

新型光控砷化镓/侧边抛磨太赫兹光纤调制器

徐成¹, 韩鑫洋¹, 骆震阳¹, 杨铁锋¹, 孔德鹏², 陈立均³, 吴岱³, 李鹏³, 徐利民⁴, 吴衡⁴, 卢惠辉¹,
陈哲^{5**}, 关贺元^{1*}

¹暨南大学光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632;

²中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;

³中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

⁴广东工业大学广东省信息物理融合系统重点实验室, 广东 广州 510006;

⁵季华实验室, 广东 佛山 528200

摘要 太赫兹调制器作为太赫兹技术应用的重要器件之一,在太赫兹通信、成像和传感等领域具有广泛应用前景。但是目前太赫兹调制器调制深度、工作带宽、稳定性等有待提升,这制约了太赫兹技术的进一步推广与发展。基于此,设计并制备了一种新型光控砷化镓/侧边抛磨太赫兹光纤(SPTF)调制器,将砷化镓转移到太赫兹光纤抛磨区,增强太赫兹波倏逝场与砷化镓相互作用。在外置 808 nm 激光器照射下实现对太赫兹波幅度调制,调制深度达到 97.4%。实验结果表明,这种新型的光纤调制器具有较好的光控调制效果。同时,该器件体积小、集成度高,具有广泛应用的潜力。

关键词 太赫兹调制器; 侧边抛磨光纤; 砷化镓; 光控; 调制深度

中图分类号 O536

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231416

Novel Optically Controlled GaAs/Side-Polished Terahertz Fiber Modulator

Xu Cheng¹, Han Xinyang¹, Luo Zhenyang¹, Yang Tiefeng¹, Kong Depeng², Chen Lijun³,
Wu Dai³, Li Peng³, Xu Limin⁴, Wu Heng⁴, Lu Huihui¹, Chen Zhe^{5**}, Guan Heyuan^{1*}

¹Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications Jinan University,
Guangzhou 510632, Guangdong, China;

²Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese
Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

³Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China;

⁴Guangdong Provincial Key Laboratory of Cyber-Physical System, Guangdong University of Technology,
Guangzhou 510006, Guangdong, China;

⁵Jihua Laboratory, Foshan 528200, Guangdong, China

Abstract As an important device for the application of terahertz technology, the terahertz modulator has a wide application prospect in the fields of terahertz communication, imaging, and sensing. However, current terahertz modulators exhibit problems, such as low modulation depth, narrow operating bandwidth, and poor stability. This restricts further promotion and development of terahertz technology. In this study, a new optical control GaAs/side-polished terahertz fiber (SPTF) modulator is demonstrated. GaAs film is transferred to the polished region of the terahertz fiber to enhance the interaction with the terahertz evanescent wave. The highest modulation depth of GaAs/ SPTF modulator is 97.4% with an external laser irradiation of 808 nm. The experimental results show that this new fiber modulator exhibits a good optical control modulation effect. Additionally, the compact and highly integrated design of the device suggests its broad application potential.

Key words terahertz modulator; side-polished fiber; GaAs; optically control; modulation depth

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-06-30; 录用日期: 2023-08-01; 网络首发日期: 2023-08-11

基金项目: 国家自然科学基金 NSAF 联合项目(U2030103,U2230111)、国家自然科学基金项目(61775084,62075088)、广东省科学技术协会青年科技人才培育计划(SKXRC202304)、广东省自然科学基金(2020A1515010791,2021A0505030036,2022A1515110970,2022A1515140055)、广东省信息物理融合系统重点实验室(2020B1212060069)、广州市基础与应用基础项目(202201010654)

通信作者: *tguanheyuan@jnu.edu.cn; **thzhechen@jnu.edu.cn

1 引言

太赫兹的频率范围为 0.1~10 THz,对应的真空波长为 3 mm~30 μm ,这个光谱区域与电子学和光子学之间的长度相重合,是从电子学向光子学过渡的领域^[1-2]。在太赫兹技术的发展过程中,太赫兹调制器作为关键元件之一,起着重要的作用。通过对太赫兹调制器的研究,可以提高太赫兹技术的性能和应用范围,进一步拓展其在科学研究和工程应用中的潜力。

太赫兹波幅度调制是指使用调制信号来控制一个或多个参数(幅度、相位等)的过程。近些年来,已经有科研团队通过不同材料与微纳结构来制备太赫兹调制器^[3-5],实现了调制深度高、调制速度快和调制带宽大等效果。美国波士顿大学 Aksu 等^[6]利用高分辨率纳米模板光刻技术在柔性基底上刻蚀纳米图案,当施加应力到薄膜上时,周期性提高 5%,共振波长红移 160 nm。美国圣母大学 Chen 等^[7]制备出宽带石墨烯电控太赫兹调制器,调制深度为 15%,调制速度为 20 kHz。南京邮电大学 Zhou 等^[8]提出一种适用于太赫兹范围的新型磁化等离子体调制器,仿真结果显示,设计的磁控调制器具有高对比度(<33.61 dB)、低插入损耗(<0.36 dB)和高调制速率(~4 GHz)。由此可以看出,目前太赫兹调制器常常受到调制深度的限制。尽管已经有多种调制方案,但多数无法实现较大的调制深度,限制了太赫兹信号的强度调节范围。

砷化镓(GaAs)是一种备受关注的太赫兹调制半导体材料,它的直接带隙为 1.44 eV,电子迁移率高于硅和锗,载流子寿命较短,约为 ps 量级^[9]。光子晶体光纤(PCF)具有宽带传输和可集成特性的优势,已经引起了科研人员广泛关注。与传统光纤相比,PCF 具有宽带单模工作^[10]和空气引导^[11]的特点,可以降低传输损耗。2022 年,Mei 等^[12]采用预制棒挤压拉伸法制备了多孔纤芯和多孔包层的微结构聚合物光纤,该光纤材料为 Zeonex(环烯烃聚合物),实验结果表明,该光纤在 0.39~0.45 THz 范围内存在一条平坦的近零色散带。

