

基于焦散线理论的表面波激发光栅结构设计

焦晗^{1,2}, 张蒙蒙^{1,2}, 李鹏^{1,2*}, 刘圣^{1,2**}, 赵建林^{1,2}¹西北工业大学物理科学与技术学院光场调控与信息感知工业和信息化部重点实验室, 陕西 西安 710129;²西北工业大学物理科学与技术学院陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710129

摘要 焦散线理论是利用光传播轨迹切线簇构造初始波前的一种方法。基于焦散线理论设计和传输的表面波具有局域场增强、传播轨迹可控等优点,在光学显微、光学传感、调控光波耦合等方面具有重要的应用。提出了一种基于焦散线理论的布洛赫表面波激发光栅结构设计方法。利用双线性光栅结构进行数值模拟实现了可传播 100 μm 的类无衍射表面波,并分析了光栅结构参数对表面波耦合效率的影响。进一步,根据焦散线理论设计了一种简单的光栅结构,经模拟计算,该光栅结构能够实现沿任意轨迹自加速传输表面波的激发调控。研究结果为操纵亚波长尺度下光波的传输和片上光互联的端口设计提供了一种有效途径。

关键词 表面光学; 表面波; 焦散线理论; 相位; 光栅

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2324001

Structure Design of Surface Wave Exciting Grating Based on Caustic Theory

Jiao Han^{1,2}, Zhang Mengmeng^{1,2}, Li Peng^{1,2*}, Liu Sheng^{1,2**}, Zhao Jianlin^{1,2}¹Key Laboratory of Light-Field Manipulation and Information Acquisition, Ministry of Industry and Information Technology, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710129, China;²Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710129, China

Abstract Caustic theory is a method of constructing the initial wavefront by using the tangent clusters of the light propagation trajectories. The surface wave designed and transmitted based on the caustic theory has the advantages of local field enhancement and controllable propagation trajectory, so it has important applications in optical microscopy, optical sensing, and control of light wave coupling. A method for designing the grating structure of Bloch surface wave excitation based on the caustic theory is proposed. Using bilinear grating structure for numerical simulation, a non-diffraction surface wave that can propagate 100 μm is realized, and the influence of the grating structure parameters on the coupling efficiency of the surface wave is analyzed. Furthermore, a simple grating structure is designed according to the caustic theory, which can realize the regulation of self-accelerating transmission of surface waves along any trajectory through simulation calculations. The results provide an effective way to manipulate the transmission of light waves at the sub-wavelength scale and the port design of on-chip optical interconnection.

Key words optics at surfaces; surface wave; caustic theory; phase; grating

OCIS codes 240.6690; 080.7343; 080.5084; 050.2770

收稿日期: 2021-04-25; 修回日期: 2021-05-25; 录用日期: 2021-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(91850118, 11634010, 11804277)、国家重点研发计划(2017YFA0303800)、西北工业大学研究生创新基金(CX2020204)

通信作者: *pengli@nwpu.edu.cn; **shengliu@nwpu.edu.cn

1 引言

表面波是一种局域在介质界面传播、场强沿着垂直于界面方向指数衰减的倏逝电磁波^[1-3]。相较于在自由空间传播的电磁波,表面波具有更大的波矢,可用来获得超过衍射极限的高度受限光场。由于突出的局域场增强效应,基于表面波的光子器件能够极大地增强光与周围环境的相互作用,因而可用于环境介质的分析检测^[4-6]。布洛赫表面波(BSWs)是一种局限于截断的一维光子晶体表面传播的电磁表面波^[7-12],不仅具有显著增强的局域场,而且还能够能够在界面实现百微米距离的传输^[13],在化学生物传感、气体传感、荧光辐射和拉曼散射增强等方面具有重要应用^[14-16]。

在纳米光子学领域中,能够在亚波长尺度操纵光波是决定相关器件应用和发展的关键。通过对表面波复振幅的调制,实现表面波传播轨迹灵活调控,在光波传导及生化传感等方面具有重要意义^[17-20]。例如,Augenstein 等^[21]通过在多层电介质表面制造棋盘状图案,实现了对 BSWs 的超衍射极限聚焦,该元件可用于光谱测量;Deng 等^[22]通过在多层结构表面设计 U 形孔阵列,实现了对 BSWs 传播方向的控制,为开发新型光开关提供了技术支持;Stella 等^[23]通过在多层结构表面构造螺旋型光栅,实现了矢量涡旋 BSWs。

