

注：河北省教育厅重点基金项目（No. ZD2017250）；广东开放大学（广东理工职业学院）校级课题（No. 1834）；广东开放大学（广东理工职业学院）校级课题（No. 1608）

摘要：基于石墨烯的光电子器件与光信号能够达到强烈的相互作用、超宽带的操作范围和高速率操作。通过控制石墨烯的外加偏置电压可以较容易的改变石墨烯的费米能级和化学势，进而改变其光吸收能力以及光波导中输出光强的控制能力。微环谐振腔能将一定频率的光在环内局域并进行循环振荡，利用微环谐振腔的谐振特性可以实现多种光信号传感和处理功能。本文将石墨烯与微环谐振腔结合在一起构成复合波导结构，重点研究其电光调制特性，通过理论推导和仿真实验得到，石墨烯偏置电压改变 0.011eV 时，微环谐振腔的电光调制消光比可以达到 2.8dB。

关键词：石墨烯；微环谐振腔；费米能级

中图分类号：TP212.14；TN253 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2020)08-0007-05

收稿日期：2020-06-04

# 硅基波导微环谐振腔光学传输特性研究

史振江<sup>1,2,3</sup> 李志全<sup>1,2</sup> 陆飞<sup>3</sup>

1. 燕山大学智能控制系统与智能装备教育部工程研究中心，河北秦皇岛 066000；

2. 燕山大学工业计算机控制工程河北省重点实验室，河北秦皇岛 066000；

3. 广东开放大学（广东理工职业学院）工程技术学院，广东广州 510091

## 一、引言

石墨烯是一种半金属薄膜材料，具有零带隙线性能带结构、常温下超高的电子迁移率、较大的量子霍尔效应和超宽带的光吸收，并且与现有的 CMOS 工艺技术兼容，这些性质使得石墨烯在调制器<sup>[1-2]</sup>、偏振器<sup>[3]</sup>、激光器<sup>[4-5]</sup>等领域具有重要应用。微环谐振腔是纳米光波导中的重要结构，它能将一定频率的光在环内局域并进行循环振荡，可以认为是一个光储存元件，利用微环谐振腔的这种谐振特性可以实现多种光信号传感<sup>[6-8]</sup>和处理<sup>[9-10]</sup>功能，而且微环谐振腔微小的尺寸对于提高光电芯片集成度、信号处理速度等都有着无可比拟的优势。

本文将石墨烯与微环谐振腔结合在一起构成复合波导结构，通过理论推导和仿真分析了石墨烯的折射率和覆盖长度对微环谐振腔光学传输特性的影响，仿真验证石墨烯光吸收能力对微环光波导中输出光强控制能力的影响。

## 二、原理分析

### 1、石墨烯

石墨烯是由单层碳原子构成的二维蜂窝状晶格结构材料，对垂直入射光的吸收率为 2.3%，导热系数高达 5300W/m·K，常温下电子迁移率超过 15000cm<sup>2</sup>/V·s。在绝对零度下，对于未掺杂的石墨烯而言，费米能量  $E_F=0\text{eV}$ ，化学势  $\mu\approx E_F=0\text{eV}$ 。

石墨烯场效应示意图如图 1 所示，通过给石墨烯

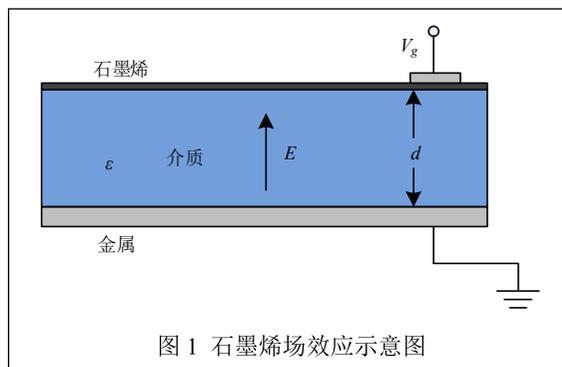


图 1 石墨烯场效应示意图

外加电压  $V_g$  可以改变石墨烯内部费米能级  $E_F$  和化学势  $\mu$  的大小, 进而改变其光吸收能力。

化学势  $\mu$  与  $V_g$  的对应关系为:

$$\mu = \hbar v_F \sqrt{\pi \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V_g}{de}} \quad (1)$$

