$A_{\rm eff} = \frac{\left(\int |E^2| dx dy\right)^2}{\int |E|^4 dx dy}$$
(4)

其中, E是横向电场的 E_x分量的大小。

光纤中各模式的泄漏损耗可以由传输常数的虚 部求解而得,公式由(5)给出:

Attenuation =
$$\frac{40\pi}{\ln(10)\lambda}$$
Im $(n_{\rm eff})$ (5)

其中, n_{eff}是各模式的有效折射率; λ 是入射波长, 用高阶模损耗与基模损耗的比值来判断光纤是否实 现了单模运转,其公式定义为(6)所示:

$$LR = \frac{Loss(lowest-HOMs)}{Loss(FM)}$$
(6)

其中,分子 Loss(lowest-HOMs)指的是最小高阶模损 耗;分母 Loss(FM)指的是基模损耗,当两者的比值 达到某一个参考值时,可以认为光纤中的高阶模全 部泄漏只剩下了单模传输。

根据所采用的介质结构层参数:纤芯的折射率 $n_core = 1.4460$,包层的折射率 $n_cladding =$ 1.4453,石墨烯上部覆盖物样品的折射率 n_sample $=1.333,单层石墨烯的厚度 t_G = N × 0.34 nm,石$ 墨烯的层数 N = 1,纤芯的半径 $r_core = 8 \mu m$,包层 的边长 $r_cladding = 15 \mu m$,金属层的厚度 $t_metal =$ 30 nm,光纤中的传播波长 $\lambda = 600$ nm,通过数值计 算得到光纤基模的模场特性,其模式分布如图 2 所 示,下角标 a 和 b 分别表示双纤芯结构中的两个纤 芯。从能量流密度可以看出,该模式在纤芯与石墨 烯和金属之间具有着强耦合,电场呈现典型的高斯 分布,SPP 的电场在金属薄膜表面最强,然后以指数 规律衰减。图中的黑色箭头表示归一化的金薄膜激 发的 SPP 的电场分布。零位置是金属膜和侧面抛 光小平面之间的边界。



3 数值模拟与结果分析

3.1 不同石墨烯层数激发的归一化电场强度 考虑石墨烯厚度不同,对电磁波的吸收能力也 相应不同,研究石墨烯层数的改变对归一化电场强 度的影响。根据所采用的介质结构层参数:纤芯的 折射率 n_core = 1.4478, 包层的折射率 n_cladding = 1.4453,石墨烯上部覆盖物样品的折射率 n_sample = 1.333,单层石墨烯的厚度 t_G = N × 0.34 nm, 纤芯 的半径 $r_{\text{core}} = 8 \mu m$,包层的边长 $r_{\text{cladding}} =$ 15 μm, 金属层的厚度 *t*_metal = 30 nm, 光纤中的传 播波长 $\lambda = 600 \text{ nm}$,通过数值计算在图 3(a)中绘制 了包括电介质、金属膜、纤芯、光纤包层的模型的电 场分布,显示了涂覆在 30 nm 金属层上的单层石墨 烯、五层石墨烯和十层石墨烯的 LPu 模式的归一化 电场强度,由图3(a)可见,在0~0.04 μm的位置, SPP 的归一化电场强度有所增强,说明涂覆了石墨 烯层之后,增强且激发了 SPP,研究显示,在金属层 上增加单层石墨烯, SPP 的强度大约能提高 30.2 %。继续增加石墨烯的层数,反而会降低 SPP 的 强度,而不是进一步提高。这是因为额外的石墨 烯层会引起较大的电子能量损失,从而导致 SPP 的逐渐降低。由此可见,单层石墨烯对电介质的 变化提供了最佳的灵敏度。图(b)是 LPou模式在 整个模拟几何图形上沿着 y 方向的归一化电场强 度的分布图。



