

文章编号 1004-924X(2016)09-2117-09

## 全光纤结构的石墨烯电吸收调制器

周 锋<sup>1\*</sup>, 金晓峰<sup>2</sup>

(1. 浙江传媒学院 电子信息学院, 浙江 杭州 310018;  
2. 浙江大学 信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**利用石墨烯优越的光学性能,构建了基于全光纤结构的石墨烯电吸收调制器。设计了调制器的结构,并进行了仿真和实验双重研究。首先,根据石墨烯的光学可调特性研究了其化学势和介电常数之间的关系。接着,基于全光纤结构设计了石墨烯电吸收调制器,并分析了它的整体有效折射率和化学势的变化关系。对提出的光纤石墨烯调制器进行仿真分析,并与传统半导体电吸收调制器进行对比,实现了一个全光纤结构的石墨烯调制器。对实现的调制器进行了系统的性能测试。结果显示:仿真的四层石墨烯的全光纤电吸收调制器的调制效率可以达到 0.233 dB/mm,在 12.9 mm 的长度上可实现 0.2 V 的摆动电压。实验测试验证了提出的全光纤石墨烯调制器的可行性;但受实验条件的限制,其半波电压约为 120 V, 3 dB 调制器带宽为 100 MHz。与传统石墨烯波导调制器相比,提出的调制器显示了半波电压小,调制效率高,尺寸小,同时具有低的插入损耗低等优势,适合在未来全光纤 RoF 系统应用。

**关键词:**电吸收调制器;石墨烯;光与物质相互作用;全光纤结构

**中图分类号:** TN253; TN761 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162409.2117

## All-fiber graphene electro-absorption modulator

ZHOU Feng<sup>1\*</sup>, JIN Xiao-feng<sup>2</sup>

(1. School of Electronics and Information,  
Zhejiang University of Media and Communications, Hangzhou 310018, China;  
2. Department of Information Science & Electronic Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)  
\* Corresponding author, E-mail: eddychow1988@126.com

**Abstract:** On the excellent optical performance of graphene, a graphene-based all-fiber electro-absorption modulator was constructed. The structure of the modulator was designed, and simulation and experiments for the modulator were both conducted. Firstly, the relationship between the chemical potential and the permittivity was researched according to the graphene's optical properties, then the graphene-based all-fiber modulator was designed, and the dependence of the effective refractivity of the modulator on the chemical potential was analyzed. The proposed graphene-based all-fiber electro-absorption modulator was simulated and was compared to traditional semiconductor modulators. Finally, the graphene-based all-fiber electro-absorption modulator was developed and its performance was tested. The simulation results show that the modulation efficiency of the quadri-layer

收稿日期: 2016-05-28; 修订日期: 2016-06-27.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2012CB315703); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61371029)

all-fiber graphene modulator reaches up to 0.233 dB/mm, and the footprint has been reduced to only 12.9 mm with the swing voltage lower than 0.2 V. The experiments demonstrate that the proposed modulator is feasibility. Limited by the practical conditions, the tested half-wave voltage is about 120 V and the 3 dB bandwidth is around 100 MHz. As compared with traditional graphene-based waveguide modulator, the proposed modulator shows a smaller half-wave voltage, higher modulation efficiency, and a smaller size. Moreover, it has a lower insert loss and is suitable for all-fiber systems in future.

**Key words:** electro-absorption modulator; graphene; light-matter interaction; all-fiber structure

## 1 引言

目前,调制器在光通信系统中有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。一般而言,光通信系统中基于电折射率原理的强度调制器和电吸收调制器是使用最为广泛的两种调制器。与基于电折射率原理的电光调制器相比,电吸收调制器的半波电压更低,调制效率更高,更易与激光器集成<sup>[4]</sup>。然而,传统的半导体电吸收调制器的尺寸往往在几百微米到数毫米之间,较大的尺寸不利于它在未来光电集成中的应用,同时,半导体电吸收调制器还存在带宽不够大、光传输损耗和耦合损耗较大、啁啾严重和受外界环境影响较大等诸多问题<sup>[5]</sup>。为了解决突破这些瓶颈,进一步提高电吸收调制器的性能,近些年人们提出了石墨烯电吸收调制器等相关器件<sup>[6-11]</sup>。由于石墨烯和光的强作用能力,尺寸仅有 25 平方微米的石墨烯电吸收调制器在实验上得到了验证<sup>[10]</sup>。与传统的调制器相比,石墨烯调制器具有更小的尺寸,更宽的调制带宽,更少的光传输损耗,并且受外界温度的影响较小。此外,通过增加石墨烯的层数可以增加石墨烯和光之间的相互作用,从而进一步提高调制器的电吸收特性,缩小调制器的尺寸和获得更好的调制特性。然而,目前石墨烯调制器主要都是基于波导结构的,因此不可避免地引入了较大的耦合损耗和加工难度,这些都会限制它在实际光纤系统中的应用。将波导结构改变成全光纤结构有益于解决上述问题,不过,纤芯外围覆盖着较厚的包层会大大降低光和物质的相互作用<sup>[12-15]</sup>。综上可知,将石墨烯应用在全光纤结构上不仅可以降低耦合损耗,还可以利用石墨烯和光的相互作用实现电吸收调制。

