光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021071402

基于顶栅调控界面的石墨烯高增益光电探测器

樊安琪*，孙久勋

（电子科技大学 物理学院，成都 611731）

摘　要： 利用 Silvaco TCAD 软件对石墨烯作为新一代二维半导体材料具有的光学电学特性进行仿真建模，计算得到了不同掺杂类型石墨烯的转移特性曲线。进而对基于顶栅调控的石墨烯-硅光电导型光电探测器进行了建模与仿真，发现顶栅电压可以通过调控石墨烯载流子类型及浓度来改变石墨烯与硅异质结的内建电势，实现提高增益的目的。基于此制备了栅控石墨烯-硅光电探测器并测得与仿真结果一致的规律，实验中该器件在 1 550 nm 波段展现出良好的光电性能。研究结果对红外光电探测器的性能优化具有指导意义。

关键词： 石墨烯；硅；光电探测器；仿真模型；顶栅调控；增益

中图分类号： TN15　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0814－04

High Gain Graphene Photodetector Based on Top-Gated Interface Coupling Effect

FAN Anqi，SUN Jiuxun

（Collge of Physical Electronics，University of Electronic Science and Technology of China，Chengdu 611731，CHN）

Abstract： In this paper，Silvaco TCAD was used to establish the model to simulate the optical and electrical properties of graphene，and the experimental bipolar curves of graphene with different doping degrees were calculated. Furthermore，modeling and simulation of graphene-silicon photoconductive photodetector based on top gate regulation were carried out. The simulation results show that the top gate voltage can change the built-in potential of graphene-silicon heterojunction by regulating the type and concentration of graphene carriers，so as to improve the gain of graphene-silicon photodetector. Then the gate-controlled graphene-silicon photodetector was prepared and it is consistent with the gain enhancement of the graphene-silicon photoconductive photodetectors fabricated at 1 550 nm band.

Key words： graphene；silicon；photodetector；simulation model；top-gate control；gain

0　引言

光电探测器在红外遥感、激光告警、激光测距、度量计、靶场光测、导弹制导等领域有着广泛的应用[1-4]。石墨烯因具有高迁移率、宽吸收波段[5-6]等优异的光电性质而被看作光电探测领域极具吸引力的材料。然而石墨烯低的光吸收率和短的载流子寿命限制了其作为光电探测器的响应度[7]。基于光栅压机理的石墨烯/半导体复合结构光电探测器因其特有的高增益引起了广泛研究[8-14]，然而复合结构的界面耦合与可控性一直以来是一个挑战。

本文通过 Silvaco TCAD 软件建立了石墨烯仿真模型来模拟石墨烯的电学光学性质，得到了与实验上双极性特征吻合的石墨烯转移特性曲线。在栅控石墨烯-硅复合结构的仿真中，我们发现石墨烯的掺杂程度可由顶栅电压操纵石墨烯中的载流子浓度来调控，进而控制石墨烯/硅异质结的内建电势。结合实验上得到的光电响应数据，验证了石墨烯-硅复合结构光电探测器的顶栅操纵机理以及顶栅调控下器件的增益提升机制。

收稿日期：2021－07－14.

* **通信作者：**樊安琪

1　建模与仿真

利用 Silvaco TCAD 构建了如图 1 所示的顶栅调控石墨烯/硅结构器件模型，仿真得到的石墨烯转移特性曲线如图 2 所示。图中黑色、蓝色、橙色曲线分别为设置不同掺杂参数得到的本征石墨烯、n 型石墨烯及 p 型石墨烯的转移特性曲线，皆呈现出石墨烯转移曲线特有的双极性，验证了石墨烯仿真模型的可靠性。石墨烯的掺杂类型由其内部电子和空穴浓度决定，当电子浓度大于空穴浓度，即电子为多子时，石墨烯为 n 型；相反石墨烯为 p 型。多子的类型和浓度可由顶栅电压通过施加在绝缘层产生的电容耦合效应来调控，即对石墨烯电导 σ 的调控，表达式如式(1)所示：

