

文章编号: 1002-2082 (2021) 02-0371-06

基于 PDMS 薄膜的等离子体光栅仿真分析

陈壮壮, 王志斌, 李克武, 吴笑男

(中北大学 理学院 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘 要: 为了实现对等离子体光栅共振波长的测量, 研究光栅参数对应力的响应敏感程度, 提出了一种新型的应力敏感型聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 薄膜等离子体光栅。基于时域有限差分 (finite difference time domain, FDTD) 法的原理, 构造了一种结构仿真模型, 即周期性等离子体光栅模型。借助周期边界条件, 通过对光栅施加应力, 改变等离子体光栅参数 (即周期、占空比及 Au 膜厚度) 来实现共振波长的测量, 研究光栅参数对应力的响应敏感程度。最后将仿真结果与理论数值作对比, 并得出相对误差大小。仿真结果表明, 当光栅周期 $p=0.7\ \mu\text{m}$, 占空比 $f=55\%$, 金膜厚度 $b=0.02\ \mu\text{m}$ 时, 对应力的响应最敏感。其次, 将仿真所得不同周期时的共振波长与理论值相比较, 可知二者结果相吻合; 周期为 $0.7\ \mu\text{m}$ 时, 共振峰的波长为 $1.251\ \mu\text{m}$, 仿真结果与理论数值比较得到, 其相对误差都不超过 2%, 结果较为准确。此方法在单色仪、光谱仪和传感等领域中具有重要作用。

关键词: 表面等离子体共振; 聚二甲基硅氧烷; 时域有限差分法; 透过率; 光栅

中图分类号: TN256

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0208002

Simulation analysis of plasma grating based on PDMS thin films

CHEN Zhuangzhuang, WANG Zhibin, LI Kewu, WU Xiaonan

(Shanxi Photoelectric Information and Instrument Engineering Technology Research Center,
School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to realize the measurement of resonance wavelength of plasma grating, and research the response sensitivity of grating parameters to stress, a new type of stress-sensitive polydimethylsiloxane (PDMS) thin films plasma grating was proposed. Based on the principle of finite-difference-time-domain (FDTD) method, a structural simulation model, that is periodic plasma grating model was constructed. With the help of periodic boundary conditions and applying the stress on the grating, the resonance wavelength was measured by changing the plasma grating parameters, such as period, duty cycle and Au film thickness, and the response sensitivity of grating parameters to stress was studied. Finally, the simulated results were compared with the theoretical values, and the relative error was obtained. The simulated results show that when the grating period is $0.7\ \mu\text{m}$, the duty cycle is 55%, and the gold film thickness is $0.02\ \mu\text{m}$, the response to stress is most sensitive. Secondly, the resonance wavelength at different periods obtained by simulation is compared with the theoretical value, and the results are consistent; when the period is $0.7\ \mu\text{m}$, the wavelength of the resonance peak is $1.251\ \mu\text{m}$, and the relative error obtained by simulated results and theoretical values is less than 2%, which means the results are more accurate. This method plays an important role in the fields of monochromator, spectrometer, sensor, and so on.

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-09-04

基金项目: 国家自然科学基金 (61505179); 山西省青年科学基金 (201901D211234); 面上自然基金项目 (201901D111145)

作者简介: 陈壮壮 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事光栅方面的研究。E-mail: 1542312637@qq.com

通信作者: 王志斌 (1966-), 男, 硕士, 教授, 主要从事光电信息物理、测试计量技术及仪器、光电子技术与仪器、光学工程等方面的研究。E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

Key words: surface plasma resonance; polydimethylsiloxane; finite-difference time-domain method; transmittance; grating

引言

光栅(grating)属于应用广泛的光学元件,在光学传感、集成光路、光信息处理、光通信等光学应用领域都呈现了举足轻重的作用。目前,该元件主要运用在纳米级别。国内外对于新型的光学元件纳米级光栅在生物传感、光子晶体^[1-3]等多领域都有深入的研究和探讨。

在柔性器件领域,柔性电子设备主要有两类,其中有机半导体^[4-6]占比最高。而在制备其他的柔性元件时,则主要依托聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)^[7]等一些具有良好可拉伸性能的材料,以及其他具有延展性的结构类体系材料。PDMS 薄膜不仅拉伸性能良好,且具有亲肤性和无毒性。因此,PDMS 薄膜作为柔性材料的代表受到了大家的青睐,被广泛应用在柔性电子设备和可穿戴设备^[8]之中。在这些应用中,作为柔性支撑材料是 PDMS 薄膜本身最常见的作用。