本文基于焦散线理论,通过反演表面波传输轨迹,提出了一种用于激发沿任意轨迹传播表面波的简单光栅结构设计方法。首先,利用双线性光栅结构实现了可传播 100 μm 的类无衍射 BSWs,并分析了结构参数对表面波耦合效率的影响。进一步,利用所提方法,给出了多种传播轨迹自加速表面波所需的光栅结构模拟设计结果。研究结果可为在亚波长范围内操纵光波提供有效途径,不仅可用于构造传播轨迹可控的 BSWs,也为调控表面等离激元传播的光学微结构提供了新的设计思路。

2 焦散线理论模型

根据焦散线理论,光波传播轨迹可以看作由初始平面各点源出射的光线在空间的交点,即光波轨迹切线的光线簇为焦散线。因此,在预知光波轨迹的前提下,可通过焦散线获得出射平面上点源出射场的波矢方向和相位变化关系。根据此相位关系设计相位调制函数,即可实现对散射光轨迹的调控。考虑表面波的二维传播特性,图 1 为在直角坐标系

下表面波的传播轨迹。假设光波沿 x 轴正方向传播, y 轴上的初始相位分布函数为 $\varphi(y)$,在此相位函数调制下光波的传播轨迹为 $y(x)$,则可取曲线上任意一点 (x', y') ,过该点做切线与 y 轴交于 y_0 点,与 x 轴夹角为 θ , $\varphi(y)$ ^[24] 满足如下关系。

$$\frac{d\varphi(y)}{dy} = k \sin \theta = \frac{k \tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}, \quad (1)$$

式中: k 为入射光的波数。

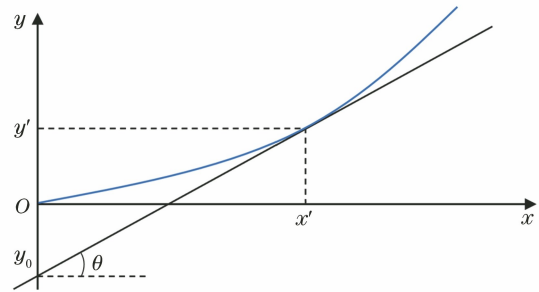


图 1 焦散线设计原理

Fig. 1 Design principle of caustic

假设光波传输轨迹为幂指数型函数,满足 $y = a_n x^n$,根据(1)式, y 轴上的初始相位分布函数为

$$\varphi(y) = k(1-n) \frac{1}{n} a_n \frac{1}{n} \frac{n^2}{(1-n)(2n-1)} y^{2-\frac{1}{n}}. \quad (2)$$

特殊情况下,当 $y = a_{1/2} x^{1/2}$ 时, y 轴上的初始相位分布函数为

$$\varphi(y) = \frac{a_{1/2}^2}{4} k \ln y. \quad (3)$$

对于自然对数型自加速光场,假设传输轨迹为 $y = a \ln(bx)$, y 轴上的初始相位分布函数为

$$\varphi(y) = k \frac{a^2 b}{e} - ka^2 b \exp\left(-\frac{y}{a} - 1\right). \quad (4)$$

(2)~(4)式中, a_n 、 n 、 $a_{1/2}$ 、 a 、 b 为所求轨迹的参数; e 为自然常数。

根据上述理论,分别求解了沿平方根、平方、立方和对数函数轨迹传输的光波初始相位,并利用光束传输法数值模拟了对应的传输过程,结果如图 2 所示,其中,白色虚线表示设定的轨迹 $y(x)$, \mathbf{E} 表示电场强度。从图中可以看出,在初始相位调制作用下,光波在传输过程中展现了良好的自加速效果,光波的能量主瓣沿着既定的轨迹进行传输。