$$\sigma = q\mu \frac{W}{L}(n+p) \tag{1}$$

其中，q 为单位电荷，μ 是石墨烯中的载流子迁移率，W 是沟道宽度，L 是沟道长度，n 和 p 分别是石墨烯中的电子和空穴浓度(每单位面积)。

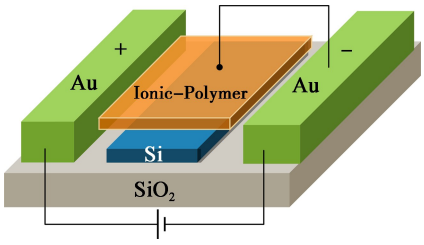


图 1　石墨烯-硅光电导型光电探测器的结构示意图

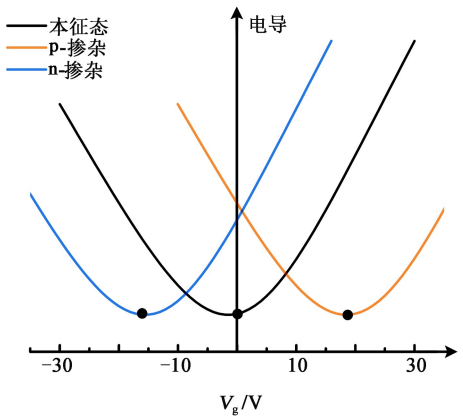


图 2　不同掺杂的石墨烯的转移特性曲线

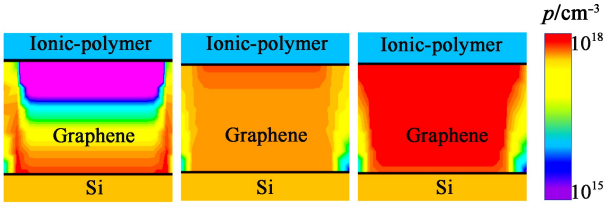
从式(2)中可以找到 V_{dirac} 对 V_g 的依赖关系：

$$q(V_g - V_{dirac}) = E_F + \frac{q^2(n-p)}{C_{ox}} \tag{2}$$

其中，V_g 为栅极电压，V_{dirac} 为石墨烯转移特性的狄拉克点电压，C_{ox} 是栅极氧化层电容常数。由上式可看出，当栅极电压大于狄拉克点电压时，电子浓度大于空穴浓度，因此石墨烯为 n 型，转移曲线如图 2 中蓝色曲线所示；当栅极电压小于狄拉克点电压时，空穴成为多子，石墨烯为 p 型，转移曲线如图 2 中橙色曲线所示。

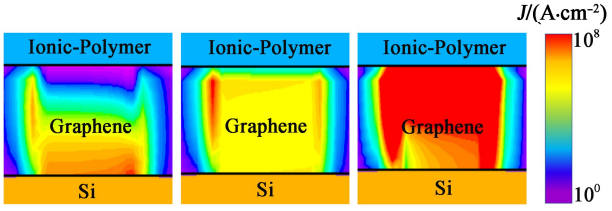
从图 3 可以看出顶栅电压和石墨烯沟道内空穴分布的关系。与未施加栅压时相比，施加 −5 V 顶栅电压时，石墨烯中产生空穴累积，石墨烯的 p 掺程度加深，费米能级下移；而顶栅电压为 5 V 时，电子的积累使石墨烯中的多子变为电子，掺杂类型发生改变。

图 4 显示了顶栅电压对石墨烯沟道中空穴电流密度的影响效果。在顶栅电压(V_{tg})从 +5 V 向 −5 V 变化的过程中，空穴电流密度(J)不断增大，这与上述的当施加负栅压时空穴浓度增大的情况相符合。由此推断出顶栅电压可实现对石墨烯的载流子浓度和掺杂类型的调控。