本文设计了一种新型光控砷化镓(GaAs)/侧边抛磨太赫兹光纤(SPTF)调制器,对太赫兹光纤进行侧边抛磨,在侧抛平坦区上转移砷化镓薄膜(350 μm)形成光控可调制的媒质区域,最后施加外置泵浦光进行调制。仿真结果表明,该器件在泵浦光作用下具有良好调制效果。对新型太赫兹光纤调制器进行测试,结果显示,侧抛剩余厚度为 1.80 mm 的 GaAs/SPTF 器件在外置 488 mW 泵浦光作用下调制深度为 97.4%。

2 太赫兹调制器仿真

2.1 仿真参数确定

采用中心波长为 808 nm 的激光器照射 GaAs,使得 GaAs 转化为类金属态,可以利用 Drude 模型来构建 GaAs 材料。GaAs 介电常数的表达式为

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (1)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m^*\epsilon_0}}, \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{1}{\tau} = \frac{e}{m^*\mu}, \quad (3)$$

$$m^* = 0.067m_e, \quad (4)$$

式中: ϵ 为真空介电常数; ϵ_{∞} 是 GaAs 高频介电常数; ω 为入射太赫兹波的频率; ω_p 是等离子体共振频率; γ 为阻尼系数; m^* 为载流子有效质量; m_e 为电子质量; τ 为弛豫时间; e 为电子常数; μ 为载流子迁移速率。

在仿真过程中,设置 GaAs 高频介电常数为 12.9^[13]。当受到泵浦光照射时,GaAs 的电导率可以表示为

$$\tilde{\sigma}(\omega) = \frac{i\epsilon_0\omega_p}{\omega + i\gamma}. \quad (5)$$

本研究建立的太赫兹光纤模型源于合作单位中国科学院西安光学精密机械研究所研发的光子晶体光纤。该光纤使用环烯烃类共聚物(COC)制备,COC 材料在太赫兹波段(0~3 THz)折射率基本保持在 1.52^[14],吸收系数和色散较低,具有较高的稳定性。光纤模型结构示意图如图 1 所示,白色部分为空气孔,剩余部分为 COC 材料,中间小孔相当于“纤芯”,大孔相当于“包层”,具体尺寸如下: $D=114 \mu\text{m}$, $d=45 \mu\text{m}$, $p=120 \mu\text{m}$, $H=1667 \mu\text{m}$, $D_{\text{out}}=2.5 \text{ mm}$ 。

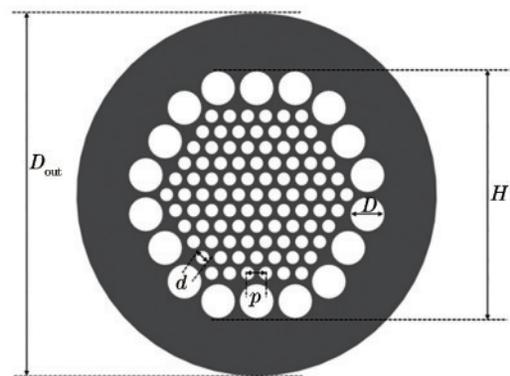


图 1 微结构太赫兹光纤模型结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the microstructured terahertz fiber model

2.2 仿真结果分析

采用有限元分析方法对太赫兹光纤进行建模和仿真计算,并对结果进行分析。在仿真软件中构建模型时,在太赫兹光纤的最外层区域使用的边界条件为散射边界条件,它的主要功能是吸收从纤芯中逸出的光

信号并向包层传播,从而不向纤芯反射。未侧抛的太赫兹光纤在 0.1~1.2 THz 范围内的基模有效折射率如图 2(a)所示,图 2(b)为光纤模场图。可以看出,传输的太赫兹光被很好地约束在由小气孔组成的“纤芯”中,外层的大气孔起到了“包层”的作用。

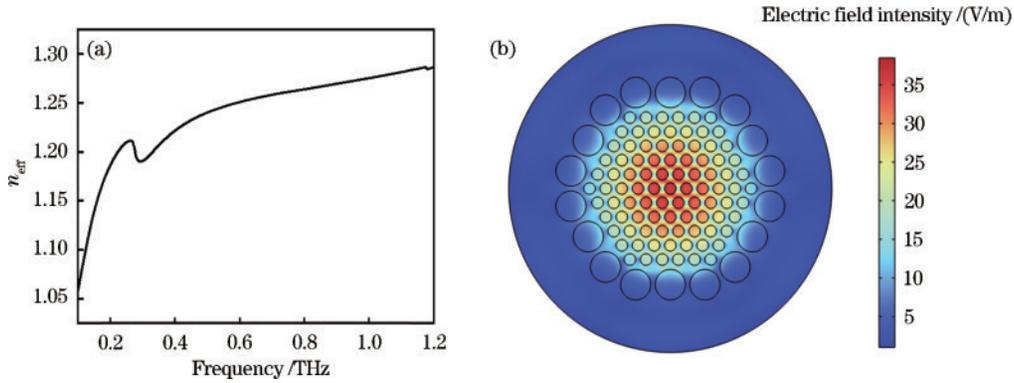


图 2 完整太赫兹光纤仿真结果。(a)在 0.1~1.2 THz 范围内基模有效折射率变化;(b)在 0.675 THz 处模场图(外层为完美匹配层和空气层)

Fig. 2 Simulation results of the complete terahertz fiber. (a) Effective refractive index variation of the fundamental mode in the range of 0.1-1.2 THz; (b) mode field diagram at 0.675 THz (outer layer is perfectly matched layer and air layer)

