

# 布洛赫表面波效应及其传感应用

万育航<sup>1</sup>, 郑铮<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083;

<sup>2</sup>地球空间信息技术协同创新中心, 湖北 武汉 430079

**摘要** 布洛赫表面波(BSW)技术是一种新型的基于全介质结构的光学传感技术,具有低光学损耗、大相位跳变以及高设计自由度,近年来得到了广泛的研究。不同的结构设计和检测方案被提出并得到验证,相关技术被证明可用于免标记的生物传感检测、气体传感检测、荧光检测等。从 BSW 技术的基本原理、传感器件、检测系统和检测方法方面,介绍了国内外 BSW 技术的研究进展。

**关键词** 传感器; 光学传感; 表面波; 光子带隙结构; 表面等离子体共振

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328008

## Bloch Surface Wave Effect and Its Sensing Applications

Wan Yuhang<sup>1</sup>, Zheng Zheng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan, Hubei 430079, China

**Abstract** The Bloch surface wave (BSW) technology is a novel optical sensing technology based on all-dielectric structures, which possesses a low optical loss, a large phase jump and a high design flexibility. It has been recently widely studied and the different structure designs and detection schemes have been proposed and confirmed. The related technologies have been confirmed to be used for label-free biosensing, gas sensing, fluorescence detection, and so on. The research progress of BSW technology at home and abroad is reviewed, from the aspects of basic principle, sensing devices, detection systems and methods.

**Key words** sensors; optical sensing; surface waves; photonic bandgap structure; surface plasmon resonance

**OCIS codes** 280.4788; 240.6690; 160.5293; 240.6680

## 1 引 言

基于表面波的光学检测技术是通过激发传感界面附近的表面波,并利用束缚在界面附近的增强的光表面波效应进行传感检测。这类传感技术具有高灵敏度、可实时检测等优点,作为该技术最典型的代表,表面等离子体共振(SPR)、表面增强拉曼(SERS)、表面增强荧光等技术得到了大量的研究。其中,SPR 技术在 20 世纪 90 年代成功实现了商业化,在生化检测、药物开发、食品安全、环境监测等方面得到了广泛的应用。

随着实际应用对检测性能要求的进一步提高,

新型的表面波传感器件与检测技术被不断提出。其中,基于低光学损耗的全介质结构的布洛赫表面波(BSW)技术具有更高的灵敏度、可调控的场增强等特性,可以与不同的化学表面修饰方法和光学检测机制结合。其与 SPR 技术具有很多相似性,同时又具有一些独有的特点,近年来吸引了国内外越来越多的研究者,并逐渐成为表面波传感技术的研究热点之一。

本文从 BSW 效应出发,分析了 BSW 的产生机理、激发条件和方法以及 BSW 相关的光学效应,对典型的 BSW 传感器件及其传感应用进行了介绍,最后综述了国内外的最新研究进展。

收稿日期: 2017-11-08; 收到修改稿日期: 2017-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(61775009,61521091)、国家重点研发计划(2016YFB1200100)

作者简介: 万育航(1985—),女,博士,讲师,主要从事光学传感、微纳光子技术方面的研究。

E-mail: yuhangwan@buaa.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: zhengzheng@buaa.edu.cn

## 2 BSW 效应

### 2.1 BSW 机理

与传统的 SPR 金属与介质的器件结构不同, BSW 存在于全介质结构中, 在截断的一维光子晶体(PC)表面传播。PC 是具有不同介电常数的介质材料在空间呈周期性排布的结构。电磁波在其中传播时遵循折射、反射、透射原理, 电子周期性的布拉格散射使电磁波受到调制而形成类似电子的能带结构, 这种能带结构被称为光子能带。在合适的晶格常数和介电常数比的条件下, PC 的光子能带间可出现使某些特定频率的电磁波无法透过的频率区域, 类似电子能带隙, 此频率区域被称为光子带隙(PBG)或光子禁带。因此, PC 材料也被称为 PBG 材料。

根据周期性排布的方向和维度, PC 可分为一维、二维和三维, 如图 1 所示。其中, 一维 PC 是由具有不同介电常数的介质层交替堆积而成的结构, 如法布里-珀罗腔的多层光学增透膜等。二维 PC 的介电常数在二维空间呈周期性排列, 如 PC 光纤中在介质背景下规律排列的空气孔结构等。三维 PC 是由两种或两种以上的介质块构成的空间周期性结构, 其在三维平面上均具有周期性, 在三个方向上都具有 PBG。三维 PC 的典型结构包括金刚石结构和面心立方的反蛋白石结构。

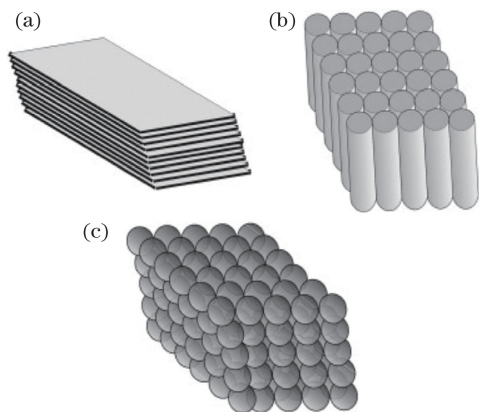


图 1 PC 的空间结构图。(a)一维;(b)二维;(c)三维

Fig. 1 Spatial structure schematics of PC.

(a) 1D; (b) 2D; (c) 3D

PC 中存在光子禁带的物理机理基于固体物理的布洛赫理论。当电磁波在一个具有平移对称性的介电空间中传播时, 沿折射率周期性变化方向的电磁场分布为被周期性函数所调制的平面波形式, 称为布洛赫态, 其显著特征是其波矢沿该方向具有周期性, 且其在 PC 中传播时无需再考虑散射效应。

根据布洛赫原理, 与电子带隙出现的原理类似, 将 PC 中呈周期性变化的折射率分布看成是平均折射率和周期性微扰作用的效果, 该微扰作用使得布里渊区的边缘出现频率带隙。在此频率带隙内, 光波的波矢没有实部, 这意味在此带隙内, 光波无法以波动形式传播, 而是以电磁场指数衰减的倏逝波形式存在。当一维 PC 表面被截断, 或在 PC 结构的表面末端引入一层介电材料时, 有可能在 PC 表面激发表面波, 即 BSW, 如图 2 所示, 其中  $x, y, z$  代表坐标系,  $K_x, E_x$  分别为  $x$  轴方向的波矢大小、能量,  $a$  为一个周期的介质层厚度。

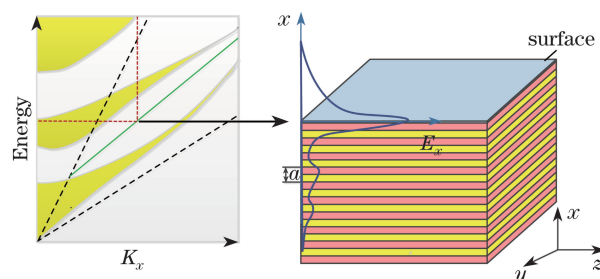


图 2 截断一维 PC 表面存在的 BSW 模式

Fig. 2 BSW mode excited on truncated 1D PC surface

一维 PC 结构的 PBG 可通过传输矩阵法<sup>[1]</sup>求解获得, 典型的一维 PBG 的各层结构分别为基质层、重复的介质层、缓冲层。缓冲层也称为终止层, 为 PBG 结构末端引入的介电材料层。1991 年, Meade 等<sup>[2]</sup>研究了 PC 的表面布洛赫波, 发现缓冲层对 PBG 结构中不同的光学模式具有重要影响。1999 年, Robertson 等<sup>[3-4]</sup>从实验角度研究了不同的缓冲层对表面波激发的影响, 并研究了相同结构和环境下所支持的不同模式的光学特性。Wan 等<sup>[5-6]</sup>通过改变环境介质, 从理论和实验两方面研究了相同 PBG 结构下不同光学模式(导波模式和表面模式)的激发及其光学特性。实验证明, 当环境介质分别为空气和水时, 同一 PBG 结构能在同一偏振态下分别激发导波模式和表面模式。