(a)　$V_{tg}=5$ V　　(b)　$V_{tg}=0$ V　　(c)　$V_{tg}=-5$ V

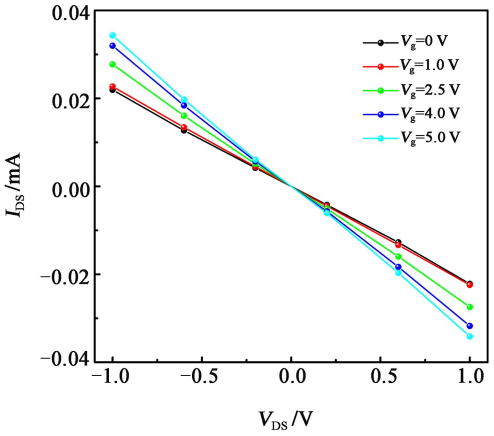
图 3　顶栅电压为 5～−5 V 时石墨烯沟道空穴分布仿真图



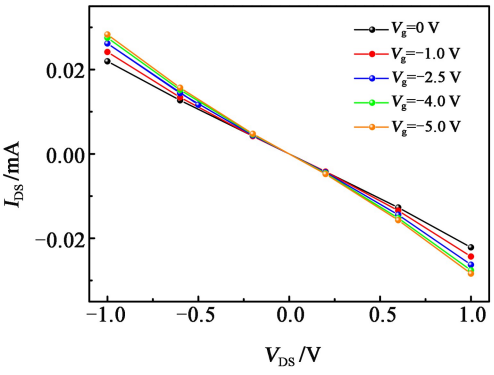
(a)　$V_{tg}=5$ V　　(b)　$V_{tg}=0$ V　　(c)　$V_{tg}=-5$ V

图 4　顶栅电压为 5～−5 V 时石墨烯沟道空穴电流密度分布仿真图

栅压对石墨烯沟道电流的影响如图 5 所示，在黑暗状态下，当 V_g 在 0～5 V 范围内变化时，石墨烯中为电子导电且电子浓度不断增大，因此沟道电流随之升高；当 V_g 变化范围为 0～−5 V 时，石墨烯沟道中为空穴导电，且空穴浓度不断增大，因此沟道电流不断增大。两种情形下电子、空穴均作为多子参与导电，故源漏电极间的电流随多子浓度增加而增大，进一步证明了顶栅电压对石墨烯沟道中载流子的调控作用。



(a) V_g 变化范围为 0～5 V

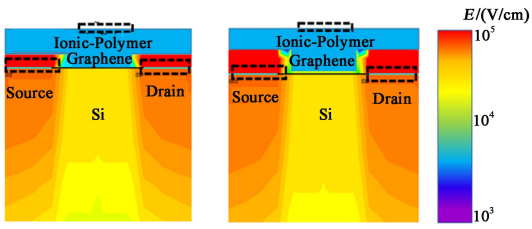


(b) V_g 变化范围为 0～−5 V

图 5 黑暗状态在不同栅压变化范围下石墨烯-硅光电导光电探测器的模拟 I-V 特性

基于以上工作，我们进一步对顶栅电压对石墨烯/硅异质结的调控作用进行了探究。如图 6 所示，在施加负栅压时，石墨烯和硅界面处的电场强度相较于未施加负栅压时有着明显的增强。这是由于当负栅压逐渐增大时，石墨烯沟道中出现了空穴大量累积的情况，石墨烯的费米能级下降，加重了石墨烯和硅间的能带弯曲。因此石墨烯和硅界面处的内建电势增强，这有利于光生载流子的分离，产生更高的光增益。

