

基于非对称谐振腔增强石墨烯紫外光吸收

罗国平*, 陈星源, 胡素梅, 朱伟玲

广东石油化工学院理学院, 广东 茂名 525000

摘要 基于布拉格光栅/金属薄膜非对称谐振腔设计一种增强石墨烯紫外光吸收的多层薄膜结构。采用传输矩阵法模拟计算多层薄膜结构参数与石墨烯吸收光谱的关联规律, 得到最佳结构参数。计算结果表明, 非对称谐振腔共振效应有效促进入射光与石墨烯的相互作用。优化后石墨烯在 275 nm 波长处的紫外光吸收率高达 0.9534, 半峰全宽仅为 2.0 nm。进一步研究表明布拉格光栅的中心波长和光入射角可以调制石墨烯的吸收峰值波长和峰值大小, 增加石墨烯层数能够同时提升紫外光吸收率和扩展吸收光谱。该结构也可以增强其他宽禁带二维材料的紫外吸收性能。

关键词 薄膜; 光吸收; 布拉格反射器; 等离激元; 石墨烯

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1531002

Ultraviolet Absorption of Graphene Enhanced by Asymmetric Resonant Cavity

Luo Guoping*, Chen Xingyuan, Hu Sumei, Zhu Weiling

School of Science, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, Guangdong 525000, China

Abstract Based on the Bragg grating/metallic film asymmetric resonant cavity, a multi-layer film structure that enhances the ultraviolet absorption of graphene is designed. The transfer matrix method is used to simulate and calculate the correlation between the film structure parameters and the absorption spectra of graphene. As a result, the optimal structure parameters are obtained. The calculation results show that the resonance effect of the asymmetric resonant cavity strongly promotes the interaction between incident light and graphene. After optimization, the ultraviolet absorption of graphene at 275 nm is up to 0.9534 and the full width at half maximum is only 2.0 nm. Further research indicates that the central wavelength of the Bragg grating and the incident angle of light can regulate the wavelength and size of the graphene absorption peak. Increasing the number of graphene layers is able to enhance the ultraviolet absorption of graphene and expand absorption spectra. The proposed structure can also promote the ultraviolet absorption of other wide-band-gap two-dimensional materials.

Key words thin films; light absorption; Bragg reflectors; plasmon polaritons; graphene

OCIS codes 310.6860; 300.1030; 230.1480

1 引言

光电探测器可探测的电磁波包括紫外光、可见光和近红外光等波段, 其中紫外光又可以分为近紫外光(315~400 nm)、远紫外光(280~315 nm)和超

短紫外光(100~280 nm)。近年来, 紫外光电探测器在火焰探测、水净化、军事追踪、夜视成像和医学检测等领域得到了广泛的应用^[1-2]。尽管 Si 基光电探测器在紫外光区域的响应度较低, 但其仍然作为主要的商用紫外光电探测器。为了提升紫外光电探

收稿日期: 2020-12-07; 修回日期: 2021-02-08; 录用日期: 2021-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(12074441)、广东省自然科学基金(2018A030307028, 2019A1515010916)、广东省教育厅青年创新人才项目(2017KQNCX136)、广东石油化工学院科研基金(2017rc20)

通信作者: *guopingluo@126.com

测器的响应度,研究者将目光投向 $\text{ZnO}^{[3]}$ 、 $\text{SnO}_2^{[4]}$ 、 $\text{TiO}_2^{[5]}$ 、 $\text{GaN}^{[6]}$ 、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3^{[7]}$ 和 $4\text{H-SiC}^{[8]}$ 等宽带隙半导体材料。基于宽带隙半导体材料的光电探测器具有暗电流低、探测率高和响应速度快等优势^[9-10],然而这一类光电探测器目前还存在材料结晶尺寸小、光电性能难以调控以及不利于器件加工和集成等问题^[11]。

