文章编号:1001-5078(2022)04-0571-08

・光学技术・

# 拉盖尔 - 高斯光束入射石英基底石墨烯涂层的 透射光强分布特性研究

### 张艺伟,王明军,王 姣

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院,陕西西安710048;2. 陕西科技大学电子信息与人工智能学院,陕西西安710021)

**摘 要:**石墨烯材料在光学领域的特性吸引了众多学者进行研究。本文基于角谱衍射理论建 立了拉盖尔 - 高斯光束入射石英基底石墨烯涂层的双层结构模型,研究了拉盖尔 - 高斯光束 通过该模型的透射光强分布特性,分析了改变石英基底的方向自相关长度、拉盖尔 - 高斯光束 的拓扑荷数和石墨烯涂层的厚度对拉盖尔 - 高斯光束入射该模型的光强分布影响,且搭建了 实验来进行验证,将其结果进行对比。结果表明:随着石墨烯涂层厚度增加,拉盖尔 - 高斯光 束透过的光强随之减弱,当石墨烯涂层的厚度大于 20 nm 时,光强强度明显减弱。当石英基底 的方向自相关长度增大时,光束受粗糙面影响变大,光强分布中暗斑变多。本文研究结果可以 为石墨烯材料光学特性的研究提供支撑。

关键词:拉盖尔 - 高斯光束;角谱衍射理论;石墨烯涂层;粗糙面;光强分布 中图分类号:0437;TN929.1 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2022.04.016

# Study on transmission intensity distribution of graphene coating on quartz substrate by Laguerre-Gaussian beam incident

ZHANG Yi-wei, WANG Ming-jun, WANG Jiao

(1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. School of Electronic Information and Artificial Intelligence, Shaanxi University of Science and

Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: The properties of graphene materials in the field of optics have attracted many scholars for research. In this paper, a two-layer structure model of graphene coating with Laguerre-Gaussian beam incident on quartz substrate is established based on angular spectrum diffraction theory, and the transmission intensity distribution characteristics of Laguerre-Gaussian beam passing through this model are also studied. The effects of changing the directional autocorrelation length of quartz substrate, the topological charge number of Laguerre-Gaussian beam, and the thickness of graphene coating on the light intensity distribution of the Laguerre-Gaussian beam incident model are analyzed. The experiment is set up for verification and the results are compared. The results show that the light intensity transmitted by the Laguerre-Gauss beam decreases with the increase of the thickness of the graphene coating. When the length of directional autocorrelation of quartz substrate increases, the influence of rough surface on the light beam becomes larger, and the number of dark spots in the light intensity distribution increases. The results of this study can provide support for the study of optical properties of graphene materials.

作者简介:张艺伟(1997-),女,硕士研究生,主要研究方向为激光散射与传输研究。E-mail:2473095856@qq. com

通讯作者:王明军(1979-),男,博士,博导/硕导,教授,从事激光散射与传输,激光雷达和光电信号检测等方面的研究。 E-mail:wmjxd@ aliyun. com

收稿日期:2021-06-25

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划培育项目(No. 92052106)、国家自然科学基金项目(No. 61771385);陕西省杰 出青年科学基金项目(No. 2020JC - 42);固体激光技术重点实验室开放基金项目(No. 6142404190301);西安 市高校人才服务企业工程项目(No. GXYD14. 26)资助。

Keywords: Laguerre-Gauss beams; angular spectrum diffraction theory; graphene coating; rough surface; the light intensity distribution

# 1 引 言

在近几十年来,拉盖尔 - 高斯光束是目前研究 较多的涡旋光束之一,因其具有的许多光学特性。 使其在光学微操控<sup>[1]</sup>、光信息传输<sup>[2-4]</sup>、驱动微粒旋 转成像<sup>[5]</sup>、激光光学<sup>[6]</sup>、雷达目标探测<sup>[7-9]</sup>等领域 的应用得到了广泛的研究。而其中涡旋光束在不同 介质中传输特性的研究也成为了当下该光束研究的 一大聚焦点。目前,多研究涡旋光束在介质传播过 程中的反射光强和透射光强的场分布特性,例如:将 涡旋光束通过石英基底来进行实验研究其光强分布 变化。在实际应用中,把其光场强度的分布在一定 程度上进行改变,来得到有不同外形的光强 分布<sup>[10]</sup>。

