

激光与光电子学进展

高效率光导开关光学系统的设计

李建聪¹, 罗佳雄¹, 张宏炫¹, 余苗¹, 宋峰^{2**}, 伍雁雄^{1*}¹佛山科学技术学院物理与光电工程学院, 广东 佛山 528000;²南开大学物理学院, 天津 300071

摘要 为了提高光导开关的光生载流子密度, 延长器件的使用寿命, 降低对光源的能量需求, 实现设备的小型化, 基于半绝缘 4H-SiC 材料建立了全内反射式光导开关数学模型, 并分析了全内反射发生的条件及影响光导开关吸收效率和均匀度的因素。采用 ZEMAX 非序列模式建立了全内反射光导开关模型, 并利用光线追迹方法进行分析。设计了一种高效率全内反射光导开关光学系统, 结果表明, 该光学系统能在获得高吸收效率的同时保证高均匀度, 吸收效率可达 90.78%, 吸收均匀度达到 74.56%。

关键词 光学设计; 全内反射; 数学模型; 高效率; 光导开关

中图分类号 TB133

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1122001

Design of High-Efficiency Photoconductive Switch Optical System

Li Jiancong¹, Luo Jiexiong¹, Zhang Hongxuan¹, Yu Miao¹, Song Feng^{2**}, Wu Yanxiong^{1*}¹School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China;²School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract In order to increase the photo-generated carrier density of the photoconductive switch, prolong the service life of the device, reduce the energy requirement of the light source, and realize the miniaturization of the device, we establish a mathematical model of the total internal reflection photoconductive switch based on the semi-insulating 4H-SiC material. The conditions of total internal reflection and the factors that affect photoconductive switches absorption efficiency and uniformity are analyzed. The non-sequential mode in ZEMAX is used to establish a total internal reflection photoconductive switch model, and the ray tracing method is adopted for analysis. A high-efficiency total internal reflection photoconductive semiconductor switches optical system is designed. The results show that the optical system can achieve high absorption efficiency while ensuring high uniformity. The absorption efficiency can reach 90.78% and the absorption uniformity can reach 74.56%.

Key words optical design; total internal reflection; mathematical model; high-efficiency; photoconductive switch

OCIS codes 220.2740; 220.4830; 080.2740; 220.4298

1 引言

光电导半导体开关(PCSS)简称光导开关, 是利用脉冲激光触发光电导半导体的固体开关,

在脉冲功率领域具有广阔的应用前景。光导开关是超快脉冲激光器和光电半导体相结合的一种新型电子器件^[1], 响应速度可达到 ps 量级, 因此, 在太赫兹技术、高响应速度的武器点火装

收稿日期: 2021-01-03; 修回日期: 2021-01-27; 录用日期: 2021-02-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61771139)、脉冲功率激光技术国家重点实验室开放基金(SKL2019KF03)、佛山科学技术学院基建科研项目(CGG07141)

*E-mail: winsword@sina.com; **E-mail: fsong@nankai.edu.cn

置以及紧凑型脉冲功率系统中得到了广泛的应用^[2-3]。

传统的光导开关照射方式主要采用正面照射及侧面照射。Bhattacharya等^[4]采用正面照射方式,利用准直透镜和柱面透镜,使光导开关产生多条并行电流路径,降低了电流密度,延长了器件的使用寿命。Caporaso^[5]采用侧面照射方式,通过附加任意数量的光纤将光从侧面引入光导开关器件中,可以平稳地改变电场。由于光程较短,上述传统照射方式的吸收效率低,且在保持高峰值电压和额定电流时会增大光导开关的体积,不利于光导开关器件的小型化。Bora等^[6]提出了一种新的非本征光导开关照明技术,其原理是建立一个全内反射光学系统,可以有效增加系统的光程和吸收效率,吸收效率最高可达92%;且相比传统照射方式,该系统可以在较小体积下获得高吸收效率,但该方法难以保证光在器件内部是均匀吸收的。在强光条件下照射时,如果光导开关器件对光通量的吸收分布集中,会使系统散热困难、密封剂的退化效果明显^[7],容易导致光导开关局部过热和电极接触区域的损坏,不利于开关的高功率、高重复频率运行,严重时损坏光导开关^[8-9]。因此,研究高吸收率和高均匀度的全内反射光导开关光学系统具有重要的现实意义。