BSW 与表面等离子体波的激发和传播特性相似, 且存在于全介质结构中, 但其传输损耗远小于表面等离子体激元(SPP)光波导的。2010 年, Descrovi 等<sup>[7]</sup>首次采用类似介质加载的波导结构, 在 Kretschmann 棱镜耦合的一维 PBG 结构末端制备了一条有限宽的用于生物分子识别的有机介质薄层 BSW 波导。实验证明, 所激发的 BSW 可以耦合到亚微米量级厚度的介质波导中, 并以相当低的光损耗进行传输, 实验测得的传输距离超过 100  $\mu\text{m}$ , 但电场的约束能力较弱, 如图 3 所示。SPP 光波导能

够打破传统的衍射极限,将光场束缚在亚波长尺寸内传输,但其金属结构加大了传输损耗。为综合优化传输损耗和光场限制能力,国内外研究者陆续提出了一些新型的 SPP 与介质波导相耦合的结构,以激发混合型 SPP 模式,并同时实现较小的传输损耗和较小的模场尺寸。Wan 等<sup>[8]</sup>在全介质的 BSW 平台上加载了有限宽的金属薄层,使两种表面波耦合以激发混合波导模式,综合优化传输损耗和模场限制能力,如图 4 所示,其中  $E_y$  代表  $y$  轴的电场分量。Yu 等<sup>[9]</sup>通过制备二维的微纳器件对 BSW 进行操控,如在一维 PBG 结构表面用光刻胶做出二维透镜的形状,并对激发的 BSW 进行聚焦等操作。Wang 等<sup>[10]</sup>在一维 PBG 平板的表面放置百纳米级半径的聚合物光纤,耦合激发的 BSW 可在该纳米光纤中进行有效传输。该聚合物光纤易进行掺杂、修饰等,通过在纳米光纤中掺杂不同的荧光物质,可实现同一输入光对不同荧光的激发观测。上述这些基于 BSW 的波导结构亦有望用于传感检测。

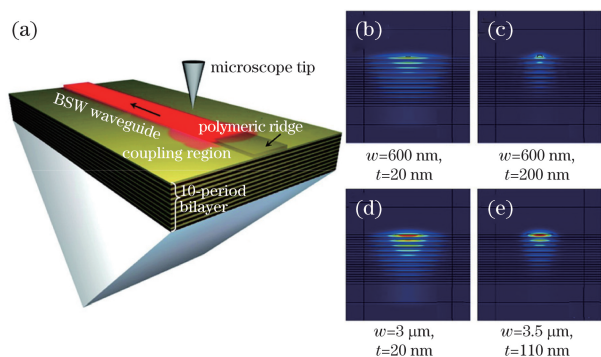


图 3 (a)有机介质薄膜加载的 BSW 波导示意图<sup>[7]</sup>;  
(b)~(e)不同波导宽度  $w$  和厚度  $t$  下  
BSW 模式的空间电场分布

Fig. 3 (a) Schematic of BSW waveguide loaded by organic dielectric thin films<sup>[7]</sup>; (b)-(e) spatial electric field distributions of BSW modes under different waveguide widths and thicknesses

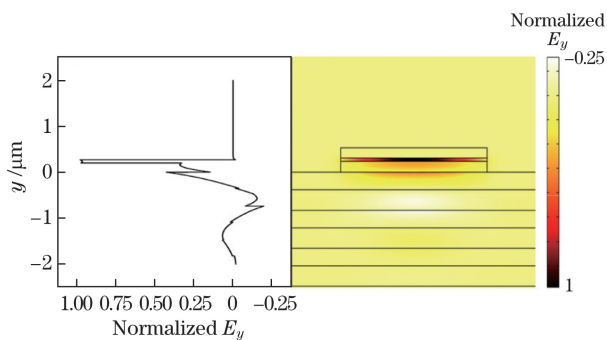


图 4 混合模式的电场分布<sup>[8]</sup>

Fig. 4 Electrical field distribution of hybrid mode<sup>[8]</sup>

## 2.2 BSW 效应的耦合、激发与检测

在 SPR 系统中,表面等离子体波通常可以通过棱镜耦合、光栅耦合和多模光纤模式耦合等方式激发,当入射光的角度和波长满足一定条件时,入射光的波矢与表面等离子体波的波矢匹配,产生 SPR。此时,表面等离子体波被激发且沿着金属和外部介质的表面传播,反射光强度最小。BSW 的激发方式与表面等离子体波的相似,可以采用同样的方式实现。图 5 所示为通过 Krestschmann 棱镜耦合方式激发 BSW 的示意图。

从图 5 可见,激发的 BSW 被约束在缓冲层和环境介质的交界面处,引起交界面处的场增强,且激发的 BSW 以指数衰减形式分别穿透两种物质,与表面等离子体波极为相似。由于与 SPR 的相似性,在 Robertson 等<sup>[3]</sup>早期的实验中,包括 Kretschmann 和 Otto 装置在内的棱镜耦合的激发装置均成功实现了 BSW 的激发。虽然理论上理想的 PC 结构是无损的,但在制备过程中介质表面不平滑会造成散射等损耗,因而当 BSW 被激发时,反射强度谱中会出现类似 SPR 的、对界面物理性质变化敏感的耦合吸收峰<sup>[5,11-12]</sup>。BSW 的激发可借鉴成熟的 SPR 实验装置,原则上只需更换相应的表面波器件和调整耦合条件,这也进一步降低了 BSW 技术的实用难度。

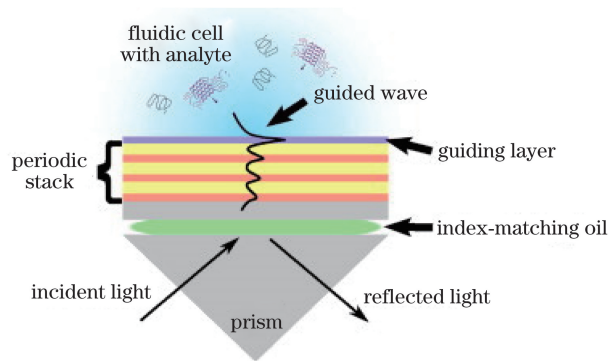


图 5 通过 Kretschmann 棱镜耦合方式激发 BSW 的示意图<sup>[13]</sup>

Fig. 5 Schematic of BSW induced by Kretschmann prism coupling method<sup>[13]</sup>

与 SPR 相似,BSW 被激发时,入射光耦合到倏逝波,反射光的强度减小,相位急剧变化。而为了实现入射光与 BSW 的波矢匹配,可通过改变波长或入射角度,因此基于 BSW 的检测系统与传统 SPR 检测一样,可以通过检测相应光学表面波导致的反射光强度或相位的变化,获得表面的折射率变化。扫描方法可分为角度扫描和波长扫描,检测的物理量包括强度和相位。

