

近红外波段硅基石墨烯电光调制器研究进展

潘昕^{1,2}, 吴佳旻¹, 徐真真¹, 邱辞源¹, 苏翼凯¹

1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院; 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240
2. 中兴通讯股份有限公司, 深圳 518057

摘要 近红外波段的电光调制器是未来光信号处理和计算系统中的关键功能元器件, 硅基石墨烯电光调制器在结构尺寸、调制速率、调制带宽及大规模片上集成等方面具有诸多潜在优点而引起人们的广泛关注和重视。本文介绍了石墨烯的光电特性及光调制机理, 结合石墨烯在近红外波段电光调制器中的研究及应用, 综述了国内外近红外波段硅基石墨烯电光调制器的研究进展, 重点叙述了条形波导结构、谐振结构、纳米梁结构的电光调制器的工作原理及各器件的特性, 展望了硅基石墨烯电光调制器的研究方向。

关键词 石墨烯; 硅基; 电光调制器

近红外电光调制器是未来光信号处理和计算系统中的关键功能元器件, 高速、宽带宽、小体积的集成电光调制器是调制器的发展趋势^[1]。目前寻找能够与互补金属氧化物半导体(CMOS)技术兼容, 同时又有良好的稳定性和可靠性, 并且具有足够的调制速率和调制效率的材料成为科学家的重要研究内容。石墨烯的出现给本研究领域带来了新的机遇和挑战, 石墨烯是由单层碳原子构成的二维晶体, 单层石墨烯对可见光吸收光比率为2.3%。因为石墨烯为零间隙的价带结构, 可以通过外加驱动电压调节石墨烯中费米能级的位置, 从而调控石墨烯对近红外波段光的吸收状态, 以实现光的调制。基于石墨烯的电光调制器因其在调制速率、调制带宽和结构尺寸等方面具有诸多潜在优点而引起人们的广泛关注和重视, 是一种具有发展潜力的新型电光调制器。本文介绍石墨烯的电光特性和光调制机理及石墨烯在近红外波段硅基电光调制器领域的研究进展, 并对未来石墨烯的研究方向进行展望。

1 石墨烯光电特性及调制原理

石墨烯是一种单原子层厚度的二维平面碳纳米材料, 由 sp^2 杂化碳原子连接而成, 该特殊结构赋予了石墨烯独特的电学和光学特性。自从2004年Manchester大学的Konstantin Novoselov和Andre Geim首次在实验室成功剥离出稳定的单层石墨烯材料以来, 被誉为21世纪神奇材料的石墨烯就成为

了研究热点。图1为石墨烯能带结构^[2]的空间示意图。石墨烯的导带和价带在狄拉克(Dirac)点相交, 这种零带隙的能带结构使石墨烯具有半导体的特性。石墨烯内部产生的载流子拥有极高的迁移速率。当电子在层状的石墨烯中传输时具有超强的原子作用力, 附近的杂质原子和碳原子不会限制电子的传输速度, 且不容易发生散射。实验结果显示室温下单层石墨烯的载流子迁移率可高达 $2 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ^[3], 光载流子的产生和复合工作在ps量级, 说明基于石墨烯的电子器件工作频率将有可能达到500 GHz的潜能。

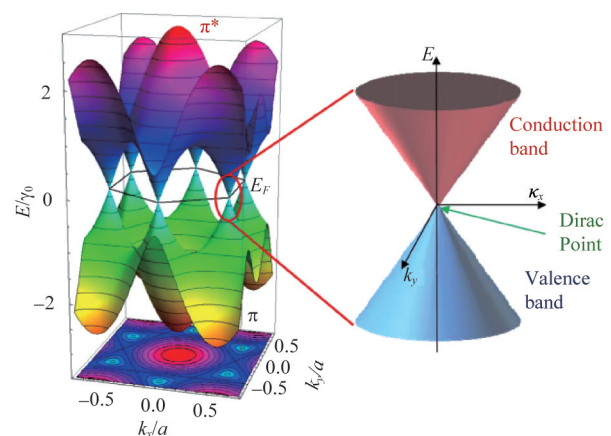


图1 石墨烯能带结构示意图

Fig. 1 Band structure diagram of graphene

收稿日期: 2016-03-20; 修回日期: 2016-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(61235007, 61505104)