为了提高光导开关的吸收效率及光通量吸收分布的均匀性,基于全内反射光学理论,本文建立了全内反射光导开关的数学模型,探究了影响全内反射光导开关光学系统吸收效率和均匀度的因素,揭示了不同设计参数对光导开关性能的影响机理。采用ZEMAX非序列模式中的光线追迹方法,设计了一个高效率的全内反射光导开关光学系统,实验结果表明,该系统能延长器件的使用寿命、减小光导开关的体积。

2 全内反射光导开关光学系统

2.1 全内反射光导开关的光学特性

全内反射光导开关光学系统的结构由光源和带有圆柱形窗口的方形非本征半导体两部分构成,其中,圆柱形窗口为光线入射窗口,如图1所示,所有光学表面均进行了抛光处理^[6]。光源放置在方形非本征半导体的一个角上,光线在窗口处入射,在半导体内发生多次全反射,以实现全内反射光导开关光学系统结构。光程随光线

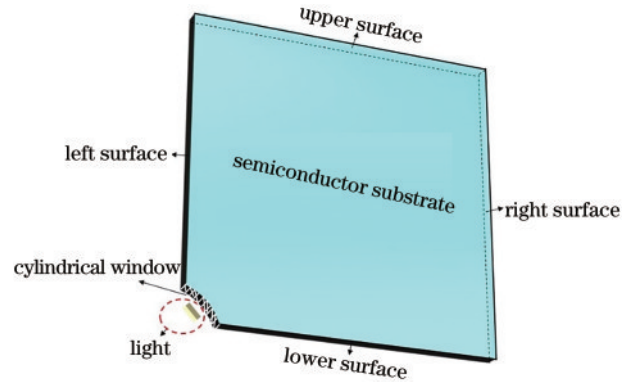


图1 全内反射光导开关光学系统的结构

Fig. 1 Structure of the total internal reflection photoconductive switch optical system

在半导体中发生全反射次数的增多而增加,可表示为

$$I = I_0 \exp(-\alpha l), \quad (1)$$

式中, I 为出射光强, I_0 为入射光强, α 为材料的吸收系数, l 为光程。可以发现,随着光程的增加,光线在半导体中被吸收的量也有所提高。

全反射是光从光密介质向光疏介质传播,当入射光线与法线的夹角超过临界角时,折射光完全消失,此时仅有反射光。根据全反射定律可知,临界角 θ 可表示为

$$\sin \theta = n_1/n_2, \quad (2)$$

式中, n_1 为空气折射率, n_2 为光导开关材料的折射率。如图2所示,当入射光线以一定角度通过圆柱形窗口且满足全反射发生的条件时,第一次全反射的反射半角为 α_1 ,则

$$\alpha_2 = \pi/2 - \alpha_1, \quad (3)$$

$$\alpha_3 = \pi/2 - \alpha_2 = \alpha_1, \quad (4)$$

$$\alpha_4 = \alpha_3 = \alpha_1, \quad (5)$$

$$\alpha_5 = \pi/2 - \alpha_4 = \pi/2 - \alpha_1. \quad (6)$$

可以发现,当光线在非本征半导体上下两个面发生全反射时,全反射半角均为 α_1 ;当光线在非本征半导体左右两个面发生全反射时,全反射半角 $\alpha_2 = \pi/2 - \alpha_1$ 。若满足全内反射条件,即 α_1 和 α_2 均大于全反射的临界角,光线持续在非圆柱形窗口处发生全反射时,会一直遵循全反射定律,在光导开关内部连续反射,直至光被材料全部吸收,如图2(a)所示。图2(b)为逃逸光线的轨迹,当光线触碰到圆柱形窗口时,全内反射的平衡状态被打破,光线会逃逸出光导开关。

