

一种基于椭圆、菱形芯的高双折射型光子晶体光纤

伍东杨

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2022年3月7日; 录用日期: 2022年4月29日; 发布日期: 2022年5月10日

摘要

本文提出了一种基于椭圆、菱形芯的高双折射型光子晶体光纤(PCF), 用于高效的太赫兹波保偏传输。PCF以环烯烃聚合物TOPAS为主体材料。纤芯中引入椭圆、菱形气孔来打破PCF的几何对称性, 以获得高双折射性。采用全矢量有限元方法(FEM)来模拟分析PCF两个偏振方向的特性参数, 如双折射、限制损耗、材料吸收损耗和模场面积。研究表明, 在500 GHz频率时, 获得了0.062的高双折射和0.081 dB/cm的低材料吸收损耗, 限制损耗低至 3.7×10^{-5} dB/cm。相较于传统光纤, 所提出的PCF结构可实现高质量、低串扰的太赫兹波保偏传输, 为低损耗、长距离的太赫兹波保偏传输提供一种解决方案。

关键词

高双折射, 低损耗, 太赫兹, 光子晶体光纤, 有限元法

A Highly Birefringent Photonic Crystal Fiber Based on Elliptical and Rhombic Cores

Dongyang Wu

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 7th, 2022; accepted: Apr. 29th, 2022; published: May 10th, 2022

Abstract

In this paper, a highly birefringent photonic crystal fiber (PCF) based on an elliptical, rhombic core is proposed for efficient terahertz wave-preserving transmission. PCF is made of cyclic olefin polymer TOPAS as the main material. Elliptical and diamond-shaped air holes are introduced into

the core to break the geometric symmetry of PCF to obtain high birefringence. The full vector finite element method (FEM) is used to simulate and analyze the characteristic parameters of PCF in both polarization directions, such as birefringence, limiting loss, material absorption loss and mode field area. The results of the study show that a high birefringence of 0.062 and a low material absorption loss of 0.081 dB/cm with a limiting loss as low as 3.7×10^{-5} dB/cm were obtained at the frequency of 500 GHz. The proposed PCF structure enables high quality, low crosstalk terahertz wave bias-preserving transmission compared to conventional optical fibers. It provides a solution for low-loss, long-distance terahertz wave bias-preserving transmission.

Keywords

High Birefringence, Low Loss, Terahertz, Photonic Crystal Fiber, Finite Element Method

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在传统的太赫兹光纤中[1], 由于两个正交偏振模的模式折射率很相近, 很容易导致光纤的模场能量从一个偏振模耦合到另一个偏振模中去, 光信号的模式之间产生串扰, 而高双折射型光子晶体光纤 (Photonic crystal fiber, PCF) [2]可以有效地解决这一问题, 其高双折射性可以降低偏振耦合。双折射型 PCF 是通过故意打破纤芯或包层的对称性[3], 让 x 和 y 两个方向的偏振模式之间产生折射率差, 有利于光信号的偏振传输。除此之外, 高双折射型 PCF 还具有许多优良的特性, 比如: 无截止单模传输[4]、大的模场面积[5]和低的限制损耗[6]等。因此, 高双折射型 PCF 具有重要的研究价值。

高双折射型 PCF 有两种方法来实现双折射特性, 一种是增加应力区域, 另一种是通过破坏光纤的圆对称结构来实现高双折射特性。由于增加应力具有不可控性, 主要是通过非对称结构来灵活设计 PCF。前人已经做了许多重要的工作。Kawsar Ahmed 等人[7]在纤芯引入两层椭圆腔, 在 1 THz 工作频率下, 获得了 0.0119 的高双折射和 0.0689 dB/cm 的材料吸收损耗。Hasanuzzaman 等人[8]提出了一种基于双孔结构的六边形 PCF, 通过旋转双孔结构来增强双折射, 在 0.85 THz 获得了 0.033 的高双折射系数和 0.43 dB/cm 的材料吸收损耗。Raonaqul Islam 等人[9]提出了一种基于 TOPAS 的高双折射型 PCF, 它利用中间气孔和非对称包层结构, 获得了 0.045 的高双折射性, 这种复杂的光纤结构是较难制造的。最近, Wang 等人[10]设计了一种带有 D 型气孔的新型 PCF, 在基本模式传输时, 光纤的双折射达 0.0595, 模场面积达 $10^5 \mu\text{m}^2$ 量级。以前的研究表明, 通过灵活设计 PCF 的结构和改变气孔参数, 可以有效调节损耗和双折射等光学特性参数。研制低损耗的高双折射型 PCF, 对于长距离的太赫兹波保偏传输具有重要的应用价值。