### 2.2.1 基于 BSW 的角度检测技术

波矢匹配关系中的 BSW 条件可以通过改变入射光的角度实现。角度扫描方法是最传统、最常用的扫描方式,该方法使用具有一定角度分布的固定波长的光源,通过改变入射光在 BSW 检测结构界面上的入射角度,获得 BSW 的角度-强度曲线以及共振峰位置,并通过检测共振角位置的变化来实现传感检测。

一种实现角度扫描的方式是采用近平面光束入射,通过高精度电动机械转台改变入射角度,实现精确的角度扫描,如图 6 所示。在这种方式下,其扫描速度受限于机械转台,往往检测速度缓慢,且检测精度依赖于机械转台的精度。2011 年,Paeder 等<sup>[13]</sup>应用布洛赫传感技术,进行了蛋白质聚集体的检测,受转台角度分辨率的影响,其获得的检测精度只能达到  $10^{-4}$  RIU。

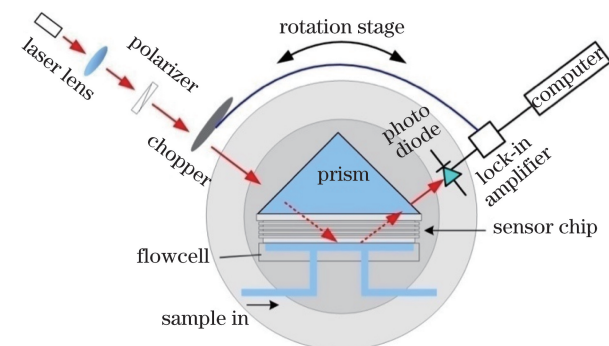


图 6 基于转台的角度扫描示意图  
Fig. 6 Schematic of angular scanning based on rotational stage

另一种广为使用的方式是采用覆盖一定角度范围的聚焦光束作为入射光,采用空间光检测阵列器件(如电荷耦合器件 CCD、光电检测阵列等),检测出对应不同波矢的反射光的空间强度分布,通过空间位置-角度位置的映射,获得反射的光束形状,并从反射光的强度分布中获取 BSW 的激发位置,如图 7 所示。这种方式的检测速度受阵列检测器响应速度的限制,但远大于基于转台的角度扫描方法的检测速度。Konopsky 等<sup>[14-17]</sup>对基于聚焦光角度扫描装置的 PBG 结构的光学传感检测方法进行了研究,系统中发光二极管的输出经过准直后通过透镜产生了一定入射角范围的聚焦光束,该光束入射到耦合棱镜上,通过设计的 PBG 结构,使得在合适条件下能在 PBG 结构表面同时激发两种有效折射率相差较大的表面波模式,利用光学成像探测器阵列对反射光进行检测。他们还采用自参考方法,利用

两种模式的穿透深度不同的特性,将表面变化引起的与背景溶液折射率变化引起的分开,从而精确观测表面的生化反应,实现了  $10^{-6}$  RIU 的检测限。

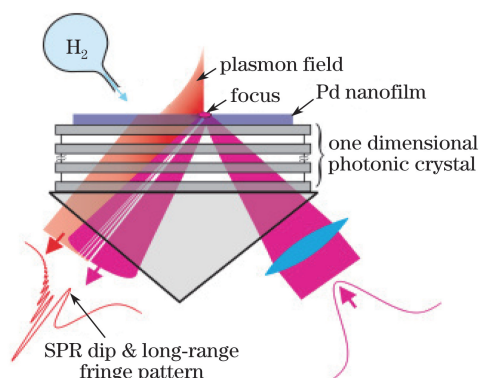


图 7 基于聚焦光的角度扫描示意图<sup>[14]</sup>  
Fig. 7 Schematic of angular scanning based on focused beam<sup>[14]</sup>

### 2.2.2 基于 BSW 的波长检测技术

波长扫描方法在固定入射角度的情况下,采用宽谱光源作为入射光,利用光谱仪或单色仪等光谱分析设备对反射光谱进行检测,得到不同入射波长下的光谱响应,从而获得 BSW 的激发波长,如图 8 所示。这种方法的装置简单,对光源和光路中光学元件的要求不高,但其检测精度和扫描速度依赖于检测端的光谱分析设备。相较于 SPR,BSW 的波长耦合峰的半峰全宽更窄,因此更易于检测。Giorgis 等<sup>[18]</sup>利用 1450~1590 nm 的可调激光器,采用 S 偏振光(偏振矢量垂直于入射平面),在由不同掺杂的氮化硅组成的 10 个周期的 PBG 结构中激发了表面布洛赫波,采用波长扫描的方式进行了葡萄糖溶液的检测灵敏度的测定,能获得  $1.1 \times 10^3$  nm/RIU 的波长灵敏度,系统的检测限可达  $3.8 \times 10^{-6}$  RIU。基于金薄膜的 SPR 传感器,当入射光为 630 nm 时,其波长灵敏度为 970 nm/RIU,当入射光为 850 nm 时,波长灵敏度可达  $1.38 \times 10^4$  nm/RIU<sup>[19]</sup>。该系统激发的 BSW 的波长灵敏度大于可见光下 SPR 的波长灵敏度,而小于近红外下 SPR 的波长灵敏度<sup>[20]</sup>。BSW 具有波长设计范围宽且灵活的优点,Farmer 等<sup>[21]</sup>在 470 nm 波长处激发了 BSW,在波长扫描系统下,进行了蛋白质与脱氧核糖核酸(DNA)结合的实验验证,获得了 600 nm/RIU 的波长灵敏度。

### 2.2.3 基于 BSW 的强度检测技术

强度检测技术将固定波长的激光以固定角度入射到表面波的耦合装置上,检测端的光电探测

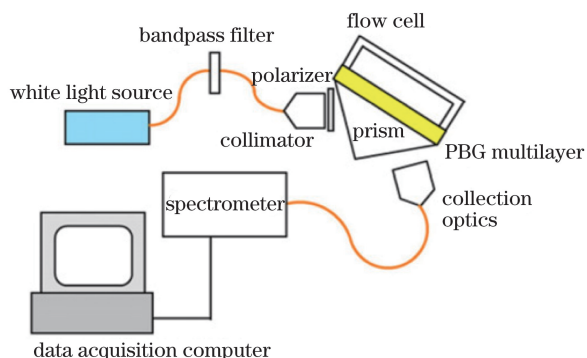


图 8 波长扫描示意图<sup>[22]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of wavelength scanning<sup>[22]</sup>

器实时测量出射光的强度随样品性质的变化。强度检测中的入射角度一般在共振角附近斜率较大处,可获得较大的灵敏度。单点的强度检测可以方便地实现高速检测,这种检测方法的响应速度快且系统结构简单,因而可以非常方便地实现高通量检测。在 SPR 传感检测系统中,高通量的传感检测大多基于强度检测技术,最为典型的应用是目前被广泛研究和关注的 SPR 成像 (SPRI) 技术。在 BSW 的激发中,由于将金属换成了全介质材料,光学损耗大大减小,从而使得 BSW 的共振峰比 SPR 的更尖锐,共振角度附近的斜率大大增大,如图 9 所示。因此,BSW 相较 SPR 更适合强度检测方案,能达到更高的检测灵敏度。Kong 等<sup>[12]</sup>采用由 SiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 交替组成的 PBG 结构,通过 Krestchmann 棱镜耦合结构,在 980 nm 入射光下,当外部介质为水时激发了 BSW,其实验测得的共振角度峰的半峰全宽为 0.05°,远小于 SPR 的 (约 1.5°)。在共振角附近固定入射角度,采用光电二极管探测器检测反射光的光强,并通过数据采集