作者简介: 潘昕, 硕士研究生, 研究方向为硅基石墨烯光电特性, 电子信箱: ptangela2013@sju.edu.cn; 苏翼凯(通信作者), 教授, 研究方向为光电子器件及集成和传输与交换光子学, 电子信箱: yikaisu@sju.edu.cn

引用格式: 潘昕, 吴佳旻, 徐真真, 等. 近红外波段硅基石墨烯电光调制器的研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 116-120; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.015

同时,由于石墨烯这种特殊的圆锥形能带结构,石墨烯材料的吸收光谱范围大,覆盖可见光到远红外波段。另外,石墨烯对光具有很强的相互作用,与半导体化合物相比较,石墨烯拥有更强烈的带间光学跃迁。

石墨烯的电光调制机理是通过对石墨烯材料外加电场,改变石墨烯能带中费米能级位置,从而得到不同强度光的吸收特性。具体为利用加载在石墨烯上的电压调控石墨烯的载流子(电子和空穴)浓度,使费米能级 E_f 发生变化,而石墨烯费米能级的变化会引起石墨烯的带内跃迁和带间跃迁,这对应着光电导率 σ 的变化,进而改变材料的光吸收特性。在近红外波段,当 E_f 位于阈值 $\pm\hbar\omega/2$ (其中 ω 为光载波的频率)之间时,此时因带间跃迁引起的吸收占主导地位,光被石墨烯吸收,而在其他情况下,石墨烯对光的传输而言则是透过的。因此可以通过对石墨烯外加电场控制石墨烯的费米能级 E_f 的位置,进而控制带间跃迁,以此控制石墨烯对近红外波段光的吸收,从而实现对光信号的调制。由于石墨烯自身载流子迁移率非常高,加上强的带间吸收,使得石墨烯可以做到高速光调制。基于石墨烯的上述性质,使实现高集成度、超高速、宽带宽的电光调制器成为可能。

2 基于石墨烯的电光调制器

基于石墨烯独特的光学和电学特性,国内外的研究者设计了各种结构的石墨烯电光调制器。主要可分为条形波导结构、环形谐振结构、纳米梁结构等。不同结构的设计各有优势,其器件性能指标也各具特色。

2.1 条形波导结构的硅基石墨烯电光调制器

2011年,第一个石墨烯电光调制器由加州大学伯克利分校张翔带领的研究小组制作成功^[4],它将单层石墨烯转移到条形硅波导上,使石墨烯覆盖在光波导的顶部。通过施加驱动电压调控石墨烯的费米能级,从而改变硅基石墨烯波导对近红外波段光的吸收,进而实现电光调制。如图2(a)所示,宽600 nm,高250 nm的条形硅波导用于传输光,利用化学气相沉积法制备的单层石墨烯转移在硅波导表面,金电极连接在石墨烯和硅波导上,该器件在原有硅基光调制的基础上引入了石墨烯作为光吸收体对光强度进行调制,调制区域的长度为40 μm 。其中,为了维持石墨烯较高的载流子迁移率同时形成电容器结构改变石墨烯费米能级,在石墨烯层和硅波导之间利用原子层沉积法沉积了一层7 nm厚的 Al_2O_3 缓冲层。图2(b)展示了在不同工作电压下,波长为1.53 μm 的光通过波导时的传播损耗,以及石墨烯费米能级改变时器件的工作状态。该石墨烯电光调制器调制效率为0.1 dB/ μm ,总的消光比为4 dB,调制波段覆盖范围1.35~1.6 μm ,3 dB调制带宽为1.2 GHz,整个器件区域只有25 μm^2 。

