

物理实验



基于 FDTD 的超透镜聚焦光场仿真

董建文^{1,2} 范智斌¹ 陈晓东¹ 陈 瑞¹ 赵福利^{1,2}(¹ 中山大学物理学院; ² 物理学国家级实验教学示范中心(中山大学), 广东 广州 510275)

摘 要 透镜是最基本的光学元件之一,也是基础光学和信息光学等课程的授课重点内容,但由于课时限制等原因,现有的光学课程对透镜内容的介绍仅局限于几何透镜。随着微纳光学的发展,由亚波长结构单元组成的超透镜由于其独特的特性已经被广泛的研究和应用。因此,在光学课程中引入超透镜发展的前沿知识,有助于激发学生对前沿微纳光学的学习兴趣,探索微纳光学领域的奥妙,为推动教研融合做出积极贡献。本文以对偏振不敏感的超透镜光学设计为例,基于 FDTD 模拟仿真展示平面波通过超透镜后的传播过程和聚焦光场分布。首先,对不同直径的圆柱型亚波长光栅进行全波仿真获得相位信息,根据相位值选取纳米柱单元作为超透镜的元胞结构单元,按照理想聚焦相位分布排布纳米柱从而获得超透镜整体结构,进一步借助 FDTD 仿真出平面波通过超透镜后的传播光场分布,最后对焦平面聚焦光场分布进行分析和总结。

关键词 超透镜;信息光学;亚波长光栅;FDTD 仿真

FOCUSING FIELD SIMULATION OF METALENS BASED ON FDTD

DONG Jianwen^{1,2} FAN Zhibin¹ Chen Xiaodong¹ CHEN Rui¹ ZHAO Fuli^{1,2}(¹ School of Physics, Sun Yat-sen University;² National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275)

Abstract As one of the most basic optical elements, lens is the crucial content in the courses of basic optics and information optics. However, due to the limitation of class hours and other reasons, the introduction of lens in the existing optics courses is limited to geometric lens. With the development of micro-nano optics, metalenses composed of sub-wavelength structures have been widely studied and applied due to their unique properties. To this end, introducing the frontier knowledge of metalens development into the optics course is beneficial to stimulate the students' interest to study and explore the mysteries of micro-nano optics, and thus make positive contributions to promoting the integration of teaching and research. In this paper, taking the optical design of a polarization-insensitive metalens as an example, we investigate the light propagation of that a plane waves passes through the metalens and show the focusing field distribution based on FDTD method. First, full-wave simulations of cylindrical sub-wavelength gratings with different diameters are carried out to obtain the phase information. With the phase values, the nanopillars are selected as the structure cells of the metalens, and are arranged to achieve the whole metalens according to the phase distribution of the ideal focusing. Further, the light field distributions of that a plane wave passes through the metalens are

收稿日期: 2022-03-30

基金项目: 中山大学质量工程项目(中山大学教务[2022]20 号)。

作者简介: 董建文,男,教授,主要从事微纳光学、超构光学物理与应用和光学教学工作,科研方向为光学与光学工程, dongjwen@mail.sysu.edu.cn。

通讯作者: 赵福利,女,教授,主要从事超快速激光光谱学、光与物质相互作用研究和光学教学工作,科研方向为光学, stsfl@mail.sysu.edu.cn。

引文格式: 董建文,范智斌,陈晓东,等. 基于 FDTD 的超透镜聚焦光场仿真[J]. 物理与工程, 2022, 32(6): 127-131.

Cite this article: DONG J W, FAN Z B, Chen X D, et al. Focusing field simulation of metalens based on FDTD[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(6): 127-131. (in Chinese)

obtained by FDTD method. Finally, the focusing field distributions are analyzed and summarized.