受到前人工作的启发, 本文提出了一种新型的高双折射型光子晶体光纤, 可灵活应用于太赫兹波的偏振传输。包层由传统的六角晶格排列的气孔组成, 纤芯引入菱形、椭圆形气孔来获得 PCF 的高双折射性。PCF 采用全矢量有限元法和完美匹配层的边界条件来分析其传输特性。数值结果表明, 在 500 GHz 频率处, 获得了 0.062 的高双折射和 0.081 dB/cm 的低材料吸收损耗。限制损耗为 3.7×10^{-5} dB/cm, 超低的限制损耗有利于太赫兹波的长距离传输。模场面积达 $10^5 \mu\text{m}^2$ 量级, 大的模场面积有利于更好地传输光信号。简单的结构, 容易利用现有的制造技术进行加工。

2. 模型设计

本文设计的新型 PCF 的横截面如图 1 所示。蓝色区域为光纤的主体材料，白色区域为空气。光纤的设计和模拟使用了基于全矢量有限元方法的软件 COMSOL 5.6。包层区域为六角晶格排列的圆形气孔，其中包层区域的气孔直径 $d_2 = 230 \mu\text{m}$ ， Λ_2 为包层气孔间距，包层的空气填充率(d_2/Λ_2)在整个模拟分析中被固定为 0.92，从而获得良好的封闭系数。纤芯引入椭圆、菱形气孔来破坏光纤的圆对称结构，从而增加 PCF 的双折射性，实现偏振模式是可分离的。 a 和 b 分别为椭圆的短半轴和长半轴，椭圆率被固定为 0.5， a_1 和 b_1 分别为菱形的短半轴和长半轴，纤芯气孔的直径 $d_1 = 12.5 \mu\text{m}$ 。最外层为完美匹配层，为纤维总直径的 10%，用于吸收不需要的电磁辐射。本文通过改变菱形气孔的参数，分析 PCF 的重要特性参数。

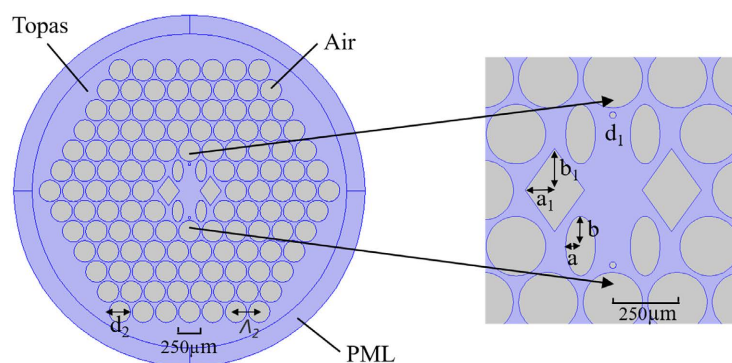
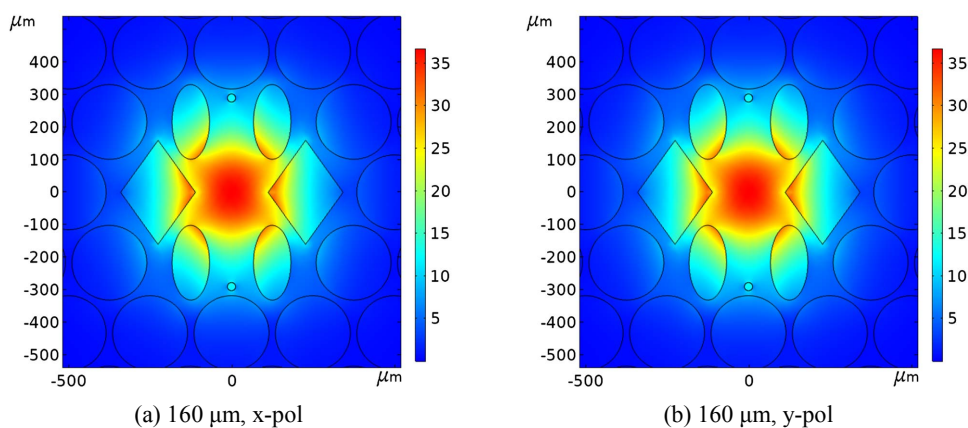