本文提出了一种基于石墨烯的全光纤结构的电吸收调制器,采用侧面研磨抛光工艺去除光纤包层,通过研磨和抛光光纤表面,不同于一般

D 型光纤的结构,采用滚圆研磨可以产生光纤芯层研磨区的渐变凹面过渡结构,这样有利于降低光纤插入损耗与回波。四层石墨烯被转移到纤芯表面以增加光和石墨烯的作用。仿真结果显示,该调制器具有较高的调制效率(0.223 dB/ $\mu\text{m}$ ),较小的控制电压(1 V 以下)和较小的尺寸(12.9  $\mu\text{m}$ )。实验上初步实现了该全光纤石墨烯调制器,受实验调制的限制,目前暂时实现了半波电压约为 120 V, 3 dB 调制器带宽为 100 MHz 的调制器。总的来说,全光纤结构的石墨烯电吸收调制器在未来的全光纤通信中有着巨大的潜力。

## 2 全光纤石墨烯电吸收调制器构成及其工作原理

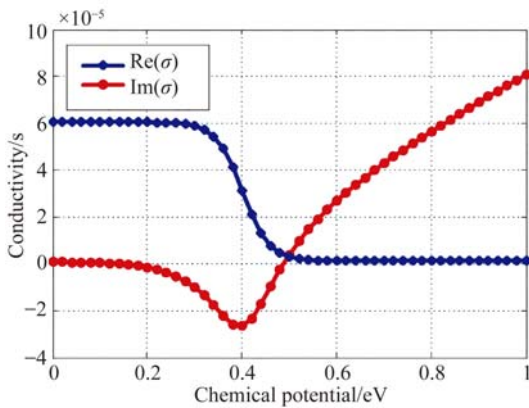
### 2.1 石墨烯的光学特性

石墨烯作为一种由单层碳原子组成的二维材料,具有非常优越的光学特性。关于石墨烯电导率和介电常数的计算,已经有很多较为深入的研究,现在比较常用和认可的是 Kubo 公式<sup>[16]</sup>:

$$\begin{aligned} \sigma(\omega, \mu_c, \Gamma, T) &= \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}, \quad (1) \\ \sigma_{\text{intra}} &= \frac{-ie^2}{\pi \hbar^2 (\omega + i2\Gamma)} \left[ \int_0^\infty \epsilon \left\{ \frac{\partial f_d(E)}{\partial E} - \frac{\partial f_d(-E)}{\partial E} \right\} dE \right], \\ \sigma_{\text{inter}} &= -\frac{ie^2 (\omega + i2\Gamma)}{\pi \hbar^2} \left[ \int_0^\infty \frac{f_d(-E) - f_d(E)}{(\omega + i2\Gamma)^2 - 4(E/\hbar)^2} dE \right], \quad (2) \end{aligned}$$

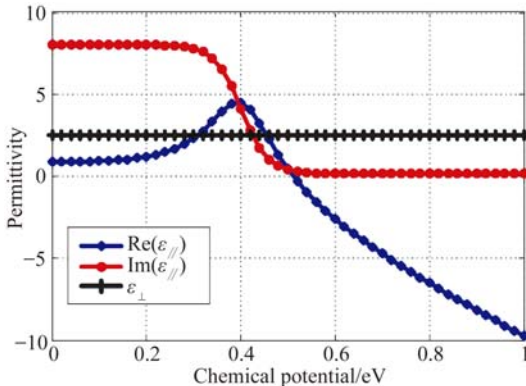
其中: $e$  是电子的电量, $\Gamma$  为散射率, $T$  表示温度, $\hbar$  表示约化普朗克常数, $f_d(E)$  为费米-狄拉克分布。根据 Kubo 公式,使用仿真工具 MATLAB 对石墨烯的电导率和介电常数进行仿真。图 1(a) 为在 1 550 nm 波长下石墨烯的电导率随着化学势的变化曲线,化学势为 0~1 eV。由图中可以看出,石墨烯的电导率实部在 0~0.4 eV 几乎没有变化,之后随着化学势的增加而下降,在 0.6 eV 之后趋于稳定;而电导率的虚部则在开始随着化学势的增加而下降,在化学势为 0.4 eV 时

达到最小值,之后随着化学势的增加而上升。图1(b)为石墨烯的介电常数随着化学势的变化曲线,介电常数实部和电导率虚部的变化趋势是相反的,一开始随着化学势的增加,介电常数不断增加,在化学势为0.4 eV时达到最大值,之后在0.4~1 eV随着化学势的增加而减小。特别的是,石墨烯的介电常数实部在下降区间会经历由正到负的变化,这表明石墨烯开始由介质特性向金属特性转变,这种特殊的可调性在其他材料所没有的,因此这也是石墨烯作为可调材料的一大优势。而介电常数虚部则和电导率实部的变化趋势是一致的,一开始随着化学势的增加,在0~0.4 eV几乎没有变化,之后开始随着化学势的增加而减小,但在化学势为0.6 eV的时候达到稳定。需要注意的是,这里石墨烯是一种各向异性的材料。因此,介电常数在与石墨烯平面垂直的方向被设置为固定常数,如图1(b)的黑线所示。参考石墨,该值为 $2.5^{[16]}$ 。