为了提高调制器的消光比,张翔团队于2012年又提出了一种双层石墨烯结构的电光调制器^[5](图3)。在加载驱动电压时,两层石墨烯电子或空穴的掺杂水平相同,它们同时对光进行吸收或者透射,提高了器件的调制效率。实验结果显示,双层石墨烯结构的电光调制器调制效率为0.16 dB/ μm ,消光比达到了6.5 dB。相比于单层石墨烯结构,双层石墨烯结构的调制效率确实得到了提升。

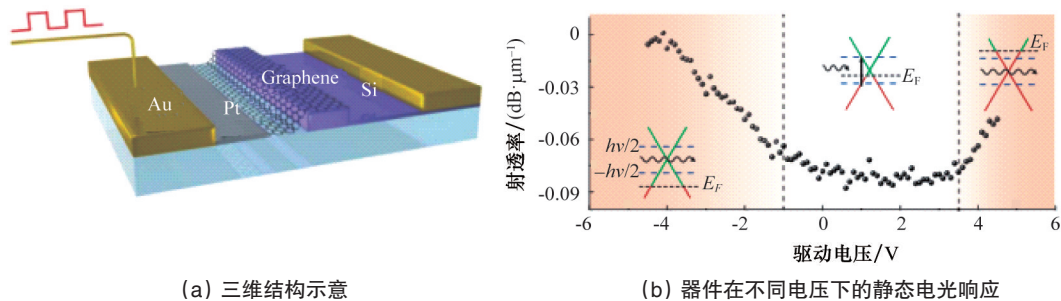


图2 基于单层石墨烯硅基波导的电光调制器

Fig. 2 A single layer graphene-based waveguide-integrated optical modulator

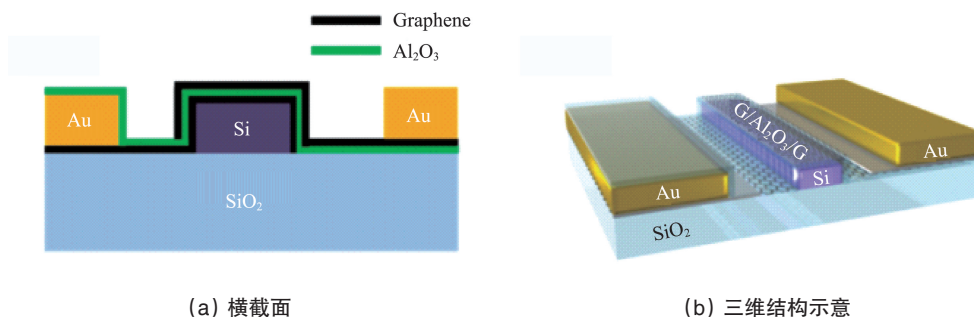


图3 基于双层石墨烯硅基波导的电光调制器

Fig. 3 A double layer graphene-based waveguide-integrated optical modulator

为进一步提高消光比,韩国三星尖端技术研究所的 Kim 等在 2011 年提出将石墨烯层置于波导中间的电光调制器结构^[6]。如图 4(a)、(b)所示,该结构将硅波导分为上下两部分,上层为多晶硅,下层为单晶硅,中间用双层石墨烯和 hBN(六方氮化硼)隔开。用 hBN 取代 Al₂O₃ 缓冲层是因为 hBN 具有较低的介电常数,可以降低器件的 RC 时间常数,从而大幅度提

升器件的调制深度与调制速率。当石墨烯被放置在波导内光强最大的区域时,石墨烯与光的相互作用更加强烈,可以使器件的调制深度最大化。在波长 1.55 μm 处,该调制器的 TE 模如图 4(c)、(d)所示,光场强度最大处被限制在石墨烯层附近,提高了光与石墨烯层的相互作用,其 3 dB 调制带宽达到了 55 GHz。