normalized electric field intensity

3.2 涂覆石墨烯-金属的双纤芯结构参数与波长的关系

介质结构层参数设定为:纤芯的折射率 n_core = 1.4478,包层的折射率 n_cladding = 1.4453,石墨烯

上部覆盖物样品的折射率 n_sample = 1.333, 单层石 墨烯的厚度 t_G = N × 0.34 nm, 纤芯的半径 r_core = 8 μm,包层的边长 $r_{cladding} = 15$ μm,石墨烯的层 数N=1,金属层的厚度 t_metal = 30 nm,光纤中的传 播波长 λ = 600 nm, 对于涂覆石墨烯 - 金属的双纤 芯结构,其基本纤芯模式LP01。模和LP01b模与高阶纤 芯模式 LP11模的有效模指数 neff 随波长变化的关系 如图 4(a)所示。由于双纤芯结构的对称性, LP₀₁模 和 LP_{ub}模的线型有相似性。有效模指数随着波长 的增加而减小。图4(b)显示了不同波长下,基本纤 芯模式和高阶纤芯模式的衰减率 dB(rad/m)变化 情况。由于纤芯和石墨烯 - 金属之间有很强的耦 合,衰减常数在波长为630~660 nm 之间的范围 有很大的波动,基本纤芯模式 LPu 模达到了350 dB 的衰减率,高阶纤芯模式 LP₁₁模则达到了 160 dB 的衰减率。





图4(c)进一步显示了基本纤芯模式 LP01模和高 阶纤芯模式 LP₁₁模的有效模场面积特性。对应于不 同波长的石墨烯区域的有效模场面积,以波长630 nm 为界,小于630 nm时,有效模场面积急速随着波长的 增大而增大;大于630 nm 时,有效模场面积只缓慢随 波长的增大而增大。在图4(d)中,还用不同的波长 绘制了光纤区域的两种模式的有效模场面积,两种模 式的面积均随着波长的增加而增加,但是基本纤芯模 式LPu模的有效模场面积增加速率明显比高阶纤芯 模式 LP₁₁模的有效模场面积增加速率要快很多。由 于非线性效应和模式不稳定这两个因素限制了激光 器功率的提升以及激光器输出的光束质量,故提高光 纤区域的摸场面积能降低光纤中光功率的密度,进一 步能减少非线性带来的不利影响,同时可以避免功率 密度过大造成的物理影响。另外,保持激光器的单模 运行能提高激光器的稳定性,保证高质量的输出光 束。图4(d)中显示了基本纤芯模式 LP01模的有效模 场面积增长速率比高阶纤芯模式 LP₁₁模的增长速率 要快,表明在满足单模运行的前提下,获得了大模场 面积,这对激光器功率的提升大有益处。

3.3 不含金属层的石墨烯双纤芯结构参数与波长的关系

考虑不含金属层的石墨烯双纤芯结构的性能,研 究其结构参数和波长的关系。介质结构层参数设定 为:纤芯折射率 $n_{\rm core} = 1.4478$,包层折射率 $n_{\rm clad-}$ ding = 1.4453,石墨烯上部覆盖物样品的折射率 $n_{\rm sample} = 1.333$,单层石墨烯厚度 $t_{\rm c}G = N \times 0.34$ nm, 纤芯半径 $r_{\rm core} = 8$ µm,包层边长 $r_{\rm cladding} =$ 15 µm,石墨烯层数N = 1,金属层厚度 $t_{\rm metal} = 0$ nm, 光纤中的传播波长 $\lambda = 600$ nm,由图 5(a)可知,同样 是在波长 600 ~ 1000 nm 区间,不含金属层的有效模 指数与含有金属层的有效模指数变化不大,而衰减率 的变化就相当的大,如图5(b)所示,这是由于不含金 属层时,石墨烯与光纤之间的耦合较弱,导致与金属 -石墨烯的双纤芯结构相比,衰减率dB降低。



有效模面积与波长的关系。与石墨烯 - 金属双纤

芯结构的石墨烯区的有效模面积明显不同的是, 两种模式的有效模面积在波长 600~1000 nm 区 间的增长速率保持一致,没有发生增长速率的突 变。图 5(d) 纤芯区有效模面积曲线与石墨烯 -金属双纤芯结构的纤芯区有效模面积曲线基本一 致,变化不大。