石墨烯作为单原子层厚的零带隙二维材料,具有独特的光学、电学、热学和机械性能,而且其吸收光谱范围宽,载流子迁移率大($2.3 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$),热导率好(3000 W/mK),易于集成和大规模生产,已被应用于场效应晶体管、光伏电池、发光二极管、触摸屏和柔性智能窗户等光电器件^[12-15]。基于石墨烯及其异质结的光电探测器也受到了研究者的广泛关注^[16-18]。石墨烯光电探测器的工作范围几乎覆盖了从紫外光到太赫兹的电磁波谱^[19-21]。然而,石墨烯的本征光吸收率只有 2.3% 左右,不利于光电探测器的正常工作,为此国内外研究者设计和制备了大量的光学器件结构并用于增强石墨烯在各个波段的光吸收率^[22-24]。Zhou 等^[25] 基于塔姆等离激元和严格耦合的波导共振结构增强石墨烯的近红外光吸收,通过改变结构参数和入射角得以调控吸收峰值,石墨烯的光吸收率从 2.3% 提高至 75.0%,半峰全宽(FWHM)仅为 2.5 nm。Furchi 等^[26] 通过设计法布里-珀罗光学微腔的共振波长,将石墨烯光电探测器在 850 nm 波长处的光吸收率提高了 26 倍,响应度达到 21 mA/W。Fang 等^[27] 将雪花状分形超表面用于增强石墨烯光电探测器的响应度,石墨烯光电探测器的光电压在宽光谱范围内得以提高,并且呈现对波长、入射角和偏振态的不敏感性。Xu 等^[28] 使用金属薄膜/石墨烯/布拉格反射器可以产生塔姆等离激元,其能够将石墨烯在 270 nm 波长处的光吸收率提高至 83.0%。Guo 等^[29] 基于金属-介质-金属的双等离激元结构提高了石墨烯在 240~485 nm 波段内的光吸收,优化后的吸收峰值达到 54.0%。尽管上述方法将石墨烯在紫外光区域的光吸收率提高了数倍,但由于金属薄膜的附加光损耗较大,光吸收率仍然有很大提升空间。

本文提出一种基于布拉格光栅/金属薄膜非对称谐振腔增强石墨烯紫外光吸收的多层薄膜结构。该结构将石墨烯在 275 nm 波长处的光吸收率提高至 0.9534,FWHM 仅为 2.0 nm。首先采用光学传输矩阵法研究多层薄膜结构参数对石墨烯吸收光谱的影响规律,用来优化间隔层和覆盖层的厚度。然

后进一步分析布拉格光栅的中心波长与石墨烯的吸收峰值位置和峰值大小的关联。最后研究入射光偏振态、入射角和原子层数对石墨烯吸收光谱的影响机制,分析该结构增强宽禁带二维材料紫外光吸收的普适性。该研究提供一种增强石墨烯紫外光吸收率的简易结构,为制备高性能紫外光电探测器等光电器件提供一种新的途径。

2 基本原理

2.1 器件结构

基于布拉格光栅/金属薄膜的非对称共振微腔多层薄膜结构如图 1 所示。布拉格光栅的周期数为 4,中心波长为 210 nm,由光学厚度为 1/4 波长的 ZnS 和 LiF 组成。ZnS 和 LiF 的厚度分别为 d_2 和 d_3 ,折射率分别为 2.86 和 1.41。覆盖层为 ZnS,厚度为 d_1 。间隔层为 LiF,厚度为 d_4 。单层石墨烯的光学常数来自文献^[30],厚度为 0.34 nm。金属层为 Al 薄膜,厚度为 d_5 。Al 薄膜的光学常数来自文献^[31]。

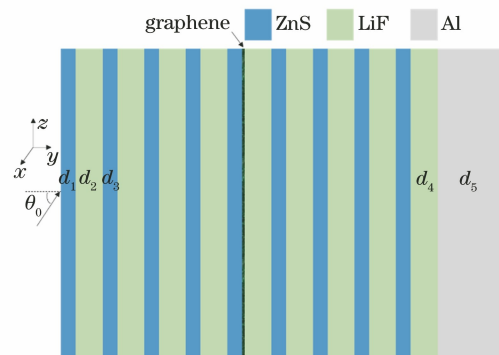


图 1 基于布拉格光栅/金属薄膜的非对称共振微腔多层薄膜结构

Fig. 1 Asymmetric resonant microcavity multilayer film structure based on Bragg grating/metal film

2.2 模拟方法

采用光学传输矩阵法^[32]分析入射光电场在多层薄膜结构中的分布情况,并进一步求解光吸收率和反射率。考虑到图 1 的多层薄膜结构,假设每一层薄膜均是各向同性且表面平整。运用麦克斯韦方程组和边界条件可以得到相邻两层薄膜分界面处的界面矩阵,表达式为

$$\mathbf{L}_j = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 + \eta_{j-1,j} & 1 - \eta_{j-1,j} \\ 1 - \eta_{j-1,j} & 1 + \eta_{j-1,j} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{L}_j 表示从第 $j-1$ 层薄膜到第 j 层薄膜的界面矩阵; $\eta_{j-1,j}$ 为中间参量。对于 TE(Transverse Electric)偏振, $\eta_{j-1,j}$ 可表示为

$$\eta_{j-1,j} = \frac{n_j \cos \theta_j}{n_{j-1} \cos \theta_{j-1}}, \quad (2)$$