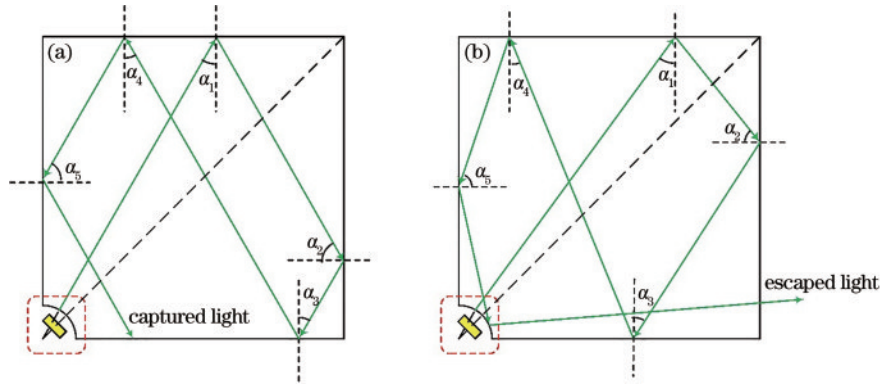


图 2 入射光线的轨迹。(a)被捕获光线的轨迹；(b)逃逸光线的轨迹

Fig. 2 Trajectory of the incident light. (a) Trajectory of the captured light; (b) trajectory of the escaped light

2.2 入射窗口的数学模型

由入射光线在半导体内发生全内反射的特点可以发现,入射光线的角度是影响全内反射光导开关光学系统吸收效率和均匀度的一个重要参数,而入射光线角度通常由光源尺寸和发散角、圆柱形窗口半径、光源到窗口的径向距离以及光导开关材料的折射率共同决定。

图 3 为图 2 中虚线矩形框的放大图,横轴为全内反射光导开关的对角线,由正弦定理可知

$$\sin I_1 / X = \sin \theta_1 / R, \quad (7)$$

$$X = H / \tan \theta_1 - R + D, \quad (8)$$

式中, I_1 为入射光线与法线的夹角, θ_1 为光源发散角, H 为光源半高度, X 为入射光线反向延长线与横向轴线的交点到圆心 O 的距离, R 为窗口半径, D 为光源到圆柱形窗口的径向距离。由折射定律可知

$$n_1 \sin I_1 = n_2 \sin I_2. \quad (9)$$

联立(7)式~(9)式,可求解出入射光线与法线的夹角 I_2

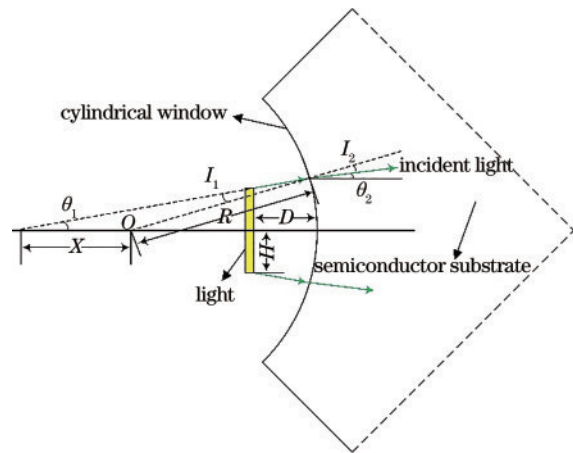


图 3 入射窗口的数学模型

Fig. 3 Mathematical model of the incident window

$$\sin I_2 = n_1 \sin \theta_1 (H / \tan \theta_1 - R + D) / n_2 R. \quad (10)$$

根据角的对应关系,可求解出入射光线与对角线的夹角 θ_2

$$\theta_2 = \theta_1 + \arcsin I_1 - \arcsin I_2, \quad (11)$$

实现第一次全内反射的反射角 α_1 与 θ_2 的关系可表示为

$$\alpha_1 = \pi / 4 - \theta_2. \quad (12)$$

当 α_1 大于临界角 θ 时,光导开关光学系统才能实现全内反射,因此需要综合考虑 θ_1 、 H 、 R 、 D 及 n_2 的关系,使 α_1 大于临界角 θ 。

3 全内反射光学系统

3.1 入射窗口参数对实现全内反射的影响

全内反射光导开关光学系统的尺寸会直接影响光程,因此选择合适的光导开关尺寸是设计高效率光导开关的首要步骤。实验仿真的全内反射光导开关光学系统的长宽高比例为 10:10:1。半绝缘 4H-SiC 材料具有禁带宽度大、热导率高、饱和漂移速度大以及击穿场强高的特点,将其作为光导开关的基底材料,能使开关在高频、高温以及高功率等状态下工作^[10-11]。