Figure 1. Cross-section of the highly birefringent PCF
图 1. 高双折射型 PCF 的横截面

设计的高双折射型 PCF 的电介质材料是环烯烃共聚物 TOPAS。相比于其他聚合物材料，例如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚四氟乙烯(PTFE)，TOPAS 具有 0.2 cm^{-1} 的低吸收系数[11]，且它在 $0.1\sim 2 \text{ THz}$ 频率范围内折射率恒定为 1.53，从而获得忽略不计的材料吸收损耗和色散。TOPAS 为非结晶的热塑性塑料，不吸收水蒸气，具有优良的稳定性和耐热性，从而灵活应用于复杂的工作环境[12]。加工方法有注塑法、钻孔、挤出法、堆积等，PCF 可以用这些先进技术来制造。

3. 仿真和结果

采用 COMSOL 软件来模拟计算光纤的特性。图 2 显示了在 500 GHz 频率下的电场分布图。由于纤芯引入了不对称结构，产生了 x 和 y 的两种极化模式。我们分析了不同参数 b_1 下的电场分布情况，结果显示，基本模式的功率被很好的限制在纤芯，更加有利于太赫兹信号的传输。



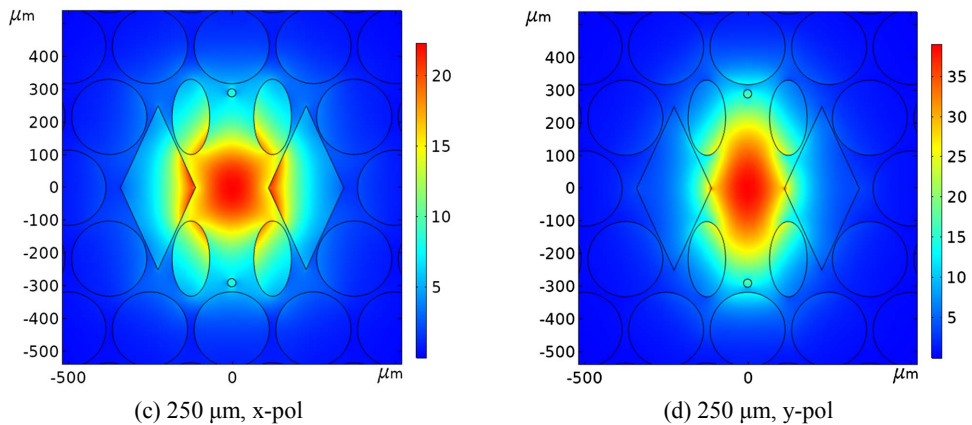
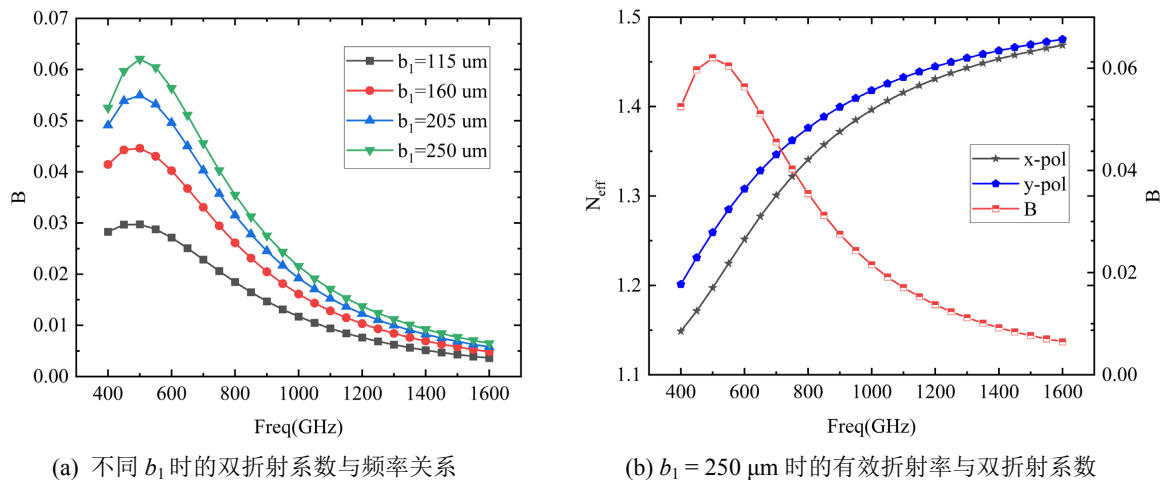