式中: θ 为光传输角度; n 为复折射率。对于 TM (Transverse Magnetic) 偏振, $\eta_{j-1,j}$ 可表示为

$$\eta_{j-1,j} = \frac{n_{j-1} \cos \theta_j}{n_j \cos \theta_{j-1}}. \quad (3)$$

在每一层薄膜中的相位矩阵表示为

$$P_j = \begin{bmatrix} \exp\left(\frac{-2i\pi d_j \cos \theta_j}{\lambda}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{2i\pi d_j \cos \theta_j}{\lambda}\right) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: d 为薄膜的厚度; λ 为入射光波长。在界面处 θ 和 n 满足 Snell 公式, 即

$$n_j \sin \theta_j = n_{j-1} \sin \theta_{j-1}. \quad (5)$$

由界面矩阵和相位矩阵的乘积可得到整个多层薄膜结构的传输矩阵 M , 因此多层薄膜结构的光吸收率可表示为

$$A = 1 - \left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2 - \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2, \quad (6)$$

式中: M_{11} 和 M_{21} 为 M 中的元素。 $\left| \frac{M_{21}}{M_{11}} \right|^2$ 为反射

率, $\left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2$ 为透射率。

3 分析与讨论

在波长为 274 nm 的紫外光垂直入射的情况下, 归一化电场强度在多层薄膜结构中的分布情况如图 2(a) 所示, 其中 E 为光电场强度。其中覆盖层和间隔层的厚度分别为 18 nm 和 37 nm, 金属层的厚度为 100 nm。入射光电场在两个布拉格光栅之间形成极大值, 而石墨烯刚好位于该极大值所在位置附近。因此, 基于布拉格光栅/金属薄膜的非对称共振微腔有利于促进入射光与石墨烯的相互作用, 提高石墨烯的光吸收率。图 2(b) 为多层薄膜结构的吸收光谱。从图 2(b) 可以看到, 对于非对称结构, 石墨烯在波长 274 nm 处的吸收峰值为 0.91, FWHM 为 3.0 nm, 多层薄膜结构的吸收峰值达到 0.9620; 对于对称结构 (没有覆盖层、间隔层和金属层), 石墨烯在波长 278.5 nm 处的吸收峰值仅为 0.2593, FWHM 为 9.5 nm, 说明使用非对称结构能够显著增强石墨烯的紫外光吸收率。

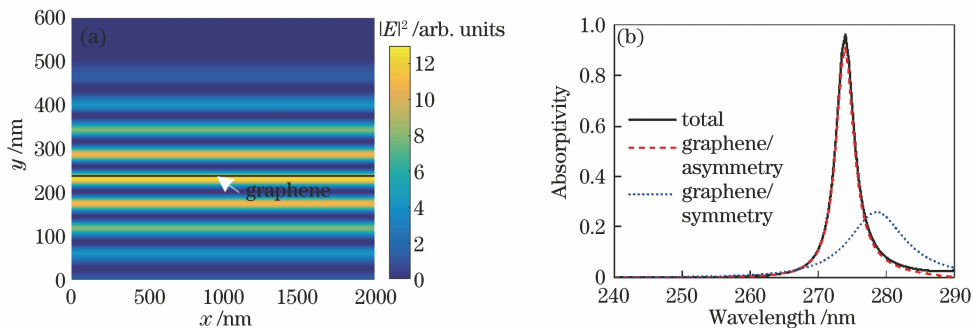


图 2 多层薄膜结构的实验结果。(a) 归一化电场强度; (b) 吸收光谱

Fig. 2 Experimental results of multilayer thin film structure. (a) Normalized electric field intensity; (b) absorption spectra

金属薄膜的光学特性对谐振腔的共振效应具有显著影响。图 3(a) 为石墨烯采用不同金属薄膜的吸收光谱。从图 3(a) 可以看到, 对于相同的结构参数, 采用 100 nm 厚的 Au、Ag 和 Cu 薄膜, 石墨烯的吸收峰值波长同样为 274 nm, 吸收峰值分别为 0.6043、0.5241 和 0.5691, 远低于采用 Al 薄膜的 0.9100。图 3(b) 为多层薄膜结构采用不同金属层的反射光谱。从图 3(b) 可以看到, 采用 Au、Ag 和 Cu 薄膜的最小反射率都十分接近于 0, 与 Al 薄膜无明显差异。由于 Au、Ag 和 Cu 薄膜的附加光损耗较大, 所以石墨烯的光吸收率较低, 因此采用 Al 薄膜有利于减少附加的光损耗, 提高石墨烯的紫外