石墨烯材料是由碳原子构成的新型二维平面薄 膜材料<sup>[11]</sup>。其碳骨架周围分布着丰富的点资源,导 致电子之间容易形成 π - π 堆叠,形成多层的石墨 结构,而且其具有相对较强的光吸收特性,这些独特 的光学特性使得石墨烯材料在光学领域具有广泛的 应用前景<sup>[12-13]</sup>。

目前,国内外学者对于涡旋光束经过不同介质 后的传输过程中,对其光强分布特性进行了深入研 究。Salla等<sup>[14]</sup>将涡旋光束通过做实验进行研究得 到了改变拓扑荷数后散斑的变化。李新忠等<sup>[15]</sup>对 涡旋光束照射毛玻璃之后的光场进行了研究。关于 石墨烯材料的研究发现,石墨烯材料的非线性响应 与其层数和石墨烯薄膜厚度相关,Hendry<sup>[16]</sup>已证实 在石墨烯层数小于6时,其非线性系数随层数和厚 度呈线性增加趋势。潘登科等人<sup>[17]</sup>研究了石墨烯 的透射系数与化学势之间的关系。石墨烯在光学领 域中的特性使研究学者们对其进行研究,从上述研 究概况可以看出目前关于石墨烯在光学领域基本上 讨论的都是平面波入射情况,关于拉盖尔 – 高斯涡 旋光束入射石墨烯涂层的界面情况较少报道。

本文利用角谱衍射理论和数字滤波技术,将石 墨烯涂层覆盖于石英基底上模拟为一组双层粗糙面 进行仿真,研究分析了拉盖尔 - 高斯光束通过该模 型的透射光强分布特性,通过改变石英基底的方向 自相关长度,石墨烯涂层的厚度,拉盖尔 - 高斯光束 的拓扑荷数这三种参数,详细讨论了其对光强分布 特性的影响,并进行了实验验证。研究结果对于激 光入射多层膜结构器件的应用具有一定的意义。

# 2 拉盖尔 - 高斯光束通过石英基底石墨烯涂层的 双层模型的理论基础

建立物理模型如图1所示,拉盖尔-高斯光束 垂直入射双层石英基底石墨烯涂层粗糙面上。



图 1 拉盖尔 - 高斯光束通过双层石英基底石墨烯涂层 Fig. 1 The Laguerre-Gaussian beam passes through a graphene coating on a two-layer quartz substrate

使拉盖尔 - 高斯光束沿 z 轴传输,当 z 取 0 时, 其光场强度为<sup>[18]</sup>:

$$E_{pl}(r,\phi,0) = C\left(\frac{\sqrt{2}r}{w_0}\right)^l L_p^l\left(\frac{2r^2}{w_0}\right) \exp\left(\frac{-r^2}{w_0^2}\right) \exp(-il\phi)$$
(1)

通过粗糙表面后的光场为<sup>[19]</sup>

$$E_{nh}(r,\phi) = E(r,\phi) \exp\left[-ik(n-1)h(r,\phi)\right]$$
(2)

式中,k为波数;n为粗糙表面的折射率;h(x,y)为 粗糙表面的高度分布函数。通过粗糙表面后的光场 可由角谱衍射理论表示为<sup>[20]</sup>:

$$E(r,\phi,z) = F^{-1} \{F\{E_{nh}(r,\phi)\} e^{[ilz\sqrt{1-(Af_x)^2-(Af_y)^2}]} \}$$
(3)

式中, *f<sub>x</sub>*, *f<sub>y</sub>* 为空间频率; *F*<sup>-1</sup>{·} 为傅里叶逆变换; *F*{·} 为傅里叶变换。由式(2)可知,得到通过粗糙 表面后的光场,需要得到粗糙表面的高度分布函数。 本文通过数字滤波技术,模拟出高斯分布条件下粗 糙表面的自相关函数,其自相关函数为以下形式:

$$R(x,y) = \theta^2 \exp\{-2.3\left(\left(\frac{x}{\beta x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\beta y}\right)^2\right]\}$$
(4)
$$R(x,y) = e^{-2}\exp\{-2.2\left[\left(\frac{x}{\beta y}\right)^2 + \left(\frac{y}{\beta y}\right)^2\right]\}$$

$$R(x,y) = \sigma^{2} \exp\{-2.3\left[\left(\frac{x}{\beta_{x}}\right) + \left(\frac{y}{\beta_{y}}\right)\right]\}$$