基于 Sridhara 等^[12]对 4H-SiC 材料的研究,实验用波长为 532 nm 的激光,4H-SiC 材料对应的折射率为 2.652,由(2)式计算出发生全内反射的临界角 $\theta = 22.135^\circ$ 。由于方形衬底的特点, $\alpha_1 = \pi / 4 - \theta_2 \leq \pi / 4$, 则 $\alpha_2 = \pi / 2 - \alpha_1 \geq \pi / 4$, 即入射光线发生第一次全内反射的角度 α_1 大于临界角时, α_2 也满足全反射的条件,则光线会一直遵循全反射定律在光导开关内部连续反射。根据入射窗口的数学模型,全内反射光导开关光学系统选用 0.9×0.9 的方形光源,将 θ_1 、 R 、 D 作为区间变量,求解满足全反射条件 α_1 的空间分布,结果如图 4 所示。其中,曲面下方空间内包含的点均满足全内反射条件。

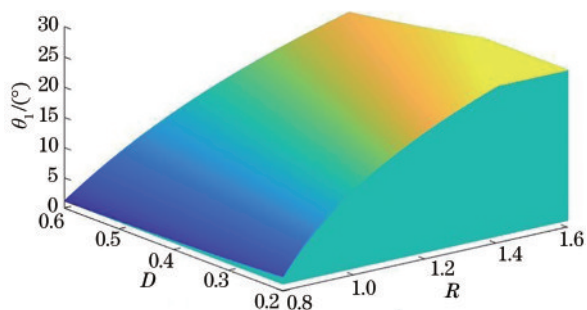


图 4 满足全内反射条件 α_1 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of α_1 satisfying the condition of total internal reflection

3.2 全内反射光导开关的性能分析

为了分析入射窗口模型中 θ_1 、 R 、 D 及 4H-SiC 材料的透过率对全内反射光学系统吸收效率和均匀度的影响,在不考虑端面反射固有能量损耗的条件下,通过改变单一参量的方式进行仿真分析。在满

足全内反射条件 α_1 以及尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的全内反射光导开关中,将空间坐标中心位置处 $R=1.2\text{ mm}$ 、 $D=0.4\text{ mm}$ 、 $\theta_1=12.5^\circ$ 以及 4H-SiC 材料透过率为 35% 的点作为起始点,再从 4 个参量中选取 1 个作为区间变化量,探究 4 个变量变化时对光导开关性能的影响。

单一参量的改变对吸收效率的影响如图 5 所示。可以发现,图 5(a)中,当 R 小于 1.05 mm 时,存在不满足全内反射条件的光线,吸收效率随着 R 的减小而降低;当 R 大于 1.05 mm 时,随着 R 的增大,窗口相对于光导开关的尺寸占比增加,光线触碰到窗口的概率也会增加,导致光线逸出,吸收效率降低;当 R 为 1.05 mm 时,吸收效率最高,可以达到 98.97%。从图 5(b)~图 5(d)可以发现,当 θ_1 、 D 以及材料的透过率增大时,不满足全内反射条件的光线增多,导致光导开关的吸收效率逐步降低。