光吸收率。

进一步分析间隔层和覆盖层的厚度对石墨烯的吸收光谱和归一化电场强度分布的影响规律。图 4(a) 为石墨烯采用不同间隔层厚度的吸收光谱, 其中覆盖层的厚度为 20 nm。从图 4(a) 可以看到, 当间隔层的厚度从 30 nm 增加至 50 nm 时, 石墨烯的吸收峰值从 0.8972 提高至 0.9306, 峰值波长几乎没有改变。图 4(b) 为石墨烯采用不同间隔层厚度的归一化电场强度分布情况。从图 4(b) 可以看到, 覆盖层的厚度对电场强度分布有一定的调制作用, 影响入射光与石墨烯的相互作用。图 4(c) 为石墨烯采用不同覆盖层厚度的吸收光

谱,其中间隔层的厚度为 50 nm。从图 4(c)可以看到,当覆盖层的厚度从 15 nm 增加至 25 nm 时,石墨烯的吸收峰值先从 0.8141 提高至 0.9306,而后稍微下降至 0.9263,峰值波长从 274 nm 移至

275 nm。图 4(d)为石墨烯采用不同覆盖层厚度的归一化电场强度分布情况。从图 4(d)可以看到,覆盖层的厚度同样对电场强度分布有一定的调制作用。

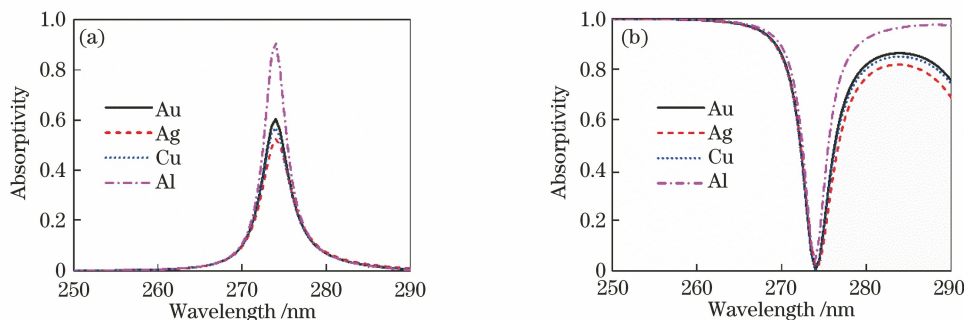


图 3 不同金属薄膜的光谱。(a) 石墨烯的吸收光谱;(b) 多层薄膜结构的反射光谱

Fig. 3 Spectra of different metal films. (a) Absorption spectra of graphene; (b) reflection spectra of multilayer thin film structures

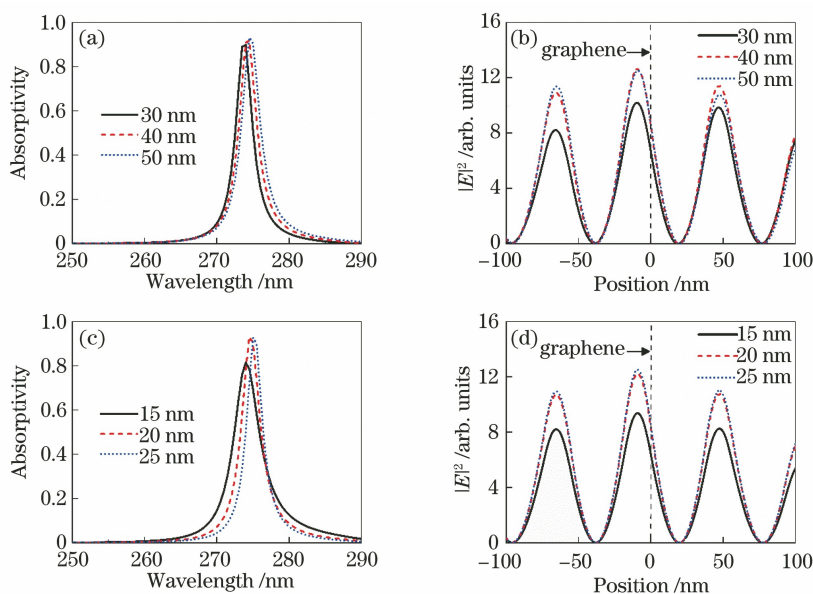


图 4 不同间隔层厚度和覆盖层厚度的性能曲线。不同间隔层厚度下,(a)吸收光谱,(b)归一化电场强度分布;不同覆盖层厚度下 (c) 吸收光谱,(d) 归一化电场强度分布