Figure 2. Electric field distribution
图 2. 电场分布

双折射性是 PCF 的重要光学特性，双折射系数越高，对于实现低串扰可分辨的光信号传输具有重要意义。由于非圆对称结构，光纤中基本模式传输时产生 x 和 y 两个方向的正交偏振模，从而获得了模式双折射系数 B 。双折射系数 B [13] 可以用以下公式(1)计算。

$$B = \left| \text{Re}(n_x - n_y) \right| \quad (1)$$

式中： B 为双折射系数； Re 为有效折射率实部； n_x 和 n_y 分别为 x 方向和 y 方向偏振模式的有效折射率。**图 3(a)** 显示了不同菱形参数 b_1 下的双折射系数与频率的关系。结果表明，双折射系数随着 b_1 的增加而增加，随着频率的增大而减小，并在 $250 \mu\text{m}$ 处获得最大双折射。如果再增大 b_1 的长度会导致纤芯气孔混叠，从而造成制造的困难。**图 3(b)** 显示了 b_1 在 $250 \mu\text{m}$ 时，有效折射率和双折射系数随着频率变化的关系， x 和 y 偏振模式的有效折射率随着频率的增大而增大。在 500 GHz 频率处，太赫兹波正交偏振极化传输时的双折射系数最大为 0.062 ，比文献[7] [8] [9] [10] [13] 报道的双折射性能有所提高。



(a) 不同 b_1 时的双折射系数与频率关系

(b) $b_1 = 250 \mu\text{m}$ 时的有效折射率与双折射系数

Figure 3. Birefringence coefficient and effective refractive index
图 3. 双折射系数与有效折射率

设计太赫兹 PCF 的难点在于降低损耗，损耗分为材料吸收损耗 EML 和限制损耗，EML [14] 可以通过公式(2)计算。

$$\alpha_{eff} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \left(\frac{\int_{mat} n_{mat} |E|^2 \alpha_{mat} dA}{\left| \int_{all} S_z dA \right|} \right) \quad (2)$$

式中, α_{eff} 是材料吸收损耗, ε_0 和 μ_0 分别是真空中的介电常数和磁导率, n_{mat} 是主体材料的折射率, α_{mat} 为主体材料的吸收损耗系数(0.2 cm^{-1}), E 是模式电场, S_z 是 Z 向的波印廷矢量($S_z = 1/2(E \times H^*) \cdot z$)。公式中分子部分的积分区域为聚合物材料部分, 分母的积分区域是 PCF 的整个横截面积。如图 4 所示, 选定不同的菱形参数 b_1 (115 μm 和 250 μm), 分析其在两个极化方向的 EML。结果表明, PCF 的 EML 随着频率的增大而增大。菱形气孔参数 b_1 较大时, PCF 的 EML 反而较小, 原因是纤芯固体材料变少, 降低了材料吸收损耗。所以我们选取了 250 μm 作为最优设计, 500 GHz 获得了 0.081 dB/cm 的低 EML。材料的 EML 相比较与文献[8] [13] [14], 有明显的降低。