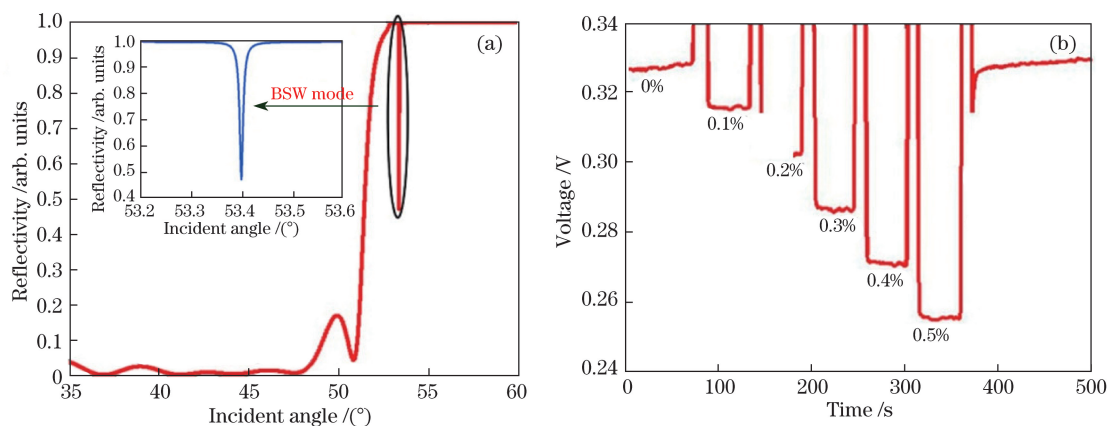


图 9 (a) BSW 激发时的角度反射曲线;(b)随甘油样品浓度变化的实时强度检测曲线<sup>[12]</sup>

Fig. 9 (a) Angular reflectance curves for BSW excitation; (b) monitoring curves of real-time intensity varying with glycerol sample concentrations<sup>[12]</sup>

卡输送到上位机。尽管一般 BSW 器件的角度灵敏度比 SPR 传感系统的稍低一些<sup>[22]</sup>,但是由于其共振峰更加尖锐,系统的强度灵敏度可以达到 156 RIU<sup>-1</sup>,远优于 SPR 传感检测系统的 24 RIU<sup>-1</sup>。考虑到系统噪声,可获得该系统的最小检测分辨率为  $7.5 \times 10^{-7}$  RIU,大于大多数传统 SPR 传感检测系统的。

#### 2.2.4 基于 BSW 的相位检测技术

发生 SPR 效应时,除了反射光场的强度改变以外,光场的相位也会发生剧烈的跳变,通常认为通过检测光场的相位可能获得更好的效果。和 SPR 一样,BSW 被激发时也伴随着剧烈的相位跳变,而且 BSW 由于具有更低的光学损耗,会出现更剧烈的相位变化,理论上可能实现更高的灵敏度。因此,相位相关的 BSW 传感技术更具发展潜力。

强度检测通过光探测器就能直接实现,而相位难以直接测量,往往需要搭建干涉装置,相位检测装置复杂,体积庞大,对环境敏感。近年来也有研究采取共线相干等方式在简单的系统中实现高精度的相位检测<sup>[23]</sup>。

2013 年,Li 等<sup>[24-25]</sup>采用椭偏仪结构的实验装置,研究了一维 PBG 结构激发的 BSW 的相位特性,并将其用于传感检测,对于同一传感芯片,其相位检测的灵敏度可明显高于强度检测的。同年,Sinibaldi 等<sup>[26]</sup>也提出利用 BSW 的相位特性进行传感应用,采用椭圆光度法使得不同偏振态相干,从而提高了纯偏振光下的相位灵敏度。实验结果表明,对于同一传感芯片,椭圆光度法比线偏振光的相位检测灵敏度提高了 11 倍。

另一方面,表面波引起的相位响应还可产生其他物理光学效应,如古斯汉辛(GH)位移等非镜面反射效应。研究表明,相位相关的非镜面效应能被表面波有效增强,而相关效应可在一定程度上反映光场相位跳变的变换,从而可以作为相位检测的替代方法实现传感检测。

非镜面反射效应是指当有限宽的光束在平面内发生全反射时,实际的反射光束与几何光学理论在反射点的侧向位置、横向位置、光束的反射角度、反射光束的焦距以及反射光斑的腰斑等方面存在微小差异<sup>[27-31]</sup>。其中,反射光束的侧向位移即 GH 效应得到了广泛的研究。GH 效应可以被想象为具有有限宽度的入射光束,在全反射过程中以表面波的形式在反射界面传播,穿透了一小段距离后再反射,从而造成该界面上的反射点距离入射点有一小段侧向位移,如图 10 所示,其中  $\theta_c$  为入射角,  $D$  为 GH 位移,  $n_1$ 、 $n_2$  为介质的折射率。该位移是由有限宽的平面光中不同的空间频率分量在反射中的相位跳变叠加形成的,理论上可由  $D = -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\phi}{d\theta}$  估计,其中  $\lambda$  为波长,  $\phi$  为相位变化量,  $\theta$  为角度变化量。由于该位移十分小,普通全反射产生的 GH 位移仅为波长量级,因此极难在实验中测到。

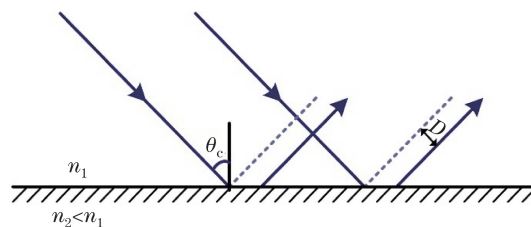


图 10 GH 位移示意图  
Fig. 10 Schematic of GH shift

大量研究集中在对 GH 效应的增强上,通过对材料和结构的研究,学者们发现,材料中吸收或增益的引入会使得全反射角附近获得增强的 GH 效应,且通过激发表面波能显著增强 GH 效应。Yin 等<sup>[32]</sup>发现,通过激发 SPP 能将 GH 位移增大到 50 倍波长的量级。Moskalenko 等<sup>[33]</sup>在一维 PC 表面引入缓冲层激发 BSW,通过物镜和 CCD 对该一维结构表面的光斑移动进行了粗略观测,测得了约 30 倍波长的 GH 位移。Wan 等<sup>[6]</sup>通过设计一维 PC 结构和激发方式,在激发导波模式下获得了约 300 倍波长量级的 GH 位移。他们进而通过激发 BSW 模式,在简单的实验系统中测得了 750 倍波长量级的 GH 位移,这是目前报道的获得的最大 GH 位移,这一亚毫米量级的 GH 位移可直接在获得的反射光斑图像中观测得到,如图 11 所示<sup>[5]</sup>。