3 倾斜光栅诱导的类无衍射表面波

根据上述理论,利用光栅耦合法对 BSWs 进行激发和传播轨迹调控。首先分析光栅结构参数对激

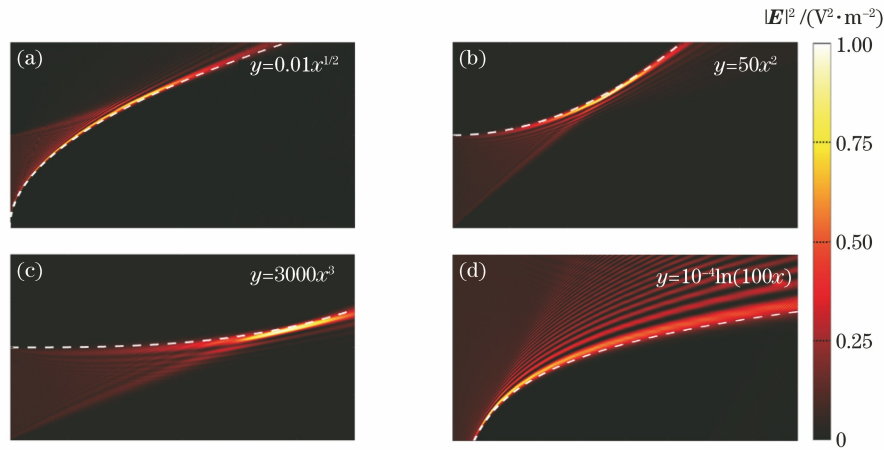


图 2 沿不同轨迹自加速传输光场的数值模拟结果。(a) $y=0.01x^{1/2}$; (b) $y=50x^2$; (c) $y=3000x^3$; (d) $y=10^{-4}\ln(100x)$
 Fig. 2 Numerical simulation results of self-accelerating light field propagating along different trajectories.

(a) $y=0.01x^{1/2}$; (b) $y=50x^2$; (c) $y=3000x^3$; (d) $y=10^{-4}\ln(100x)$

发 BSWs 的影响。图 3(a) 为所采用的多层电介质结构图^[13], 该结构包含 8 层二氧化硅(SiO_2) 薄膜和 7 层氮化硅(Si_3N_4) 薄膜, 虚线框为光栅侧向结构示意图。其中, 顶层为 $d_1=240\text{ nm}$ 厚的 SiO_2 , 在其表面刻有周期 $\Lambda=590\text{ nm}$ 、宽度 $w=295\text{ nm}$ 、占空比 DC 为 0.5、深度 $d=86\text{ nm}$ 、长度 $l=25\text{ }\mu\text{m}$ 、夹角为 170° 的两个倾斜光栅; 底层 SiO_2 厚度 $d_4=500\text{ nm}$, 两层之间是 Si_3N_4 和 SiO_2 , 两者厚度 d_2 和 d_3 分别为 88 nm 和 105 nm , 两者折射率 n_1 和 n_2 分别为 2.6 和 1.46。使用软件时域有限差分 (FDTD) Solutions 对结构进行仿真计算, 横电 (TE) 波从结构底部垂直入射, 入射光波长 $\lambda=633\text{ nm}$ 。

图 3(b) 为多层电介质结构上表面电场强度分布图。从图中可以看出, 采用光栅耦合法能够在多

层电介质结构上表面有效激发 BSWs, 线性光栅结构激发的 BSWs 具有线性相位结构, BSWs 的局部波矢方向与相位梯度方向正交。利用两个对称的线性光栅结构激发具有相反横向波矢的 BSWs, 在两波相干叠加区域, 产生了传播距离超过 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的表面波。这种干涉场在传输过程中能够保持横向结构的稳定, 展现出了类贝塞尔光场的无衍射特性, 传播距离与 Dubey 等^[25] 利用棱镜耦合法产生的类贝塞尔表面波相近, 这表明这种线性光栅结构能够产生较好的线性相位结构, 也为引入复杂局部波矢结构进行表面波传输调控奠定了基础。此外, 这种表面波的无衍射距离除了与表面波的纵向传输损耗有关, 还与光场长度及相位调制范围有关, 如图 3(b) 所示。