限制损耗(L_{CL})^[15]是光子晶体光纤特有的损耗性质,它的计算公式如下:

$$L_{CL} = 8.686 \frac{2\pi f}{c} \text{Im}(n_{eff}), \quad (6)$$

式中: f 表示频率; c 表示光速; $\text{Im}(n_{eff})$ 表示基模有效折射率的虚部。接下来对太赫兹光纤的侧边抛磨剩余厚

度进行仿真计算,以每层小气孔为间隔,仿真侧抛掉 1 层小气孔、2 层小气孔和 3 层小气孔等 3 种结构,分别计算它们的限制损耗,结果如图 3 所示。

从图 3(a)可以看出,随着太赫兹光纤的剩余厚度不断减小,纤芯中传输的太赫兹波会泄漏使得光纤的限制损耗不断增加。图 3(b)表明,在不同侧抛剩余厚

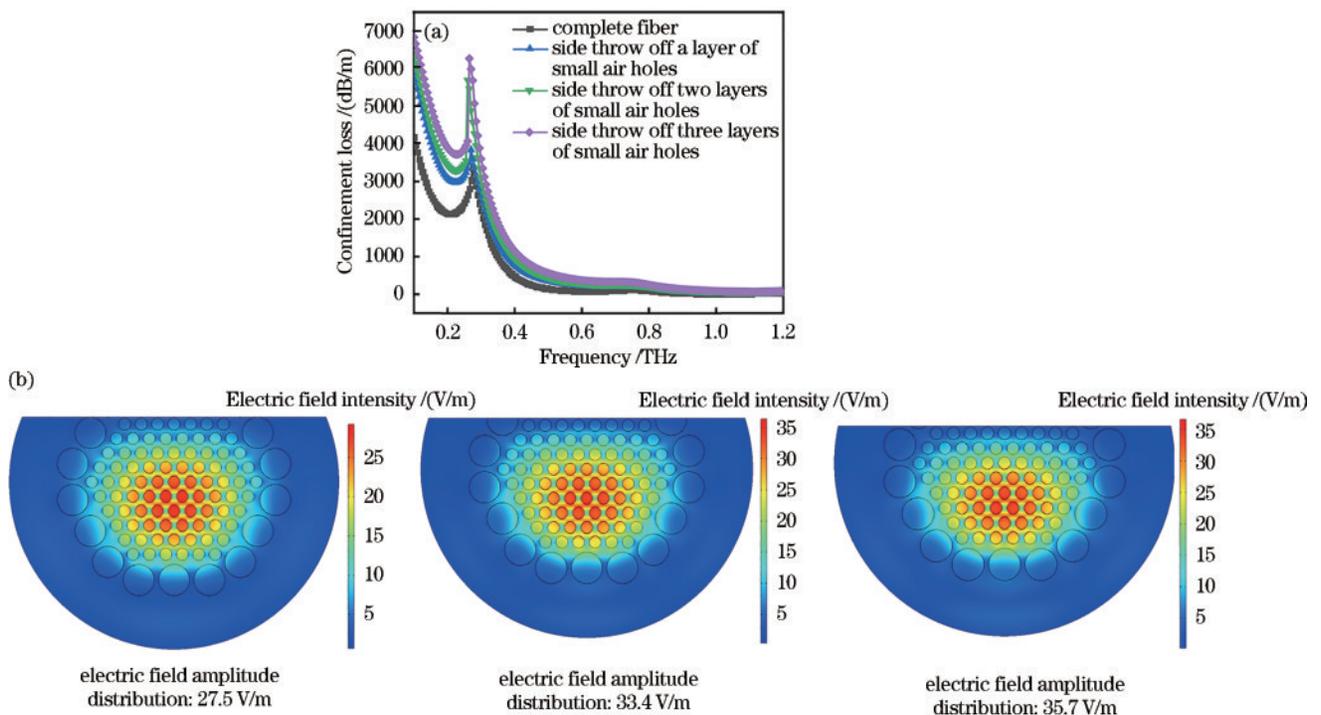


图 3 侧边抛磨太赫兹光纤仿真结果。(a)不同侧抛深度的太赫兹光纤限制损耗图;(b)在 0.675 THz 处,不同侧抛深度的太赫兹光纤模场分布图

Fig. 3 Simulation results of side-polished terahertz fiber. (a) Confinement loss plots of terahertz fibers with different side throw depths; (b) mode field distribution of terahertz fibers with different side throw depths at 0.675 THz

度、同一频率下中心模场强度图中,侧抛掉 3 层小气孔的光纤中心模场强度最高,为 35.7 V/m。

从前面对于砷化镓材料的光调谐特性可以了解到,在 808 nm 激光器照射下,不同的激光功率作用会导致砷化

镓材料的载流子浓度和迁移率发生变化,进而影响电导率。因此,在仿真中可以直接设置不同的电导率来模拟不同功率泵浦光的作用。在本研究中,使用的是 350 μm 厚度的 N 型砷化镓,构建的仿真模型如图 4(a) 所示。

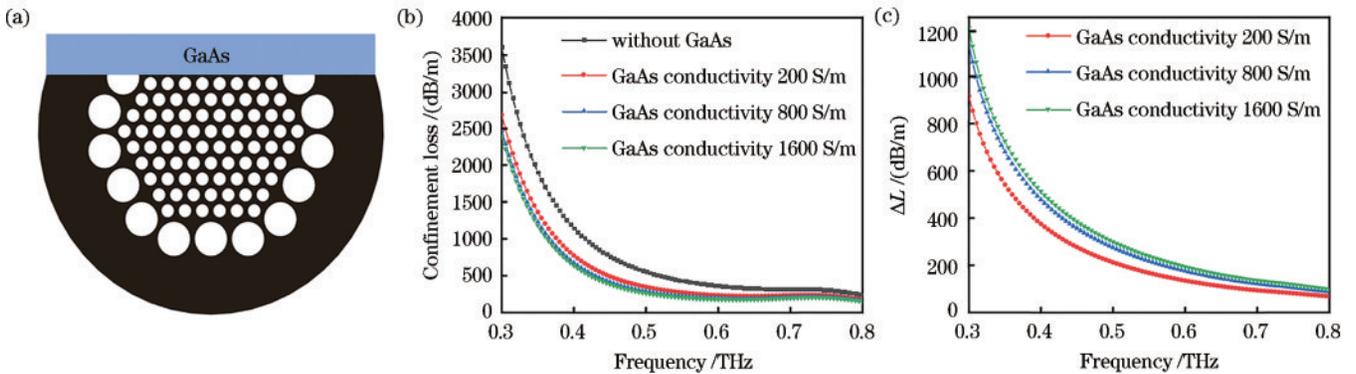


图 4 集成砷化镓后的侧边抛磨太赫兹光纤仿真结果。(a) GaAs/SPTF 模型示意图和模场图;(b) 侧抛 3 层小气孔时,不同砷化镓电导率下的器件限制损耗;(c) 侧抛 3 层小气孔时,不同砷化镓电导率下的限制损耗差值变化