式中,  $v_F$ —费米速度;

$\hbar$ —约化的普朗克常量;

$\epsilon_0$ —真空介电常数;

$\epsilon_r$ —相对介电常数;

$d$ —介质层厚度;

$e$ —单位电荷量。

石墨烯材料对光吸收的机制主要包括载流子的带间跃迁和带内跃迁两个过程, 该机制可以利用石墨烯的光电导率  $\delta(\omega)$  进行描述:

$$\delta(\omega) = \delta_{\text{intra}} + \delta_{\text{inter}} \quad (2)$$

$$\delta_{\text{intra}} = \delta_0 \frac{4\mu}{\pi} \frac{1}{\hbar(\tau_1^{-1} - \omega)} \quad (3)$$

$$\delta_{\text{inter}} = \delta_0 \left[ 1 + \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\hbar\omega - 2\mu}{\hbar\tau_2^{-1}} - \frac{1}{\pi} \arctan \frac{\hbar\omega + 2\mu}{\hbar\tau_2^{-1}} - i \frac{1}{2\pi} \ln \frac{(\hbar\omega + 2\mu)^2 + (\hbar\tau_2^{-1})^2}{(\hbar\omega - 2\mu)^2 + (\hbar\tau_2^{-1})^2} \right] \quad (4)$$

其中,  $\delta_0 = \frac{e^2}{4\hbar}$ ;

$\omega$ —光子角频率;

$\tau_1$ —带内跃迁弛豫时间;

$\tau_2$ —带间跃迁弛豫时间;

$\delta_{\text{intra}}$ —带内光电导率;

$\delta_{\text{inter}}$ —带间光电导率。

在石墨烯与光波导结合的光波导器件设计时, 一般用介电常数来表征材料的特性, 石墨烯的介电常数可以根据石墨烯的光电导率  $\delta(\omega)$  推导得到:

$$\epsilon(\omega) = 1 + i \frac{\delta(\omega)}{\omega \epsilon_0 d_g} \quad (5)$$

其中,  $i$ —虚部;

$d_g$ —石墨烯厚度。

## 2、微环谐振腔

全通型微环谐振腔由一根直波导和一个微环构成, 如图2所示, 图中  $R$  是微环半径。根据耦合膜理论有:

$$E_{\text{out}} = tE_{\text{in}} + ikE_2 \quad (6)$$

$$E_1 = ikE_{\text{in}} + tE_2 \quad (7)$$

其中,  $E_{\text{in}}$ —直波导输入端的光信号;

$E_{\text{out}}$ —直波导输出端的光信号;

$E_1$ —微环输入端的光信号;

$E_2$ —微环输出端的光信号;

$t$ —透射系数;

$k$ —耦合系数。

将式(6)和(7)变成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} E_{\text{out}} \\ E_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & ik \\ ik & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\text{in}} \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

耦合进微环的光信号  $E_1$  经过微环传输一周后的光信号  $E_2$  可以表示为:

$$E_2 = E_1 \exp(i\phi) \quad (9)$$

其中,  $\phi$  是光信号绕微环一周产生的光相位变化, 可以表示为:

$$\phi = \beta L = \frac{2\pi}{\lambda} (n + ia)L = k_0 (n + ia)L \quad (10)$$

其中,  $n$ —微环有效折射率;

$\beta$ —传播常数;

$a$ —微环损耗系数(吸收系数);

$L$ —微环周长;

$\lambda$ —光波长;

$k_0$ —真空波矢量。

将  $E_2$  带入到上面的矩阵中, 可以求得归一化光功率比值为:

$$\frac{E_{\text{out}}^2}{E_{\text{in}}^2} = \frac{t^2 + \exp(2i\phi) - 2t \exp(i\phi)}{1 + t^2 \exp(2i\phi) - 2t \exp(i\phi)} \quad (11)$$