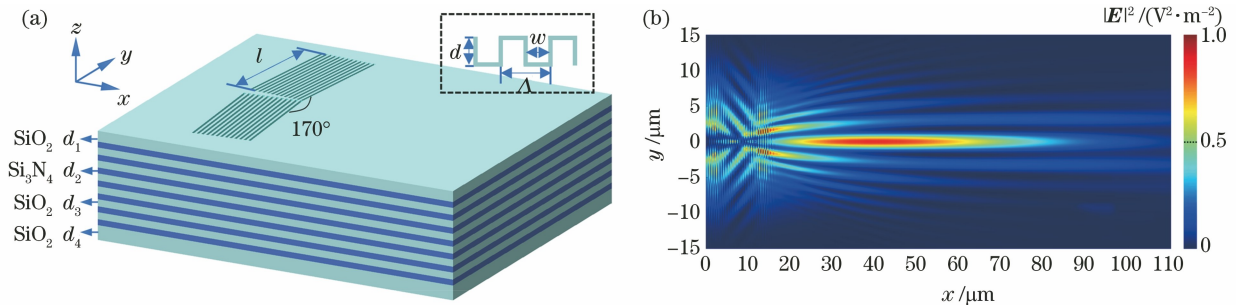


图 3 模型及仿真结果。(a) 多层电介质结构; (b) TE 波激发的类无衍射 BSWs 电场强度分布
 Fig. 3 Model and simulation results. (a) Multilayer dielectric structure; (b) electric field intensity distribution of non-diffraction BSWs excited by TE wave

当入射光照射光栅结构时, 激发效率由光栅的散射模式与表面波模式之间的耦合系数决定。为了获得更高的激发效率, 利用这种特殊干涉场分析了光栅深度、周期及波导折射率等参数对表面波耦合系数的影响。图 4 显示了不同光栅周期 Λ 、深度 d

及占空比 DC 条件下, 该结构激发的 BSWs 传输特性模拟结果。激发表面波时, 光栅强耦合作用的波矢匹配条件^[26]可表示为

$$k_{//} = k_{\text{BSWs}} \pm mK', \quad (5)$$

式中: k_{BSWs} 表示布洛赫波矢大小; m 表示衍射级次;

$K' = 2\pi/\Lambda; k_{//} = k' \sin \theta'$, k' 表示入射波矢大小, θ' 表示入射角。由于只讨论了垂直入射情况, (5) 式变为 $k_{\text{BSWs}} = \pm mK'$ 。从图 4(a) 可以看出: 当不满足波矢匹配条件时, 入射光与光栅的耦合效率极低, 未激发出无衍射 BSWs; 但在 $\Lambda = 590 \text{ nm}$ 时, 由于满足了波矢匹配条件, 光栅的耦合效率较高, 产生了良好的类无衍射 BSWs。此时, BSWs 的有效折射率为 1.19。

根据二元光栅耦合波理论^[27]可知: 光栅深度较小时, 只有少量的入射光被光栅耦合, 此时耦合效率

较低; 随着光栅深度的增加, 耦合强度迅速增加, 但在光栅深度较大时, 大量的入射光进入电介质层导致耦合效率降低。从图 4(b) 中可以看出, 当光栅深度 $d = 95 \text{ nm}$ 时, 耦合效率最大。此外, 分析了光栅占空比对耦合效率的影响, 图 4(c) 为不同光栅占空比情况下的无衍射 BSWs 的电场强度分布。从图中可以看出, 当 DC 为 0.5 时, 由于光栅散射的偶次谐波被消除且基波振幅被有效增大, 光栅的耦合传输效率最高, 此时产生的无衍射 BSWs 效果最好。

