

doi:10.3788/gzxb20184703.0324004

基于电控棱镜结构太赫兹波开关

赵泽江, 李九生

(中国计量大学 信息工程学院 太赫兹研究所, 杭州 310018)

摘 要:提出基于棱镜-空气-石墨烯-石英-硅结构,通过外加电场改变石墨烯的介电常数,引起太赫兹波反射率的变化,并利用等离子体共振机理对反射太赫兹波强度控制以实现太赫兹波开关功能.研究了空气隙对太赫兹波反射率的影响,结果表明:当空气隙为 $20\ \mu\text{m}$ 时,太赫兹波反射率最小值为 68.79% ,当空气隙为 $56\ \mu\text{m}$ 时,太赫兹波反射率最小值降至 0.04% ,此时的空气隙达到最佳值.分析确定了石墨烯化学势对太赫兹波反射率的影响,结果表明:当石墨烯化学势从 $0\ \text{eV}$ 增加到 $0.2\ \text{eV}$,太赫兹波的反射率从零增加到 95.89% ,从零反射变成全反射,表明该结构具有优异的反射太赫兹波强度控制性能,开关的消光比达到 $33\ \text{dB}$.

关键词:太赫兹波;等离子体;电控;石墨烯;多层结构;开关

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)03-0324004-6

Terahertz Wave Switch Based on Electric Tunable Prism Structure

ZHAO Ze-jiang, LI Jiu-sheng

(Centre for THz Research, School of Information Engineering, China Jiliang University,
Hangzhou 310018, China)

Abstract: A terahertz wave switch based on prism-air-graphene-quartz-Si structure was proposed. The dielectric constant of grapheme was changed by the applied external voltage, which make the terahertz wave reflectivity dramatically was changed. The plasma resonance mechanism was used to control of reflected terahertz wave intensity and realize the function of terahertz wave switch. Firstly, the influence of air gap distance on terahertz wave reflectivity is studied. The results show that when air gap is $20\ \mu\text{m}$, the minimum value of terahertz wave reflectance is 68.79% , When air gap is $56\ \mu\text{m}$, the minimum value of terahertz wave reflectance is reduced to 0.04% and the air gap distance reaches the optimum value. Secondly, the influence of graphene chemical potential on terahertz wave reflectivity was determined. The results show that when the chemical potential of graphene increases from $0\ \text{eV}$ to $0.2\ \text{eV}$, the reflectivity of terahertz wave increases from zero to 95.89% and changes from zero to total reflection. The numerical results also further show that the proposed structure has enormous potential for terahertz wave switch with the extinction ratio of $33\ \text{dB}$.

Key words: Terahertz wave; Plasma; Electronic control; Graphene; Multilayer structure; Switch

OCIS Codes: 240.3990; 240.6700; 130.4815; 300.6495; 350.5400

0 引言

近年来,随着太赫兹波产生和检测技术迅速发展^[1-3],太赫兹技术被广泛应用于许多领域,如:太赫兹通信,太赫兹大气监测,太赫兹安检等.太赫兹功能器件的研发也日显重要,相关器件有开关^[4-6]、滤波器^[7-8]、调制器^[9]、传感器^[10]和分束器^[11-12]等,尤其是太赫兹波开关引起了不少科研人员关注.LI J 等^[13-14]提出了基于

基金项目:国家自然科学基金(No.61379024)资助

第一作者:赵泽江(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为太赫兹技术及其应用和超材料. Email:736900045@qq.com