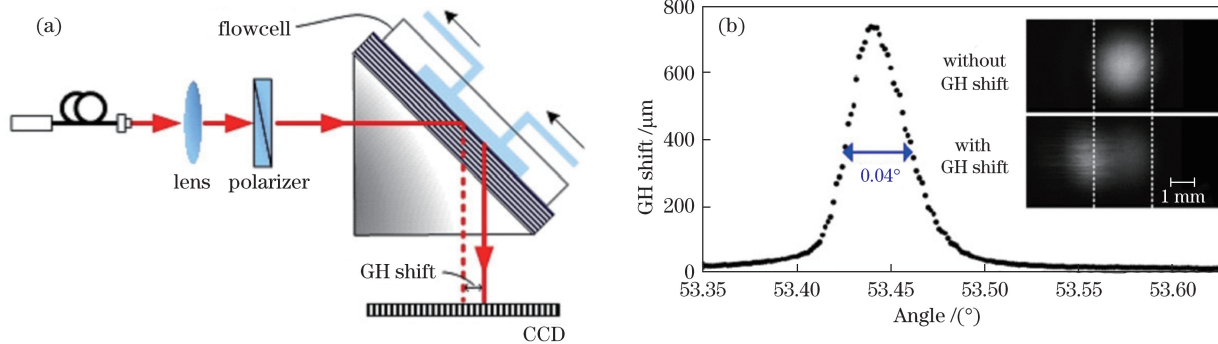


图 11 (a) 实验装置; (b) BSW 增强的 GH 位移<sup>[5]</sup>  
Fig. 11 (a) Experimental installation; (b) BSW-enhanced GH shift<sup>[5]</sup>

GH 效应直接取决于相位跳变的大小,因此通过检测 GH 位移的变化可间接实现相位检测。Wan 等<sup>[5-6]</sup>研究了 PBG 结构中不同局域模式被激发时的 GH 位移效应,实验验证了 BSW 的激发对 GH 位移的显著增强效果和对表面折射率变化的敏感性,获得了比基于 SPR 增强的 GH 传感器高一个数量级的灵敏度<sup>[34]</sup>。搭建图 12 所示的偏振相关的共线光路,通过测量 Stocks 参量获得了 BSW 激发时的空间相位分布<sup>[35]</sup>。这一实验也证明了 BSW 激发时,

即使在同一入射角下,相位变化也并非单一均匀的物理量,而是具有一定的空间分布;而利用相位的空间分布,可以通过简单的空间干涉装置,将空间相位进行进一步叠加,从而实现 GH 效应的进一步增强<sup>[36]</sup>,以获得更高的传感检测灵敏度。此外,Wan 等<sup>[37]</sup>提出了一种相位敏感的 BSW 传感方法,采用两个光电探测器同时测量不同偏振光的输出信号强度并进行差分,该信号由于包含了 BSW 的相位变化信息,对外界折射率变化比单纯的强度响应更加敏感。

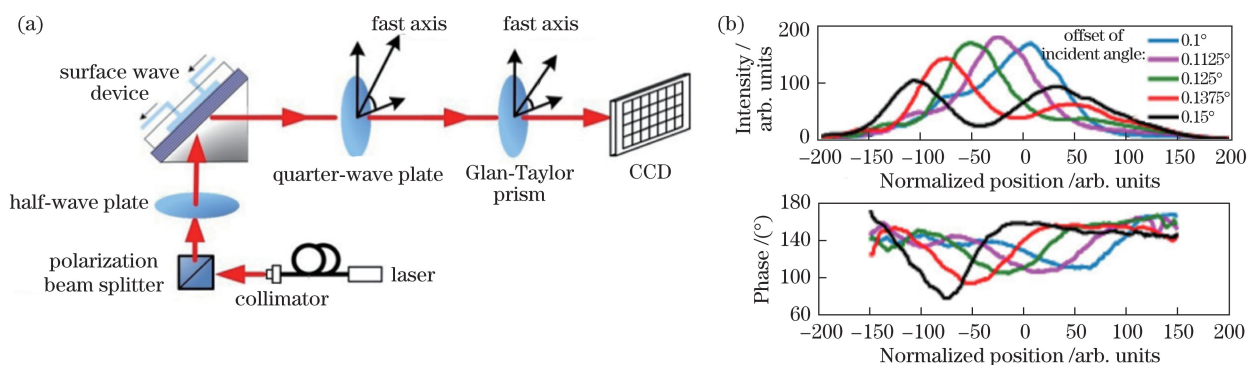


图 12 (a)空间相位检测装置示意图;(b)空间强度(上)和相位(下)分布<sup>[35]</sup>

Fig. 12 (a) Schematic of setup for measuring spatial phase; (b) spatial intensity (upper) and phase (lower) distribution<sup>[35]</sup>

尽管一般 BSW 器件的角度灵敏度比一般的 SPR 传感系统的稍低<sup>[22]</sup>,但是通过合理的设计和材料选择,可实现非常低的光学损耗,其共振峰的尖锐度可以增大一个数量级以上,因此系统的强度灵敏度比 SPR 的增大 5 倍<sup>[12]</sup>。通过结构的设计,BSW 的波长检测灵敏度可以与 SPR 的相当,且具有大波长范围的适用性。与 SPR 相比,BSW 的主要优势在于损耗低,且具有剧烈的相位变化,因而采用相位相关的检测方式能带来更大的性能提升。相较于采用 SPR 增强的 GH 位移检测,采用 BSW 增强的 GH 位移检测的灵敏度可提高一个数量级。

值得注意的是,BSW 结构的优势在于其丰富的可设计性、材料及波长选择的灵活性,许多工作重点放在优化系统中的各项参数以实现更优的性能<sup>[38]</sup>。材料的损耗对 BSW 的激发效果有较大影响,Kong 等<sup>[39]</sup>研究了不同扫描方式下 BSW 结构的优化损耗,结果显示,不同扫描方式下的最优损耗并不相同,低光学损耗的结构能实现高灵敏度的相位检测,不利于进行强度检测。另外,强度检测的灵敏度对结构的损耗较不敏感。

### 2.3 BSW 的场增强效应与传感检测方式

作为表面电磁波的一种,BSW 和表面等离子体波一样,被约束在两种物质界面处,引起界面处的场增强,并以指数衰减形式分别穿透两种物质。基于金属的 SPP 对电场具有非常强的约束能力,能突破衍射极限达到亚波长量级,表面电场在外部介质中的法向穿透深度为百纳米量级。而 BSW 源于 PBG 结构中光束的反射、折射的相干叠加效应,因而其场约束能力相对较弱,这意味着表面电场的穿透深度较大,通过合理的设计,可以达到微米量级。由于表面波的激发,以倏逝波形式存在的电磁场可以沿着界面方向传播,由于金属的欧姆损耗,表面等离子体波的传输距离往往较短。而全介质的 PBG

结构中的光学损耗非常低,因此 BSW 的传输距离可以达到百微米以上。由于表面波界面处电场的显著增强,光与物质的相互作用显著增强,对散射、荧光、拉曼散射等都具有显著的增强效应。

在基于光与物质的相互作用增强方面,Ramirez-Duverger 等<sup>[40]</sup>研究了一维 PBG 结构中 BSW 的激发对散射效应的增强,发现表面波激发时的散射效应比未激发时的增强了一个数量级以上。Soboleva 等<sup>[41]</sup>通过在 BSW 器件表面涂罗丹明 6G 染料,采用光学显微镜观测到 BSW 增强的荧光激发效应,同时也观测到了布洛赫波相关的荧光增强效应在表界面处沿侧向的传播和分布。Ballarini 等<sup>[42]</sup>通过控制 BSW 的激发来控制有机荧光染料的荧光发射,测量了棱镜背面和耦合回棱镜的荧光角度反射谱,发现其荧光效应比普通玻璃背面的分别增强了几十倍和几百倍。2012 年,Delfan 等<sup>[43]</sup>采用半经典理论计算了多层介质中不同尺寸光束的拉曼散射激发,并计算了波导、表面等离子体结构和 BSW 结构等中的拉曼增强效应,计算结果显示,BSW 比单层金属膜激发的平面表面等离子体波能更有效增强拉曼信号。随后,Pirotta 等<sup>[44]</sup>实验验证了布洛赫波对拉曼信号的增强。虽然理论计算获得的 BSW 的拉曼增强效果不如传统的基于粗糙金属表面或金属纳米颗粒的 SERS 方式,但这种低损的平面仍有可能作为基底与金属纳米颗粒或结构结合,有望共同实现更有效的拉曼信号增强。