Fig. 4 Simulation results of side-polished terahertz fiber after integrating GaAs. (a) GaAs/SPTF model schematic and mode field diagram; (b) device limiting loss under different GaAs conductivity when side-polished three-layer small air holes; (c) limiting loss difference variation under different GaAs conductivity when side-polished three-layer small air holes

从图 4(b) 可以看出,随着砷化镓电导率的增加,GaAs/SPTF 的限制损耗不断增加,这是因为砷化镓电导率的增加会增强对太赫兹波的吸收。但是由于限制损耗值差距比较小,为了更加直观地对比未加砷化镓与添加砷化镓的限制损耗差值,图 4(c) 给出了不同砷化镓电导率下的限制损耗差值变化情况。可以看出,随着砷化镓电导率的增加,限制损耗差值降低,吸收太赫兹能力增强。

3 器件制备与测试

3.1 侧边抛磨太赫兹光纤调制器制备

使用的太赫兹光纤来自合作单位中国科学院西安光学精密机械研究所,光纤使用的材料为环烯烃共聚物。首先,太赫兹光纤被切割成合适长度,通过光纤夹具将其固定在砂轮下方。然后,用双面胶把砂纸包在砂轮上,并把石蜡油滴在砂纸上润滑,先用粗砂纸使包层的厚度迅速下降,然后用细砂纸精细打磨抛光。该方法制备的 SPTF 侧抛区平整,抛磨区长度为 4 mm,抛磨剩余厚度为 1.80 mm,抛磨深度可达纤芯。图 5(a) 为侧抛设备示意图。在抛磨完成后,使用去离子水和无水乙醇清洁光纤,去除侧抛区域产生的材料碎屑。使用的砷化镓片为单面抛光类型,直径为 2 inch (1 inch = 2.54 cm),电阻率为 1~3 $\Omega \cdot \text{cm}$,厚度为 350 μm 。砷化镓片切割成合适大小后通过器件集成平台转移到侧抛平坦区,完成器件制备并干燥保存。图 5(b) 为所使用的光电器件集成平台(型号 E1-T,南京迈塔光电科技有限公司)。

3.2 测试系统搭建与调试

在本研究中对制备的侧边抛磨太赫兹光纤调制器进行调制深度性能测试,测试采用太赫兹时域光谱仪技术 (THz-TDS),光路为透射式,使用的太赫兹时域光谱仪型号为 QT-TS1000 (青岛青源峰达太赫兹科技有限公司)。图 6 为器件调制深度测试系统的示意图。

在进行实验之前,控制实验室温度在常温附近。将实验光路放入由亚克力板组成的罩子中,打开抽湿机抽湿,使得罩内湿度小于 5% 以减少水蒸气对测试的影响。在用调制深度来对调制性能进一步分析之前,首先介绍调制深度,其通常由信号强度在 OFF 和 ON 状态之间的变化决定,调制深度^[16]的表达式为

$$D_{\text{MD}} = \frac{T_{\text{max}}(\text{OFF}) - T_{\text{min}}(\text{ON})}{T_{\text{max}}(\text{OFF})}, \quad (7)$$

式中: $T_{\text{max}}(\text{OFF})$ 为未加泵浦时光器件的频域谱; $T_{\text{min}}(\text{ON})$ 为施加泵浦光时器件的频域谱。

对裸侧边抛磨光纤样品进行测试,选择的样品侧边抛磨剩余厚度为 1.80 mm,外置 808 nm 激光器通过调节电流大小控制输出光功率在 186~488 mW 之间。此外,在侧边抛磨太赫兹光纤调制器的制备过程中,为了使转移的砷化镓材料能够稳定粘附在光纤的平坦区需要再涂抹一层薄薄的紫外胶,所以需要涂有紫外胶的侧边抛磨光纤在不同功率的 808 nm 激光照射下进行测试,得到的结果如图 7 所示。从图中可以看出,时域谱和频域谱几乎无变化,说明在侧边抛磨光纤上涂有紫外胶后对光纤中传输的太赫兹波几乎没有什么影响,可以排除紫外胶对后续实验的干扰。

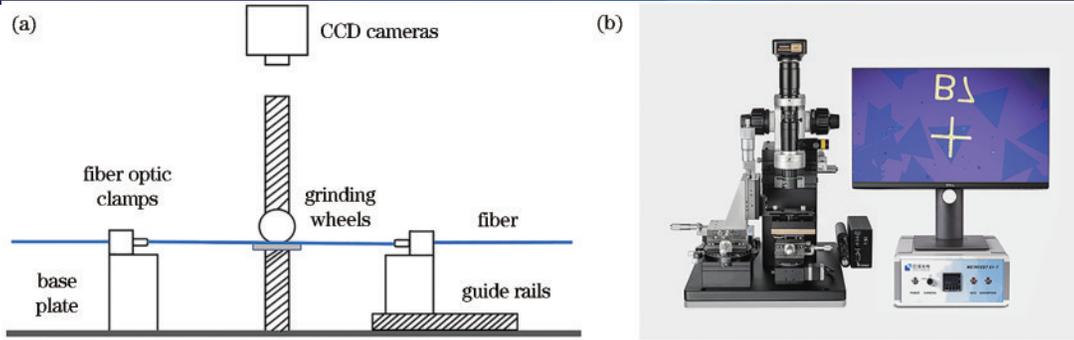


图 5 器件制备设备图。(a)侧面抛磨设备示意图;(b)光电器件集成平台

Fig. 5 Diagrams of device preparation equipment. (a) Schematic diagram of the side-polished equipment; (b) photovoltaic device integration platform