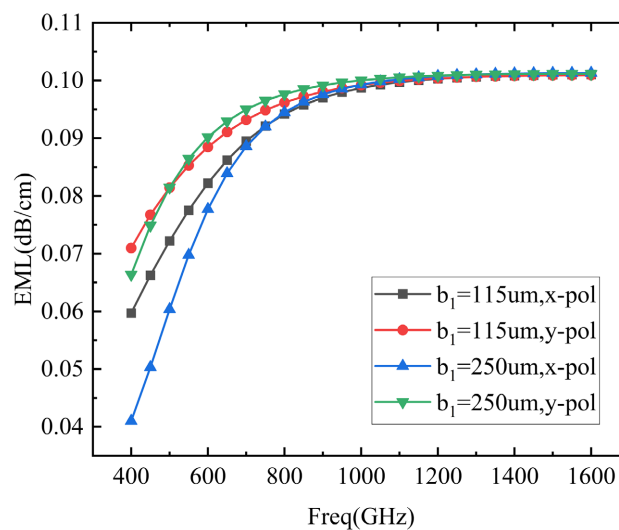


Figure 4. Material absorption loss versus frequency
图 4. 材料吸收损耗与频率的关系

PCF 的限制损耗是衡量太赫兹波传输距离的重要特性参数。它表示光纤对能量传输的封闭效果, 主要受包层结构的影响。光子晶体光纤的限制损耗[15]可以通过公式(3)计算。

$$L_c = 8.686 \left(\frac{2\pi f}{c} \right) \text{Im}(n_{eff}) \times 10^{-2}, \text{dB/cm} \quad (3)$$

式中, L_c 是限制损耗, f 是工作频率, c 是真空中的光速, $\text{Im}(n_{eff})$ 代表有效折射率的虚部。在 b_1 为 250 μm 下, 三维电场模分布如图 5(a)所示, 包层很好的将能量束缚在核芯中。x 和 y 偏振方向的限制损耗随频率变化关系如图 5(b)所示。在 500 GHz 时获得的限制损耗为 $3.7 \times 10^{-5} \text{ dB/cm}$, 限制损耗随着频率的增加显著减小。这是因为, 随着频率的增加, 更多的光收缩在核芯。如此低的限制损耗, 更有利于太赫兹信号的长距离稳定传输。

光纤的有效模场面积(A_{eff})是分析光纤中模态场所覆盖面积的重要参数, 有效模场面积[16]可以通过公式(4)计算

$$A_{eff} = \frac{\left[\int I(r) r dr \right]^2}{\int I^2(r) r dr} \quad (4)$$

式中, $I(r) = |E_t|^2$ 表示光纤横截面上的横向电场强度。基模传输情况下 x 和 y 极化的有效模场面积如图 6 所示, 有效模场面积随着频率的不断增大而减小, y 极化时的模场面积略低于 x 极化的模场面积。光功率能量更聚集在纤芯, 有利于光信号的传输。设计的高双折射型 PCF 模场面积为 $10^5 \mu\text{m}^2$ 量级, 与之前文献报道的量级类似[15][16]。