(a) 石墨烯电导率随化学势的变化图

(a) Conductivities of graphene under different chemical potentials



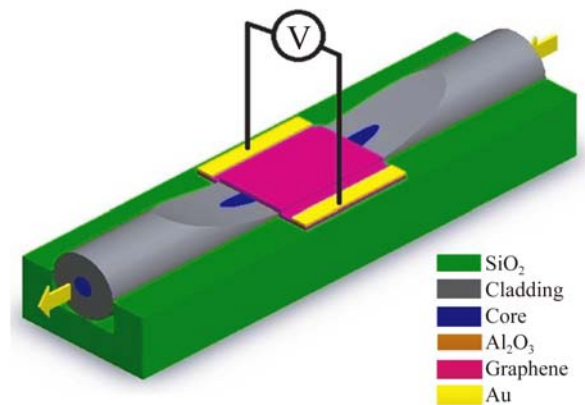
(b) 各向异性下石墨烯介电常数随化学势的变化图  
(b) Permittivities of graphene under different chemical potentials

图1 石墨烯光学特性随化学势的变化

Fig.1 Optical properties of graphene as a function of chemical potential

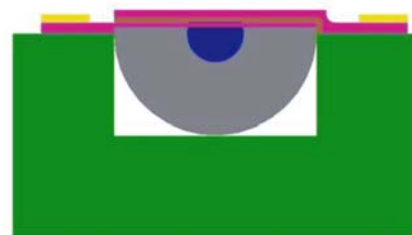
## 2.2 全光纤石墨烯电吸收调制器结构

本文提出的全光纤石墨烯电吸收调制器的原理如图2所示。在二氧化硅的基底上放置一段光纤,将光纤的一段包层剥除,在垂直于光纤长度方向采用滚圆研磨至纤芯的位置。首先在凹面过渡区转移底层石墨烯,之后在底层石墨烯层上制备一薄层 $Al_2O_3$ 过渡层,最后在 $Al_2O_3$ 过渡层上制备顶层石墨烯,电极分别放置在底层石墨烯和顶层石墨烯上。由于光纤纤芯的折射率大约为1.45,而石墨烯材料的有效折射率随费密能级的状态具有很大的动态可调性,所以引入折射率大约为1.76的 $Al_2O_3$ 过渡有利于稳定光学模场的分布。同时由于 $Al_2O_3$ 的附着力和传热性与光纤纤芯和石墨烯层匹配得较好,因此有利于增加复合膜层的强度与性能。



(a) 结构图

(a) 3-D structure of proposed modulator



(b) 中间区域的剖面图

(b) 2D cross-sectional view of etched fiber profile with graphene

图2 全光纤石墨烯电吸收调制器的结构

Fig.2 Schematic diagram of proposed all-fiber graphene electro-absorption modulator

## 3 仿真结构分析

根据图2提出的仿真结构,光在光纤中传输

时,由于侧面研磨光纤的渐变性,部分光和石墨烯发生了较为强烈的作用。利用仿真软件 Comsol 建立了全光纤石墨烯电吸收调制器的模型,并进行了计算和分析。调制器的有效折射率随化学势的变化如图 3 所示,蓝线和红线分别表示有效折射率的实部和虚部随化学势的变化趋势(彩图见期刊电子版)。由于有效折射率虚部反映的是损耗系数,两者的关系可以表示为:

$$\alpha = 20 \lg(1/e) \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}). \quad (3)$$

由式(3)可知,损耗系数和有效折射率的虚部成线性正比关系,而有效折射率的虚部和石墨烯介电常数的虚部呈线性正比的关系,因此可以推导出损耗系数和介电常数之间存在的线性正比关系。也就是说可以通过直接调节石墨烯的有效介电常数来改变损耗值。由图 3 可以看出,有效折射率虚部的最大值和最小值相差很大,由计算可知最大值和最小值相差 48 倍之多。这样一个巨大的差值有利于设计一个具有高调制深度、小尺寸的电吸收调制器。

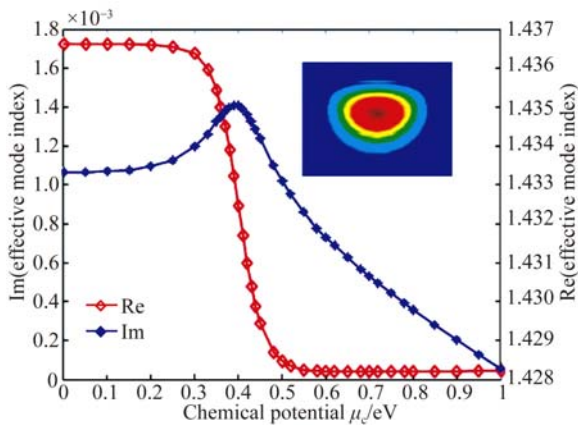


图 3 有效折射率的实部和虚部随化学势的变化图  
(插图为 TE 模式下的电场)