本文选用时域有限差分(finite difference time domain, FDTD)法,通过相关仿真软件 FDTD Solutions,建立一种以 PDMS 薄膜为基板的具有周期边界条件的二维金属等离子体光栅仿真结构。通过对光栅施加应力,改变 PDMS 薄膜等离子体光栅的参数(即周期、占空比及 Au 膜厚度),并对其进行设计仿真和理论计算。通过对其共振波长特性的探究,本文提出了对应力最为敏感的等离子体光栅结构。最后将仿真结果与理论数值做对比,并计算出相对误差的大小。

1 基本原理

1.1 等离子体光栅理论模型

等离子体作为一种比较特殊的物质状态,是由高密度且呈均等分布状态的两种带电自由粒子所构成的^[9],它本身不会产生空间电荷,对外也不显电性。基于光栅耦合的原理,能够引起表面等离子体波,其示意图如图 1 所示。当光波(包括极化光 p)进入光栅表面的电介质时,光栅本身的周期结构会导致一系列衍射。衍射光线被反射的同时,按照不同的衍射角进行衍射,继而出现不同的衍射级次。当某一级次的波向量与表面等离子体波的波向量在界面方向上的投射相一致时,表面等离子体波便可以在光栅表面激发^[9]。

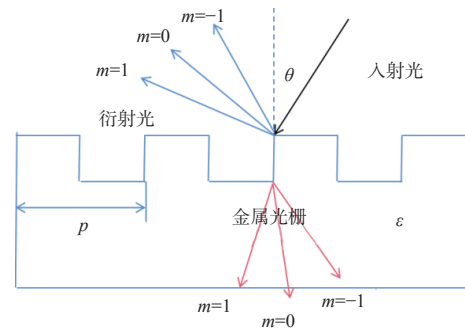


图 1 光栅耦合模型

Fig. 1 Grating coupling model

对于入射角为 θ 的光,在基板和空气中传播的衍射级数与基板表面平行的衍射波的波长 λ 为

$$\pm n_2 p \sin \theta + n_1 p = m \lambda \quad (1)$$

$$\pm n_2 p \sin \theta + n_2 p = m \lambda \quad (2)$$

式中: n_1 为 PDMS 基底的折射率; n_2 为空气的折射率; m 为任意整数,对应不同衍射级次, $m > 0$ 时(1)式、(2)式取正, $m < 0$ 时取负; p 为光栅周期。(1)式和(2)式分别为等离子体光栅反射和透射时衍射级数与波长的关系。

1.2 表面等离子体共振原理

众所周知,自由电子存在于金属内部的同时,也大量存在于其表面,且组成独立的自由电子团,也就是等离子体(plasmon);另一方面,将存在于金属表面高活性的自由电子团定义为表面等离子体。当入射光照射到金属表面时,会与它产生的自由电子团振动频率相同从而引起共振,便产生了表面等离子体共振^[10](surface plasmon resonance, SPR)。与 SPR 一样,光和电子的相互作用也可以产生局域表面等离子体共振(localized surface plasmon resonance, LSPR)。当光束照射到金属表面时,金属表面的自由电子迅速激发,并与入射光中的光子以一致的频率在晶格中共振^[11],在光谱上显示出紫外可见光范围内的强共振吸收或散射峰。而对于金纳米材料, LSPR 特性明显改变的直观表现是峰值和颜色的变化,因而可以在传感器^[12]等众多领域中发挥关键的作用。

表面晶格共振是由金属颗粒的局域表面等离子体与瑞利反常^[13](rayleigh abnormal, RAs)产生衍射耦合引起的。瑞利反常,这是由平行于基板表面的衍射阶数叠加和来自单个纳米线的局域表面等离子体共振(LSPR)引起的。瑞利反常产生时,

某些衍射级次对应的衍射角恰好为 90° , 意味着它们处于倏逝波^[8]或传播波(不附带能量或附带有能量)的临界状态。

由光栅方程可知, 假设光栅常数^[8]为 a , 空气中的入射光照射到光栅上的角度为 θ , ε_1 代表金薄膜的介电常数, ε_2 代表空气介电常数, 沿光栅表面产生 SPPs^[8] 的条件可以写成:

$$k_x = \frac{\omega}{c} n_1 \sin \theta + mg = \pm \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}} = k_{\text{spp}} \quad (3)$$