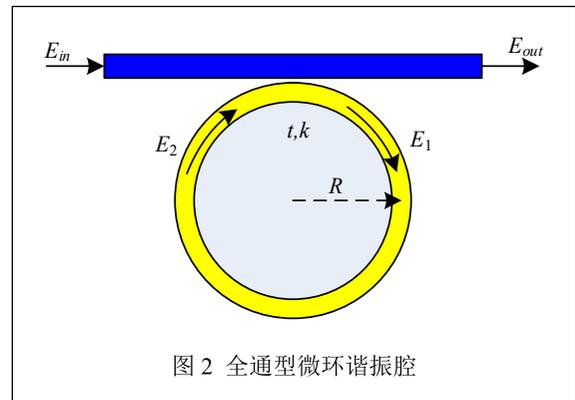


图2 全通型微环谐振腔

$$\exp(i\phi) = \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}(n+ia)L\right] = \exp\left(-\frac{2\pi aL}{\lambda}\right)\exp\left(i\frac{2\pi nL}{\lambda}\right) \quad (12)$$

全通型单环谐振腔中只有相位满足相位条件的光才能在环内稳定的传输。当光波长满足下面条件时，光在微环中发生谐振，不再从  $E_{out}$  端输出光信号。

$$\lambda = \frac{2\pi nR}{m} \quad (13)$$

其中， $m$ —正整数，代表谐振模式数量；

$R$ —微环半径。

### 3、石墨烯—微环谐振腔复合结构

石墨烯—微环谐振腔复合结构如图3所示，在图3微环谐振腔上加入石墨烯材料，石墨烯覆盖长度为  $L_g$ 。上述式(6)~(9)的耦合膜理论仍然适用，但是因为石墨烯的加入， $\exp(i\phi)$  发生变化，如下式：

$$\exp(i\phi) = \exp[i\beta(L-L_g)]\exp[i\beta_g L_g] \quad (14)$$

其中， $\beta_g$ —光在石墨烯中的传播常数；

$L_g$ —石墨烯覆盖长度。

进一步推导可以得到：

$$\exp(i\phi) = \exp[-k_0 a(L-L_g) - k_0 a_g L_g] \exp[ik_0(nL - nL_g + n_g L_g)] \quad (15)$$

其中， $a_g$ —石墨烯折射率虚部；

$n_g$ —石墨烯折射率实部。

公式前一项是微环传输系数，影响光信号幅值，通过改变参数  $a_g$  和  $L_g$ ，可以改变石墨烯对微环中光信号的吸收作用，进而实现电光调制。

## 三、仿真实验

### 1、石墨烯特性仿真

利用 Matlab 对石墨烯特性进行了仿真，仿真结果如图4所示。根据公式(2)~(4)，可以计算出石墨烯的光电导率的实部和虚部值随着石墨烯化学势能  $\mu$  的变化曲线，如图4(a)所示。计算时采用的参数值如表1所示。

石墨烯的介电常数随着石墨烯化学势能的变化可由以上公式(5)计算得到，仿真结果如图4(b)所示。式中石墨烯的有效厚度  $d_g = 0.7\text{nm}$ ， $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ 。从图中可以看到，石墨烯介电常数的实部和虚部在化学势