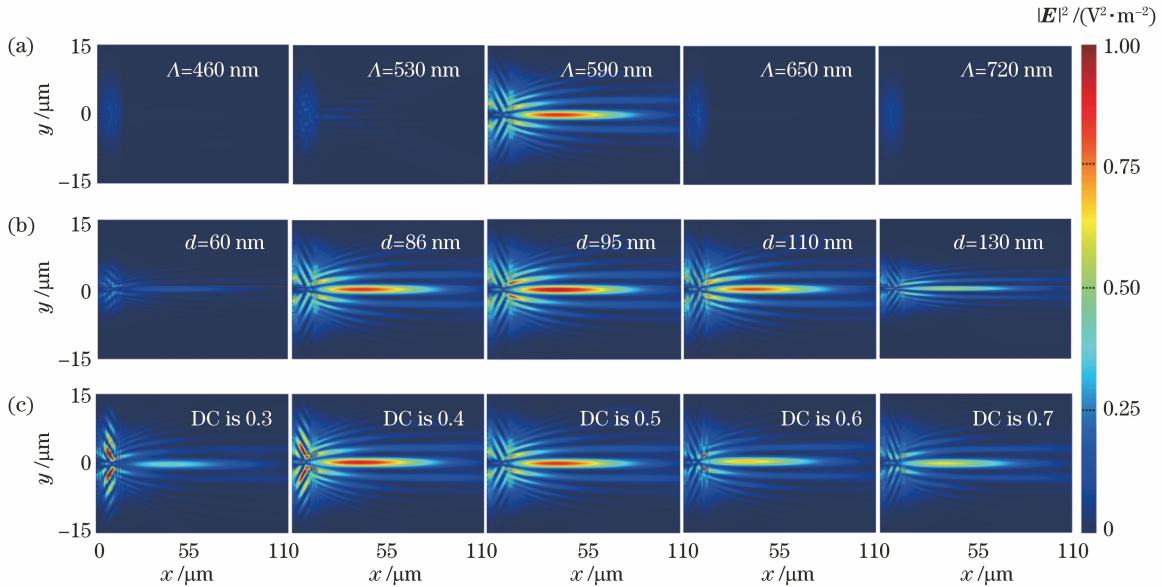


图 4 BSWs 的传输特性模拟结果与光栅周期、深度和占空比的关系。(a) 周期; (b) 深度; (c) 占空比

Fig. 4 Relationship between simulation results of transmission characteristics of BSWs and grating period, depth, and duty cycle. (a) Period; (b) depth; (c) duty cycle

4 弯曲光栅结构调制的自加速表面波

在双倾斜光栅结构的基础上, 进一步构造了用于自加速 BSWs 激发的光栅结构。以轨迹函数为 $y = 20000x^2$ 的自加速光场为例, 图 5 为对应的构造原理。首先, 根据(2)式计算了沿该轨迹自加速的表面波在 y 轴上所具有的相位分布, 如图 5(a) 所示。然后, 将此相位分布投影在 $[0, 2\pi]$ 区间, 结果如图 5(b) 所示, 其中, $\Delta\lambda$ 表示任一锯齿宽度, 对应极大值的横坐标为 y_0 ; $\text{mod}(\varphi)$ 指将 φ 投影到 $[0, 2\pi]$, 仍表示相位。根据该初始相位分布, 对应的二维光栅结构为

$$x(y) = \frac{\Delta\lambda}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi}{dy} \cdot \left(\frac{d\varphi}{dy} \right)^{-1}_{y=y_0} |\varphi| \quad (6)$$

图 5(c) 给出了诱导沿 $y = 20000x^2$ 轨迹传输的表面波所需的弯曲光栅分布坐标, 函数分布为 $x(y) = 0.052y^2$ 。

图 5(d) 为光栅结构的示意图, 其中 $\Lambda = 590 \text{ nm}$, $d = 95 \text{ nm}$, DC 为 0.5。利用该光栅结构替代图 3(a) 中的双倾斜光栅结构, 数值模拟获得的表面波传播过程如图 6(a) 所示, 其中白色虚线表示设定的表面波自加速轨迹, 高斯光场光源从底部垂直照明该结构。从图中可以看出, 该光栅结构激发的表面波的传输轨迹与预设吻合较好。为了验证该构造方法的稳定性, 进一步分析了具有更强横向自加速能力以及不同自加速方向的表面波。所采用的轨迹函数分别为 $y = 200x^{3/2}$ 和 $y = 10^{-5} \ln(5000x)$, 相同条件下, 所对应的光栅结构激发的表面波的传输过程分别如图 6(b)、(c) 所示。从图中可以看出, 这两种情况也得到了较好的激发效果, 表面波能够沿着预定轨迹进行传输。上述结果表明, 利用这种焦散线反演方法设计的简单光栅结构能够实现对任意轨迹自加速表面波的有效激发, 为依赖光波传输特性的片上光子器