Key words metalens; information optics; sub-wavelength grating; FDTD method

随着光信息技术和微纳集成光学的发展,光学元件的集成化和微型化成为了不可阻挡的时代潮流。传统的光学元件如光学透镜,利用光在介质传播中产生的相位积累实现对光场波阵面的操控,其调制过程主要与光学元件的材料和表面形状有关,往往需要相当的体积和厚度来累积足够的光程差产生相位偏移以调控光束^[1],从而导致体积质量大、不易携带和集成。微纳光学的发展促进了新型光学元件的提出,比如超透镜。超透镜^[2-3]由于结合了传统光学成像技术和现代超表面技术,具有高自由度设计、高精度调控和超薄超轻的特性,可突破传统光学元件面临的瓶颈问题,在光纤成像、显微成像、摄影镜头等领域具有重要的潜在应用前景。因此,有必要引入光学发展前沿问题,鼓励学生探索微纳光学新发展,培养创新思维,激发学生对前沿光学的学习兴趣,促进教研融合。同时,考虑到知识的可视化管理,我们结合虚拟全波仿真对光学设计和模型进行精确模拟和分析,从而有助于加深学生对抽象物理过程的理解,提高教学效果和学习效率。

本文以对偏振不敏感的相位梯度型超透镜设计为例,基于 FDTD 全波仿真模拟平面波通过超透镜后的传播光场,展示超透镜对光场的调控和聚焦性能。从广义斯涅尔定律出发,讲述光束通过相位梯度型超表面的折射和反射原理,并由此推导出会聚超透镜的理想相位分布。在超透镜微纳结构设计上,我们考虑亚波长的圆柱结构。通过仿真不同直径的亚波长圆柱型光栅获得其对应的相位响应,从而可以由相位响应按照聚焦相位分布排布亚波长的圆柱结构,组成具有接近衍射极限聚焦性能的超透镜。进一步借助 FDTD 仿真给出平面波通过超透镜调控后的聚焦光场分布,为学生提供可视化的结果。最后通过对聚焦光场分布进行分析和总结,有助于学生对超透镜性能的理解和掌握。

1 广义斯涅尔定律

在几何光学中,人们通常假设光的传播方式只由两种介质的光学属性所决定,和这两种介质的中间界面无关,从而认为物质界面是不改变光

学波前信息的理想边界。在这假设的前提下,由费马原理可以推导出光的直线传播定律、折射定律和反射定律。其中折射定律和反射定律,即斯涅尔定律^[4],提供了光在两种介质中传播的反射角和折射角的大小,在几何光学设计上具有非常重要的物理意义。随着微纳光学和纳米制备技术的发展,具有反常光学性质的超表面开始兴起。超表面一般是在单层界面上通过纳米尺度的人工结构设计,使界面具有与传统界面不同的特性,能实现光学波前的任意调控,包括偏振、相位、振幅、频率等方面的精准调制。超表面与理想的边界不同,能在微纳尺度下改变光波波前,给两种介质的分界面带来额外的波前突变,从而带来反常的光学传播特性。本文主要介绍相位梯度型超表面,其在两种介质边界中引入相位梯度变化,能够引起光的反常折射和反射。光学课程里介绍的斯涅尔定律并没有考虑到边界的相位梯度变化,因此我们有必要进一步扩展和改写该定律,推导出广义斯涅尔定律^[2],以便描述光束通过相位型梯度超表面后折射和反射特性。

考虑如图 1 所示模型,第一种介质材料折射率为 n_i ,第二种介质材料折射率为 n_t ,两介质的界面设为 x 轴。一入射光以 θ_i 角从第一种介质入射到第二种介质的界面上,部分光经由界面以 θ_r 角反射回第一种介质传播,其他部分光则以 θ_t 角在第二种介质内传播。假设两种介质的分界面上存在额外的相位突变 $\varphi(x)$,ADB 和 AEB 是相邻折射路径光线,ADC 和 AEC 是相邻反射路径光线,两光路在界面处的距离 $DE = dx$,在 D 和 E 处引起的折射相位突变分别为 φ_i 和 $\varphi_i + d\varphi_i$,反射相位突变分别为 φ_r 和 $\varphi_r + d\varphi_r$ 。光在传播时