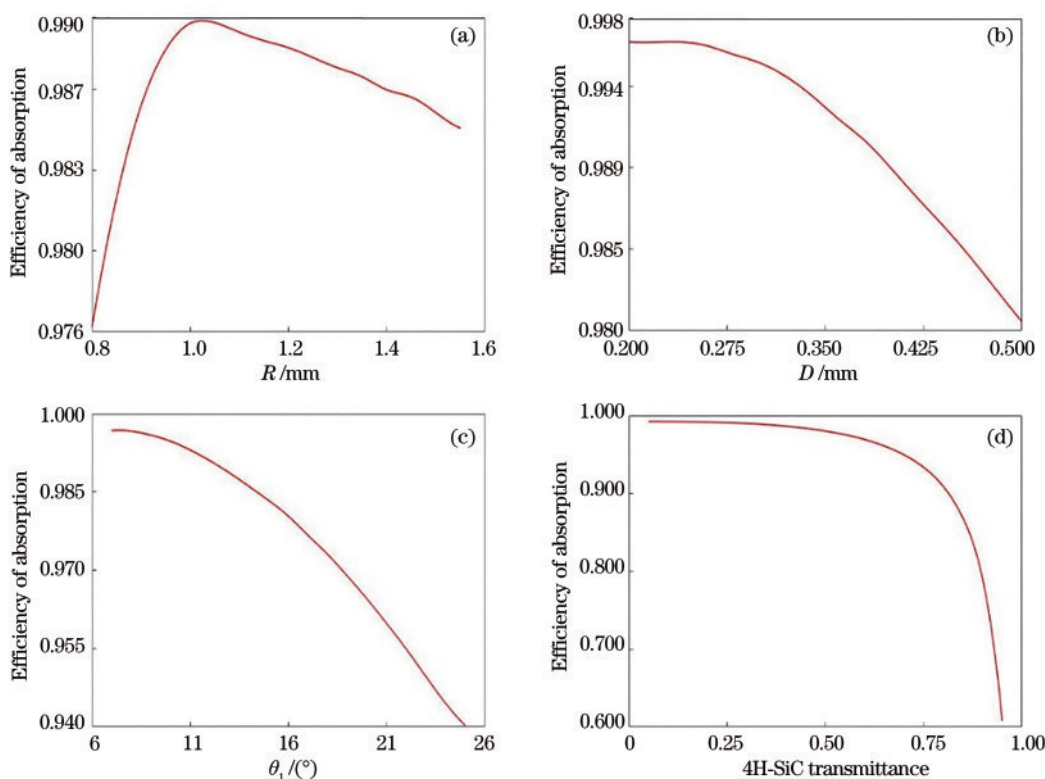


图 5 不同参数对吸收效率的影响。(a) R ; (b) D ; (c) θ_1 ; (d) 4H-SiC 的透过率

Fig. 5 Influence of different parameters on absorption efficiency. (a) R ; (b) D ; (c) θ_1 ; (d) transmittance of the 4H-SiC

为了研究单一参量的变化对均匀度的影响,将 ZEMAX 非序列模式中的探测器设置为网格状,均匀度 σ 可表示为

$$\sigma = Q_{\min} / Q_{\text{ave}}, \quad (13)$$

式中, Q_{\min} 为网格探测器中最小的吸收通量, Q_{ave} 为所有网格探测器的平均吸收通量。光导开关的均

匀度仿真结果如图 6 所示,可以发现,由于入射窗口的存在,初始入射光线角度 α_1 、 α_2 均符合全反射角,光线也会通过该窗口泄漏,无法持续在光导开关内部发生全反射,且入射角与最大有效反射次数是非线性关系。设入射光能量进入光导开关被吸收 95% 时,发生的全反射次数为有效反射次数,图 7 为