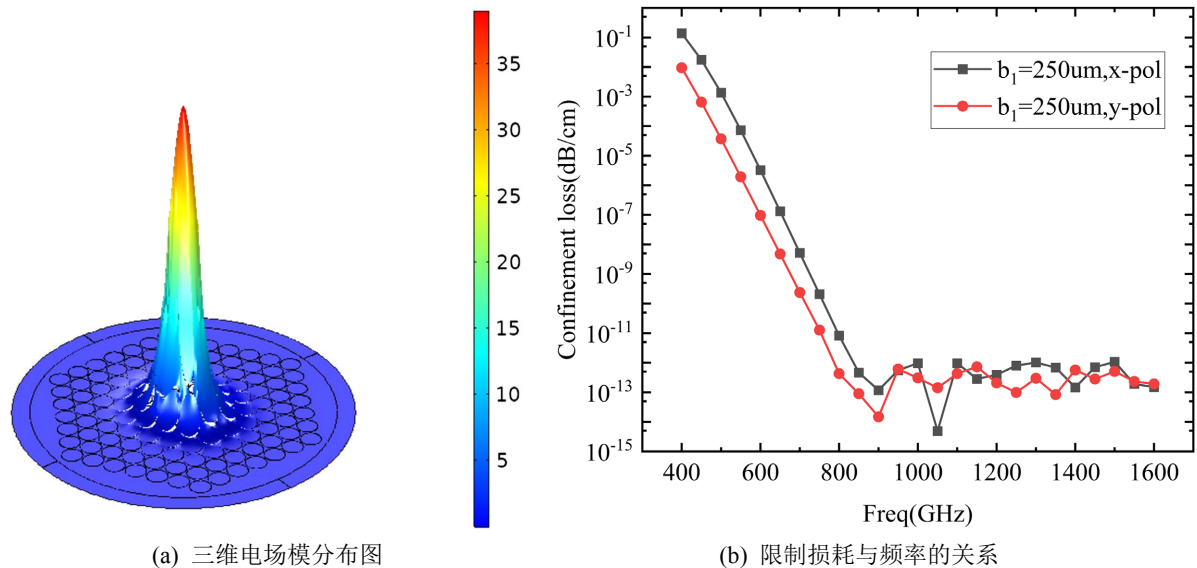


Figure 5. Three-dimensional electric field mode and limiting loss

图 5. 三维电场模和限制损耗

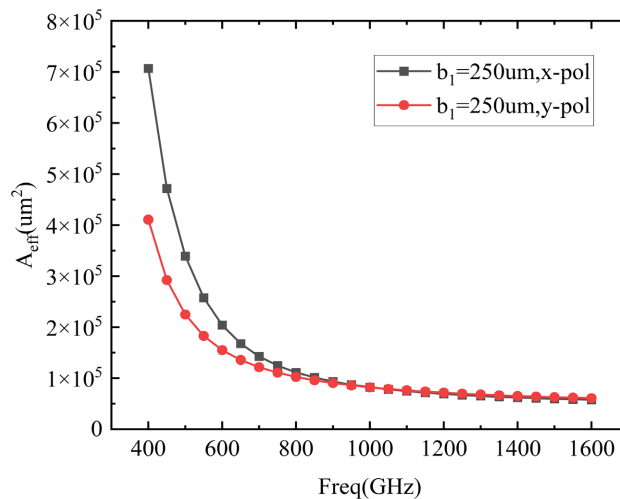


Figure 6. Effective mode field area versus frequency

图 6. 有效模场面积与频率的关系

4. 结论

综上所述, 本文提出了一种低损耗的高双折射型光子晶体光纤模型。通过灵活设计纤芯结构, 引入菱形和椭圆气孔来破坏 PCF 的圆对称性, 具有较高的双折射。文章采用有限元法对其模场分布、双折射、材料吸收损耗、限制损耗和有效模场面积进行了研究。仿真结果表明, 在 500 GHz 频率处, PCF 可以获得高达 0.062 的双折射系数和低至 0.081 dB/cm 的材料吸收损耗。与传统光纤相比, 本文设计的 PCF 可

以实现光信号高质量的偏振单模传输。限制损耗低至 3.7×10^{-5} dB/cm, 基模能量大部分被限制在纤芯, 有利于太赫兹信号进行远距离传输。其单元尺寸为毫米级, 简单的气孔结构更易于制造。因此, 本文所设计的高双折射型 PCF 有望用于太赫兹偏振保持和通信传感等领域。