Fig. 3 Real and imaginary part of effective mode index under different graphene's chemical potentials. The inset shows electric field profile for TE mode

为了进一步揭示石墨烯调制器的作用机理,本文研究了多层石墨烯对调制器性能的影响。随着石墨烯层中能量的增大,有效折射率的虚部也会增加,因此通过施加多层石墨烯可以有效地加大有效折射率虚部的变化。为了研究多层石墨烯是如何增加吸收效率的,图 4 给出了 1~4 层石

烯在化学势为 0~1 eV 情况下的损耗系数。由图 4 可以看出,4 条曲线的形状基本一致,插图表示损耗系数随着石墨烯层数的变化情况,可以发现两者呈线性关系。其中 1~4 层石墨烯对应的损耗系数分别为 0.06, 0.12, 0.18 和 0.24 dB/μm, 这表明要实现同样的消光比,4 层石墨烯结构的调制器所需的长度仅约为单层石墨烯结构调制器的四分之一。因此采用多层石墨烯结构有助于增加吸收效率,提高调制效率,减小半波电压并实现更小的尺寸,从而进一步提高调制器的性能。

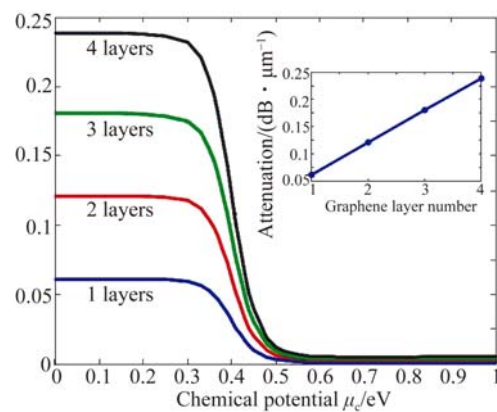


图 4 多层石墨烯损耗随化学势的变化图(插图为石墨烯层数与最大损耗间的关系)

Fig. 4 Attenuation versus chemical potentials under different graphene layers. Inset shows linear relationship between number of graphene layer and maximum attenuation

由图 4 可以看出,在化学势为 0~0.2 eV 时,调制器的损耗系数最大,也就是说经历相同的长度,调制器的损耗最大,可以认为此时调制器工作在 OFF 状态;而当化学势选取在 0.6~1 eV 时,调制器的损耗较小,可认为此时调制器工作在 ON 状态。举例来说,当调制器工作在 0 eV (OFF)时,损耗系数为 0.238 dB/μm;而当调制器工作在 0.7 eV (ON)时,损耗系数为 0.005 dB/μm。因此,如果想实现 3 dB 的损耗,只需要最小 12.9 μm 的调制长度,同时也意味着调制深度最大可以达到 0.233 dB/μm。

化学势和外加电压的关系如下<sup>[8]</sup>:

$$\mu_c = \hbar v_F \sqrt{\eta \pi | (V_g - V_{\text{Dirac}}) |}, \quad (4)$$

其中:  $V_{\text{Dirac}}$  是由石墨烯自然参杂造成的补偿电压;为了简化公式,  $v_F = 3 \times 10^6$  m/s 表示费米速

度。根据平行板电容器的模型计算得到： $\eta=9 \times 10^{16} \text{ m}^{-2} \text{ V}^{-1}$ ，另外由于  $V_{\text{Dirac}}$  是一个定值，因此可以把  $|(V_g - V_{\text{Dirac}})|$  当成是外加偏置电压。根据式(4)绘制出不同化学势下的偏压曲线，如图 5 所示。与传统调制器相比，本文提出的全光纤石墨烯电吸收调制器只需要很小的偏置电压就可以实现调制效果；因此调制器的功耗很小，而且通过直接调节外加偏置电压便可以灵活控制该调制器的损耗变化。

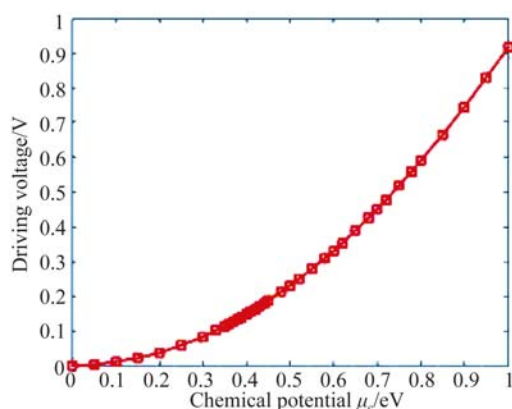


图 5 化学势和偏压曲线关系示意图

Fig. 5 Relationship between driving voltage and chemical potential for proposed modulator