Fig. 4 Performance curves of different spacer thickness and overburden thickness. Under different thickness of spacer layer, (a) absorption spectra, (b) normalized electric field intensity distribution; under different thicknesses of cover layer, (c) absorption spectra, (d) normalized electric field intensity distribution

进一步优化覆盖层和间隔层的厚度,可以得到石墨烯在 275 nm 波长处的光吸收率与覆盖层和间隔层厚度的关系,如图 5(a)所示。从图 5(a)可以看到,覆盖层和间隔层的厚度具有较大的调整范围,都可以确保石墨烯的光吸收率在 0.9000 以上,覆盖层和间隔层的最优厚度分别为 23 nm 和 50 nm。优化后多层薄膜结构的吸收光谱和反射光谱如图 5(b)所示。从图 5(b)可以看到,石墨烯在 275 nm 波长处的吸收峰值为 0.9534,FWHM 仅为 2.0 nm,多

层薄膜结构的吸收峰值为 0.9998。

改变布拉格光栅的中心波长将会对布拉格光栅/金属薄膜非对称谐振腔的共振效应造成影响,进而影响石墨烯的吸收峰值波长^[33]。图 6(a)为不同布拉格光栅的中心波长所对应的石墨烯的吸收光谱。图 6(b)为石墨烯的吸收峰值及其峰值波长与布拉格光栅的中心波长的关系曲线。从图 6 可以看到,随着布拉格光栅的中心波长从 180 nm 增加至 220 nm,石墨烯的吸收峰值由 0.6970 提高至

0.9538, 峰值波长从 239 nm 红移至 292 nm, 说明石墨烯的窄带吸收特性未受到布拉格光栅中心波长的

影响, FWHM 保持低于 3.0 nm。石墨烯的吸收特性与布拉格光栅的中心波长的关系如表 1 所示。

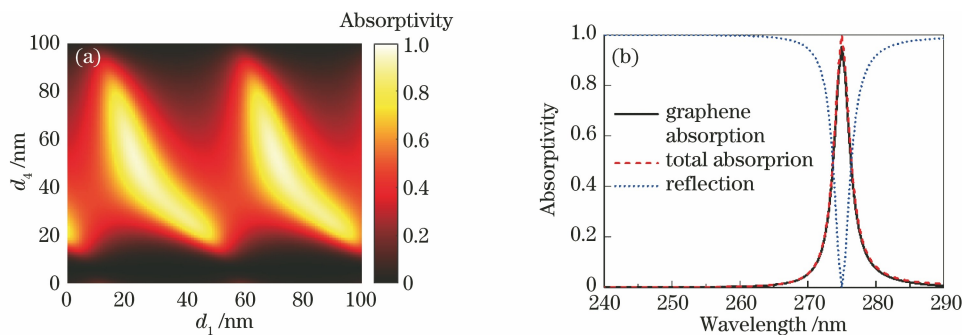


图 5 优化覆盖层和间隔层厚度的结果。(a) 275 nm 波长处石墨烯的吸收率与覆盖层厚度和间隔层厚度的关系; (b) 优化后的多层薄膜结构的吸收光谱和反射光谱

Fig. 5 Results of optimizing thicknesses of cover layer and spacer layer. (a) Relationship between absorption rate of graphene at 275 nm and thicknesses of cover layer and spacer layer; (b) absorption and reflection spectra of optimized multilayer thin film structure

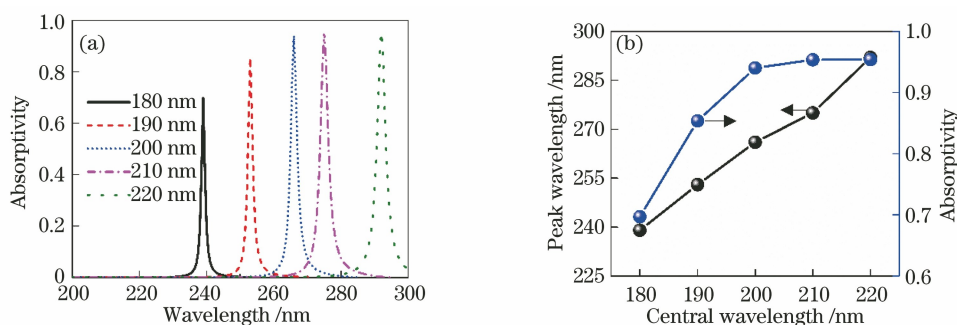


图 6 布拉格光栅的中心波长对石墨烯吸收特性的影响。(a) 吸收光谱; (b) 峰值波长和吸收峰值

Fig. 6 Effect of central wavelength of Bragg grating on absorption characteristics of graphene. (a) Absorption spectra; (b) peak wavelength and absorption peak