式中: g 为光栅波矢, 且 $g = 2\pi/a$, $\omega = 2\pi/\lambda$; m 表示衍射级次。

当光栅常数和入射角合适时, 金属表面可产生 SPPs 波。这种激发表面等离子体共振的方式适用于金属/电介质界面和空气/金属界面^[14]。通过计算(2)式和(3)式, 可以得出等离子体光栅透射时所产生的共振波长 λ_{spp} 为

$$\lambda_{\text{spp}} = \frac{(1 \pm \sin \theta) p n_1}{m} \quad (4)$$

式中: p 和 n_1 分别表示光栅的周期和基底的折射率。

1.3 PDMS 等离子体光栅应力应变原理

由胡克弹性定律^[15-16]可知, 物体在弹性区间内所受的外力与它单向拉伸的变量成线性关系, 即应力 σ 和应变 ε 成正比:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

式中: E 为弹性模量或杨氏模量^[16]。

在本文中, 我们采用 FDTD Solutions 模拟分析了 PDMS 基板上的等离子体晶格光栅的视向光学响应。光栅所用的材料为金, 一般而言, 金、银等金属材料都可以用来制作光栅, 但是银在制作过程中容易发生氧化, 在其表面形成一种氧化膜, 从而会对实验结果产生影响。因此, 从光学特性来看我们选择了金作为 PDMS 光栅的材料。

对等离子体光栅沿栅线方向施加压力, 改变等离子体光栅参数, 当压力变大时, 光栅的周期、占空比都会不断减小, 金膜厚度则随着压力的增大而逐渐增大。本文中将通过仿真等离子体光栅的透射率来观察光栅参数变化时对光栅共振吸收峰的影响, 并得出光栅参数对光栅应力的响应敏感程度; 其次将仿真所得结果与理论计算值作比较得出相对误差的大小。

2 等离子体光栅仿真模型结构设计

FDTD Solutions 是一款对微结构进行仿真设

计分析的高性能软件。该软件能经过脚本语言构建任何形状的二维和三维结构, 借助软件提供的综合数据分析和作图, 可以很快地解决问题。此外, FDTD Solutions^[17] 可以根据本文设计模型结构进行选取, 可以用来建立仿真周期性光栅结构, 并对简化的二维模型进行设计分析。用 FDTD 仿真光栅, 需要建立物理模型、定义仿真区域、设置光源和监视器, 最后进行运行及分析。

我们用 FDTD 建立了具有边界周期条件的 y - z 平面等离子体晶格光栅的视向光学响应的二维模型。如图 2 所示, 已知 PDMS 基底的折射率 n_1 为 1.55, 空气介质中的折射率 n_2 设置为 1, 光栅的材料是 Au, 用 p 表示光栅周期, 用 h 表示刻槽深度, 其中金膜的厚度为 b , PDMS 宽度为 w , 平面波斜入射时的角度为 θ , 光栅的占空比 $f = w/p$ 。

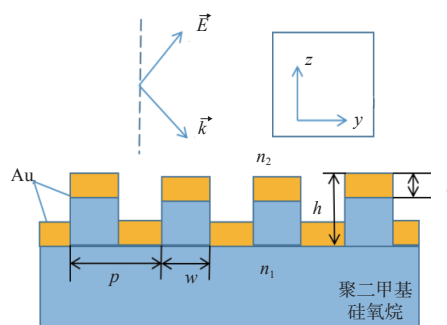


图2 光栅结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grating structure

光栅上的光沿 y 方向线性极化, 考虑到模拟的光栅在结构上属于周期性, 因此在仿真中竖直方向结构为无限周期边界条件, 选择完全边界条件^[18-20]将照射的电磁波全部吸收无反射, 水平方向结构则采用周期边界条件。设置周期性边界条件后, 建立仿真区域时只需对其中一个周期进行建模, 便可实现对整个周期排列的结构进行电磁场仿真分析^[21], 极大地提高了工作效率。