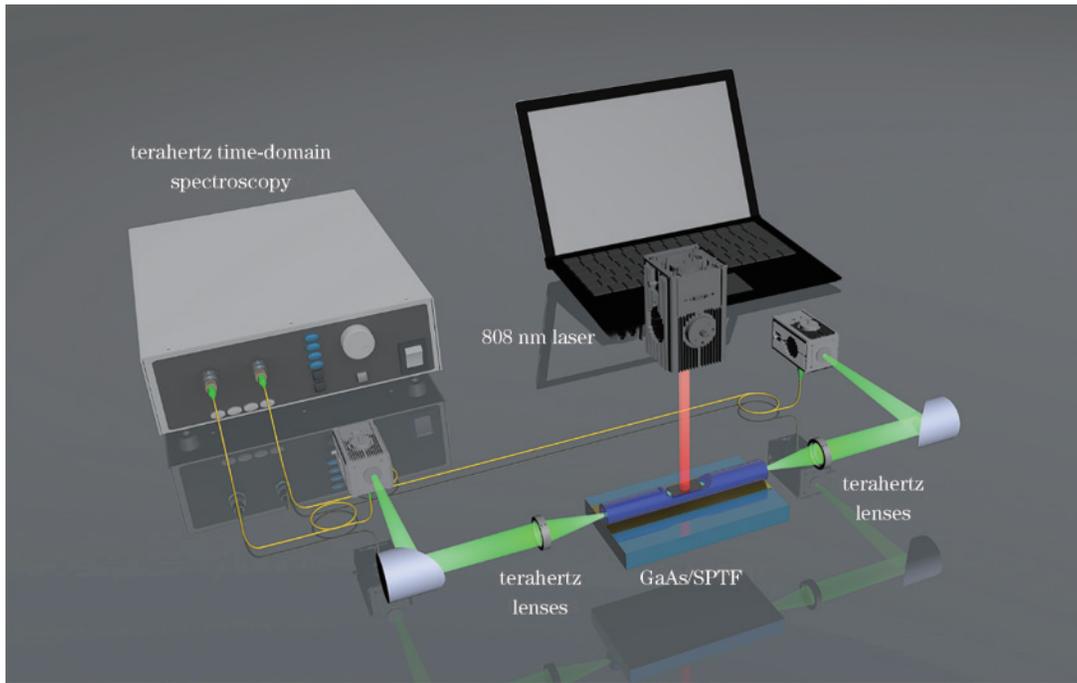


图 6 调制深度测试系统结构示意图

Fig. 6 Modulation depth test system structure schematic

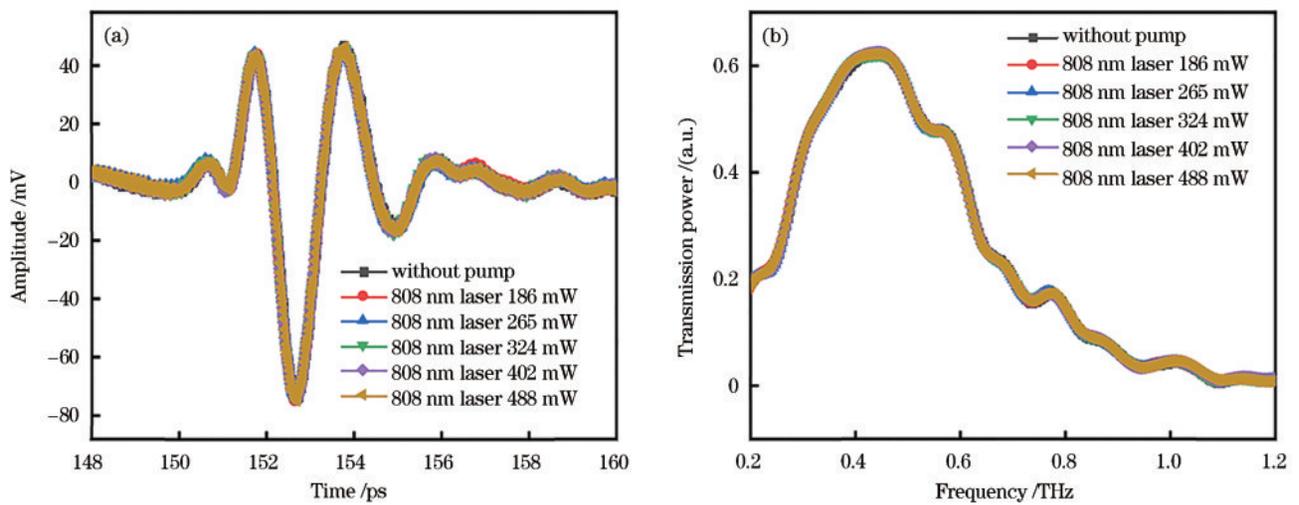


图 7 涂有紫外胶的侧面抛磨光纤在不同功率激光照射下测试结果。(a)时域谱;(b)频域谱

Fig. 7 Test results of side-polished fiber coated with UV adhesive under different power laser irradiation. (a) Time domain spectrum; (b) frequency domain spectrum