式中, $\sigma$ 为表面均方根高度; $\beta_x$ 为x方向上的相关 长度; $\beta_y$ 为y方向上的相关长度,因为石墨烯材料 为各向异性,当介质表面特性为各向异性时,相关长 度取 $\beta_x \neq \beta_y$ 。滤波器的传递函数 $H(w_x, w_y)$ 为:

$$H(w_x, w_y) = \sqrt{G_z(w_x, w_y)/C}$$
(5)

式中,C为功率谱密度; $G_z(w_x, w_y)$ 为功率谱密度函数。其高度分布函数为:

$$h(x,y) = F^{-1} \{ Z(w_x, w_y) \}$$
  
=  $F^{-1} \{ H(w_x, w_y) A(w_x, w_y) \}$  (6)

式中,  $Z(w_x, w_y)$  和 $A(w_x, w_y)$  分别是输出序列和输入序列的傅里叶变换。由复数面电导率  $\sigma_s(w) = \sigma'_s - i\sigma''_s$ 来表示石墨烯电导率,其表达式为<sup>[21]</sup>:

$$\sigma_{g} = \frac{2e^{2}K_{B}T}{\pi^{2}} \ln\left[2\cosh\left(\frac{\mu_{c}}{2K_{B}T}\right)\right] \frac{i}{w + i\tau^{-1}} + \frac{e^{2}}{4} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi}\arctan\left(\frac{w - 2\mu_{c}}{2K_{B}T}\right) - \frac{i}{2\pi} \ln\frac{(w + 2u_{c})^{2}}{(w - 2u_{c})^{2} + 4(K_{B}T)^{2}}\right]$$
(7)

式中,*e* 是电子量; $\hbar$  是约化普朗克常数; $\tau = 0.1$  ps 是弛豫时间;w = 2f是角频率;T是温度; $\mu_e$ 是石墨 烯的化学势; $K_B$ 是玻尔兹曼常数。根据石墨烯的电 导率可等效出石墨烯层的折射率<sup>[22]</sup>,即:

$$n_{g} = \sqrt{\varepsilon_{g}} = \sqrt{1 + i\sigma_{g}/(w\varepsilon_{0}\Delta)}$$
 (8)  
式中, $\varepsilon_{g}$ 为石墨烯层的相对介电常数; $\Delta$ 为单层石墨  
烯的厚度; $\varepsilon_{0}$ 为真空介电常数。可通过石墨烯电导  
率来表示其相对透过率,由菲涅尔定理<sup>[23]</sup>得到为:

$$\tau_{g} = \frac{T_{0}(w)}{T_{1}(w)}$$
$$= \frac{1}{\left|1 + N\sigma_{s}(w) \sqrt{\mu_{0}/\varepsilon_{0}}(1 + n_{g})\right|^{2}} \qquad (9)$$

式中,  $\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$  为真空波阻抗; N 为介质层数;  $n_s$  为 折射率。由于石墨烯材料本身的物理特性, 其透过 率很大, 因此, 可以将其表面电导率近似为实部来进 行运用计算。

拉盖尔 - 高斯光束透过石墨烯表面的透射光场 公式为:

$$E_2 = E(r,\phi,z)\tau_{\varphi} \tag{10}$$

先将拉盖尔 - 高斯光束通过单层石墨烯粗糙面 的光场 *E*<sub>1</sub>利用式(3)推导得到,当*E*<sub>1</sub>经过石墨烯厚 度后透过光场为 *E*<sub>2</sub>由式(10)推导得到,最后通过将 *E*<sub>2</sub>代入式(3)得到再次入射石英基底粗糙面的光场 为 *E*<sub>3</sub>,*E*<sub>3</sub>为拉盖尔 - 高斯光束通过所建立模型传输 的透射光场。

### 3 仿真与实验结果分析

3.1 石英基底对拉盖尔-高斯光束光强的影响

模拟拉盖尔 – 高斯光束原始光强,光束的拓扑 荷数 l = 1、波长为  $\lambda = 632.8$  nm、径向粒子数为0, 束腰半径 w = 2 nm。如图 2 所示:



Fig. 2 Laguerre-Gaussian beam intensity diagram

取不同方向相关长度 $\beta_x = 0.02 \text{ mm}, \beta_y = 0.02 \text{ mm},$ 均方根高度为 $\sigma = 0.01 \text{ mm}$ 数值模拟高斯粗糙面, 如图 3 所示。