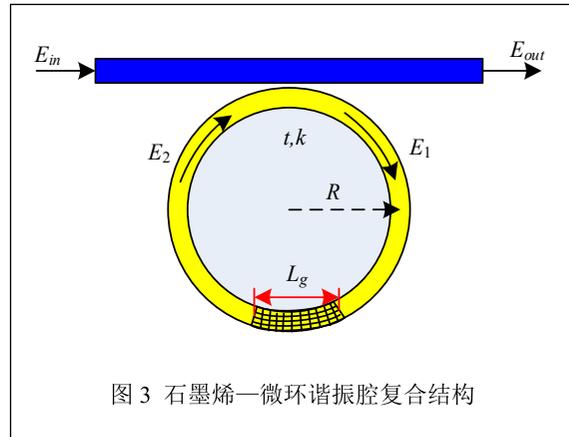


图3 石墨烯—微环谐振腔复合结构

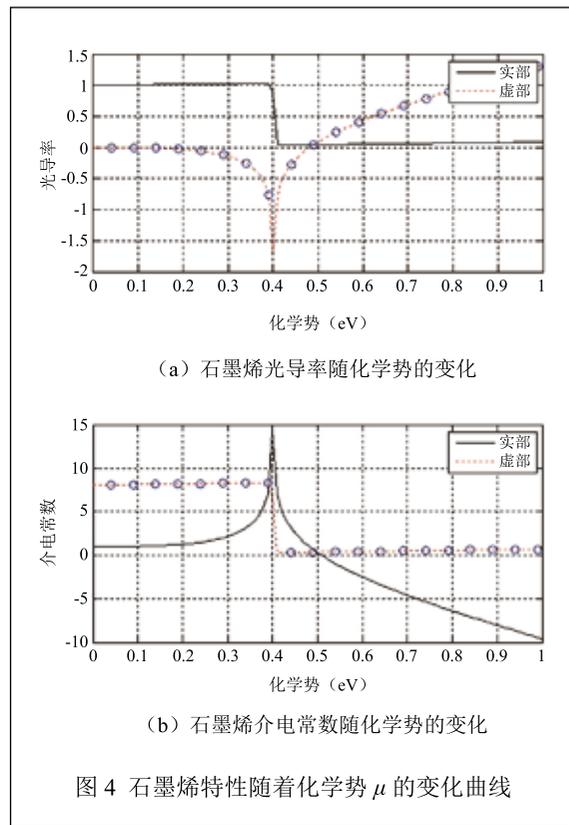


图4 石墨烯特性随着化学势  $\mu$  的变化曲线

表1 光电导率仿真参数列表

参数符号	参数值	单位
$\hbar$	$1.06 \times 10^{-34}$	J·s
$e$	$1.6 \times 10^{-19}$	C
$\tau_1$	$0.015 \times 10^{-12}$	s
$\tau_2$	$1.2 \times 10^{-12}$	s

等于 0.4eV 左右时有着尖锐的改变；石墨烯介电常数的实部和虚部在化学势小于 0.51eV 时都是正数，这时石墨烯的特性相当于普通的电介质特性；而当化学势大于 0.51eV 时，石墨烯介电常数的实部变为负数，而虚部接近于零，具有贵金属特性，此时对光的吸收能力较强。正是因为石墨烯这样独特的电光调制特性，被认为在光调制器中有着极大的应用，再加上其超快的电子迁移率，基于石墨烯的光调制器被认为可以实现超高速的光信号调制。

### 2、微环谐振腔特性仿真

利用 Matlab 对微环谐振腔特性进行了仿真，微环归一化透射谱随波长的变化曲线如图 5 所示。

全通型单环谐振腔中只有相位满足相位条件的光才能在环内稳定的传输，因此输出端的光呈现陷波的形式。分别对微环半径  $R=1.7\mu\text{m}$  和  $R=5\mu\text{m}$  进行了仿真，通过仿真图可以看出半径  $R$  不同会导致谐振模式数量和消光比不同，半径  $R$  越小，谐振模式数量越少，消光比越大。但是微环半径越小，对加工工艺的要求也越高。

### 3、石墨烯—微环谐振腔仿真

利用 comsol 对石墨烯—微环谐振腔进行了有限元仿真，石墨烯微环输出端口透射率随波长变化曲线如图 6 (a) 所示，可以看出当波长在  $1.5577\mu\text{m}$  附近时，光在微环中发生明显谐振，在波形上表现出陷波的形式。图 6 (b) 是波长为  $1.5577\mu\text{m}$  时，输出端口消光比随石墨烯折射率虚部的变化曲线，可以看出当  $a_g=0$  时，石墨烯对微环中的光信号没有吸收作用，光在微环中发生谐振，输出与输入光功率比值出现最低值为 -3dB 左右；而当  $a_g=0.5$  时，石墨烯对微环中的光信号产生吸收作用，光在微环中不能发生谐振，输出与输入光功率比值出现最高值为 -0.2dB 左右。通过计算可得光功率比值变化范围对应的石墨烯化学势和外加偏置电压变化范围分别是 0.005eV 和 0.011eV，因此通过改变石墨烯外加偏置电压，可以调节输出光功率的大小，进而实现电光调制。