3.3 GaAs/SPTF 调制器的光控特性测试

接下来对转移砷化镓材料的侧边抛磨光纤样品进行测试,使用的外置调制光源和前文一致,为

808 nm 激光器。首先,对侧抛剩余厚度为 1.55 mm 的 GaAs/SPTF 进行测试,得到的测试结果如图 8 所示。

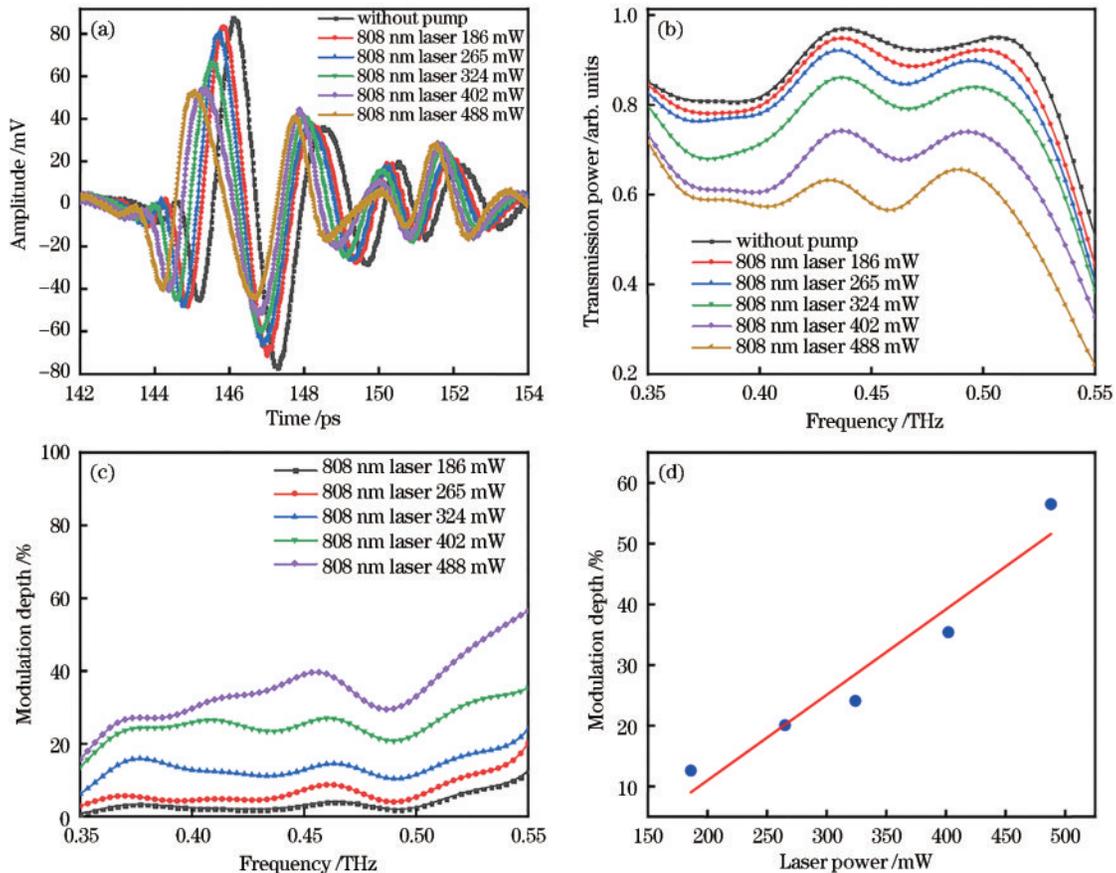


图 8 侧抛剩余厚度为 1.55 mm 的 GaAs/SPTF 测试结果。(a) 不同激光功率下时域谱;(b) 不同激光功率下频域谱;(c) 不同激光功率下调制深度谱;(d) 在 0.55 THz 处调制深度与激光功率对应关系

Fig. 8 GaAs/SPTF test results with a remaining thickness of 1.55 mm in the side throw. (a) Time domain spectrum at different laser powers; (b) frequency domain spectrum at different laser powers; (c) modulation depth spectrum at different laser powers; (d) correspondence between modulation depth and laser power at 0.55 THz

从图 8(a)、(b)可以看出:当外置 808 nm 激光器功率达到 324 mW 时,器件的时域谱出现明显左移,频域谱出现下降,此时 0.55 THz 处的调制深度为 24.1%;当功率增加到 488 mW 时,调制深度达到 56.5%,带宽为 0.2 THz,拟合出的调制深度随激光功率的变化相关系数 R^2 为 0.92。原因是侧抛较多致使剩余厚度较薄,传输的太赫兹衰减导致损耗增加,虽然将外置泵浦光的功率调高但是调制效果仍然很弱。

对侧抛剩余厚度为 1.80 mm 的 GaAs/SPTF 器件进行测试,测试的结果如图 9 所示。

从图 9(a)、(b)可以看出,随着外置 808 nm 激光器功率的增强,时域谱和频域谱的强度出现明显下降,波峰位置也发生左移。在 808 nm 泵浦光的作用下,光子能量与砷化镓的带隙能量相匹配,吸收一定能量的光子后有效的激发电子从价带跃迁到导带从而形成自由载流子,然后这些载流子会以扩散形式传递。随着激光功率的不断增加,光掺杂浓度越高的时候,载流子数

量越多,透射就越低。当外置激光功率为 488 mW 时,0.61 THz 处的调制深度达到 97.4%,带宽为 0.08 THz,拟合出的调制深度随激光功率的变化相关系数 R^2 为 0.96。

最后,对侧抛剩余厚度为 2.05 mm 的 GaAs/SPTF 器件进行测试,测试的结果如图 10 所示。

从图 10(a)、(b)可以看出,在外置泵浦光作用下时域谱发生了幅度降低和脉冲位置左移。在外置激光功率达到 488 mW 时,0.82 THz 处的调制深度为 66.2%,带宽为 0.09 THz,拟合出的调制深度随激光功率的变化相关系数 R^2 为 0.94。和前面剩余厚度为 1.55 mm 的器件相比,二者调制深度接近。这是因为当侧边抛磨深度较低时,光纤中传输的太赫兹波难以泄漏出来,不会产生倏逝场,所以即使增加激光功率对调制深度影响也是比较微弱的。