## 3 BSW 器件及传感应用

### 3.1 BSW 器件

在早期的 BSW 器件结构中, $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgF}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{TaO}_5$  等常见介质材料通过蒸镀或溅镀等介质薄膜加工方式沉积到玻璃基底表面,形成周期性的高、低折射率交替层,在针对可见光的设计中,每层膜

厚为百纳米量级<sup>[3,5,40,45]</sup>。

一方面,为了在传感等重要应用领域实现易加工等性能, Fornasari 等<sup>[46]</sup>采用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)耦合棱镜,基于全聚合物薄膜实现了 BSW 结构。另一方面,为了加强器件的可集成性,基于硅基的 BSW 器件得到了越来越多的研究。Descrovi 等<sup>[47]</sup>使用具有不同孔隙率的多孔硅薄膜形成多层结构,并作为 BSW 激发器件。Wei 等<sup>[48-49]</sup>对基于多孔硅结构的 BSW 进行了大量研究。在高掺杂的 p+型 Si 中,通过电化学方法刻蚀形成纳米量级的空气孔而形成多孔硅,通过控制刻蚀过程中的电流强度、时间等参数,可有效控制形成的薄层厚度,以及每层多孔硅的孔隙率,即等效折射率等。硅和空气的折射率相差较大,因此通过调整孔隙率,可在较大范围内改变介质层的折射率。这类基于多孔硅的结构的工作波长通常在 1550 nm 附近。Descrovi 等<sup>[50]</sup>采用等离子体增强的化学气相沉积(PECVD)法,在玻璃基底表面沉积不同掺杂的氮化硅,通过改变氮含量来改变介质层折射率,形成的一维 PBG 结构成功地激发了表面波。Sreekanth 等<sup>[51]</sup>提出并实现了用石墨烯、PMMA 交替的多层结构取代传统的高低介质薄层激发 BSW,理论计算表明,其强度传感灵敏度较多层介质 BSW 结构的提高了 1.6 倍。

上述均为传统系统中采用棱镜耦合方式进行表面波激发的 BSW 器件。除此之外,Rodriguez 等<sup>[49]</sup>研究了光栅耦合方式下的布洛赫波激发,他们采用电化学刻蚀法在硅片上通过不同的电流密度和刻蚀时间,制备了多层不同孔隙率的多孔硅薄膜,然后在表面的多孔硅薄层上采用电子束曝光刻蚀出光栅结构,如图 13 所示。为了利用多孔硅中的空气孔对小分子的吸附效应,该结构中包含两种 PBG 结构,分别能支持 BSW 和场强约束在多层结构中的波导模式。

近年来,基于光纤结构的 BSW 结构被提出,其结合了光纤器件方便灵活、低成本的优势,扩展了 BSW 的传感应用。Li 等<sup>[52]</sup>将由 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 组成的一维 PBG 结构镀在 D 型光纤表面,通过设计使 D 型光纤中的模式与 BSW 能被同时激发,当外部环境的折射率变化时,该传输模式发生急剧变化。Tan 等<sup>[53]</sup>提出了一种基于 BSW 的新型光纤传感器,即将以 Ge/ZnSe 为重复周期层、ZnS 为缓冲层的一维 PBG 结构涂敷在多模光纤的外表面。Tu 等<sup>[54]</sup>通过原子层沉积(ALD)技术,将由 TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成的

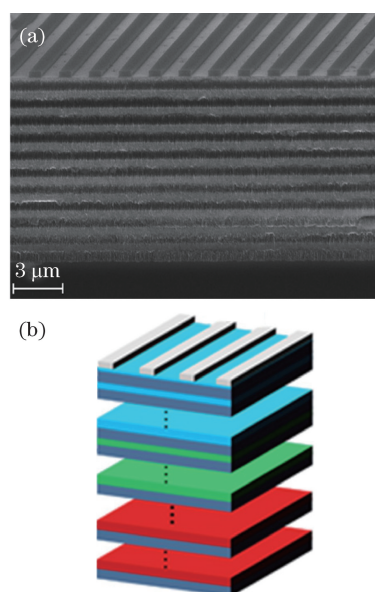


图 13 (a)基于多孔硅的光栅耦合表面波器件的扫描电镜图;(b)结构示意图<sup>[50]</sup>

Fig. 13 (a) SEM image of grating coupling surface wave device based on porous Si; (b) structural diagram<sup>[50]</sup>

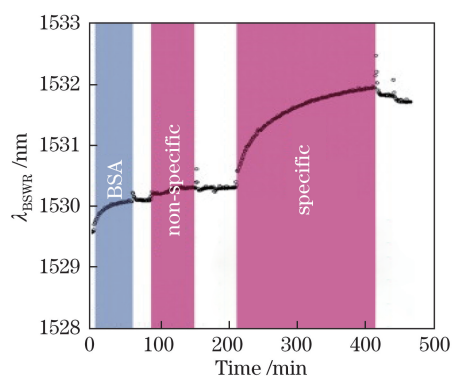
一维 PBG 结构镀在拉锥光纤表面,在实验中观测到了环境折射率变化引起的 BSW 激发条件的变化并将此用于传感检测。

### 3.2 传感检测应用

在对 BSW 进行激发、检测和实验系统标定时,研究者们常常利用具有一定折射率差的不同浓度的葡萄糖、盐或甘油溶液等进行验证。Descrovi 等<sup>[7]</sup>利用 1450~1590 nm 的可调激光器,采用 S 偏振光,在由不同掺杂的氮化硅组成的 10 个周期的 PBG 结构中激发了 BSW,采用波长扫描的方式进行了检测灵敏度的测定,获得了  $1.1 \times 10^3$  nm/RIU 的波长灵敏度,该系统的检测限可达  $3.8 \times 10^{-6}$  RIU。

蛋白质、DNA 的检测也是这一类表面波技术较为常见的传感应用。Roberson 等<sup>[55]</sup>提出了一种基于 BSW 微阵列的免标记方法,用于检测抗原-抗体的结合性。通过在玻璃基底沉积一维 PBG 结构,并在其表面修饰表面化学层以捕捉蛋白质分子,通过激发 BSW 进行了免标记的生物动力学实验。Farmer 等<sup>[21]</sup>成功实现了牛血清白蛋白(BSA)的抗体-抗原结合实验,获得了 600 nm/RIU 的波长灵敏度;在同一系统下,他们还进行了 DNA 结合实验。Paeder 等<sup>[13]</sup>研究了鸡蛋白溶菌酶(HEWL)的团聚。Rivolo 等<sup>[56]</sup>进行了抗体蛋白质非特异性和特异性结合的研究,如图 14 所示,其中  $\lambda_{BSWR}$  为布洛赫表面波共振(BSWR)波长。