该全光纤石墨烯吸收调制器另外一个优势在于开和关两个状态之间的摆动电压特别小，在高速的光调制系统中，小的摆动电压不仅能够降低成本，而且可以减小功耗。由于调制器的消光比参数和传播长度是呈线性正比的关系，为了更好地和传统的电吸收调制器进行对比，假设两者的长度都为  $120 \mu\text{m}$ 。由图 5 可以看出，提出的电吸收调制器在偏置电压为  $0 \sim 0.1 \text{ V}$  时，可以看成是关闭状态；而在电压为  $0.2 \sim 0.5 \text{ V}$  时，可以看成是开的状态。四层石墨烯全光纤电吸收调制器的传递函数示意图如图 6 所示，传统的商用半导体电吸收调制器由图 6 的蓝色点线表示。可以看出，全光纤石墨烯吸收调制器在  $0.2 \text{ V}$  的电压变化中（偏压为  $0.05 \sim 0.25 \text{ V}$ ），可以实现大约  $27 \text{ dB}$  的消光比，而传统的半导体电吸收调制器的消光比大约在  $20 \text{ dB}$  左右；而且通过调节偏压从  $0 \sim 0.5 \text{ V}$ ，传统电吸收调制器的消光比只有不到  $1 \text{ dB}$  的变化，所有的点都工作在开的状态。因此相较于传统的半导体电吸收调制器，全光纤石墨烯电吸收调制器的偏置电压更小，具有更高的

开关消光比和更低的摆动电压，这能极大程度地提高电光转换效率。利用这个特性，该调制器更适合实现数字开关式的调制，在未来的数字光通信中具有一定的实用价值。

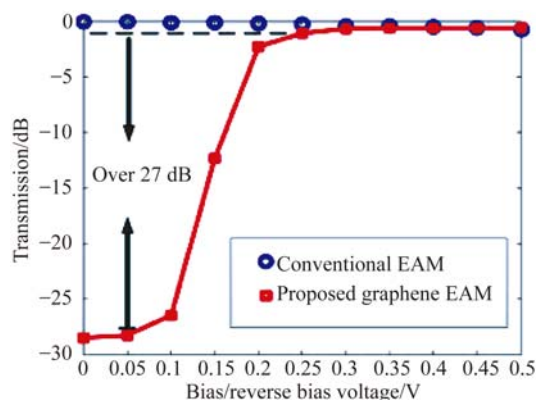


图 6 基于全光纤石墨烯的电吸收调制器的传递函数示意图

Fig. 6 Transmission curves versus bias/reverse bias voltage from  $0 \text{ V}$  to  $0.5 \text{ V}$  for all-fiber graphene-based EA modulator and a typical EA modulator

## 4 实验验证

这里根据仿真结果设计了基于石墨烯的全光纤调制器实验，并根据现有的实验条件对仿真模型进行了修改和优化，使之更适合实验加工和测试。实验设计的全光纤石墨烯电吸收调制器和仿真结构有着一定的不同，具体而言，由于仿真条件的限制，光纤仿真模型的包层直径为  $10 \mu\text{m}$ ，纤芯直径为  $2 \mu\text{m}$ ，而实际加工中采用标准  $125 \mu\text{m}$  直径的单模光纤。经过计算，两种模型的模场分析结果十分近似，差异很小；另外，仿真模型中，采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和石墨烯组成复合层来稳定光模场，但是在实验设计中，采用了石墨烯场效应管 (Graphene Field Effect Tube, GFET) 结构，先转移石墨烯层再覆盖一层绝缘层，而测试证明  $\text{Al}_2\text{O}_3$  作为绝缘层并不适合该结构，因此实验采用高分子材料聚偏氟乙烯 (PVDF) 作为替代。两种材料的光学性质和厚度不同，形成的 GFET 结构和仿真模型也存在着一定的差异。相对于 PVDF 而言， $\text{Al}_2\text{O}_3$  的折射率更高，更有利于稳定光学模场，然而，PVDF 的绝缘性能良好且厚度均匀，因此，最终选用高分子材料 PVDF 作为替代绝缘层。图 7 所示为实验样品。

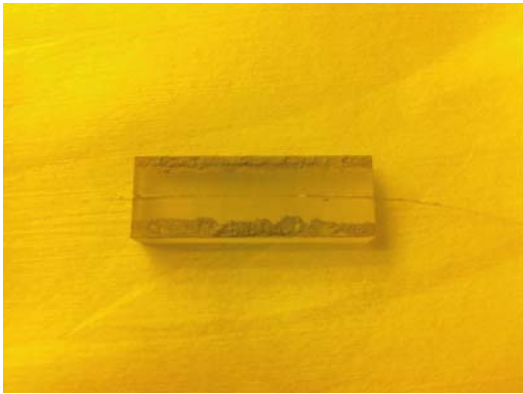


图 7 调制器样品图

Fig. 7 Sample of all-fiber graphene-based electro-absorption modulator

#### 4.1 电学特性曲线测试

GFET 结构的基本测试是  $I$ - $V$  测试。图 8 为探针平台示意图,测试平台是安捷伦半导体器件分析仪 Agilent Technologies B1500A Semiconductor Device Analyzer。