导师(通讯作者):李九生(1976-),男,教授,博士,主要研究方向为太赫兹技术应用. Email:702289460@qq.com

收稿日期:2017-09-20;录用日期:2017-11-28

<http://www.photon.ac.cn>

光子晶体结构的太赫兹波开关和光控硅平板结构的太赫兹波开关,消光比为29.9 dB,开关响应时间小于50 ms. CHEN H等^[15]提出基于电控人工介质结构的太赫兹波开关,采用0 V和16 V之间交替的矩形交流反向偏压. ZHANG H^[16]提出了基于液晶/光子晶体结构的太赫兹波开关,消光比达到16 dB. GÓMEZ-DÍAZ J等^[17]提出基于石墨烯材料的太赫兹开关,隔离度达到80 dB. SUEN J等^[18]用ErAs:GaAs设计了应用于0.2~1.0 THz范围的开关,衰减为17 dB. SONG K等^[19]提出了波导-腔-波导通道型结构太赫兹开关,消光比为3 dB. 等离子体共振机理被广泛应用于太赫兹波调控, CHEN L等^[20-21]提出缺陷诱导金属圆盘产生多个Fano共振以及一个由C形和波纹金属盘组成的混合结构来调控太赫兹波. 本文提出利用棱镜-空气-石墨烯-石英-硅多层结构实现对太赫兹开关的功能. 将特定频率的太赫兹波以固定的角度从棱镜左侧入射,在棱镜右侧的太赫兹波全反射方向上固定一个太赫兹波探测器. 当无外加电场时,石墨烯的折射率为定值,结构满足匹配条件产生表面等离子体共振,入射太赫兹能量在空气-石墨烯界面传输,太赫兹波反射率几乎为零,棱镜右侧太赫兹波反射强度达到最低,此时位于棱镜右侧的太赫兹波探测器探测不到反射太赫兹波,这种情况可以作为太赫兹波开关“关”状态. 当有外加电场时,石墨烯层介质材料折射率发生变化,不再满足等离子体共振的匹配条件,反射太赫兹波强度随着外加偏压变化而增强,反射太赫兹波按照几何光学反射方向实现对太赫兹波的反射传输,此时棱镜右侧的太赫兹波探测器可以探测到反射的太赫兹波,称为太赫兹波开关“开”状态. 计算结果获得该开关的消光比可达33.8 dB,可以实现太赫兹波开关功能.

1 太赫兹波开关设计

结合棱镜耦合衰减全反射技术构建一个表面等离子体共振结构,设计新型太赫兹开关,见图1. 该结构共四层,第一层是由远红外石英组成的棱镜,折射率 $n_1=1.94$. 与棱镜间隔一定距离处设有石墨烯层,棱镜和石墨烯层之间的空气隙为 d_2 . 石墨烯层的厚度为 $d_3=N \times 0.33$ nm,其中 N 为石墨烯的层数. 石墨烯下层为石英层,石英层作为缓冲层,厚度为 $d_4=10$ μm . 石英的下层为硅层,其厚度 $d_5=490$ μm . 将一定频率的太赫兹波从棱镜左侧以一定角度(θ)入射,棱镜右侧固定一个太赫兹波探测器. 该结构基本原理是:当无外加电场时,石墨烯层介质的折射率没有变化,入射太赫兹波满足表面等离子体共振条件,结构产生离子体共振,入射太赫兹波能量几乎全部在空气-石墨烯界面传输,棱镜右侧反射率接近0,探测器探测不到反射太赫兹波,开关处于“关”状态. 表面等离子体激元对界面介质的介电常数改变十分敏感,改变介质的介电常数不满足共振匹配条件时,界面等离子体共振消失,结构发生全反射,反射太赫兹波按照几何光学反射方向实现对太赫兹波的反射传输,反射强度迅速变大,探测器能探测到反射太赫兹波能量,这种状态可以称为太赫兹波开关“开”状态. 通过控制反射率,根据棱镜右侧的探测器是否探测到反射太赫兹波来控制太赫兹波的开关.