在实验中，我们利用离子凝胶作为顶栅调控石墨烯-硅光电导型光电探测器，在 1 550 nm 周期性红外光源照射下，不同栅压下得到的光响应分布图如图 7 所示。当施加正向栅压时，没有得到光电流增大的效果，如蓝色曲线所示。而当施加负栅压且不断增加时，光电流也随之增大，这是由于负栅压造成石墨烯和硅界面处的内建电势增大，光生载流子的分离效率更高。图 8 中的插图也印证了这点，随着负栅压的增加，石墨烯-硅结的肖特基势垒(SHB)逐渐增大，内建电势增强。此外，在 1 550 nm 红外光源照射下器件的响应度(R)与顶栅电压的关系如图 8 所示，负向栅压给器件带来了高的响应度。在顶栅电压为 −5 V 时，1 550 nm 处响应度为 15 A/W。与顶栅电压为 0～3 V 时相比，其获得的响应度提高了 5～8 倍。



(a) V_{tg}=0 V (b) V_{tg}=−3 V

图 6 顶栅电压对石墨烯/硅异质结的调控作用

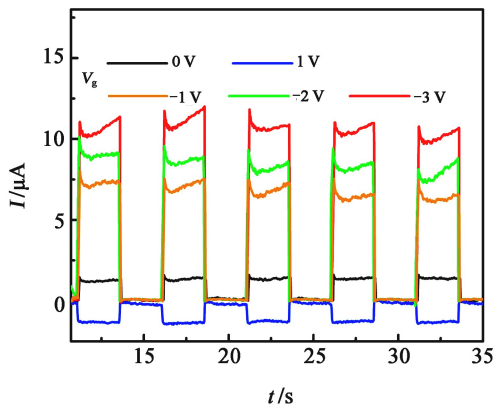


图 7 1 550 nm 光源、不同栅压下光源的周期性斩波随时间变化的光响应图

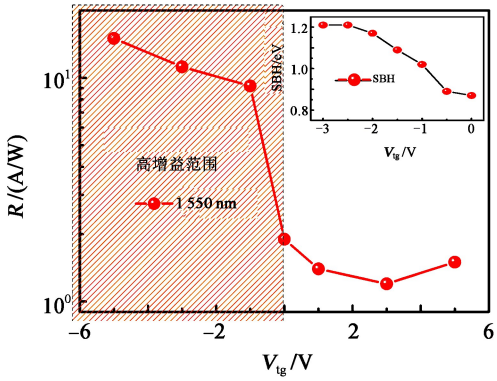


图 8 1 550 nm 光源下、顶栅电压和石墨烯-硅光电探测响应度关系图

2 结论

本文针对石墨烯-硅光电导光电探测器建立了仿真模型，探究了用离子凝胶作为顶栅来调控石墨烯的载流子浓度和类型，从而实现石墨烯-硅光电探测器高增益的机理。通过调节顶栅电压可操控石墨烯的费米能级，获得石墨烯/硅异质结增强的内建电

势，利于光生载流子的分离，因而获得石墨烯-硅光电探测器的高增益。此外，在红外光源下，通过施加负栅压获得了石墨烯-硅光电探测器的高响应度（在 1 550 nm 下为 15 A/W）。研究结果对红外波段下石墨烯-硅光电导光电探测器的增益提升具有指导意义。

参考文献：

[1] 王庆有，蓝　天，胡　颖. 光电技术[M]. 北京：电子工业出版社，2005：355-357.
Wang Q Y，Lan T，Hu Y. Photoelectric Technology[M]. Beijing：Electronic Industry Press，2005：355-357.

[2] 刘颂豪. 光电子技术与产业[J]. 激光与光电子学进展，2004，41(4)：1-13.
Liu S H. Optoelectronic technology and industry[J]. Progress in Laser and Optoelectronics，2004，41(4)：1-13.

[3] 杜宝勋. 半导体光电检测器[M]. 北京：电子工业出版社，1992：25-28.
Du B X. Semiconductor Photodetector[M]. Beijing：Electronic Industry Press，1992：25-28.

[4] 黄章勇. 光纤通信用光电子器件和组件[M]. 北京：北京邮电大学出版社，2001：67-68.
Huang Z Y. Optoelectronic Devices and Components for Optical Fiber Communication[M]. Beijing：Beijing University of Posts and Telecommunications Press，2001：67-68.