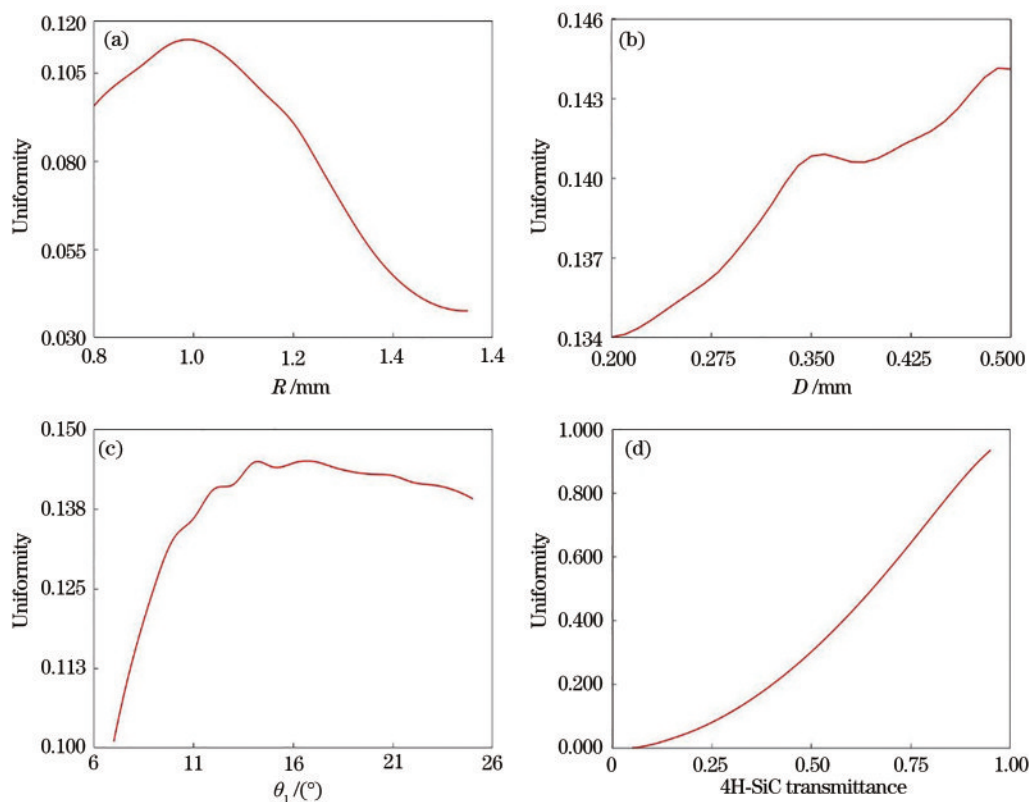


图 6 不同参数对均匀度的影响。(a) R ; (b) D ; (c) θ_1 ; (d) 4H-SiC 的透过率

Fig. 6 Influence of different parameters on uniformity. (a) R ; (b) D ; (c) θ_1 ; (d) transmittance of the 4H-SiC

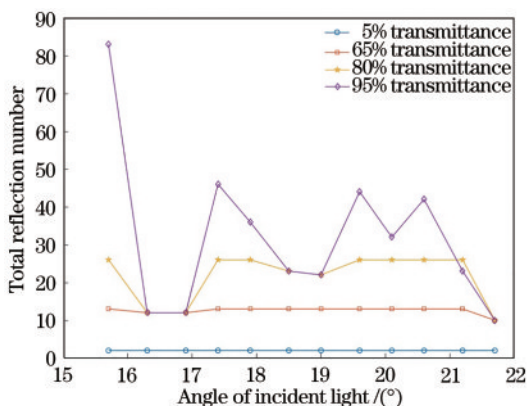


图 7 不同透过率下的有效反射次数

Fig. 7 Effective reflection times under different transmittances

以角度 θ_2 入射的实际光线在不同透过率下的有效反射次数。可以发现,当最大有效反射次数增多时,光线在光导开关中的分布更均匀。由于 θ_1 、 R 、 D 均会不同程度地影响光线入射角,导致图 6(a)~图 6(c)中均匀度的变化曲线有一定起伏。有效反射次数随材料透过率的增加而增多,当透过率为 95% 时,入射光的能量理论上需要约 300 次有效反射才能降至 5%,但入射窗口限制了不同角度入射光线的最大有效反射次数。入射光的能量未降至

5% 时光线便携带部分能量逃逸出光导开关器件,导致器件的吸收效率降低,但提升了均匀度,如图 5(d)和图 6(d)所示。

综上所述,吸收效率和均匀度曲线的变化趋势是相反的,两者之间存在一定的平衡关系。当光导开关的吸收效率和均匀度分别超过 90% 和 70% 时,可认为是一个高效率的光导开关。因此,根据仿真结果分析单一参量对全内反射光导开关吸收效率和均匀度的影响趋势,寻找最优解,再结合建立的入射窗口数学模型,可以设计出一个高效率的光导开关。

4 高效率全内反射光导开关的设计

根据全内反射光导开关光学系统的模型,用 ZEMAX 中的非序列模式设计高效率全内反射光导开关光学系统,采用半绝缘体 4H-SiC 作为全内反射光导开关的基底材料进行模拟仿真设计。将 Bora 等^[6]设计的全内反射光导开关结构作为初始结构,其参数如表 1 所示,该系统的吸收效率可达 92%,但均匀度仅为 4.7%。由于 ZEMAX 材料库中没有现成的 4H-SiC 材料参数,需要在玻璃库中自定义一个

表 1 全内反射光导开关结构的初始参数

Table 1 Initial parameters of the total internal reflection photoconductive switch structure