表 1 石墨烯的吸收特性与布拉格光栅的中心波长的关系
Table 1 Relationship between absorption properties of graphene and central wavelength of Bragg grating

Central wavelength /nm	Peak wavelength /nm	Absorption peak /%	FWHM / nm
180	239	69.70	1.0
190	253	85.36	1.0
200	266	94.01	2.0
210	275	95.34	2.0
220	292	95.38	2.5

入射光的偏振态和入射角对石墨烯的吸收光谱也存在一定的影响。图 7(a)和图 7(b)分别为 TE 偏振光和 TM 偏振光在不同入射角下的石墨烯吸收峰值和峰值波长。从图 7 可以看到,随着入射角的增大,吸收峰值呈现下降趋势, TM 偏振光的吸收峰值下降十分显著;峰值波长随着入射角的增大而发生蓝移,而且与入射角满足线性关系, TM 偏振光的峰值波长随入射角的增大蓝移非常明显,这是由

于不同偏振态的入射光的等离激元共振波长发生分离^[34]。

当石墨烯的层数比较少时,仍然呈现出二维材料的特性,为此进一步研究石墨烯的层数对其吸收特性的影响。图 8 为石墨烯的吸收峰值和 FWHM 与石墨烯层数的关系。从图 8 可以看到,随着石墨烯的层数从 1 层增加至 6 层,吸收峰值先有比较明显的提升后趋于饱和,吸收峰值可达到 0.9900; FWHM 与石墨烯的层数呈线性关系,当石墨烯从 1 层增加至 6 层时,FWHM 从 2.0 nm 提高至 18.0 nm。采用多层石墨烯不但可以提高吸收峰值,同时也能够拓宽吸收光谱的范围,这一结果与文献^[35]的研究结论相一致。

为了进一步说明布拉格光栅/金属薄膜非对称结构的普遍适用性,本文分析该结构对其他宽禁带二维材料,如单层二硫化钼(MoS₂)的紫外光吸收性能的影响。单层 MoS₂ 的厚度为 0.615 nm,其在紫

外光波段具有较大的吸收系数^[36]。将图 1 多层薄膜结构中的石墨烯替换为单层 MoS₂, 调整覆盖层和间隔层的厚度分别为 20 nm 和 58 nm, 可增强单层 MoS₂ 的紫外光吸收性能。含有单层 MoS₂ 的多

层薄膜结构的吸收光谱和反射光谱如图 9 所示。从图 9 可以看到, 单层 MoS₂ 在 275 nm 处形成吸收窄峰, 吸收峰值为 0.9635, FWHM 为 3.0 nm, 多层薄膜结构的吸收峰值为 0.9999。

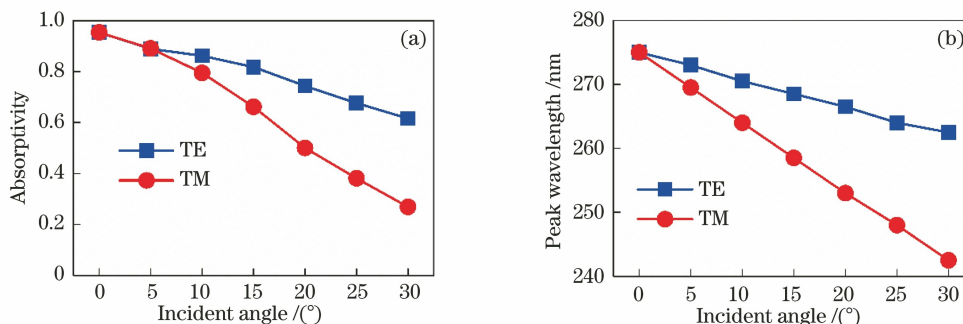


图 7 光入射角和偏振态对石墨烯吸收特性的影响。(a)吸收峰值;(b)峰值波长

Fig. 7 Influence of light incident angle and polarization on absorption properties of graphene.