[5] Geim A K，Novoselov K S. The rise of graphene[J]. Nature Materials，2007，6(3)：183-191.

[6] Xia F N，Wang H，Xiao D，et al. Two-dimensional material nanophotonics[J]. Nature Photonics，2014，8(12)：899-907.

[7] Xia F N，Mueller T，Lin Y M，et al. Ultrafast graphene photodetector [J]. Nature Nanotechnology，2009，4(12)：839-843.

[8] Li X M，Zhu H W，Wang K L，et al. Graphene-on-silicon Schottky junction solar cells[J]. Adv. Materials (Weinheim)，2010，22(25)：2743-2748.

[9] An X H，Liu F Z，Jung Y J，et al. Tunable graphene-silicon heterojunctions for ultrasensitive photodetection[J]. Nano Lett.，2013，13(3)：909-916.

[10] Liu F Z，Kar S. Quantum carrier reinvestment-induced ultrahigh and broadband photocurrent responses in graphene-silicon junctions[J]. ACS Nano，2014，8(10)：10270-10279.

[11] Guo X T，Wang W H，Nan H Y，et al. High-performance graphene photodetector using interfacial gating[J]. Optica，2016，3(10)：1066-1070.

[12] Chen Z F，Cheng Z Z，Wang J Q，et al. High responsivity，broadband and fast graphene/silicon photodetector in photoconductor mode[J]. Adv. Optical Materials，2015，3(9)：1207-1214.

[13] Liu J J，Yin Y L，Yu L H，et al. Silicon-graphene conductive photodetector with ultra-high responsivity[J]. Scientific Reports，2017，7(1)：40904.

[14] Riazimehr S，Kataria S，Gonzalez-Medina J M，et al. High responsivity and quantum efficiency of graphene/silicon photodiodes achieved by interdigitating Schottky and gated regions[J]. ACS Photonics，2019，6(1)：107-115.

作者简介：

樊安琪(1997—)，女，四川省成都市人，硕士研究生，主要从事石墨烯等材料及其光电探测器的仿真和性能研究；

孙久勋(1967—)，男，四川省成都市人，博士，教授，主要研究方向为材料物理、液态化学物理和半导体物理。

(上接第 813 页)

[14] Samsonoy A，Solovive S. Eigenvibrations of a beam with load[J]. Lobachevskii J. of Mathematics，2017，38：849-855.

[15] Schaefer P，Gregory C，Alexandre M，et al. 3D small strain large deflection beam shape sensing including poisson effect [J]. Engineering Structures，2020，209：109948.

[16] Sobhy M，Zenkour A M. The modified couple stress model for bending of normal deformable viscoelastic nanobeams resting on visco-Pasternak foundations[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures，2020，27(7)：525-538.

[17] 姚　敏，赵振刚，李　凯，等. 基于 3D 打印技术的全绝缘多简支梁光纤 Bragg 光栅振动传感器研究[J]. 光学技术，2018，44(6)：698-702.
Yao M，Zhao Z G，Li K，et al. Study on Bragg grating vibration sensor of fully insulated muti-cantilever beam based on 3D printing technology[J]. Optical Technique，2018，44(6)：698-702.

[18] Jiang L，Zheng L，Feng Y，et al. Mapping the relationship between the structural deformation of a simply supported beam bridge and rail deformation in high-speed railways[J]. Proc. of the Institution of Mechanical Engineers Part F：J. of Rail and Rapid Transit，2019，234(10)：1081-1092.

[19] 陈　超，赵建林，李继锋. 基于变截面梁的光纤光栅线性无啁啾调谐[J]. 光子学报，2006，35(6)：867-872.
Chen C，Zhao J L，Li J F. Linear tuning of fiber grating wavelength based on variational section beam without chirp effect[J]. Acta Photonica Sinica，2006，35(6)：867-872.

作者简介：

张建平(1972—)，男，江苏省南京市人，博士，教授，博士生导师，主要从事能源低碳安全利用及智能化、节能发光器件寿命预测等方面的研究。