参考文献

- [1] Islam, Md.S., Cordeiro Cristiano, M.B., Franco Marcos, A.R., *et al.* (2020) Terahertz Optical Fibers. *Optics Express*, **28**, 16089-16117. <https://doi.org/10.1364/OE.389999>
- [2] Erick, R.V., Juan, U.R., Cristian, J.D., *et al.* (2018) Design of Low-Loss and Highly Birefringent Porous-Core Photonic Crystal Fiber and Its Application to Terahertz Polarization Beam Splitter. *IEEE Photonics Journal*, **10**, Article ID: 5900413. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2860251>
- [3] 张怡, 葛海波, 吴昊, 等. 一种高双折射低损耗椭圆双芯光子晶体光纤的特性分析[J]. 光通信技术, 2020, 44(5): 13-17.
- [4] Li, S., Liu, H., Huang, N., *et al.* (2014) Broadband High Birefringence and Low Dispersion Terahertz Photonic Crystal Fiber. *Journal of Optics*, **16**, Article ID: 105102. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/16/10/105102>
- [5] Chen, H., Chen, D. and Hong, Z. (2009) Squeezed Lattice Elliptical-Hole Terahertz Fiber with High Birefringence. *Applied Optics*, **48**, 3943-3947. <https://doi.org/10.1364/AO.48.003943>
- [6] Han, X., Li, H., Wu, B., *et al.* (2018) Polarization-Maintaining Terahertz Bandgap Fiber with a Quasi-Elliptical Hollow-Core. *Optics & Laser Technology*, **105**, 276-280. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.03.014>
- [7] Kawsar, A., Sawrab, C., Kumar, P.B., *et al.* (2017) Ultrahigh Birefringence, Ultralow Material Loss Porous Core Single-Mode Fiber for Terahertz Wave Guidance. *Applied Optics*, **56**, 3477. <https://doi.org/10.1364/AO.56.003477>
- [8] Hasanuzzaman, G., Rana, S. and Habib, M.S. (2016) A Novel Low Loss, Highly Birefringent Photonic Crystal Fiber in THz Regime. *IEEE Photonics Technology Letters*, **28**, 899-902. <https://doi.org/10.1109/LPT.2016.2517083>
- [9] Islam, R., Selim Habib, M., Hasanuzzaman, G.K.M., *et al.* (2016) Novel Porous Fiber Based on Dual-Asymmetry for Low-Loss Polarization Maintaining THz Wave Guidance. *Optics Letters*, **41**, 440-443. <https://doi.org/10.1364/OL.41.000440>
- [10] Wang, B., Jia, C., Yang, J., *et al.* (2021) Highly Birefringent, Low Flattened Dispersion Photonic Crystal Fiber in the Terahertz Region. *IEEE Photonics Journal*, **13**, Article ID: 7200210. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2021.3057698>
- [11] Nielsen, K., Rasmussen, H.K., Adam, A.J.L., *et al.* (2009) Bendable, Low-Loss Topas Fibers for the Terahertz Frequency Range. *Optics Express*, **17**, 8592-8601. <https://doi.org/10.1364/OE.17.008592>
- [12] Emiliyanov, G., Jensen, J., Bang, O., *et al.* (2007) Localized Biosensing with Topasmicrostructured Polymer Optical Fiber. *Optics Letters*, **32**, 460-462. <https://doi.org/10.1364/OL.32.000460>
- [13] Wu, Z., Zhou, X., Xia, H., *et al.* (2017) Low-Loss Polarization-Maintaining THz Photonic Crystal Fiber with a Triple-Hole Core. *Applied Optics*, **56**, 2288-2293. <https://doi.org/10.1364/AO.56.002288>
- [14] Wu, Z., Shi, Z., Xia, H., *et al.* (2016) Design of Highly Birefringent and Low-Loss Oligoporous-Core THz Photonic Crystal Fiber with Single Circular Air-Hole Unit. *IEEE Photonics Journal*, **8**, 1-11. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2633229>
- [15] Kaijage, S.F., Ouyang, Z., *et al.* (2013) Porous-Core Photonic Crystal Fiber for Low Loss Terahertz Wave Guiding. *IEEE Photonics Technology Letters*, **25**, 1454-1457. <https://doi.org/10.1109/LPT.2013.2266412>
- [16] Bai, J.N., *et al.* (2011) A Porous Terahertz Fiber with Randomly Distributed Air Holes. *Applied Physics B*, **103**, 381-386. <https://doi.org/10.1007/s00340-010-4334-x>