将上述图 2 模拟仿真的拉盖尔 – 高斯光束入射

到图3所示的石英粗糙表面上,得到拉盖尔 - 高斯 光束通过粗糙表面后的光强分布图4。由图4可以 看出,拉盖尔 - 高斯光束透过粗糙表面的光强强度 减弱。当光束光强经过粗糙面后,受粗糙面的影响 光斑变得不再光滑,在光束光斑上出现了黑色斑点, 将该仿真现象在本文中称为暗斑。



Fig. 4 Intensity distribution of a Laguerre-Gaussian beam passing through a random rough surface

3.2 单层石墨烯涂层对拉盖尔 – 高斯光束光强的影响 对拉盖尔 – 高斯光束垂直入射单层石墨烯粗糙 面的模型进行了数值模拟。令入射光束的波长为  $\lambda = 632.8 \text{ nm}、束腰半径 w = 2 \text{ nm}、径向粒子数为0、$  $表面均方根高度 <math>\sigma = 0.01 \text{ nm}、传输距离为 200 \text{ nm}$ 的值一定。取方向相关长度  $\beta_x = 0.01 \text{ nm}, \beta_y =$ 0.02 mm 值一定。如图5 所示,(b)、(f)取厚度 $\Delta =$ 1 nm,(c)、(g)取厚度  $\Delta = 5 \text{ nm},(d)$ 、(h)取厚度  $\Delta = 20 \text{ nm},(a) \sim (d)$ 为拓扑荷数  $l = 1,(e) \sim (h)$ 为拓扑荷数 l = 3。

在图 5 中光束光斑始终保持圆环状,中心强度 为0,当涡旋光束通过单层石墨烯粗糙面时,改变拓 扑荷数,仅对拉盖尔 - 高斯光束光斑的尺寸大小有 影响,拓扑荷数和光斑尺寸成正比;改变石墨烯的厚 度,拉盖尔 - 高斯光束透过石墨烯表面后的光强强 度随着石墨烯厚度的增加而减弱,石墨烯的厚度与 光强强度成反比。





3.3 石英基底石墨烯涂层的双层结构对拉盖尔 -高斯光束光强的影响

如图 6 所示,双层石墨烯涂层石英基底粗糙面, 石英的厚度为 2 mm,设置石墨烯薄膜的厚度为  $\Delta =$ 20 nm 和方向相关长度 $\beta_x = 0.01$  mm, $\beta_y = 0.02$  mm 的值不变,(a)~(c)为拓扑荷数 l = 1,(d)~(f)为 拓扑荷数 l = 3,(b),(e)为通过单层石墨烯表面后 的光强,(c),(f)为通过双层石墨烯涂层石英基底 粗糙面的光强。对比了通过单层石墨烯和双层石墨 烯涂层石英基底粗糙面时,光束的光强分布变化。





图 6 不同拓扑荷数下,拉盖尔 - 高斯光束 通过不同厚度双层石墨烯粗糙表面的光强分布 Fig. 6 Intensity distribution of Laguerre-Gaussian beams passing through rough surfaces of layered graphene with different thickness under different topological charge numbers

图 6 中改变拓扑荷数,其对拉盖尔 - 高斯光束 的影响与通过单层石墨烯的光斑变化相同,均对光 束空心分布影响微弱,增加一层石英介质相较于单 层石墨烯粗糙面,透射光束强度大幅度减弱,可以看 出光强分布强度等变化主要由不同介质或介质的不 同厚度所影响。

图 7 中取石墨烯涂层的厚度  $\Delta = 20 \text{ nm}$ ,因石墨烯 材料特殊的各向异性,所以取  $\beta_x \neq \beta_y$ ,(a)~(c)为 拓扑荷数 l = 1,(d)~(f)为拓扑荷数 l = 3。(b)、 (e)为不同方  $\beta_x = 0.02 \text{ nm} , \beta_y = 0.06 \text{ nm}$ 时光强分 布。(c)、(f)为不同方向相关长度  $\beta_x = 0.03 \text{ nm} , \beta_y = 0.09 \text{ nm}$ 时光强分布。