图 14 生物分子相互作用的实时检测图<sup>[57]</sup>Fig. 14 Real-time monitoring of biomolecular interaction<sup>[57]</sup>

Rodriguez 等<sup>[49]</sup>对由具有不同孔隙率的多孔硅薄层交替组成的 PBG 结构进行了深入研究,通过设计使得形成的多层结构能支持不同模式,其中表面波模式的电场在结构表面外,而导波模式的电场被约束在多孔硅结构中。由于生物小分子能渗透进入多孔硅材料的空气孔中,但大分子不能,因此多孔硅结构能从物理上将小分子和大分子在空间位置上区分开,可分别采用激发的不同模式进行检测。

值得注意的是, Ye 等<sup>[57]</sup>利用一维 PBG 结构中的缺陷模式开展了大量研究。他们在表面引入吸收较大的缺陷层,使电场约束在该缺陷层中,通过设计其厚度,使电场泄漏到外部介质中,在外部环境中形成指数衰减的电场分布。虽然该结构与 BSW 的结构十分相似,但二者的机理不同。通过这种结构,荧光的激发强度被提高了 20~2000 倍,他们还进行了特定生物分子作用的实时监测,并进行了从小分子到大分子、DNA 寡核苷酸等的实验演示验证<sup>[58]</sup>。陈颖等<sup>[59-60]</sup>也对类似结构进行了研究,将待测样本加载在吸收介质的外侧形成表面缺陷腔,并对其传感特性进行了讨论。

除了生物检测之外, BSW 还被用于其他方面的传感。Konopsky 等<sup>[61]</sup>在 PBG 结构表面同时激发了两种有效折射率相差较大的表面波模式,对与 BSW 结合的 SPP 传感检测方法进行了研究。将合理设计的 PBG 结构作为基底,在其上再镀一层金薄膜,使所形成的 PC/Au/空气结构中激发类似长程 SPP 的模式,将金属薄膜换成氢气检测中常用的钯(Pd)薄膜,利用此效应可进行氢气的传感检测<sup>[14,62]</sup>。进一步,他们将钯薄膜换为不同尺寸和折射率大小的 Pd 纳米颗粒,进行了不同条件下氢气分子检测的实验研究<sup>[63]</sup>。Descrovi 等<sup>[47,64]</sup>采用多孔硅一维 PBG 结构,设计了一种对一维多孔硅晶体

表面变化非常敏感的气体传感器,并进行了基于 BSW 的乙醇蒸汽的实时传感检测。

## 4 结束语

从机理和应用等方面介绍了基于全介质的一维 PBG 结构的 BSW 的基本原理、激发途径、增强效应、器件结构和传感应用,以及国内外的研究进展。针对布洛赫波的自身特点,为提高传感系统的性能,应扬长避短,采用更适合的方式激发表面波,并采用更具优势的传感检测方法,以实现更好的传感性能。

经过十几年的发展, BSW 技术得到了长足的发展。在材料方面,传统的氧化物介质薄膜、便宜的聚合物薄层以及可集成的硅基材料均被使用;在激发方式方面,常见的棱镜耦合、集成性更好的光栅耦合、光纤/波导耦合均得到了研究,不同的扫描和检测方式得到了探索;在传感应用方面,葡萄糖、蛋白质、小分子、DNA 等常见的生物分子检测得到了实验验证,气体传感和温度的敏感性也得到了研究和探索。与 SPR 技术相比, BSW 技术具有更尖锐的强度响应峰、更剧烈的相位变化、更大的穿透深度,因此采用适宜的检测方法和技術,有望实现比 SPR 更优异的性能。在今后的发展中,除了进一步提升基于 BSW 的系统传感性能外,采用成本低廉、集成性好的器件和系统以实现方便快速的现场检测也是十分具有前景的研究方向。

## 参 考 文 献

- [1] Yeh P, Yariv A, Hong C-S. Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory[J]. Journal of Optical Society of America, 1977, 67(4): 423-438.
- [2] 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, 1991, 44(19): 10961.
- [3] Robertson W M. Experimental measurement of the effect of termination on surface electromagnetic waves in one-dimensional photonic bandgap arrays[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(11): 2013-2017.
- [4] Robertson W M, May M S. Surface electromagnetic wave excitation on one-dimensional photonic band-gap arrays[J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(13): 1800-1802.
- [5] Wan Y H, Zheng Z, Kong W J, et al. Nearly three orders of magnitude enhancement of Goos-Hanchen

- shift by exciting Bloch surface wave[J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 8998-9003.
- [6] Wan Y H, Zheng Z, Kong W J, *et al.* Direct experimental observation of giant Goos-Hanchen shifts from bandgap-enhanced total internal reflection[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3539-3541.
- [7] Descrovi E, Sfez T, Quaglio M, *et al.* Guided Bloch surface waves on ultrathin polymeric ridges[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(6): 2087-2091.
- [8] Wan Y H, Zheng Z, Shi X G, *et al.* Hybrid plasmon waveguide leveraging Bloch surface polaritons for sub-wavelength confinement[J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(3): 567-572.
- [9] Yu L, Barakat E, Sfez T, *et al.* Manipulating Bloch surface waves in 2D: a platform concept-based flat lens[J]. *Light: Science and Applications*, 2014, 3(1): 110-118.
- [10] Wang R X, Xia H Y, Zhang D G, *et al.* Bloch surface waves confined in one dimension with a single polymeric nanofibre[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14330.
- [11] Robertson W M, May M S. Surface electromagnetic wave excitation on one-dimensional photonic band-gap arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(13): 1800-1802.
- [12] Kong W J, Zheng Z, Wan Y H, *et al.* High-sensitivity sensing based on intensity-interrogated Bloch surface wave sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 193(3): 467-471.
- [13] Paeder V, Musi V, Hvozdar L, *et al.* Detection of protein aggregation with a Bloch surface wave based sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 157(1): 260-264.
- [14] Konopsky V N, Alieva E V. Long-range plasmons in lossy metal films on photonic crystal surfaces[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(4): 479-481.
- [15] Konopsky V N, Alieva E V. A biosensor based on photonic crystal surface waves with an independent registration of the liquid refractive index[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, 25(5): 1212-1216.
- [16] Konopsky V N, Alieva E V. Critical-angle refractometer enhanced by periodic multilayer coating[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 150(2): 794-797.
- [17] Konopsky V, Karakouz T, Alieva E, *et al.* Photonic crystal biosensor based on optical surface waves[J]. *Sensors*, 2013, 13(2): 2566-2578.
- [18] Giorgis F, Descrovi E, Summonte C. Experimental determination of the sensitivity of Bloch surface waves based sensors[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8087-8093.
- [19] Homola J, Yee S S, Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1999, 54(1): 3-15.
- [20] Piliarik M, Homola J. Surface plasmon resonance (SPR) sensors: approaching their limits?[J]. *Optics Express*, 2009, 17(19): 16505-16517.
- [21] Farmer A, Friedli A C, Wright S M, *et al.* Biosensing using surface electromagnetic waves in photonic band gap multilayers[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 173(10): 79-84.
- [22] Sinibaldi A, Danz N, Descrovi E, *et al.* Direct comparison of the performance of Bloch surface wave and surface plasmon polariton sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 174(11): 292-298.
- [23] Zheng Z, Wan Y H, Zhao X, *et al.* Spectral interferometric measurement of wavelength-dependent phase response for surface plasmon resonance sensors[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(13): 2491-2495.
- [24] Li Y H, Yang T L, Song S M, *et al.* Phase properties of Bloch surface waves and their sensing applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(4): 041116.
- [25] Li Y H, Yang T L, Pang Z Y, *et al.* Phase-sensitive Bloch surface wave sensor based on variable angle spectroscopic ellipsometry[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21403-21410.
- [26] Sinibaldi A, Rizzo R, Figliozzi G, *et al.* A full ellipsometric approach to optical sensing with Bloch surface waves on photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23331-23344.
- [27] Goos F, Hanchen H. Ein neuer und fundamentaler Versuch zur Totalreflexion (in German)[J]. *Annalen Der Physik*, 1947, 436(7/8): 333-346.
- [28] Lotsch H K V. Beam displacement at total reflection: the Goos-Hanchen effect[J]. *Optik*, 1970, 32(2): 116-137.
- [29] de Beaugregard O C, Imbert C. Quantized longitudinal and transverse shifts associated with total internal reflection[J]. *Physical Review Letters*, 1972, 28(18): 1211-1213.
- [30] Carniglia C K, Brownstein K R. Focal shift and ray model for total internal reflection[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1977, 67(1): 121-122.
- [31] Tamir T. Nonspecular phenomena in beam fields reflected by multilayered media[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(4): 558-565.
- [32] Yin X, Hesselink L, Liu Z, *et al.* Large positive and negative lateral optical beam displacements due to surface plasmon resonance[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(3): 372-374.
- [33] Moskalenko V V, Soboleva I V, Fedyanin A A. Surface wave-induced enhancement of the Goos-Hanchen effect in