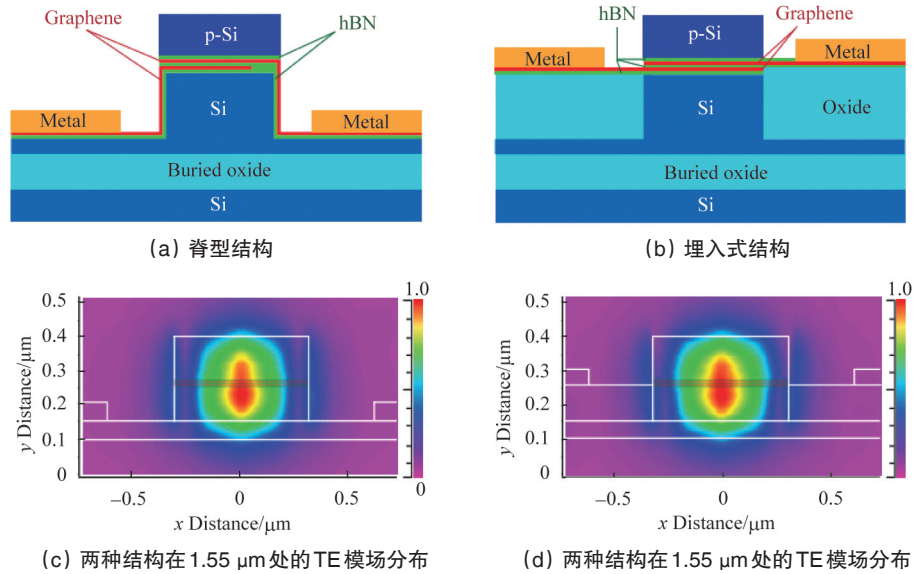


图 4 嵌入式硅基石墨烯电光调制器

Fig. 4 Structure of a graphene-gated optical modulator

2.2 基于谐振结构的硅基石墨烯电光调制器

环形谐振是指光从直波导耦合进入微环当中,传输一周后会与后续进入微环中的光学信号发生干涉效应,最终选择性地输出一部分光,剩下的部分光会在微环中完全损耗掉,即发生谐振效应。对于微型环形谐振腔来说,共振的频率和微环型波导的有效折射率的实部有关,而谐振腔透射谱的品质因数和波导的有效折射率的虚部有关。因此折射率的变化可以改变光在微环谐振波导中的光程和损耗,因此在输出端便可以控制光输出强度的大小。石墨烯可以调节硅波导的有效折射率,并且可以使有效折射率的实部和虚部在很大

范围内进行调节,将其和微环谐振结构进行结合,可以改善微环谐振器的性能,比如可改变消光比、调制带宽和共振波长范围。

图 5 所示为 2014 年邱辞源等^[7]设计的带有石墨烯的有源硅基微环谐振器。如图 5 所示,利用谐振器具有高品质因数的特性,通过加载在石墨烯上的电压改变石墨烯的费米能级,进而调节硅波导的有效折射率,最终实现调制器从耦合状态到非耦合状态的转换,这种调制器可实现超过 40% 的幅度调制深度。