图 7 中改变拓扑荷数,其对拉盖尔 - 高斯光束 的影响与通过单层石墨烯的光斑变化相同,当光束 通过单层石墨烯时,取不同的方向相关长度,拉盖 尔 - 高斯光束透过石墨烯粗糙面后的光强随着相关 长度取值增大而减弱,光强与方向相关长度成反比。 受粗糙面影响变大,光强分布中暗斑明显变大变多。 当光束通过双层石墨烯涂层石英基底时,光束透过 粗糙表面的光强相比于单层石墨烯粗糙面明显减 弱,光斑受粗糙面影响对比于单层石墨烯薄膜变化 明显。







本文为研究拉盖尔 - 高斯光束光束透过基于石 英基底石墨烯涂层双层结构的光学特性,设计了一 组实验进行验证,其实验原理图如图 8 所示。



Fig. 8 Experimental schematic diagram

本文运用控制变量法,在实验中只改变拉盖 尔-高斯光束透过不同厚度的石墨烯涂层,实验所 采用的设备有:石墨烯材料激光装置,包括基台,基 台上固接有发射链路和检测链路,发射链路和检测 链路呈垂直直角关系,检测链路包括石墨烯材料,发 射链路通过发射信号给检测链路,检测链路完成对 石墨烯材料的检测。

实验中使用波长为λ =632.8 nm 的激光器,透 镜焦距f =200 nm。其发射链路包括顺次连接的激 光器、第一透镜、第二透镜、起偏器、分光棱镜,检测 链路包括顺次连接的终端、光检测器、石墨烯材料、 光筛、检偏器、分光棱镜、空间解调器 SLM,发射链 路和检测链路通过分光棱镜呈直角连接。首先,激 光器发射高斯光束到第一透镜和第二透镜,第一透 镜和第二透镜透射使得高斯光束准直扩束,然后透 过起偏器和分光棱镜发生反射和透射,将反射的光 束再一次垂直入射到空间光调制器 SLM 中,最后得 到了拉盖尔 - 高斯光束。

产生的拉盖尔 - 高斯光束再透过分光棱镜射出,再经过检偏器和光筛,通过调节光筛来筛选出光强最强、分布最均匀的光束,将其打到每组实验中的石墨烯涂层材料上。

透过石墨烯涂层的光束再入射到光检测器中, 再通过终端中的 BeamGage 软件将信息直接传输出 来。其实验现场图和结果如图 9 和图 10 所示。



图 9 实验现场图 Fig. 9 Experimental field diagram

图 10 涡旋光束光强图 Fig. 10 Optical intensity diagram of vortex beam

图 10(a) 为通过一个长宽 2.5 cm × 2.5 cm, 厚 2 mm 的空白石英基底后的光强图。图 10(b) 为通 过一个长宽 2.5 cm × 2.5 cm, 厚 2 mm 的石英基底涂 抹了 5 nm 厚石墨烯涂层后的光强图。图 10(c) 为 通过一个长宽 2.5 cm × 2.5 cm, 厚 2 mm 的石英基 底涂抹了 20 nm 厚石墨烯涂层后的光强图。

由图 10 可以看出,在同一条件下,随着材料厚 度改变,其光束的光斑图像明显地看到由亮变暗。 经过石英基底的光束的光斑光强最强。经过 5 nm 厚石墨烯涂层石英基底的光束的光斑光强相较石英 基底变暗。经过 20 nm 厚石墨烯涂层石英基底的光 束的光斑光强最弱。当光束光强经过粗糙面后,受 粗糙面的影响光斑变得不再光滑,在光束光斑上也 出现了黑色斑点。

## 4 结 论

本文利用角谱衍射理论,研究了拉盖尔 - 高斯 光束通过石英基底石墨烯涂层这组双层结构的透射 光强分布特性,仿真计算了拉盖尔 - 高斯光束经过 不同方向自相关长度的石英基底、不同厚度的石墨 烯涂层后的光强分布,结果表明:石墨烯涂层的厚度 和石英基底的方向自相关长度对拉盖尔 - 高斯光束 的空心分布几乎没有影响;拉盖尔 - 高斯光束通过 石墨烯涂层的光场强度随着石墨烯涂层厚度的增加 而逐步变弱,光场强度与厚度成反比,当厚度大于 20 nm 时,衰减明显变大,石英基底石墨烯涂层这组 双层结构对比于单层石墨烯涂层衰减更为显著。当 石英基底的方向自相关长度增大时,光场分布受其 影响变大,光场中的暗斑明显变大变多。暗斑的变 化仅与的方向自相关长度有关。与单层和双层粗糙 面模型无关,实验和理论的光强变化一致。本文的 研究结果对于石墨烯在光学、光电子领域的应用和 发展具有一定的价值。