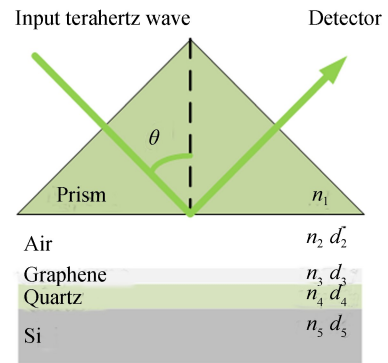


图1 太赫兹波开关结构

Fig.1 Diagram of terahertz wave switch

采用转移矩阵法求多层结构的反射系数的表达式, U_1 代表在第一层边界电场的切向分量,第 N 层边界电场的切向分量分别由 U_{N-1} 表示. V_1 和 V_{N-1} 分别表示第一层边界磁场和第 N 层边界磁场的切向分量.第一边界的切向场与最终边界的切向场关系表达式为

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_3 \mathbf{M}_4 \cdots \mathbf{M}_{N-1} \begin{bmatrix} U_{N-1} \\ V_{N-1} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} U_{N-1} \\ V_{N-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $M_{ij} = \left(\prod_{k=2}^{N-1} \mathbf{M}_k \right)_{ij}$, $i, j = 1, 2, \dots$, \mathbf{M} 表示多层体系结构的特征矩阵, \mathbf{M}_k 表达式为

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} \cos \beta_k & -i \sin(\beta_k/q_k) \\ -i q_k \sin \beta_k & \cos \beta_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $q_k = (\epsilon_k - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2} / \epsilon_k$, $\beta_k = 2\pi d_k / \lambda (\epsilon_k - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{1/2}$, λ 是入射光的波长, θ 是TM偏振太赫兹波的入射角, d_k 表示任意介质层的厚度, ϵ_k 表示任意介质层介电常数, n_k 表示任意介质层的折射率.根据菲涅

耳公式,得出反射系数为

$$r_p = \frac{(M_{11} + M_{12}q_N)q_1 - (M_{21} + M_{22}q_N)}{(M_{11} + M_{12}q_N)q_1 + (M_{21} + M_{22}q_N)} \quad (3)$$

该多层结构的太赫兹波反射率可以表示为 $R = |r_p|^2$.

2 结果与讨论

石墨烯的电磁特性主要由化学势能决定,通过掺杂或外加电场等手段可实现动态调控石墨烯化学势能,改变电导率,最后使其介电常数发生改变,石墨烯介电常数表达式为

$$\epsilon_{g,eq} = \epsilon' + i\epsilon'' = 1 + i\sigma/(\epsilon_0 d\omega) \quad (4)$$

式中石墨烯的电导率 $\sigma(\omega)$ 由带内电导率 $\sigma_{intra}(\omega, \mu_c, \Gamma, T)$ 和带间电导率 $\sigma_{inter}(\omega, \mu_c, \Gamma, T)$ 两部分构成,由 Kubo 公式计算得

$$\sigma(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \sigma_{intra}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) + \sigma_{inter}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) \quad (5)$$

$$\sigma_{intra}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = -\frac{je^2}{\pi\hbar^2(\omega + j2\Gamma)} \int_0^\infty \xi \left(\frac{\partial f_d(\xi, \mu_c, T)}{\partial \xi} - \frac{\partial f_d(-\xi, \mu_c, T)}{\partial \xi} \right) d\xi \quad (6)$$

$$\sigma_{inter}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \frac{je^2(\omega + j2\Gamma)}{\pi\hbar^2} \times \left[\int_0^\infty \frac{f_d(-\xi, \mu_c, T) - f_d(\xi, \mu_c, T)}{(\omega + j2\Gamma)^2 - 4(\xi/\hbar)^2} d\xi \right] \quad (7)$$

在太赫兹低频波段且处于室温条件时带间电导率远远小于带内电导率,因此带间电导率通常忽略,石墨烯的电导率 $\sigma = \sigma' + j\sigma''$ 可近似表示为

$$\sigma \approx \sigma_{intra} = \sigma'_{intra} + j\sigma''_{intra} = \frac{je^2 k_B T}{\pi\hbar^2(\omega + j2\Gamma)} \times \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2\ln(e^{\mu_c/k_B T} + 1) \right] \quad (8)$$

由式(4)~(8)计算得到石墨烯化学势分别为 0 eV、0.1 eV 和 0.2 eV 时,石墨烯介电常数随频率的变化关系如图 2 所示,从图 2(a)中可以看出石墨烯介电常数的虚部一直为正数,因此石墨烯在太赫兹频段支持 TM 模式表面等离子体波传输。