3 仿真结果与理论对比

3.1 周期改变对等离子体光栅共振峰的影响

光从空气向 PDMS 薄膜光栅入射时, 此时光入射的角度 θ 为 50° 。考虑光的入射波长范围为 $0.4 \mu\text{m} \sim 1.5 \mu\text{m}$, PDMS 宽度 w 为 $0.25 \mu\text{m}$, 光栅槽深 h 为 $0.12 \mu\text{m}$, 其中金膜厚度 b 为 $0.02 \mu\text{m}$, 占空比 f 为 50%。本仿真中光栅周期 p 的取值范围为 $0.4 \mu\text{m} \sim 0.7 \mu\text{m}$, 步长为 $0.05 \mu\text{m}$, 用 FDTD Solutions 进行仿真得到的透过率结果如图 3 所示。

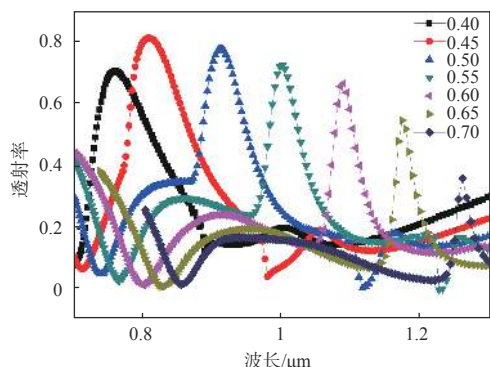


图3 不同周期的共振谱

Fig. 3 Resonance spectrum of different periods

由图3可知,在波长相同的入射光条件下,不同周期激发产生表面等离子体共振峰的位置不同。其次,当周期从 $0.4\ \mu\text{m}$ ~ $0.45\ \mu\text{m}$ 变化时,光栅的共振峰光谱发生了红移,共振深度逐渐增加,共振半峰宽度逐渐减小;但当周期在 $0.45\ \mu\text{m}$ ~ $0.7\ \mu\text{m}$ 区间内时,共振峰光谱又发生红移,共振深度逐渐缩小,共振半峰宽度随之递减,但其激发的等离子体光栅共振吸收峰的波长随着周期变大而逐渐增大,且周期每增大 $0.05\ \mu\text{m}$,对应的共振峰波长增加 $0.1\ \mu\text{m}$ 。图3可以看出周期在 $0.65\ \mu\text{m}$ ~ $0.7\ \mu\text{m}$ 时,透射率变化最明显,在 $0.7\ \mu\text{m}$ 时共振峰最尖锐,共振半峰宽度最窄,因此对应力响应最敏感的周期为 $0.7\ \mu\text{m}$ 。

图4表明了共振波长与周期的变化关系,通过(2)式计算可得周期为 $0.4\ \mu\text{m}$, $0.45\ \mu\text{m}$, $0.5\ \mu\text{m}$, $0.55\ \mu\text{m}$, $0.6\ \mu\text{m}$, $0.65\ \mu\text{m}$, $0.7\ \mu\text{m}$ 时的共振波长分别为 $0.704\ \mu\text{m}$, $0.792\ \mu\text{m}$, $0.88\ \mu\text{m}$, $0.918\ \mu\text{m}$, $1.056\ \mu\text{m}$, $1.144\ \mu\text{m}$, $1.232\ \mu\text{m}$,可知理论数值与仿真所得结果都吻合,其中周期为 $0.7\ \mu\text{m}$ 时共振波长为 $1.251\ \mu\text{m}$,相对误差为1.5%。

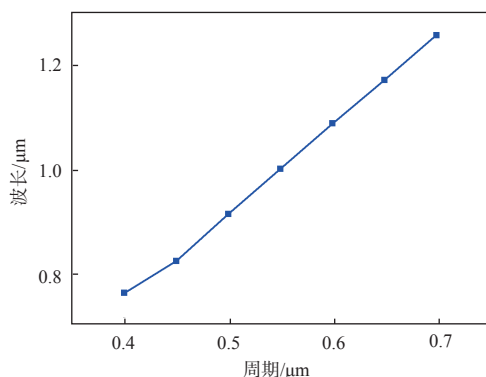


图4 共振波长与周期的变化关系

Fig. 4 Change relationship between resonance wavelength and period

3.2 金膜厚度改变对等离子体光栅共振峰的影响

不同金膜厚度会影响金属性能,当金膜厚度较薄时,其表面电子浓度低,会导致SPR响应不明显。只有金膜厚度一定、形成均匀平滑的薄膜层时,产生SPR现象才更为稳定。如果金膜厚度再逐渐增加,那么光谱曲线中的谐振共振峰耦合深度会变浅。