3.4 纤芯折射率对光纤性能的影响

为了抑制高阶模,保证基模传输,通过改变纤芯 的折射率分布是光纤结构设计的方法之一。为此, 我们对纤芯折射率从 1.4460 到 1.4496 区间的有效 模指数、衰减率、石墨烯的有效模场面积和纤芯区的 有效模场面积做了分析。不同纤芯折射率对光纤性 能的影响如图6所示,其中,光纤参数设定为包层折 射率 n_cladding = 1.4453, 纤芯半径 r_core = 8 μm, 包层边长 r_cladding = 15 μm, 金属层厚度 t_metal = 30 nm,光纤中的传播波长 $\lambda = 600$ nm。通过数值计 算结果表明:纤芯折射率的改变对基模衰减率的影 响很小,由图6(b)可见,衰减率基本保持不变。而 从图 6(d) 可见, 当纤芯折射率是 1.4460 时, 基模的 有效模场面积为 275 μm²,此面积大于之前不含金 属层的波长为 600 nm 时基模的有效模场面积 250 μm²,也大于含有金属层的波长为 600 nm 的基模有 效模场面积249 µm²,说明选择恰当的纤芯折射率, 能有效提高模场面积,减小光纤的非线性效应。在 实际使用中,应根据实际情况进行纤芯折射率的 选择。







3.5 金属层厚度、石墨烯层数和纤芯折射率对品质 因子的影响

品质因子 Q 是研究传感性能的一项重要指标 参量,光学微腔由于其高品质因子特性具有广泛的 应用前景。考虑影响品质因子 Q 的几种因素,包括 金属层厚度、石墨烯层数和纤芯的折射率,介质结构 层参数设定为:纤芯折射率 $n_{\rm core} = 1.4478$,包层折 射率 $n_{\rm cladding} = 1.4453$,石墨烯上部覆盖物样品的 折射率 $n_{\rm sample} = 1.333$,单层石墨烯厚度 $t_{\rm C} = N$ ×0.34 nm,纤芯半径 $r_{\rm core} = 8$ µm,包层边长 $r_{\rm cladding} = 15$ µm,石墨烯层数 N = 1,金属层厚度 $t_{\rm c}$ metal = 30 nm,光纤中的传播波长 $\lambda = 600$ nm,经数 值模拟计算可知在 23 层石墨烯时品质因子能达到 1.99×10⁸,金属层厚度在 90 层时,品质因子大约是 2.03×10⁸,而纤芯的折射率与品质因子呈单调上升 的关系,如图 7 所示。





日 / 亚周云戸及 日 空和 云 双 印 三 ひ 打 オ 平 刈 田 灰 四 丁 日 永 中 Fig. 7 Effects of metal layer thickness, graphene layer number and core refractive index on quality factors

4 结 论

针对金属 - 石墨烯结构的双纤芯结构,通过数 值模拟研究了等离子体光子结构的变化对表面激励 (SPP)的影响以及该等离子体传感器的感测性能。 并且对涂覆金属层和不涂覆金属层两种情况下,不 同波长范围内的纤芯区的有效模指数、衰减常数、石 墨烯的有效模面积和纤芯区的有效模面积进行了分 析。数据表明选择合适的纤芯折射率,能在 600 nm 波长段提高基模的有效模场面积到 275 μm²,高于 同等 600 nm 波长情况下其他纤芯折射率数值的有 效模场面积,达到了减小光纤非线性效应的效果。 文中提出的双纤芯结构的传感器具有独特的传感性 能,具备实现感测应用中的高度敏感,高度集成,灵 活和小型化的前景。

参考文献:

- [1] Sun Lei, Semenova Y, Wu Qiang, et al. Investigation of humidity and temperature response of a silica gel coated microfiber coupler [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016,8(6):1-7.
- [2] Rao Yunjiang, Ran Zengling, et al. Hybrid LPFGMEFPI sensor for simultaneous measurement of high-temperature and

strain[J]. Optics Express, 2007, 15(22):14936-14941.