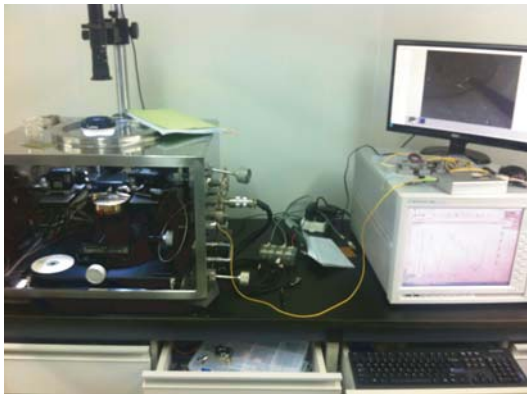


图 8 探针平台示意图  
Fig. 8 Prober platform

样品准备好后,首先进行了石墨烯电学性能的测量。将样品放在探针台上,两个探针分别接在石墨烯导电沟道的两端,即源极和漏极,两极之间电压不能加得过大,过大的源漏电压会破坏石墨烯的导电沟道。实验测得石墨烯的电阻为  $500 \Omega$ ,同时检验绝缘层的绝缘性,测得绝缘层的绝缘性能良好。之后对样品的三端口进行测试,为了保证绝缘层不会被击穿,实验中缓慢增加栅极的电压。随着源极和漏极之间的电压增加,源漏之间的电流也随着增大,而通过调节栅极的电压,不同栅极电压下的  $I$ - $V$  曲线也是不同的。

图 9 所示为器件三端口的直流测试图。由图 9 可以看出,随着栅极电压从  $-40 \text{ V}$  到  $40 \text{ V}$  的变化,源漏之间的  $I$ - $V$  特性曲线也发生了变化,这表明了电域上调制的变化。

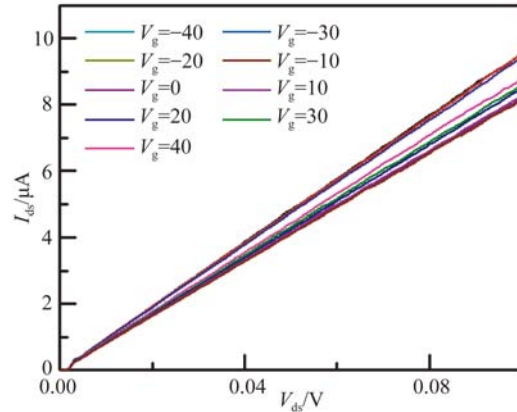


图 9 器件三端口直流测试图

Fig. 9 DC test of device's three-port

#### 4.2 石墨烯电吸收调制器性能分析

全光纤石墨烯调制器的电光调制性能验证的实验原理如图 10 所示。激光器输出通过光放大器 EDFA ( $20 \text{ dB}$  放大增益) 放大后获得  $10 \text{ dBm}$  的输出光功率,通过偏振控制器 PC 注入到石墨烯全光纤调制器中。测试发现,石墨烯全光纤调制器的插入损耗仅有  $1.5 \text{ dB}$ ,大大优于传统波导石墨烯调制器的高插入损耗,也明显低于传统的铌酸锂调制器、三五族半导体调制器和聚合物调制器的插入损耗。射频信号和偏置电压由信号发生器发出,信号发生器的频率为  $0 \sim 120 \text{ MHz}$ ,通过探针加到石墨烯全光纤调制器的栅极和源极之间。调制后的信号通过光电探测器 PD 拍频输出得到原始的电信号,PD 的频率为  $40 \sim 860 \text{ MHz}$ ,之后通过电放大器放大后由频谱仪 Agilent 8563EC 显示。这样就构成了一个最简单的 RoF (Radio-over-Fiber) 系统。进入 PD 的光功率为  $-10 \text{ dBm}$ ,经过 PD 拍频和  $20 \text{ dB}$  的低噪放后在频谱仪上显示,其中射频信号的大小和频率可以改变,因此可以通过研究解调后的信号来获得调制器的一些性能参数。具体而言,首先选取了  $0.2, 1$  和  $6 \text{ V}$  的射频信号,考虑到 PD 的解调范围和信号发生器的频率范围,这里选取的频率为  $40 \sim 120 \text{ MHz}$ 。