测试结果汇总如表 1 所示。

与其他光控太赫兹调制器的对比结果如图 11 所

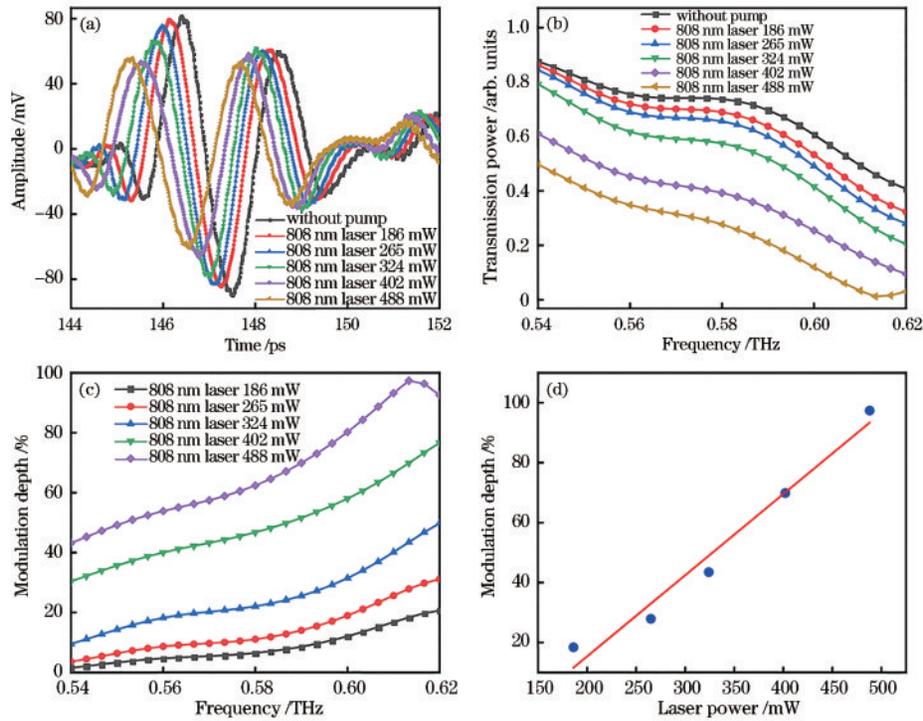


图9 侧抛剩余厚度为1.80 mm的GaAs/SPTF测试结果。(a)不同激光功率下时域谱;(b)不同激光功率下频域谱;(c)不同激光功率下调制深度谱;(d)在0.61 THz处调制深度与激光功率对应关系

Fig. 9 GaAs/SPTF test results with a remaining thickness of 1.80 mm in the side throw. (a) Time domain spectrum at different laser powers; (b) frequency domain spectrum at different laser powers; (c) modulation depth spectrum at different laser powers; (d) correspondence between modulation depth and laser power at 0.61 THz

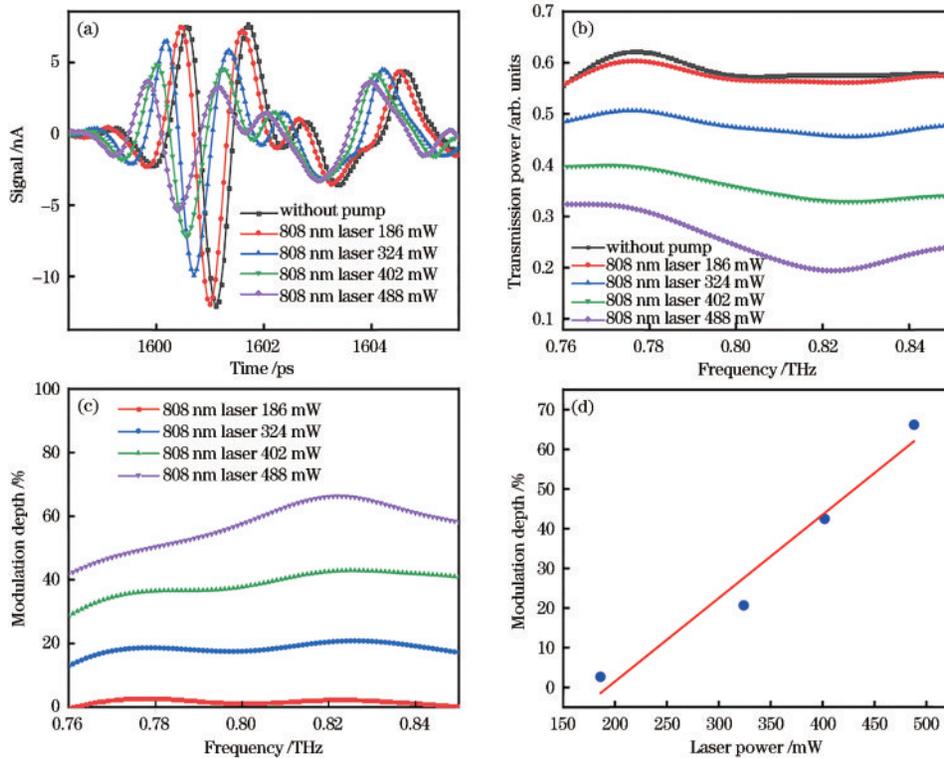


图10 侧抛剩余厚度为2.05 mm的GaAs/SPTF测试结果。(a)不同激光功率下时域谱;(b)不同激光功率下频域谱;(c)不同激光功率下调制深度谱;(d)在0.82 THz处调制深度与激光功率对应关系

Fig. 10 GaAs/SPTF test results with a remaining thickness of 2.05 mm in the side throw. (a) Time domain spectrum at different laser powers; (b) frequency domain spectrum at different laser powers; (c) modulation depth spectrum at different laser powers; (d) correspondence between modulation depth and laser power at 0.82 THz

表 1 808 nm 激光作用下,侧边抛磨太赫兹光纤调制器调制效果

Table 1 Modulation effect of the side-polished terahertz fiber modulator under 808 nm laser action

Material	Remaining thickness /mm	Modulation depth /%	bandwidth / THz	R^2
GaAs	1.55	56.2	0.2	0.92
GaAs	1.72	76	0.08	0.91
GaAs	1.80	97.4	0.08	0.96
GaAs	2.05	66.2	0.09	0.94

示,其中,正方块表示硅基太赫兹调制器^[17-22],菱形块表示锗基太赫兹调制器^[23],圆形表示基于二硫化钼的太赫兹调制器^[24],上三角形表示基于二硫化钨的太赫兹调制器^[23,25],下三角形表示基于砷化镓的太赫兹调制器^[27],五角星为新型光控 GaAs/SPTF 调制器。从图中可以看出,所设计并制备的太赫兹调制器在较低激光功率作用下可实现高调制深度(越往左上角器件的调制效果越好)。