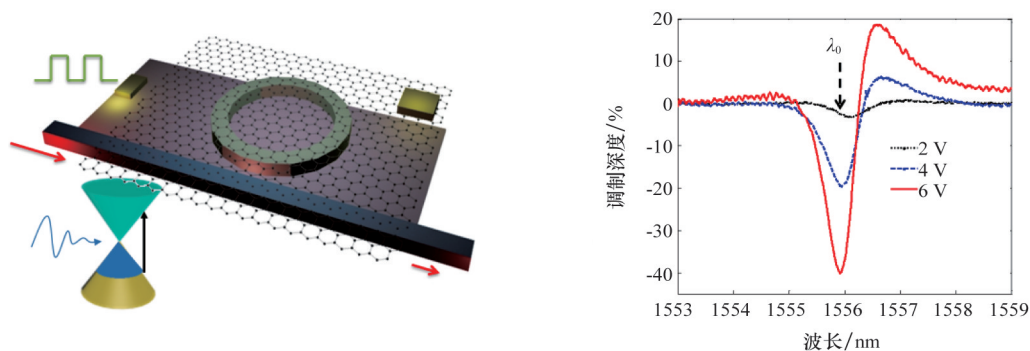


图 5 硅基石墨烯微型环形谐振结构的电光调制器

Fig. 5 A graphene-modulated silicon microring modulator

通过电压调节石墨烯的费米能级,石墨烯的介电常数能减小25倍以上。这种变化所产生的影响在石墨烯被放置在波导顶部时并不明显,但是当石墨烯被置于光传输模式电场最大处时,这种变化将大大提高石墨烯与光的相互作用。如图6^[8]所示,浙江大学郝然等^[8]仿真设计了将石墨烯嵌入到微环谐振腔波导内部的调制器结构,可实现调制效率的大幅提升。单层石墨烯嵌入在硅波导的中间,电极一端放在石墨烯的上面,另一端电极放在延伸的硅波导上面,因此石墨烯中

的载流子浓度可以由外加电压调节,进而控制石墨烯的费米能级和混合波导的性能。通过将石墨烯层嵌入到环形谐振腔内部,石墨烯与光的相互作用大大增加。该调制器的调制效率可达1.08 nm/V,比将石墨烯覆盖在环形谐振腔表面的调制器提高两个数量级,调制带宽可达到149 GHz,调制器的消光比为22.13 dB。但是相对于石墨烯层在波导顶部的电光调制器,其制作工艺比较复杂。

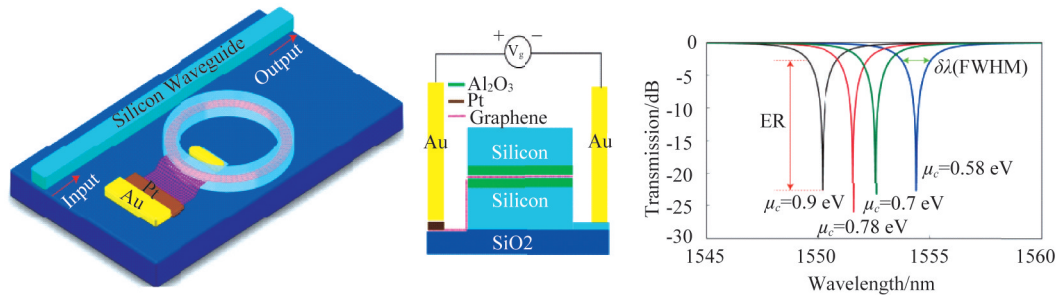


图6 嵌入式硅基石墨烯微型环形谐振腔结构的电光调制器

Fig. 6 A graphene-embedded silicon microring modulator

环形谐振腔受限于自由光谱范围(FSR)。尽管可以通过减小环的半径增大FSR,但同时会增加弯曲损耗,降低调制效率和增加功耗。为了克服微环谐振腔FSR对波分复用系统中相邻波长通道的干扰,上海交通大学苏翼凯课题组研究了如图7所示的基于纳米梁谐振腔的硅基石墨烯电光调制器^[9]。

该电光调制器在单个器件结构上集成了石墨烯和纳米梁谐振腔的优点,相比于硅基微型环形腔,纳米梁谐振腔在保持相对高的品质因数的同时结构尺寸更小,大大提高了FSR,在宽的频谱范围内只有一个谐振峰,在调制时不受相邻谐振峰的影响,这对于波分复用系统非常重要。