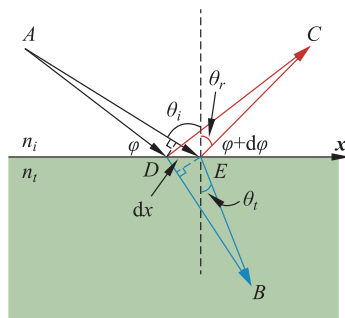


图 1 广义斯涅尔定律模型

通过两种折射路径的光程相同,所产生的相位也应为固定值,在两种反射路径的情况也一样,考虑光程差引起的相位差,有

$$k_0 n_i \sin \theta_i dx + \varphi_t + d\varphi_t = k_0 n_t \sin \theta_t dx + \varphi_t \quad (1)$$

$$k_0 n_i \sin \theta_i dx + \varphi_r + d\varphi_r = k_0 n_t \sin \theta_r dx + \varphi_r \quad (2)$$

其中,式(1)为折射的情况,式(2)为反射的情况, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为真空波矢, λ_0 为入射光真空波长。由此可以得到广义斯涅尔定律

$$n_i \sin \theta_t - n_t \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi_t}{dx} \quad (3)$$

$$n_i \sin \theta_r - n_t \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\varphi_r}{dx} \quad (4)$$

式(3)描述了光通过界面后的折射情况,式(4)描述的是反射的情况。可以看到,光的折射和反射传播不仅和介质材料有关,还和界面引起的相位梯度有关,从而可以通过调控界面的相位梯度来实现折射或反射光的角度调制,为光场的调控提供新的调控方式,这也是相位梯度超表面的原理。

超透镜作为一种具有聚焦性能的超表面元件,是由不同的亚波长结构单元按照特定的相位分布在平面空间上排布形成的二维纳米柱阵列^[3],如图2(a)所示。它能在亚波长尺度下利用纳米柱结构对入射光场进行精准调控,将垂直入射的平面光波会聚到焦点处,并形成一定大小的焦斑。通过广义斯涅尔定律,我们可以推导出其理想的聚焦相位分布函数。考虑一会聚型超透镜,其聚焦相位分布具有圆对称性,如图2(b)所示。光垂直入射到超透镜后,出射光将会聚到焦距为 f 的焦点上。在 xOy 平面上不同径向位置 r 对应不同出射光的折射角 θ ,满足几何关系 $\sin \theta =$

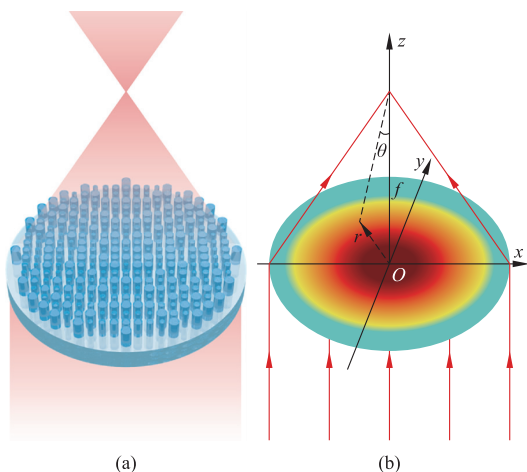


图2 会聚型超透镜模型

$\frac{r}{\sqrt{r^2 + f^2}}$, 其中 $r^2 = x^2 + y^2$ 。由广义斯涅尔定律,可以得到相应的径向相位梯度为

$$\frac{d\varphi(r)}{dr} = k_0 n_t \sin \theta = k_0 n_t \frac{r}{\sqrt{r^2 + f^2}} \quad (5)$$

假设出射介质为空气 $n_t = 1$, 并对式(5)在径向方向进行积分,可以得到

$$\varphi(r) = \int_0^r dr k_0 n_t \frac{r}{\sqrt{r^2 + f^2}} = -\frac{2\pi}{\lambda_0} (\sqrt{r^2 + f^2} - f) \quad (6)$$

因此,会聚型超透镜的理想聚焦相位分布公式可以写为

$$\varphi(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda_0} (\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f) \quad (7)$$