# 参考文献:

- [1] Leach J, Yao E, Padgett M J. Observation of the vortex structure a non-integer vortex beam [J]. New Journal of Physics, 2004, 6:71.
- [2] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum[J]. Science, 2013, 341(6145):537-540.
- [3] Fraine A, Uribe-Patarroyo N, Simon D S, et al. Object identification using correlated orbital angular momentum states [C]//Proceedings of CLEO: Science and Innovations 2013, San Jose, 2014:1 - 2.
- [4] Ke X Z, Zhao J. Analysis on characteristic of Laguerre-Gaussian beams with topological charges of arithmetic progression[J]. Optik, 2019, 183:302 - 310.
- [5] Hall M, Courteau S, Dutton A A, et al. An investigation of sloan digital sky survey imaging data and multiband scaling relations of spiral galaxies[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 425(4):2741-2765.
- [6] Liu H Q. Optical spanner based on the transfer of spin angular momentum of light in semiconductors [J]. Optics Communications, 2015, 342:125 - 128.
- Zhao C L, Dong Y, Wang Y M, et al. Experimental generation of a partially coherent Laguerre-Gaussian beam [J].
   Applied Physics B, 2012, 109(2):345 349.
- [8] Wang F, Liu X L, Yuan Y S, et al. Experimental generation of partially coherent beams with different complex degrees of coherence [J]. Optics Letters, 2013, 38 (11): 1814 – 1816.
- [9] Cai Y J, Chen Y H, Wang F. Generation and propagation of partially coherent beams with nonconventional correlation functions: a review [Invited] [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2014, 31(9):2083 - 2096.
- [10] Zhao C L, Cai Y J, Lu X H, et al. Radiation force of coherent and partially coherent flat-topped beams on a Rayleigh particle [J]. Optics Express, 2009, 17 (3):

1753 - 1765.

- [11] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. Science, 2004,306(5696):666-669.
- [12] Weiss N O, Zhou H, Liao L, et al. Graphene: an emerging electronic material [J]. Adv. Mater, 2012, 24 (43): 5782-5825
- [13] Nair R R, Blake P, Grigorenko A N, et al. Fine structure constant defines visualtransparency of graphene [J]. Science, 2008, 320:1308
- [14] Reddy S G, Prabhakar S, Kumar A, et al. Higher order optical vortices and formation of speckles [J]. Optics Letters, 2014, 39(15):4364-4367.
- [15] Li Xinzong, Tian Xaimin, Wang Hui, et al. Study on properties of speckle field formed by Laguerre-Gaussian beam illumination [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (7): 0726001. (in Chinese)
  李新忠,田晓敏, 王辉, 等. 拉盖尔 高斯光束照射产 生散 斑 场 的 特 性 研 究 [J]. 光 学 学 报, 2015, 35 (7):0726001.
- [16] Yan H, Li X, Chandra B, et al. Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks[J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7:330 – 334.
- [17] 潘登科,谢亚楠,等.石墨烯在微波至可见光波段的电磁特性[J].中国科技论文,2015,10(18): 2117-2120.

- [18] Hndry E, Hale P J, Moger J, et al. Coherent nonlinear optical response of graphene [J]. Physical Review Letters, 2010,105(9):212-217.
- [19] Shi Li, Li Jing, Tao Tao. Micro-particles' rotation by Laguerre-Gaussian beams produced by computer-generated holograms [J]. Laser & Infrared, 2012, 42 (11): 1226-1229. (in Chinese)
  施丽,李静,陶陶.利用计算全息产生的拉盖尔 - 高斯 光束旋转微粒[J].激光与红外, 2012, 42 (11): 1226-1229.
- [20] Li Junchang, Xiong Binheng. Theory and calculation of information optics [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
  李俊昌,熊秉衡. 信息光学理论与计算[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [21] Yao Y, Kats M A, Genevet P, et al. Broad electrical tuning of graphene-loaded plasmonic antennas [J]. Nano Letters, 2013,13(3):1257.
- [22] Ferrari L, Wu C, Lepage D, et al. Hyperbolic metamaterials and their applications [J]. Progress in Quantum Electronics, 2015, (40):1-40.
- [23] Jahan M Dawlaty, Shriram Shivaraman, Jared Strait, et al. Measurement of the optical absorption spectra of epitaxial graphene from terahertz to viaible [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(13):131905.