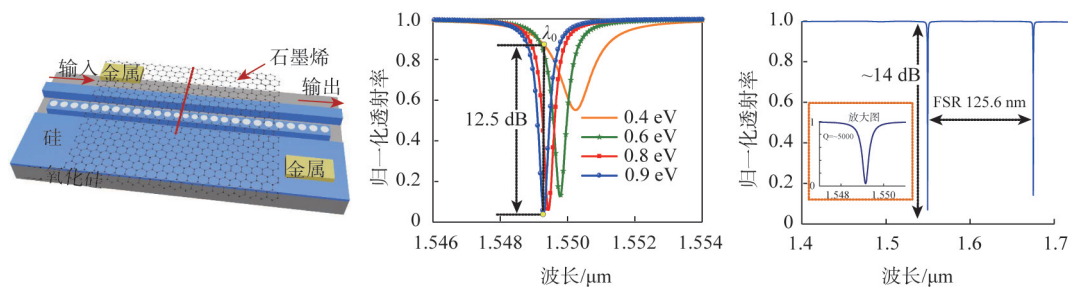


图7 硅基石墨烯纳米梁结构的电光调制器

Fig. 7 EO modulator based on graphene-silicon hybrid 1D photonic crystal nanobeam cavity

3 结论

硅基石墨烯电光调制器的性能还有巨大的潜力。石墨烯的引入提高了调制速率,采用高折射率差的SOI基底,其制作工艺与成熟的CMOS加工工艺相兼容,有利于大规模集成和开发,这对以后集成光学芯片的微型化、高速化以及低功耗具有重要意义。今后研究的重点是突破实际情况的限制,在保证插入损耗和调制带宽的高性能的同时,兼顾其他性能指标不受影响,以达到最佳的调制效果。

参考文献(References)

[1] Krishnamoorthy A V, Ho R, Zheng X Z, et al. Computer systems based

on silicon photonic interconnects[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97 (7): 1337-1361.

[2] McClure J W. Energy band structure of graphite [J]. IBM Journal of Research and Development, 1964, 8(3): 255-261.

[3] Bolotin K I, Sikes K J, Jiang Z, et al. Ultrahigh electron mobility in suspended graphene[J]. Solid State Communications, 2008, 146(9-10): 351-355.

[4] Liu M, Yin X B, Ulin-Avila E, et al. A graphene-based broadband optical modulator[J]. Nature, 2011, 474(7349): 64-67.

[5] Liu M, Yin X B, Zhang X. Double-layer graphene optical modulator[J]. Nano Letters, 2012, 12(3): 1482-1485.

[6] Kim K, Choi J Y, Kim T, et al. A role for graphene in silicon-based semiconductor devices[J]. Nature, 2011, 479(7373): 338-344.

[7] Qiu C Y, Gao W L, Vajtai R, et al. Efficient modulation of 1.55 μm ra-

- diation with gated graphene on a silicon microring resonator[J]. Nano Letters, 2014, 14(12): 6811-6815.
- [8] Du W, Li E P, Hao R. Tunability analysis of a graphene-embedded ring modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(20): 2008-2011.
- [9] Pan T, Qiu C Y, Wu J Y, et al. Analysis of an electro-optic modulator based on a graphene-silicon hybrid 1D photonic crystal nanobeam cavity[J]. Optics Express, 2015, 23(18): 23357-23364.

Recent development in silicon-graphene integrated electro-optic modulators

PAN Ting^{1,2}, WU Jiayang¹, XU Zhenzhen¹, QIU Ciyuan¹, SU Yikai¹

1. State Key Lab of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation, Shenzhen 518057, China

Abstract Near-infrared (NIR) electro-optic (EO) modulator will play a key role in future optical signal processing and communication systems. Graphene-silicon hybrid EO modulators have attracted much attention due to the merits regarding device footprints, modulation speeds, modulation bandwidth, and mass-productivity. In this paper, we firstly introduce the electro-optical properties of graphene and light modulation mechanism in EO modulators. Then based on the application of the graphene in EO modulators, this paper reviews current research progress of various types of NIR EO modulators based on graphene-silicon hybrid structure, and describes their operation principles and performances, including silicon waveguide graphene-based modulator, silicon micro-ring modulator based on graphene, and EO modulator based on graphene-silicon hybrid 1D photonic crystal nanobeam cavity. Finally, some future research directions are predicted.

Keywords graphene; silicon; electro-optic modulators

(责任编辑 刘志远)