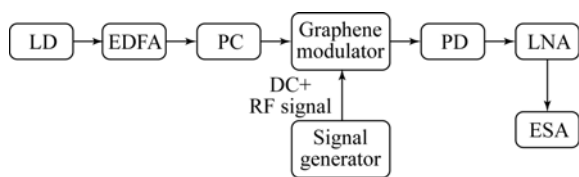


图 10 实验原理示意图

Fig. 10 Schematic view of experiment principle

以 50 MHz 射频调制信号为例,通过 PD 拍频获得的信号如图 11~图 13 所示。当射频幅度分别为 0.2, 1 和 6 V 时,拍出的信号分别为 -91, -78, -64 dBm, 根据公式换算 dB 为单位可以得到,1 V 和 0.2 V 相差约 14 dB,而 6 V 和 1 V 相差约 15 dB,与实际测得的 13 dB 和 14 dB 的差量基本吻合,由此证明了实验的正确性。此外,将电压固定在 6 V,从 40~120 MHz 每隔 10 MHz 获取拍频后的数据,可以发现拍频信号随着频率的增大而减小,最大值 40 MHz 和最小值 120 MHz 之间的差值为 2.8 dB 左右。由此可以估算出调制器的 3 dB 调制带宽大致在 100 MHz 左右。

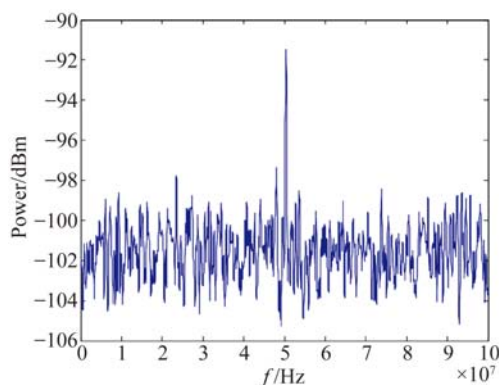


图 11 0.2 V 下拍出的 50 MHz 射频信号

Fig. 11 RF signal obtained at 0.2 V

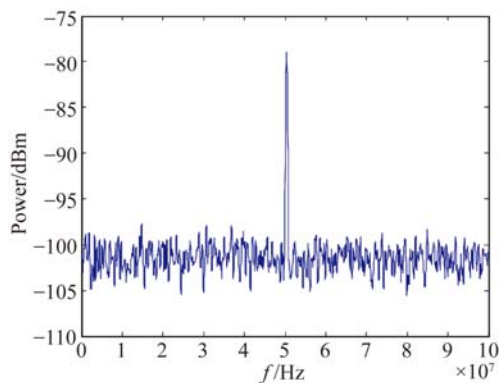


图 12 1 V 下拍出的 50 MHz 射频信号

Fig. 12 RF signal obtained at 1 V

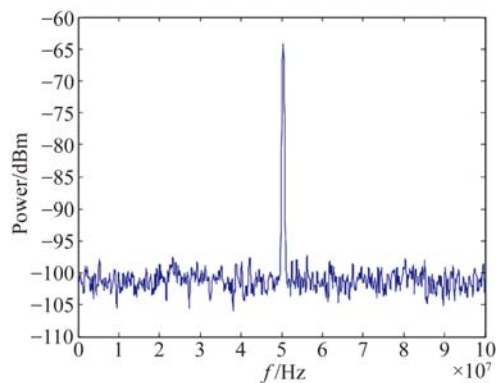


图 13 6 V 下拍出的 50 MHz 射频信号

Fig. 13 RF signal obtained at 6 V

由实验数据可以简单推算调制器的半波电压和调制效率,由文献[17]可知,对于一个强度调制和直接解调(IMDD)的 RoF 系统来说,半波电压大概在 120 V 左右。经过计算得到链路的增益约为 -50 dB。同样,如果能够测得噪声系数,还可以获得 RoF 链路的其他重要参数,如链路的噪声系数,压缩动态范围(CDR)和无杂散动态范围(SFDR)等。不过,受实际制作的调制器电极长度、表面粗糙度及石墨烯纯度等因素的影响,调制器样品的半波电压较大,因此整个调制器的效率还不够高。

根据实验结果,全光纤石墨烯调制器暂时只能实现 100 MHz 左右的调制带宽。最主要是受到 RC 条件的限制,进而限制了整个器件的调制带宽,具体分析可以参考文献[18]。根据文中的计算方法,PVDF 绝缘层的厚度大概在  $1 \mu\text{m}$  左右,石墨烯的有效面积在  $10 \text{ mm}^2$  左右,而电阻在  $500 \Omega$  左右,估算可得石墨烯调制器的 3 dB 带宽为 100 MHz,与实验测得的 3 dB 带宽基本一致。

实验初步验证了全光纤石墨烯电吸收调制器的可行性,但是该调制器尚未达到其理论性能。因此,在以后的工作中需要优化整个调制器的结构,以期获得调制带宽更大和调制效率更高的全光纤石墨烯调制器。

## 5 结 论

本文通过将传统的石墨烯波导调制器和全光纤调制器进行结合,提出了一种新型的全光纤石墨烯电吸收调制器。将光纤经过滚圆研磨至纤芯的位置,使石墨烯可以直接和纤芯接触,从而增加