### 四、结束语

本文通过理论推导和仿真分析了石墨烯作用于微环谐振腔后对其电光调制特性的影响，分析了全通型单环谐振腔输出光透射强度随石墨烯的折射率以及光波长的变化规律。当光波长在  $1.5577\mu\text{m}$  附近时，如果石墨烯虚部  $a_g=0$ ，石墨烯对微环中的光信号没有吸收作用，因此光在微环中发生明显谐振，输出端

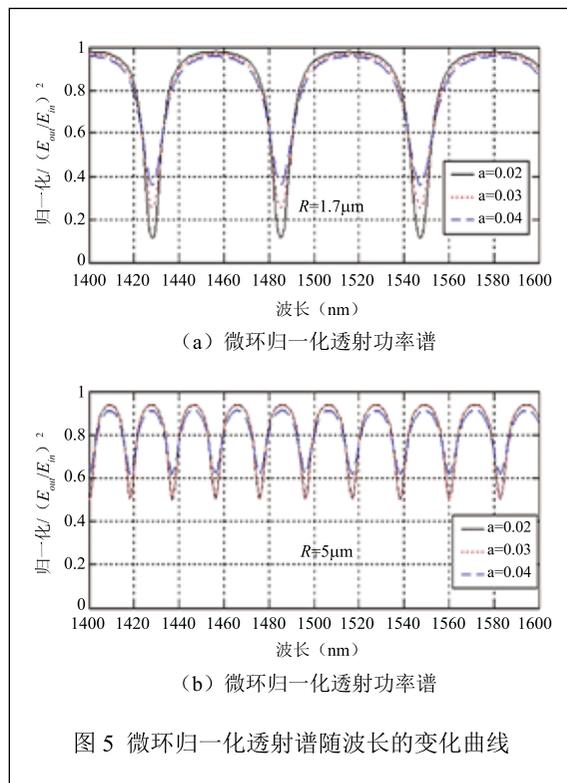


图 5 微环归一化透射谱随波长的变化曲线

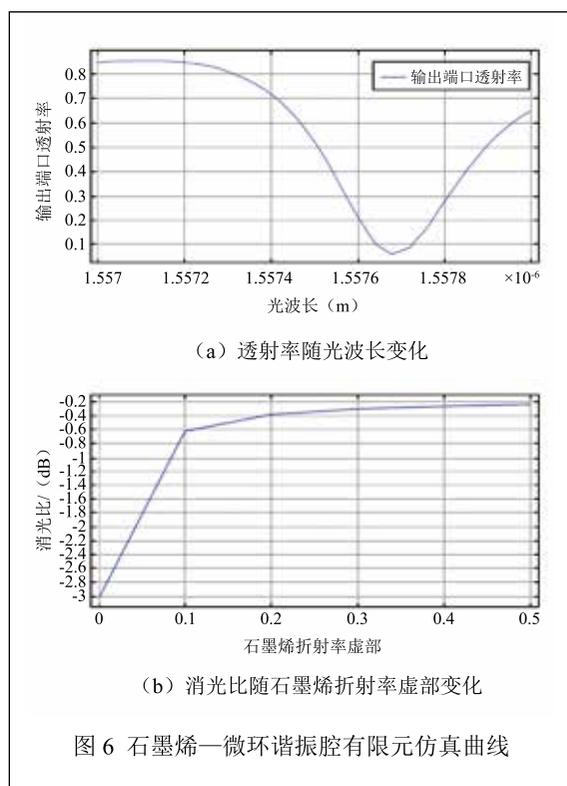


图 6 石墨烯—微环谐振腔有限元仿真曲线

口只有微弱光信号, 相当于“0”状态; 如果石墨烯虚部  $a_g=0.5$ , 石墨烯对微环中的光信号有较强的吸收作用, 破坏了光在微环中发生谐振的条件, 因此光信号绝大部分直接投射到输出端口, 相当于“1”状态。通过仿真实验可知, 石墨烯作用于微环谐振腔可以较好的实现电光调制。