- [3] Tang Zunwei, Lou Shuqi. Research on the dependence of coupling ratio for fused tapered polarization maintaining fiber coupler[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3):217-222. (in Chinese)
 唐尊伟,娄淑琴. 熔锥型保偏光纤耦合器分光比的依赖性研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 217-222.
- [4] Yu Yang, Zhang Xueliang, Song Zhangqi, et al. Investigation of fabrication and vibration sensing properties of optical microfiber coupler [J]. Chinese Journal of Laser, 2014,41(11):119-125. (in Chinese)
 于洋,张学亮,宋章启,等. 微光纤耦合器制作及振动 传感 特性 研究 [J]. 中国激光, 2014,41(11): 119-125.
- [5] Chen Xiaolong, Luo Yunhan, Xu Mengyun, et al. Refractive index and temperature sensing based on surface plason resonance fabricated on a side-polished fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2):68 73. (in Chinese) 陈小龙,罗云瀚,徐梦云,等. 基于侧边抛磨光纤表面 等离子体共振的折射率和温度传感研究[J]. 光学学 报,2014,34(2):68-73.
- [6] Rifat A A, M-Hdiraji G A, Ahmed R, et al. Copper-graphene-based photonic crystal fiber plasmonic biosensor
 [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 8(1):1-8.
- [7] Hao Dan, Wang Jianshuai, Xie Yuheng, et al. Surface plason resonance sensor based on dual-core photonic crystal fiber for low refractive index detection in Mid-infrared spectrum[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(6):146 153. (in Chinese)
 郝丹,王建帅, 解宇恒,等. 基于双芯光子晶体光纤的中红外表面等离子体共振低折射率传感器[J]. 光子 学报, 2020, 49(6):146 153.
- [8] TURITSYN S K, BABIN S A, EL-TAHER A E, et al. Random distributed feedback fiber laser[J]. Nature Photonics, 2010, (4):231-235.
- [9] Vakil A, Engheta N. Transformation optics using graphene
 [J]. Science, 2011, 332(6035):1291 1294.
- [10] Furchi M, Urich A, Pospischil A, et al. Microcavity-integrated grapheme photodetector [J]. Nano Lett, 2012, (12):2773-2777.
- [11] Cheng Dejiang, Hu Xing, Hui Yongling, et al. Design and experimental verification of a large core sized Yb: YAG crystalline waveguide [J]. Laser & Optoelectronics. Progress, 2019, 56(23):231401. (in Chinese)

程德江,胡星,惠勇凌,等.大芯层尺寸: 晶体波导的 设计及实验验证[J].激光与光电子学进展,2019,56 (23):231401.

- [12] Femandez-Valleju M, Olier D, Zomoza A, et al. km-long Raman amplified hybrid double-bus network with point and distributed Brillouin sensors [J]. Sensors Journal, 2012,12(1):184-188.
- [13] 赵圣之. 非线性光学 [M]. 济南: 山东大学出版 社,2007.
- [14] Tan Zhan, Liao Changrui, Liu Shen, et al. Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12):98 104. (in Chinese)
 谭展,廖常锐,刘申,等. 基于空芯光纤和光纤布拉指 光栅的温度应变同时测量传感器[J]. 光学学报, 2018, 38(12):98 104.
- [15] 顾畹仪,黄永清,陈雪,等.光纤通信[M].北京:人民 邮电出版社,2015.
- [16] Zhou Renlong, Yang Sa, Liu Dan, et al. The confined surface plasmon and second harmonic waves in graphene nanoribbon arrays[J]. Opt. Exp. ,2017,25(25):31478-31491.
- [17] Zhou Renlong, Li Hongjian, Zhou Bingju, et al. Transmission through a perforated metal film by applying an exter-

nal magnetic field [J]. Solid State Communications. 2009 , 149 (15 – 16) : 657 – 661.

- [18] Qu Yurui, Li Qiang, Cai Lu, et al. Polarization switching of thermal emissions based on plasmonic structures incorporating phase-changing material Ge2Sb2Te5 [J]. Optical Materials Express, 2018, 8(8):2312 - 2320.
- [19] Bai Chunhe, Luo Yunhan, Chen Zhe. Characteristics of side-polished fiber in refractive index sensing [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42 (10):1182 1186. (in Chinese)
 白春河,罗云瀚,陈哲. 基于侧边抛磨光纤倏逝场的折射率传感特性[J]. 光子学报, 2013, 42 (10): 1182 1186.
- [20] John M Fini. Bend-compensated design of large-mode-area fibers[J]. Optics letters, 2006, 31(13): 1963 - 1965.
- [21] Deepak Jain, Catherine Baskiotis, Sahu Jayanta Kumar. Mode area scaling with multi-trench rod-type fibers [J]. Optics Express, 2013, 21(2):1448 - 1455.
- [22] Song Ning, Yin Zongmin, Ge Wenping. Theoretical calculation of the propagation characters of optical fibers[J]. Acta Photonica Sinica,2002,31(5):566-569. (in Chinese) 宋宁,殷宗敏,葛文萍. 光纤传输特性的理论计算[J]. 光子学报,2002,31(5):566-569.