本文中设置其余条件不变,取 $p=0.7\ \mu\text{m}$, $f=50\%$,将金膜厚度 b 的取值范围设置为 $0.01\ \mu\text{m}$ ~ $0.07\ \mu\text{m}$,步长为 $0.01\ \mu\text{m}$,用FDTD Solutions仿真得到的透射率结果如图5所示。

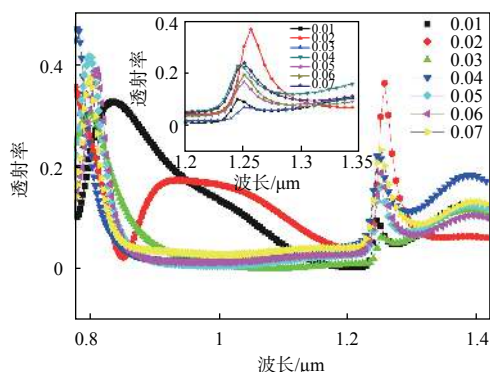


图5 不同金膜厚度的共振谱

Fig. 5 Resonance spectrum with different gold film thicknesses

其中图5中的嵌图为光栅金膜厚度改变时共振波长的局部放大图。光栅周期为 $0.7\ \mu\text{m}$ 时,由嵌图可知,金膜厚度小于 $0.02\ \mu\text{m}$ 时,共振深度增大,等离子体光栅共振波长随之增大;金膜厚度大于 $0.02\ \mu\text{m}$ 时,个别数据除外,共振深度逐渐增大,共振波长大小基本不变,且金膜厚度从 $0.01\ \mu\text{m}$ ~ $0.02\ \mu\text{m}$ 变化时,共振吸收峰深度增大得最为明显。同时金膜厚度为 $0.02\ \mu\text{m}$ 时,光栅的共振深度最深,共振半峰宽度最窄。因此可得金膜厚度为 $0.02\ \mu\text{m}$ 时,对应力的响应最为敏感。

图6表明了共振波长和金膜厚度的变化关系,可知光栅周期为 $0.7\ \mu\text{m}$ 时,FDTD仿真所得的共振波长为 $1.25\ \mu\text{m}$,与理论值对比后,其相对误差是1.4%。

3.3 占空比改变对等离子体光栅共振峰的影响

其余参数保持不变,光栅周期 p 设置为 $0.7\ \mu\text{m}$,金膜厚度 b 为 $0.02\ \mu\text{m}$,占空比 f 的取值范围为35%~65%,步长为5%,用FDTD Solutions仿真得到的透射率结果如图7所示。

其中图7中的嵌图为光栅占空比改变时共振波长的局部放大图。光栅周期为 $0.7\ \mu\text{m}$ 时,由嵌

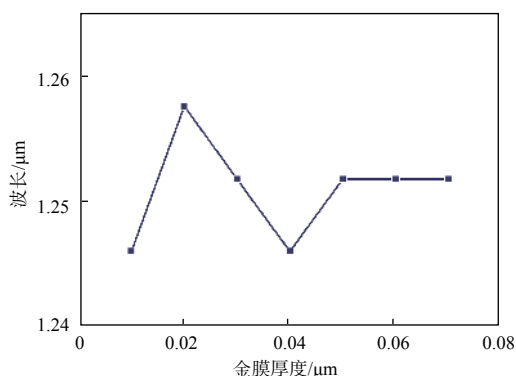


图6 共振波长和金膜厚度的变化关系

Fig. 6 Change relationship between resonance wavelength and gold film thickness

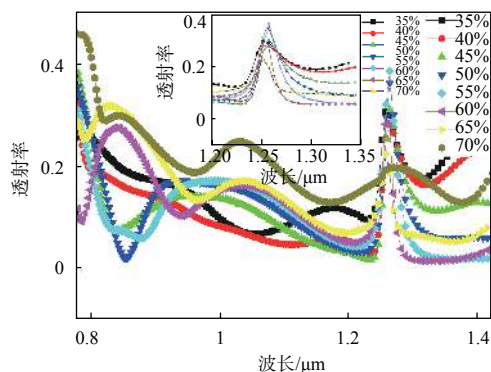


图7 不同占空比的共振谱

Fig. 7 Resonance spectrum with different duty cycle

图可知, 光栅占空比的变化并不会引起共振波长的改变。当占空比小于 55%、 f 增加时, 共振深度变深; 当占空比大于 55% 时, 共振深度变浅; 当占空比等于 55% 时, 共振半峰宽度最窄。因此在 SPR 测量中, 占空比为 55% 时对应力的响应最为敏感。