#### 参考文献

- [1] 王少亮, 叶子威, 彭希亮, 郝然. 基于石墨烯的高效复合波导调制器研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(05): 144-148.
- [2] 金丽丹, 宁提纲, 裴丽, 郑晶晶, 李晶, 贺雪晴. 基于石墨烯的 D 型双芯光纤调制器 [J]. 光学学报, 2019, 39(05): 71-78.
- [3] 吴小虎, 彭英姿, 郑奇焯, 李源. 二维 MoS<sub>2</sub>/ 石墨烯异质结对圆偏振光的光电响应 [J]. 杭州电子科技大学学报 (自然科学版), 2020, 40(02): 74-79.
- [4] 任军, 吴思达, 程昭晨, 徐佳, 杨全红, 王璞. 基于氧化石墨烯与半导体可饱和吸收镜的锁模飞秒掺铒光纤激光器 [J]. 中国激光, 2015, 42(06): 93-98.
- [5] 王晓龙, 桑梅, 朱攀, 陈沛佩, 刘珂, 杨天新. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动调 Q 光纤激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(06): 119-124.
- [6] 孙枫, 万静, 冯明贤, 王兆松, 苗江云. 基于微环辅助的 M-Z 温度传感器 [J]. 光通信研究, 2020, (01): 38-42.
- [7] 陈芄宇, 张雷, 李鹏宇, 赵超樱. 狭缝级联微环耦合谐振腔声学传感特性分析 [J]. 杭州电子科技大学学报 (自然科学版), 2019, 39(05): 25-29.
- [8] 刘恒, 马涛, 余重秀, 高金辉. 双层介质加载等离子体微环的高灵敏生物传感 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(03): 140-144.
- [9] 郑鹏飞, 恽斌峰. 可重构自耦合微环辅助的 MZI 集成光子滤波器 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(01): 1-9.
- [10] 李静, 郑鹏飞, 徐雪朦, 洪红, 杨惠敏, 张若虎, 恽斌峰. 基于氮化硅微环和载波分离的可重构微波光子带通滤波器 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(01): 117-122.

#### Research on Optical Transmission Characteristics of Microring Resonator with Silicon Waveguide

SHI Zhen-jiang<sup>1,2,3</sup>, LI Zhi-quan<sup>1,2</sup>, LU Fei<sup>3</sup>

(1. Engineering Research Center of the Ministry of Education for Intelligent Control System and Intelligent Equipment, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China; 2. Key Laboratory of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University Qinhuangdao 066000, China; 3. Dept. of Engineering Technology, Open University of Guangdong (Guangdong Polytechnic Institute), Guangzhou 510091, China)

**Abstract:** Graphene based optoelectronic devices and optical signals can achieve strong interaction, ultra wide band operation range and high-speed operation. By controlling the applied bias voltage of graphene, the Fermi energy level and chemical potential of graphene can be easily changed, and then the light absorption ability and the output light intensity control ability of the waveguide can be changed. Micro ring resonator can localize the light with a certain frequency in the ring and oscillate circularly. It can realize a variety of optical signal sensing and processing functions by using the resonance characteristics of micro ring resonator. In this paper, graphene and microring resonator are combined to form a composite waveguide structure, and its electro-optic modulation characteristics are mainly studied. Through theoretical derivation and simulation experiments, the electro-optic modulation extinction ratio of microring resonator can reach 2.8dB when the bias voltage of graphene is changed by 0.011eV.

**Key words:** graphene; microring resonator; fermi level

#### 作者简介

史振江: 广东开放大学 (广东理工职业学院), 博士, 副教授, 主要研究方向为光电检测与信号处理。  
通信地址: 广东省广州市越秀区下塘西路一号  
邮编: 510091  
邮箱: szj\_79@126.com  
李志全: 燕山大学, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性光电检测。  
陆飞: 广东开放大学 (广东理工职业学院), 硕士, 讲师, 主要研究方向为声光信号处理。