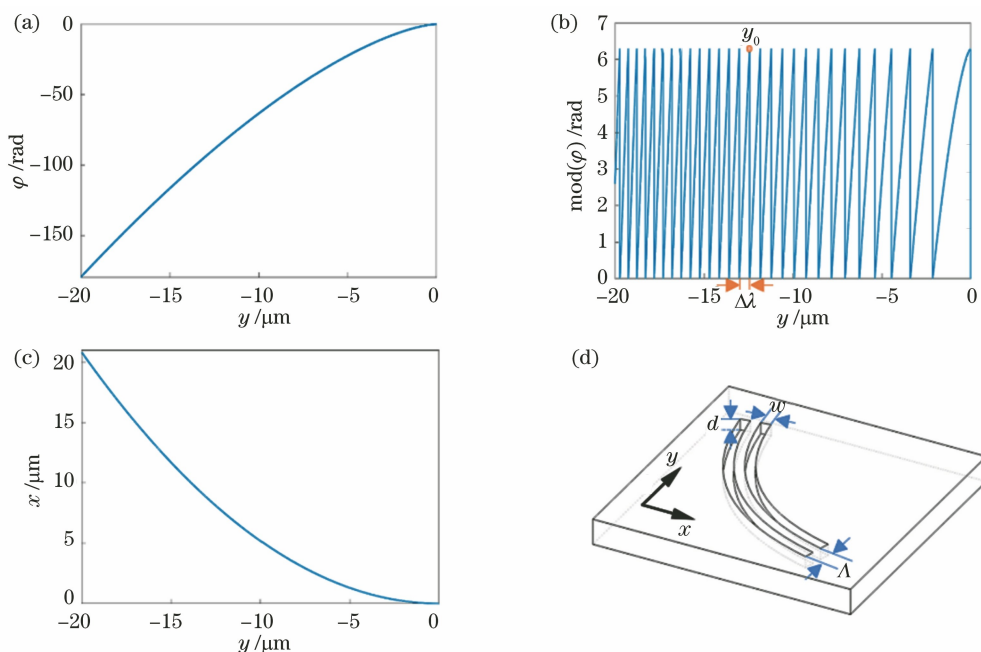


图 5 光栅结构构造原理。(a)初始相位分布曲线;(b)相位分布投影结果;(c)光栅结构分布曲线;(d)光栅结构示意图
 Fig. 5 Principle of grating structure construction. (a) Curve of initial phase distribution; (b) phase distribution projection result; (c) curve of grating structure distribution; (d) schematic of grating structure

件的设计提供了一种有效手段。而这种光栅结构可以借助成熟的电子束光刻等技术加工并借助近场扫描显微装置进行实验验证。

5 结 论

提出了一种基于焦散线理论的表面波激发光栅结构设计方法。以线性光栅诱导的类无衍射 BSWs 为例,分析了光栅周期、深度和占空比对 BSWs 耦合效率的影响,优化了高效激发 BSWs 的光栅结构参数。基于焦散线理论,反演了诱导自加速 BSWs 的相位分布函数,进一步设计了一种简单的光栅结构,通过数值模拟实现了沿任意轨迹自加速 BSWs 的激发。研究结果为在亚波长范围内操纵光波提供了一种有效途径,为拓展表面光波在光学微加工、光学微操控等方面的应用提供了一种设计思路。

参 考 文 献

[1] Ozbay E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions [J]. Science, 2006, 311(5758): 189-193.
 [2] Takayama O, Crasovan L, Artigas D, et al. Observation of Dyakonov surface waves [J]. Physical Review Letters, 2009, 102(4): 043903.
 [3] Robertson W M, Arjavalingam G, Meade R D, et al. Observation of surface photons on periodic dielectric arrays [J]. Optics Letters, 1993, 18(7): 528-530.
 [4] Xue T Y, Liang W Y, Li Y W, et al. Ultrasensitive detection of miRNA with an antimonene-based surface plasmon resonance sensor [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 28.