(a) Absorption peak; (b) peak wavelength

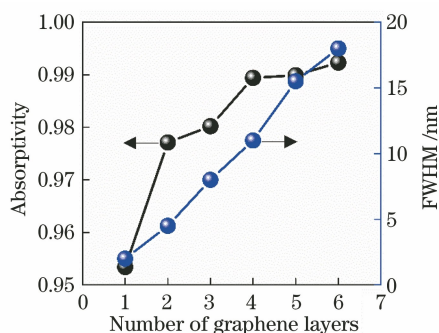


图 8 石墨烯的吸收峰值和半峰全宽与石墨烯层数的关系

Fig. 8 Relationship between absorption peak and FWHM of graphene and number of graphene layers

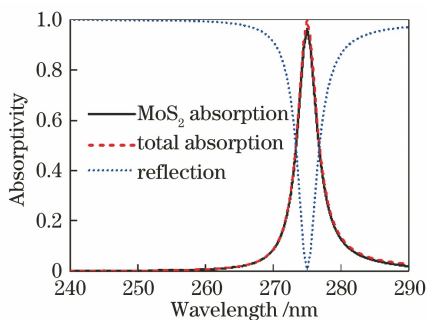


图 9 含有单层 MoS₂ 多层薄膜结构中的吸收光谱和反射光谱

Fig. 9 Absorption and reflection spectra of multilayer structure with monolayer MoS₂

4 结 论

本文利用布拉格光栅/金属薄膜的非对称结构来产生微腔效应,可以有效增强紫外光与石墨烯之

间的相互作用,能够将石墨烯在 275 nm 波长处的光吸收率提高至 0.9534,相比其本征光的吸收率增加了 40 倍。基于光学传输矩阵法模拟计算表明电场强度在布拉格光栅之间形成极大值,有效促进入射光和石墨烯的相互作用,提高石墨烯在紫外光波段的吸收率。探讨多层薄膜结构参数对单层石墨烯吸收性能的调控作用。研究结果表明,石墨烯的吸收峰值与间隔层和覆盖层的厚度存在关联。石墨烯的吸收峰值波长随着布拉格光栅中心波长的增大而增大。进一步研究发现,光入射角和偏振态可调控石墨烯的吸收峰值和峰值波长。该结构同样适用于增强其他宽禁带二维材料(如单层 MoS₂)的紫外光吸收性能。本文的研究结果为实现新型高性能紫外光电探测器提供新思路。

参 考 文 献

- [1] Shang H M, Dai M J, Gao F, et al. Progress in inorganic ultraviolet photoelectric materials [J]. Materials China, 2019, 38(9): 875-886. 尚慧明, 戴明金, 高峰, 等. 无机紫外光电探测器材料研究进展[J]. 中国材料进展, 2019, 38(9): 875-886.
- [2] Chen J X, Ouyang W, Yang W, et al. Recent progress of heterojunction ultraviolet photodetectors: materials, integrations, and applications [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30 (16): 1909909.
- [3] Guo F, Yang B, Yuan Y, et al. A nanocomposite ultraviolet photodetector based on interfacial trap-controlled charge injection [J]. Nature