2 超透镜微纳结构设计

要实现会聚型超透镜的聚焦相位分布,首先要进行超透镜亚波长元胞结构几何构型的设计,获得能够覆盖 $[0, 2\pi]$ 相位区间的多种亚波长元胞结构单元。目前超透镜的元胞结构类型比较丰富,有圆柱型、椭圆柱型、长方柱型、正方柱型、环状型等。这里我们考虑到对入射光偏振态不敏感的特性,选用圆柱型的元胞结构单元,该类型结构单元更容易在不同正交偏振态的入射光下实现相同的相位偏移和振幅响应。考虑由亚波长圆柱组成的四角晶格二维光栅结构,如图3所示。设入射光波长为 633nm , 光栅柱子材料为氮化硅,折射率约为 2.0 , 光栅衬底为二氧化硅,填充材料为空气。当光从衬底方向正入射到光栅时,使出射光只存在零级衍射光,则光栅的晶格常数需要小于衬底中的等效波长 ($633\text{nm}/n_{\text{SiO}_2} = 436\text{nm}$)。这里,我们选取光栅晶格常数为 380nm , 以抑制其他级次的衍射光。通过调节圆柱的直径,可以改变光栅的占空比,从而实现不同的出射相位,而出射相位的最大变化范围可以由光通过均匀薄膜的相

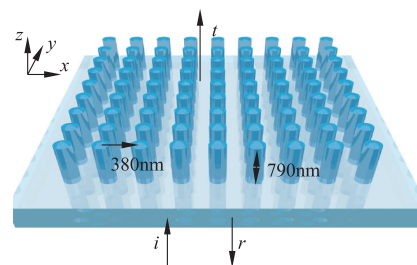


图3 四角晶格下圆柱型光栅示意图

位变化来评估,即相位 $\varphi_{max} = 2\pi(n_g - 1)d/\lambda$,其中 n_g 为光栅折射率, d 为光栅层厚度。为了便于实现 $[0, 2\pi]$ 区间的相位覆盖,选取的光栅厚度需要稍微大于入射光波长,这里我们设光栅厚度为 $d = 790\text{nm}$ 。结构参数确定后,考虑一 y 方向偏振的光从衬底入射到氮化硅光栅,利用 FDTD 进行全波仿真分析,可以得到光栅的内部电磁场分布、出射相位响应、透过率和反射率等。

图 4 展示了圆柱型光栅的内部磁场的归一化强度分布,其中光栅的直径为 208nm ,黑色虚线标示出了圆柱的边缘轮廓。可以看到入射光进入光栅传播时,磁场主要局限在圆柱的内部,相邻圆柱之间的相互耦合较弱,因而我们可以适当假设每个圆柱是独立响应的。而不同半径圆柱结构分别对应不同的相位响应,因此可以依据晶格常数在平面不同空间位置上按照所需的相位值排布不同的圆柱,从而形成所需的空空间相位分布。图 5 给出了不同直径下的圆柱型光栅的透过率和相位响应,深色线表示透过率,浅色线表示透射光的归一化相位。可以看到,除去一处低透过率的共振低谷外,光栅在宽的直径范围($60 \sim 340\text{nm}$)内均能保持高的透过率,而随着直径增大,归一化相位值也在增大,并提供较大的相位覆盖范围。进一步,我们对相位区间进行六阶离散化,并选取对应的六种圆柱直径,即六种直径的圆柱一一对应六段不同的离散化相位区间。本文中我们选取的六种圆柱直径分别为 301nm 、 60nm 、 140nm 、 195nm 、 233nm 、 269nm ,分别对应 $0 \sim 2\pi$ 相位的 6 段等分区间。接着,我们在石英衬底上按照晶格常数对超透镜相位分布进行空间离散化采样,按照超透镜相位分布式(7)计算出每个采样点所需的相位值,从而根据圆柱直径和相位区间的对应规则可以获得每个采样点所需的圆柱直径。当衬底上每个采样点都排布好所需的圆柱结构,即可组成如图 2(a)