- one-dimensional photonic crystals[J]. *Jetp Letters*, 2010, 91(8): 382-386.
- [34] Kong W J, Wan Y H, Zheng Z. Highly-sensitive, Bloch-surface-wave induced giant Goos-Hanchen shift sensing[C]//*Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2012: CTh4L.6.
- [35] Wan Y H, Kong W J, Zheng Z, *et al.* Giant spatial phase distortion in nonspecularly reflected beams[C]. *Conference on Lasers And Electro-Optics*, 2014: JTu4A. 78.
- [36] Wan Y H, Shi X G, Zhao X, *et al.* Spatial-interferometry-enhanced giant Goos-Hanchen sensing based on Bloch surface wave sensors[C]//*Proceedings of the Frontiers in Optics*, 2013: FTu1D.6.
- [37] Wan Y, Shu L, Zhu X, *et al.* Phase-sensitive Bloch surface wave sensing[C]//*Proceedings of the Frontiers in Optics*, 2014: FW2G.5.
- [38] Rizzo R, Danz N, Michelotti F, *et al.* Optimization of angularly resolved Bloch surface wave biosensors[J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 23202-23214.
- [39] Kong W J, Wan Y H, Ni X C, *et al.* Optimizing loss of the dielectric stack for Bloch-surface-wave sensors under different interrogation schemes[J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, 64(4): 407-412.
- [40] Ramirez-Duverger A S, Gaspar-Armenta J, Garcia-Llamas R. Surface wave effect on light scattering from one-dimensional photonic crystals[J]. *Optics Communications*, 2007, 277(2): 302-309.
- [41] Soboleva I V, Descrovi E, Summonte C, *et al.* Fluorescence emission enhanced by surface electromagnetic waves on one-dimensional photonic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(23): 231122.
- [42] Ballarini M, Frascella F, Michelotti F, *et al.* Bloch surface waves-controlled emission of organic dyes grafted on a one-dimensional photonic crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(4): 043302.
- [43] Delfan A, Liscidini M, Sipe J E. Surface enhanced Raman scattering in the presence of multilayer dielectric structures[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(8): 1863-1874.
- [44] Pirota 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.
- [45] Wan Y H, Zheng Z, Kong W J, *et al.* Fiber-to-fiber optical switching based on gigantic Bloch-surface-wave-induced goos-hanchen shifts[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(1): 7200107.
- [46] 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.
- [47] Descrovi E, Frascella F, Sciacca B, *et al.* Coupling of surface waves in highly defined one-dimensional porous silicon photonic crystals for gas sensing applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(24): 241109-241103.
- [48] Wei X, Kang C, Liscidini M, *et al.* Grating couplers on porous silicon planar waveguides for sensing applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(12): 113-123.
- [49] Rodriguez G A, Ryckman J D, Jiao Y, *et al.* A size selective porous silicon grating-coupled Bloch surface and sub-surface wave biosensor[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2014, 53(1): 486-493.
- [50] Descrovi E, Giorgis F, Dominici L, *et al.* Experimental observation of optical bandgaps for surface electromagnetic waves in a periodically corrugated one-dimensional silicon nitride photonic crystal[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(3): 243-245.
- [51] Sreekanth K V, Zeng S, Shang J, *et al.* Excitation of surface electromagnetic waves in a graphene-based Bragg grating[J]. 2012, 2(10): 737.
- [52] Li S N, Liu J S, Zheng Z, *et al.* Highly sensitive, Bloch surface wave D-Type fiber sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(5): 1200-1204.
- [53] Tan X J, Zhu X S. Optical fiber sensor based on Bloch surface wave in photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 16016-16026.
- [54] Tu T Y, Pang F F, Zhu S, *et al.* Excitation of Bloch surface wave on tapered fiber coated with one-dimensional photonic crystal for refractive index sensing[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9019-9027.
- [55] Robertson W M, Wright S M, Friedli A C, *et al.* Protein microarray analysis using surface optical wave resonance in photonic band gap multilayers[C]. *Conference on Lasers & Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference*, 2007: CWK4.
- [56] Rivolo P, Michelotti F, Frascella F, *et al.* Real time secondary antibody detection by means of silicon-based multilayers sustaining Bloch surface waves[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 161(1): 1046-1052.
- [57] Ye J Y, Ishikawa M. Enhancing fluorescence detection with a photonic crystal structure in a total-internal-reflection configuration[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(15): 1729-1731.
- [58] Guo Y, Ye J Y, Divin C, *et al.* Real-Time biomolecular binding detection using a sensitive photonic crystal biosensor[J]. *Analytical Chemistry*, 2010, 82(12): 5211-5218.

- [59] Chen Y, Fan H Q, Lu B, *et al.* Formation and sensing mechanism of photonic crystal surface wave based on Bloch theory[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0116002.  
陈颖, 范卉青, 卢波, 等. 基于布洛赫理论的光子晶体表面波形成及传感机理[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0116002.
- [60] Chen Y, Cao H Y, Han S T, *et al.* Sensing property of photonic crystal fabry-perot heterogeneous structure with absorption medium[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0223003.  
陈颖, 曹会莹, 韩帅涛, 等. 含吸收介质的光子晶体法布里-珀罗异质结构的传感特性研究[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0223003.
- [61] Konopsky V N, Alieva E V. Long-range propagation of plasmon polaritons in a thin metal film on a one-dimensional photonic crystal surface[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(25): 253904.
- [62] Valery N K, Dmitry V B, Elena V A, *et al.* Registration of long-range surface plasmon resonance by angle-scanning feedback and its implementation for optical hydrogen sensing[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(6): 063049.
- [63] Konopsky V N, Basmanov D V, Alieva E V, *et al.* Size-dependent hydrogen uptake behavior of Pd nanoparticles revealed by photonic crystal surface waves[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(8): 083108.
- [64] Michelotti F, Sciacca B, Dominici L, *et al.* Fast optical vapour sensing by Bloch surface waves on porous silicon membranes[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2010, 12(2): 502-506.