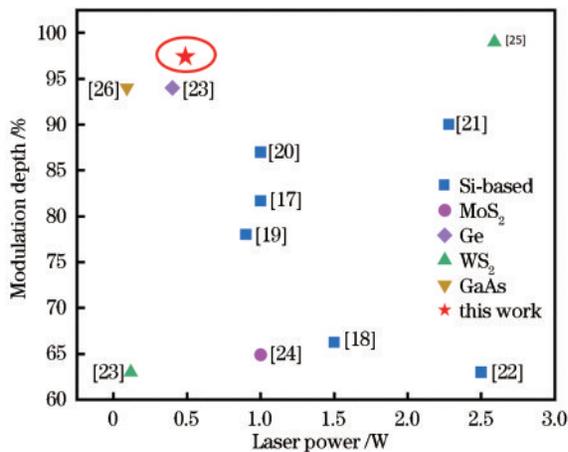


图 11 新型光控 GaAs/SPTF 调制器与其他光控太赫兹调制器调制效果对比

Fig. 11 Comparison of modulation effects between the new type of optically controlled GaAs/SFPT modulator and other optically controlled terahertz modulators

4 结 论

设计了一种新型光控 GaAs/SPTF 调制器,对侧边抛磨光纤产生倏逝场的原理进行分析并研究砷化镓材料的光调谐特性,从而实现了对太赫兹波的动力学调制分析。使用的光纤材料为聚合物,因此采用轮式抛磨法对太赫兹光纤进行侧边抛磨,将砷化镓片切割成合适尺寸并通过器件集成平台转移到侧抛平坦区。实验结果表明,制备的器件在外置 808 nm 激光器的作用下,最高调制深度为 97.4%。将新型光控 GaAs/SPTF 调制器与目前报道的光控太赫兹调制器相比较,该器件在低泵浦光功率下具有较高的调制深度,在太赫兹通信、成像和安全检测等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Siegel P H. Terahertz technology in biology and medicine [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(10): 2438-2447.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [3] Kim D K, Citrin D S. Frequency and amplitude modulation in terahertz-sideband generation in quantum wells[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(2): 021105.
- [4] Li J S. Terahertz modulator using photonic crystals[J]. Optics Communications, 2007, 269(1): 98-101.
- [5] Paul O, Imhof C, Lagel B, et al. Polarization-independent active metamaterial for high-frequency terahertz modulation[J]. Optics Express, 2009, 17(2): 819-827.
- [6] Aksu S, Huang M, Artar A, et al. Flexible plasmonics on unconventional and nonplanar substrates[J]. Advanced Materials, 2011, 23(38): 4422-4430.
- [7] Chen X Y, Ghosh S, Xu Q, et al. Active control of polarization-dependent near-field coupling in hybrid metasurfaces[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(6): 061111.
- [8] Zhou W, Chen H M, Ji K, et al. Vertically magnetic-controlled THz modulator based on 2-D magnetized plasma photonic crystal[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2017, 23: 28-35.
- [9] Prabhu S S, Ralph S E, Melloch M R, et al. Carrier dynamics of low-temperature-grown GaAs observed via THz spectroscopy[J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(18): 2419-2421.
- [10] Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J, et al. Highly birefringent photonic crystal fibers[J]. Optics Letters, 2000, 25(18): 1325-1327.
- [11] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. Science, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [12] Mei S, Kong D P, Mu Q Y, et al. A porous core Zeonex THz fiber with low loss and small dispersion[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 69: 102834.
- [13] Grischkowsky D, Keiding S, van Exter M, et al. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1990, 7(10): 2006-2015.
- [14] Zhong Y, Xie G X, Mao F, et al. Thin-wall cyclic olefin copolymer tube waveguide for broadband terahertz transmission[J]. Optical Materials, 2019, 98: 109490.
- [15] 惠战强, 杨雪, 韩冬冬, 等. 超低损耗高双折射空芯反谐振太赫兹光子晶体光纤[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(3): 563-572.
- [16] Hui Z Q, Yang X, Han D D, et al. High birefringence hollow-core anti-resonant terahertz photonic crystal fiber with ultra-low loss[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(3): 563-572.
- [17] Wang Z M, Qiao J, Zhao S Q, et al. Recent progress in terahertz modulation using photonic structures based on two-dimensional materials[J]. InfoMat, 2021, 3(10): 1110-1133.

- [17] Li D, Ji Z J, Luo C Y. Optically tunable plasmon-induced transparency in terahertz metamaterial system[J]. *Optical Materials*, 2020, 104: 109920.
- [18] Wang H X, Ling F R, Luo C Y, et al. A terahertz wave all-optical modulator based on quartz-based MAPbI₃ thin film[J]. *Optical Materials*, 2022, 127: 112235.
- [19] Shi Z W, Cao X X, Wen Q Y, et al. Terahertz modulators based on silicon nanotip array[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(2): 1700620.
- [20] Li D, Luo C Y, Wang H X, et al. Active control of plasmon-induced transparency based on a GaAs/Si heterojunction in the terahertz range[J]. *Optical Materials*, 2021, 121: 111609.
- [21] Shrekenhamer D, Watts C M, Padilla W J. Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12507-12518.
- [22] Bai Y, Chen K J, Liu H, et al. Optically controllable terahertz modulator based on electromagnetically-induced-transparency-like effect[J]. *Optics Communications*, 2015, 353: 83-89.
- [23] Wen Q Y, Tian W, Mao Q, et al. Graphene based all-optical spatial terahertz modulator[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7409.
- [24] Cao Y P, Gan S, Geng Z X, et al. Optically tuned terahertz modulator based on annealed multilayer MoS₂ [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 22899.
- [25] Fu Y, Tan Z, Wang C, et al. Research on optical controlled terahertz modulator based on monolayer tungsten disulfide[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(5): 655-661.
- [26] Alihosseini F, Heshmatpanah Z, Zandi H. Design of a highly efficient photoconductive terahertz modulator enhanced by photonic crystal resonant cavity[C]//2021 29th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), May 18-20, 2021, Tehran, Iran, Islamic Republic of Iran. New York: IEEE Press, 2021: 36-38.