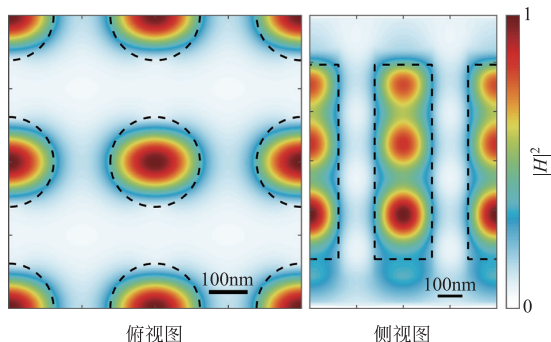


图 4 圆柱型光栅内部磁场归一化强度分布

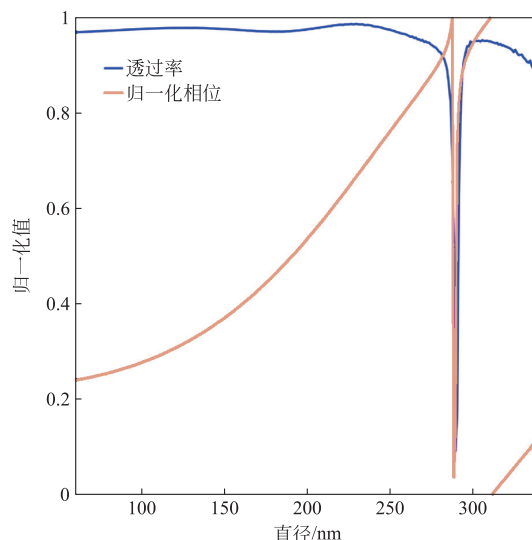


图 5 不同直径下光栅的透过率和归一化相位响应

所示的超透镜整体结构。本文中,我们设计的超透镜直径 D 为 $20\mu\text{m}$,焦距 f 为 $5\mu\text{m}$,对应的空气数值孔径为 $\text{NA} = n_{\text{Air}} \cdot \sin\left(\arctan \frac{D}{2f}\right) \approx 0.9$ 。

3 超透镜聚焦光场仿真

按照上述超透镜微纳结构设计的方法,我们在石英衬底上构建了会聚型的氮化硅超透镜。用 FDTD 全波仿真的方法对整个超透镜模型进行模拟,可以获得平面波通过超透镜后的传播光场。本文中我们假设超透镜所在平面为 xy 平面,以沿着 y 方向偏振的平面波作为光源,光的传播方向为 z 方向。图 6 展示了平面波通过超透镜后,在 xz 平面和 yz 平面传播的归一化光场强度分布,其中超透镜模型中心坐标的 x 、 y 均为 0, $z=0$ 平面为超透镜表面。从图上可以清晰地看出,入射平面波经过超透镜的相位调制后,汇聚到了中轴线上一点,在设计焦距附近形成了聚焦光场,验证了所设计的超透镜具有的汇聚效果。通过提取图 6 中 $x=0$ 、 $y=0$ 的中轴线上归一化光强分布,可以得到图 7 所示的线图。光通过超透镜汇聚后的最大光强点位于 $z = 4.88\mu\text{m}$ 处,即该超透镜仿真出的实际焦距 $f = 4.88\mu\text{m}$,与设计的焦距大小基本吻合。同时可以得到该强度分布曲线的半高宽,也就是焦深为 $1\mu\text{m}$ 。