Parameter	Value
Transmittance of the 4H-SiC / %	33.3
$\theta_1 / (^{\circ})$	12.7
R / mm	1.4
D / mm	0.4

表 2 优化后的光导开关结构参数

Table 2 Structure parameters of the optimized photoconductive switch

Parameter	Value
Transmittance of the 4H-SiC / %	85
$\theta_1 / (^{\circ})$	7.5
R / mm	1.05
D / mm	0.35

与其光学参数相同的材料。

根据上述设计原理与方法,优化全内反射光导开关光学系统的光线入射窗口参数以及光源参数,并考虑加工及装调的精度,完成高效率的全内反射光导开关设计,设计结果如表 2 所示。实验结果表明,在满足全内反射的条件下,4H-SiC 的透过率是提升光导开关均匀度的关键。

将 400 个探测器整齐排列在全内反射光导开关上,并用探测到的数据进行三维绘图,结果如图 8 所示,其中, x 、 y 为探测器的位置, z 为探测器的吸收通量。图 8(a) 为高效率光导开关三维数据图和伪彩色图,设计结果表明,全内反射光导开关的吸收效率为

90.78%, 均匀度为 74.56%。为了与文献[6]的结果进行对比,在未改变其他参数的情况下,将光功率密度的显示尺度范围统一设置为 $0 \sim 0.18 \text{ W/cm}^3$ 。图 8(b) 为文献[6]结构的仿真结果图,模型参数为表 1 中的参数,其吸收效率为 92%,均匀度仅为 4.7%,且光通量集中分布,会直接影响器件的使用寿命;图 8(c) 为高均匀度低吸收率仿真结果图,模型参数 θ_1 、 R 、 D 为表 2 中的参数,其中,4H-SiC 材料的透过率为 95%,均匀度为 93.477%,吸收效率仅为 60.82%,不利于器件的小型化。这表明本方法设计的光导开关光学系统能在保持高吸收率的情况下提升均匀度,延长光导开关的使用寿命。