图 8 表明了共振波长和占空比的变化关系, 可知光栅周期为 $0.7 \mu\text{m}$ 时, FDTD 仿真所得的共振波长为 $1.254 \mu\text{m}$, 与理论值对比后, 其相对误差是 1.7%。

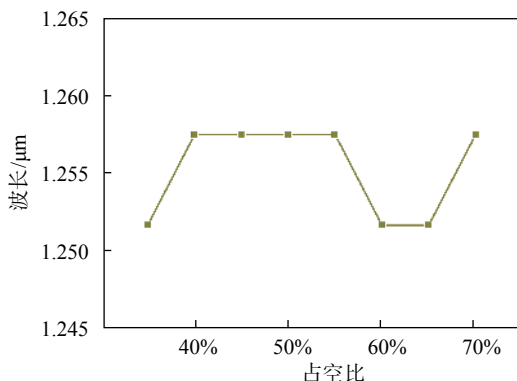


图8 共振波长和占空比的变化关系

Fig. 8 Change relationship between resonance wavelength and duty cycle

4 结论

本文利用 PDMS 薄膜优越的拉伸特性, 提出了一种以 PDMS 薄膜为基底的具有周期性边界条件的金属等离子体光栅结构。借助 FDTD Solutions 光学仿真软件, 通过对等离子体光栅施加应力, 得出了光栅周期、占空比及金膜厚度改变时对等离子体光栅共振峰波长的影响以及对力的响应敏感程度。结果表明, 当金膜厚度 b 和占空比 f 一定时, 周期 p 为 $0.7 \mu\text{m}$ 的等离子体光栅的共振半峰宽度最窄, 共振峰最尖锐; 当占空比 f 和周期 p 一定时, 金膜厚度 b 为 $0.02 \mu\text{m}$ 的光栅的共振深度最深, 共振半峰宽度最窄; 当金膜厚度 b 和周期 p 一定时, 占空比 f 为 55% 的光栅的共振深度最深, 共振半峰宽度最窄。

综上所述, 当光栅周期 $p=0.7 \mu\text{m}$, 占空比 $f=55\%$, 金膜厚度 $b=0.02 \mu\text{m}$ 时, 对光栅施加应力所产生的响应最为敏感; 其次, 将仿真所得的不同周期时的共振峰波长与理论计算值相比较可知, 二者结果相吻合。并且当周期为 $0.7 \mu\text{m}$ 时, 共振吸收峰的波长为 $1.251 \mu\text{m}$, 理论与仿真所得结果的相对误差都小于 2%。该方法可以为传感器、光谱仪等光学应用领域提供参考。

参考文献:

- [1] ZHANG Junming, WU Xiaojie, MA Xiaohui, et al. Simulation design of transmission grating based on spectral beam combining technique[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(3): 514-520.
张俊明, 吴肖杰, 马晓辉, 等. 基于光谱合束技术的透射光栅模拟设计[J]. 应用光学, 2017, 38(3): 514-520.
- [2] GU Yanni, XUAN Yan. Research on preparation technology of metal tunable grating based on PDMS[J]. Materials Reports, 2011, 25(16): 27-29, 47.
顾艳妮, 宣艳. 基于PDMS金属可调谐光栅的制备工艺研究[J]. 材料导报, 2011, 25(16): 27-29, 47.
- [3] LI Taiping, LI Xiaoying, YU Yiting, et al. Experimental investigation of diffraction property for a MEMS-based pitch-tunable grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(4): 618-621.
李太平, 李晓莹, 虞益挺, 等. 一种MEMS周期可调光栅衍射特性的实验研究[J]. 光子学报, 2010, 39(4): 618-621.
- [4] LI L Q, GAO P, SCHUERMAN K C, et al. Control-