光和石墨烯的相互作用。在此基础上提出了石墨烯电吸收调制器,并对这种方案进行了仿真分析和实验验证。提出的石墨烯调制器具备良好的性能,其中仿真四层石墨烯结构的电吸收调制器的调制深度达到了  $0.0233 \text{ dB}/\mu\text{m}$ , 仅需  $12.9 \mu\text{m}$  的长度就可以实现  $3 \text{ dB}$  的消光比,外加电压则不到  $1 \text{ V}$ 。实验初步验证了全光纤石墨烯调制器的

可能性,然而受实验调制的限制,仅实现了半波电压约为  $120 \text{ V}$ ,  $3 \text{ dB}$  调制器带宽为  $100 \text{ MHz}$  的调制器。与传统石墨烯波导调制器相比,全光纤石墨烯电吸收调制器具有半波电压小、调制效率高、潜在高调制带宽和尺寸小等优势,同时兼具光纤调制器插入损耗低的优点,适合应用在未来全光纤 RoF 系统中。

#### 参考文献:

- [1] 姜宝光, 穆全全, 曹召良, 等. 液晶空间光调制器对真实人眼畸变波前的校正[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2651-2656.  
JIANG B G, MU Q Q, CAO ZH L, *et al.*. The research on the correction of the aberration in eyes with liquid crystal spatial light modulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2651-2656. (in Chinese)
- [2] 金珠, 温志渝, 张智海, 等. 交叉效应对光栅光调制器阵列的影响[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1790-1797.  
JIN ZH, WEN ZH Y, ZHANG ZH H, *et al.*. Influence of crosstalk effect on grating light modulator array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1790-1797. (in Chinese)
- [3] 沈学举, 姚广涛, 胡文刚, 等. 利用空间光调制器的衍射特性提高 VLC 输出相关峰值[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2110-2113.  
SHEN X J, YAO G T, HU W G, *et al.*. Enhancing correlation peak value in VLC based on diffraction characteristic of SLM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2110-2113. (in Chinese)
- [4] CHUNG Y D, YOUNG-SHIK K, JIYOUN L I M, *et al.*. Large enhancement of linearity in electro-absorption modulator with composite quantum-well absorption core [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2005, 88(5): 967-972.
- [5] LI G L, YU P K L, TUTORIAL I. Optical intensity modulators for digital and analog applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(9): 2010-2030.
- [6] LIU M, YIN X, ZHANG X. Double-layer graphene optical modulator [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1482-1485.
- [7] LU Z, ZHAO W. Nanoscale electro-optic modulators based on graphene-slot waveguides [J]. *JOSA B*, 2012, 29(6): 1490-1496.
- [8] XU C, JIN Y, YANG L, *et al.*. Characteristics of electro-refractive modulating based on graphene-oxide-silicon waveguide [J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22398-22405.
- [9] YANG L, HU T, HAO R, *et al.*. Low-chirp high-extinction-ratio modulator based on graphene-silicon waveguide [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2512-2515.
- [10] LIU M, YIN X, ULIN-AVILA E, *et al.*. A graphene-based broadband optical modulator [J]. *Nature*, 2011, 474(7349): 64-67.
- [11] 冯德军, 黄文育, 纪鹏宇, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的掺铒光纤环形腔脉冲激光器[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1097-1101.  
FENG D J, HUANG W Y, JI P Y, *et al.*. Erbium-doped fiber ring cavity pulsed laser based on graphene saturable absorber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1097-1101. (in Chinese)
- [12] HIRABAYASHI K, WADA M, AMANO C. Liquid crystal variable optical attenuators integrated on planar lightwave circuits [J]. *IEEE, Photonics Technology Letters*, 2001, 13(6): 609-611.
- [13] MYRÉN N, MARGULIS W. All-fiber electrooptical mode-locking and tuning [J]. *IEEE, Photonics Technology Letters*, 2005, 17(10): 2047-2049.
- [14] YANG X, LIU Y, TIAN F, *et al.*. Optical fiber modulator derives from hollow optical fiber with suspended core [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2115-2117.
- [15] MATJASEC Z, CAMPJELJ S, DONLAGIC D. All-optical, thermo-optical path length modulation based on the vanadium-doped fibers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 11794-11807.
- [16] GAO W, SHU J, QIU C, *et al.*. Excitation of plasmonic waves in graphene by guided-mode resonances [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(9): 7806-7813.
- [17] URICK V J, BUCHOLTZ F, MCKINNEY J D, *et*

al.. Long-haul analog photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(8): 1182-1205.

[18] KOESTER S J, LI H, LI M. Switching energy

limits of waveguide-coupled graphene-on-graphene optical modulators [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20330-20341.

作者简介:



周 锋(1988—),男,安徽黄山人,博士,讲师,2010年、2015年于浙江大学分别获得学士、博士学位,主要从事微波光子学及新材料方面的研究。  
E-mail: eddychow1988@126.com



金晓峰(1968—),男,浙江东阳人,博士生导师,教授,1993年于中国舰船研究院获得硕士学位,1996年于浙江大学获得博士学位,主要从事光通信技术、微波/毫米波技术、微波光子技术和新型传感与探测技术等。E-mail: jinxf00@zju.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)