图 8 展示了焦平面处的归一化光场分布。可以发现,光场在焦平面处汇聚为艾里斑形状的亮圆斑,周围伴有强度较弱的同心圆环。在焦平面

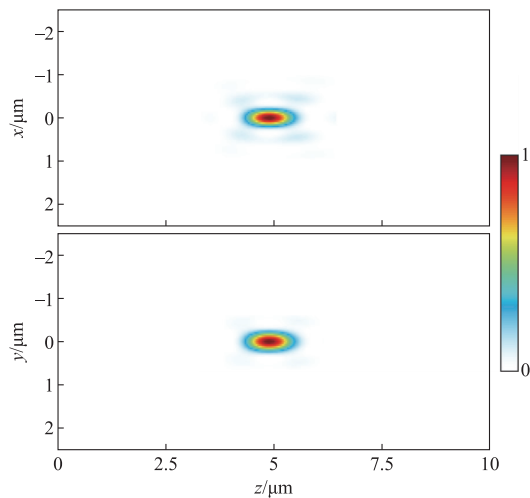


图6 超透镜聚焦光场在 xz 和 yz 平面的归一化强度分布

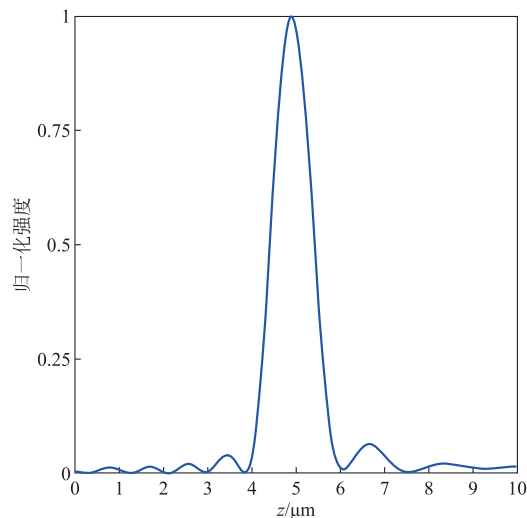


图7 聚焦光场沿传播方向中轴线归一化强度分布

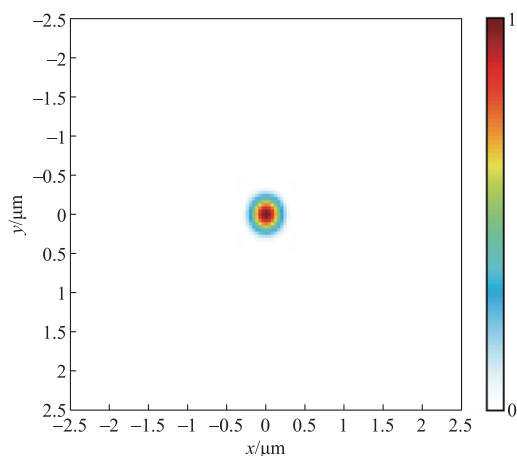


图8 聚焦光场的焦平面的归一化光强分布

上分别沿着 $x=0$ 和 $y=0$ 位置提取截线,即可得到图9所示的归一化强度曲线,其中灰色虚线代

表沿 y 方向的归一化光场强度曲线,灰色实线为沿 x 方向的归一化光场强度曲线。对上述两曲线分别进行艾里斑拟合,可以得到焦斑的沿 x 方向的半高宽约为 316nm ,沿 y 方向的半高宽约为 356nm ,达到衍射极限的大小,说明该超透镜具有衍射极限的聚焦性能。

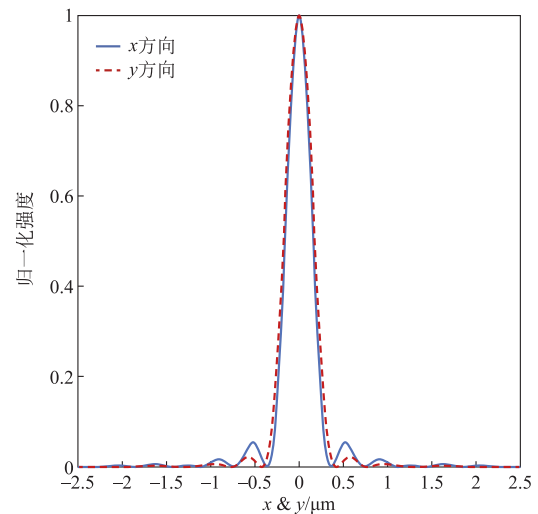


图9 焦斑沿着 x 方向和 y 方向横截线的归一化强度

4 结语

本文利用亚波长圆柱型纳米结构设计了会聚型的超透镜,并利用 FDTD 全波仿真获得了平面波通过超透镜后的聚焦光场分布,分析了其焦斑大小,获得了和设计相一致的结果,验证了超透镜具有衍射极限的聚焦性能,有助于学生对超透镜设计和性能的理解和掌握。在此基础上,激发学生对超透镜的学习兴趣,可以分析其单色像差、色差等更复杂的成像光学特性^[5],为探索光学新发展和促进教研融合做贡献。

参考文献

- [1] 陈敏,赵福利,董建文. 光学[M]. 北京:高等教育出版社,2018.
- [2] YU N, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [3] FAN Z B, SHAO Z K, XIE M Y, et al. Silicon nitride metalenses for close-to-one numerical aperture and wide-angle visible imaging[J]. Physical Review Applied, 2018, 10(1): 014005.
- [4] 赵建林. 高等光学[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [5] FAN Z B, QIU H Y, ZHANG H L, et al. A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible [J]. Light: Science & Applications, 2019, 8(1): 1-10.