- Nanotechnology, 2012, 7(12): 798-802.
- [4] Zhao J L, Deng R, Qin J M, et al. Photoresponse enhancement in SnO₂-based ultraviolet photodetectors via coupling with surface plasmons of Ag particles [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 748: 398-403.
- [5] Xu X, Chen J, Cai S, et al. A real-time wearable UV-radiation monitor based on a high-performance p-CuZnS/n-TiO₂ photodetector [J]. Advanced Materials, 2018, 30(43): e1803165.
- [6] Lee C J, Won C H, Lee J H, et al. Selectively enhanced UV-A photoresponsivity of a GaN MSM UV photodetector with a step-graded Al_xGa_{1-x}N buffer layer[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1684.
- [7] Zhang D, Zheng W, Lin R C, et al. High quality β-Ga₂O₃ film grown with N₂O for high sensitivity solar-blind-ultraviolet photodetector with fast response speed [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 735: 150-154.
- [8] Chen X P, Zhu H L, Cai J F, et al. High-performance 4H-SiC-based ultraviolet p-i-n photodetector[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(2): 024505.
- [9] Chen H, Liu H, Zhang Z, et al. Nanostructured photodetectors: from ultraviolet to terahertz [J]. Advanced Materials, 2016, 28(3): 403-433.
- [10] Chen H Y, Liu K W, Hu L F, et al. New concept ultraviolet photodetectors [J]. Materials Today, 2015, 18(9): 493-502.
- [11] Xie C, Lu X T, Tong X W, et al. Ultrawide-bandgap semiconductors: recent progress in solar-blind deep-ultraviolet photodetectors based on inorganic ultrawide bandgap semiconductors [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(9): 1970057.
- [12] Stankovich S, Dikin D A, Dommett G H B, et al. Graphene-based composite materials [J]. Nature, 2006, 442(7100): 282-286.
- [13] Geim A K. Graphene: status and prospects [J]. Science, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [14] Zhang C L, Xin Z Q, Min C J, et al. Refractive index sensing imaging technology based on optical surface wave[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126009.
张崇磊, 辛自强, 闵长俊, 等. 基于光学表面波的折射率传感成像技术[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126009.
- [15] Yuan Z H, Xu Y, Cao B, et al. Broadband transmission infrared light modulator based on graphene plasma [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 232301.
- 袁志豪, 徐俞, 曹冰, 等. 基于石墨烯等离子体的宽带透射式红外光调制器[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 232301.
- [16] Koppens F H, Mueller T, Avouris P, et al. Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems[J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(10): 780-793.
- [17] Kong W Y, Wu G A, Wang K Y, et al. Graphene-β-Ga₂O₃ heterojunction for highly sensitive deep UV photodetector application [J]. Advanced Materials, 2016, 28(48): 10725-10731.
- [18] Gong M G, Liu Q F, Cook B, et al. All-printable ZnO quantum dots/graphene van der Waals heterostructures for ultrasensitive detection of ultraviolet light[J]. ACS Nano, 2017, 11(4): 4114-4123.
- [19] Wang J L, Fang H H, Wang X D, et al. Recent progress on localized field enhanced two-dimensional material photodetectors from ultraviolet-visible to infrared[J]. Small, 2017, 13(35): 1700894.
- [20] Long M S, Wang P, Fang H H, et al. Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(19): 1803807.
- [21] Liu C H, Chang Y C, Norris T B, et al. Graphene photodetectors with ultra-broadband and high responsivity at room temperature [J]. Nature Nanotechnology, 2014, 9(4): 273-278.
- [22] Li Z W, Lu H, Li Y W, et al. Near-infrared light absorption enhancement in graphene induced by the Tamm state in optical thin films [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0131001.
黎志文, 陆华, 李扬武, 等. 光学薄膜塔姆态诱导石墨烯近红外光吸收增强 [J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0131001.
- [23] Li Q, Lu J, Gupta P, et al. Engineering optical absorption in graphene and other 2D materials: advances and applications [J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(20): 1900595.
- [24] Cai Y J, Wang Z Y, Yan S, et al. Ultraviolet absorption band engineering of graphene by integrated plasmonic structures[J]. Optical Materials Express, 2018, 8(11): 3295-3306.
- [25] Zhou K, Lu L, Song J L, et al. Ultra-narrow-band and highly efficient near-infrared absorption of a graphene-based Tamm plasmon polaritons structure [C]//The International Photonics and Optoelectronics Meeting (POEM), October 31-November 3, 2018, Wuhan, China. Washington, D. C.: OSA, 2018: OT4A.8.
- [26] Furchi M, Urich A, Pospischil A, et al.

- Microcavity-integrated graphene photodetector [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(6): 2773-2777.
- [27] Fang J R, Wang D, de Vault C, et al. Enhanced graphene photodetector with fractal metasurface[C]// *CLEO: QELS_Fundamental Science 2016*, June 5-10, 2016, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2016: FF1B.4.
- [28] Xu Y L, Li H X, Zhou C B, et al. The ultraviolet absorption of graphene in the Tamm state[J]. *Optik*, 2020, 219: 165015.
- [29] Guo Y B, Wang S Q, Zhou Y G, et al. Broadband absorption enhancement of graphene in the ultraviolet range based on metal-dielectric-metal configuration [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 126(21): 213103.
- [30] Weber J W, Calado V E, van de Sanden M C M. Optical constants of graphene measured by spectroscopic ellipsometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(9): 091904.
- [31] McPeak K M, Jayanti S V, Kress S J P, et al. Plasmonic films can easily be better: rules and recipes [J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(3): 326-333.
- [32] Zhan T R, Shi X, Dai Y Y, et al. Transfer matrix method for optics in graphene layers[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2013, 25(21): 215301.
- [33] Liang Z J, Liu H X, Niu Y X, et al. Design and performance analysis of microcavity-enhanced graphene photodetector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(13): 138501.
梁振江, 刘海霞, 牛燕雄, 等. 基于谐振腔增强型石墨烯光电探测器的设计及性能分析[J]. *物理学报*, 2016, 65(13): 138501.
- [34] Kaliteevski M, Iorsh I, Brand S, et al. Tamm plasmon-polaritons: possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror [J]. *Physical Review B*, 2007, 76(16): 165415.
- [35] Zhu J F, Yan S, Feng N X, et al. Near unity ultraviolet absorption in graphene without patterning [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(15): 153106.
- [36] Song B K, Gu H G, Fang M S, et al. Layer-dependent dielectric function of wafer-scale 2D MoS₂ [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(2): 1801250.