- lable growth and field-effect property of monolayer to multilayer microstrips of an organic semiconductor[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132(26): 8807-8809.
- [5] LI L Q, TANG Q X, LI H X, et al. An ultra closely pi-stacked organic semiconductor for high performance field-effect transistors[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(18): 2613-2617.
- [6] LI L Q, HU W P, FUCHS H, et al. Controlling molecular packing for charge transport in organic thin films[J]. *Advanced Energy Materials*, 2011, 1(2): 188-193.
- [7] HOU Tianfei, ZHAO Fusheng, WANG Bin, et al. Micro-nano structure transfer method of fiber end face based on PDMS[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 631-636.
侯天斐, 赵复生, 王斌, 等. 基于PDMS的光纤端面微纳结构转移法[J]. *应用光学*, 2020, 41(3): 631-636.
- [8] MENG Yancheng. Preparation and application research of PDMS film-based flexible micro-nano structure[D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2019.
孟彦成. PDMS薄膜基柔性微纳结构的制备及其应用研究[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2019.
- [9] BELLAN P M. Fundamentals of plasma physics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [10] ZHOU Jianqiao, JING Ning, WANG Zhibin, et al. Side-grinding U-shaped gold sputter plastic fiber SPR sensor[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(3): 511-516.
周建乔, 景宁, 王志斌, 等. 侧边抛磨的U型金溅射塑料光纤等离子体共振传感器[J]. *应用光学*, 2019, 40(3): 511-516.
- [11] ZHOU Chuanhong, WANG Lei, NIE Ya, et al. The rigorous coupled-wave analysis of guided-mode resonance in dielectric gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(1): 68-73.
周传宏, 王磊, 聂娅, 等. 介质光栅导模共振耦合波分析[J]. *物理学报*, 2002, 51(1): 68-73.
- [12] CHEN Zhitao, ZHANG Rui, JIANG Hui, et al. Application progress of local surface plasmon resonance in visual sensing[J]. *Fujian Analytical Testing*, 2017, 26(6): 11-16.
陈志涛, 张睿, 姜晖, 等. 局域表面等离子体共振在可视化传感中的应用进展[J]. *福建分析测试*, 2017, 26(6): 11-16.
- [13] LIU Fan, YUAN Jinshe, LI Haijun. Transmissive metal grating coupled SPR sensor[J]. *Semiconductor Technology*, 2012, 37(6): 452-455.
刘帆, 苑进社, 李海军. 透射式金属光栅耦合SPR传感器[J]. *半导体技术*, 2012, 37(6): 452-455.
- [14] HASMAN E, BOMZON Z, NIV A, et al. Polarization beam-splitters and optical switches based on space-variant computer-generated subwavelength quasi-periodic structures[J]. *Optics Communications*, 2002, 209(1-3): 45-54.
- [15] YANG Jiangtao, TANG Jun, WANG Yubo, et al. Tunable grating for stress measurement[J]. *Optical Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1596-1603.
杨江涛, 唐军, 王玉波, 等. 用于应力测量的可调谐光栅[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(7): 1596-1603.
- [16] GAO Jingjing, CHEN Yongli, HUANG Qian, et al. Design of grating structure model based on FDTD[J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(7): 113-115.
高敬敬, 陈永利, 黄倩, 等. 基于FDTD的光栅结构模型设计[J]. *包装工程*, 2015, 36(7): 113-115.
- [17] CUI Min. Research on preparation technology of grating based on PDMS[D]. Shanxi: North University of China, 2013.
崔敏. 基于PDMS的光栅制备工艺研究[D]. 山西: 中北大学, 2013.
- [18] HU Laiping, LIU Zhanjun. Absorption boundary conditions in FDTD method[J]. *Modern Electronic Technology*, 2003(9): 30-32.
胡来平, 刘占军. FDTD方法中的吸收边界条件[J]. *现代电子技术*, 2003(9): 30-32.
- [19] RAMADAN O. Unsplit-field PML algorithm for truncating nonlinear FDTD domains[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 26(8): 1151-1161.
- [20] YU Z Y. A simple and effective method for the reflection coefficient extraction in rectangular waveguide discontinuity analysis by the FDTD[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1997, 15(1): 57-59.
- [21] HAN Linxuan. Research on optical performance of perovskite solar cells by FDTD-Solutions[D]. Jiangsu: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
韩林轩. FDTD-Solutions对钙钛矿太阳能电池的光学性能研究[D]. 江苏: 南京航空航天大学, 2018.