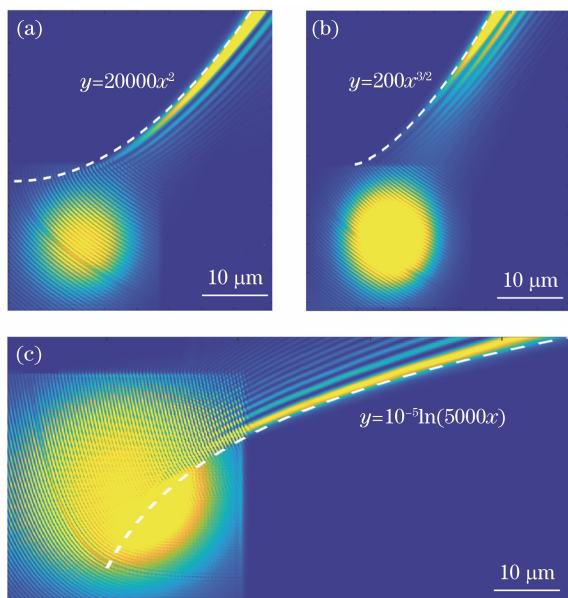


图 6 所提光栅结构调控的不同轨迹 BSWs 传播过程。
 (a) $y = 20000x^2$; (b) $y = 200x^{3/2}$; (c) $y = 10^{-5} \ln(5000x)$
 Fig. 6 Propagations of BSWs with different trajectories excited by proposed grating structure. (a) $y = 20000x^2$; (b) $y = 200x^{3/2}$; (c) $y = 10^{-5} \ln(5000x)$

- [5] Rizzo R, Alvaro M, Danz N, et al. Bloch surface wave label-free and fluorescence platform for the detection of VEGF biomarker in biological matrices [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 255: 2143-2150.
- [6] Niu D K, Zerrad M, Lereu A, et al. Excitation of Bloch surface waves in zero-admittance multilayers for high-sensitivity sensor applications [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(5): 054064.
- [7] Yeh P, Yariv A, Hong C S. Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. general theory [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, 67(4): 423-438.
- [8] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [9] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [10] Zhang Z, Satpathy S. Electromagnetic wave propagation in periodic structures: Bloch wave solution of Maxwell's equations [J]. *Physical Review Letters*, 1990, 65(21): 2650-2653.
- [11] Meade R D, Brommer K D, Rappe A M, et al. Electromagnetic Bloch waves at the surface of a photonic crystal [J]. *Physical Review B, Condensed Matter*, 1991, 44(19): 10961-10964.
- [12] Yeh P, Yariv A, Cho A Y. Optical surface waves in periodic layered media [J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(2): 104-105.
- [13] Wang R X, Wang Y, Zhang D G, et al. Diffraction-free Bloch surface waves [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(6): 5383-5390.
- [14] Villa F, Regalado L E, Ramos-Mendieta F, et al. Photonic crystal sensor based on surface waves for thin-film characterization [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(8): 646-648.
- [15] Fornasari L, Floris F, Patrini M, et al. Demonstration of fluorescence enhancement via Bloch surface waves in all-polymer multilayer structures [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, 18(20): 14086-14093.
- [16] Pirodda S, Xu X G, Delfan A, et al. Surface-enhanced Raman scattering in purely dielectric structures via Bloch surface waves [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117(13): 6821-6825.
- [17] Xiang Y F, Tang X, Fu Y N, et al. Trapping metallic particles using focused Bloch surface waves [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(3): 1688-1696.
- [18] Genevet P, Lin J, Kats M A, et al. Holographic detection of the orbital angular momentum of light with plasmonic photodiodes [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1278.
- [19] Allsop T, Arif R, Neal R, et al. Photonic gas sensors exploiting directly the optical properties of hybrid carbon nanotube localized surface plasmon structures [J]. *Light, Science & Applications*, 2016, 5(2): e16036.
- [20] Michelotti F, Rizzo R, Sinibaldi A, et al. Design rules for combined label-free and fluorescence Bloch surface wave biosensors [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(14): 2798-2801.
- [21] Augenstein Y, Vetter A, Lahijani B V, et al. Inverse photonic design of functional elements that focus Bloch surface waves [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 104.
- [22] Deng C Z, Ho Y L, Clark J K, et al. Light switching with a metal-free chiral-sensitive metasurface at telecommunication wavelengths [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(10): 2915-2922.
- [23] Stella U, Grosjean T, De Leo N, et al. Vortex beam generation by spin-orbit interaction with Bloch surface waves [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(3): 774-783.
- [24] Froehly L, Courvoisier F, Mathis A, et al. Arbitrary accelerating micron-scale caustic beams in two and three dimensions [J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16455-16465.
- [25] Dubey R, Vosoughi Lahijani B, Kim M S, et al. Near-field investigation of Bloch surface wave based 2D optical components [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10106: 101061G.
- [26] Kovalevich T, Boyer P, Suarez M, et al. Polarization controlled directional propagation of Bloch surface wave [J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5710-5715.
- [27] Moharam M G, Gaylord T K, Grann E B, et al. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1068-1076.