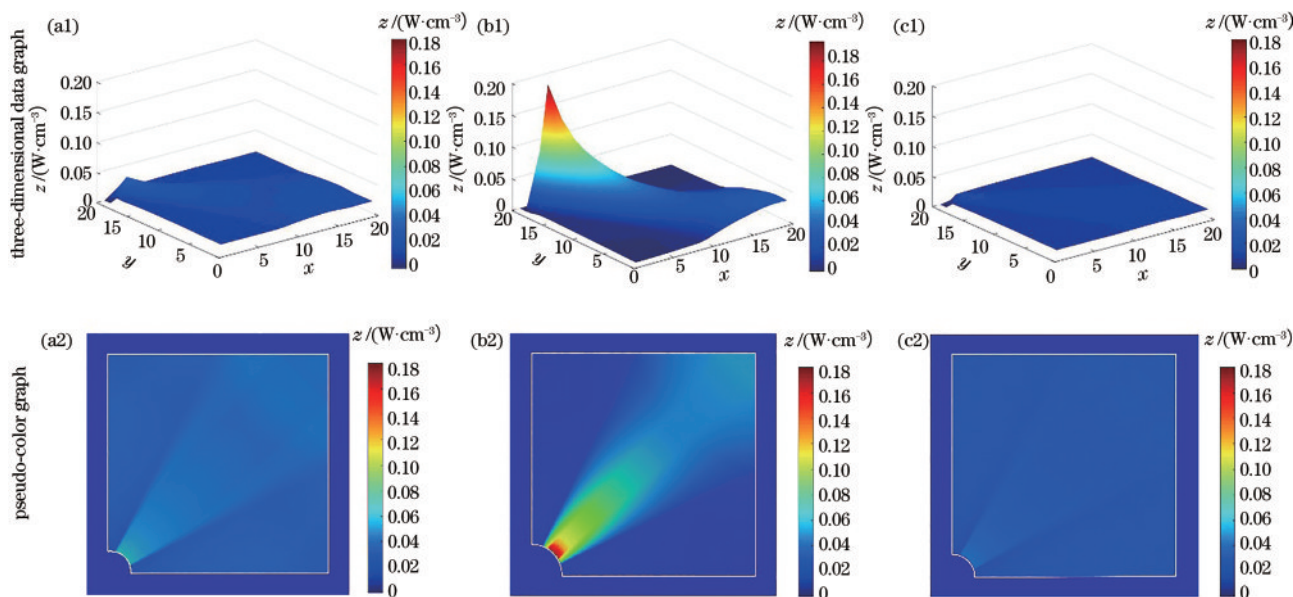


图 8 不同全内反射光导开关吸收通量的三维数据图和伪彩色图。(a)高效率;(b)初始结构;(c)高均匀度、低吸收率

Fig. 8 Three-dimensional data and pseudo-color graphs of the absorbed flux of different total internal reflection photoconductive switches. (a) High-efficiency; (b) initial structure; (c) high uniformity and low absorption rate

5 结 论

基于全内反射光学原理,推导并建立了全内反射光导开关的数学几何模型,从理论上研究了光线在开关内部发生全反射和光线逸出开关的机理。

根据全内反射光导开关的光学特性及圆柱形窗口入射模型,采用 ZEMAX 非序列模式中的光线追迹方法,揭示了入射窗口以及开关内部各参量对系统吸收效率及均匀度的影响。根据单一参量变化对开关吸收效率和均匀度的影响权重,优化圆柱形窗

口的结构参数,实现了吸收效率达 90.78%,均匀度达 74.56% 的高效率全内反射光导开关光学系统;且在实现光导开关器件高吸收光通量的前提下,极大延长了器件的使用寿命,为高性能光导开关光学系统的设计发展提供了借鉴与参考。

参 考 文 献

- [1] Ni N. The simulation study of semi-insulating silicon carbide photoconductive semiconductor switches[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
倪娜. 半绝缘碳化硅光导开关的仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [2] Gunda R, Gleason D S, Kelkar K, et al. Radio-frequency heating of GaAs and SiC photoconductive switch for high-power applications[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(5): 1697-1701.
- [3] Diesinger H, Panahandeh-Fard M, Baillargeat D, et al. Electromagnetic modeling and optimization of photoconductive switches for terahertz generation and photocurrent transient spectroscopy[C]//2011 International Topical Meeting on Microwave Photonics Jointly Held with the 2011 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, October 18-21, 2011, Singapore. New York: IEEE Press, 2011: 373-376.
- [4] Bhattacharya R S, Evans H B. Photoconductive semiconductor switch: US20140264684[P]. 2014-09-18.
- [5] Caporaso G J. Photoconductive switch package: US20140038321[P]. 2014-02-06.
- [6] Bora M, Voss L F, Grivickas P V, et al. A total internal reflection photoconductive switch[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(5): 734-737.
- [7] Song C Y. Study on semi-insulating 4H-SiC PCSS [D]. Xi'an: Xidian University, 2015.
- 宋朝阳. 半绝缘 4H-SiC 光导开关研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [8] Li X Y. Simulation of vanadium doped 6H-SiC photoconductive switches[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2018.
李星月. 钒补偿 6H-SiC 光导开关的模拟仿真[D]. 上海: 上海师范大学, 2018.
- [9] Zhang Y. Simulation and new structure design of vanadium-compensated 6H-SiC photoconductive semiconductor switches[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2019.
张阳. 钒补偿 6H-SiC 光导开关结构设计[D]. 上海: 上海师范大学, 2019.
- [10] Hao Y, Peng J, Yang Y H, et al. The technology of the wide band-gap semiconductor SiC[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-30.
郝跃, 彭军, 杨银堂, 等. 碳化硅宽带隙半导体技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-30.
- [11] Li J M. SiC materials and devices[J]. Physics, 2000, 29(8): 481-487.
李晋闽. SiC 材料及器件研制的进展[J]. 物理, 2000, 29(8): 481-487.
- [12] Sridhara S G, Devaty R P, Choyke W J. Absorption coefficient of 4H silicon carbide from 3900 to 3250 Å [J]. Journal of Applied Physics, 1998, 84(5): 2963-2964.
- [13] Yu Y X, Lian J, Guan W L, et al. Analysis of transmission spectra of 6H-SiC crystal in the visible and near infrared range[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2011, 41(2): 126-129.
于元勋, 连洁, 官文栎, 等. 碳化硅晶体的可见近红外透射光谱分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2011, 41(2): 126-129.