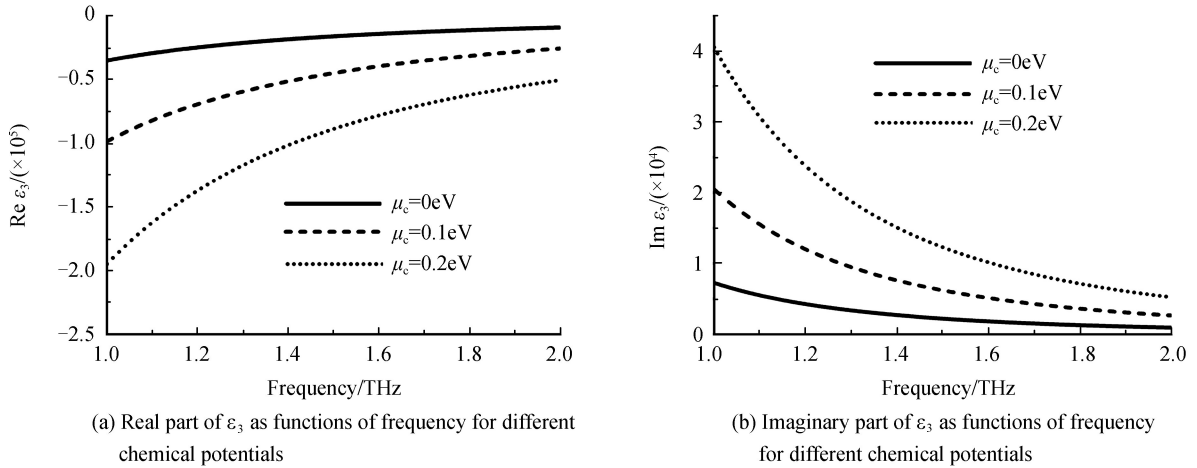


图 2 不同化学势时石墨烯介电常数 ϵ_3 随频率变化关系

Fig.2 The dielectric constant ϵ_3 of graphene as functions of frequency for different chemical potentials

外加电场会改变石墨烯化学势,关系为

$$D_n = \epsilon_i E = en_s/2 \quad (9)$$

式中 E 为外加电场, n_s 表示石墨烯电荷密度,而石墨烯化学势 μ_c 的值取决于载流子密度,其计算方式为

$$n_s = \frac{2}{\pi\hbar^2 v_F^2} \int_0^\infty \xi [f_d(\xi, \mu_c, T) - f_d(\xi + 2\mu_c, \mu_c, T)] d\xi \quad (10)$$

由式(9)和(10)可得到

$$\frac{2\epsilon_i E}{e} = \frac{2}{\pi\hbar^2 v_F^2} \int_0^\infty \xi [f_d(\xi, \mu_c, T) - f_d(\xi + 2\mu_c, \mu_c, T)] d\xi \quad (11)$$

太赫兹频段石墨烯电导率的虚部都是正数,因此该结构支持 TM 模式表面等离子体波传输^[22]. 由于单

层的石墨烯不足以屏蔽外加电场所带来的表面电荷,所以可以通过外加电场改变石墨烯化学势,石墨烯化学势的改变会导致其电导率变化,从而改变了石墨烯介电常数.本文在绝对温度 $T=300\text{ K}$ 下,石墨烯化学势分别为 $\mu_c=0\text{ eV}, 0.1\text{ eV}, 0.2\text{ eV}$, 计算得到各个太赫兹频率对应石墨烯介电常数如图2.从图中可以看出,随着化学势的增加,石墨烯介电常数的实部逐渐减小,介电常数的虚部不断增加.本文在频率为 1 THz 时(此时太赫兹波入射波长为 $300\text{ }\mu\text{m}$),取不同化学势的石墨烯介电常数用于计算.由式(11)计算得到石墨烯化学势随外加电场变化曲线如下图3所示.

由于表面等离子激元对结构参数相当敏感,空气

隙的变化会直接影响该开关性能,所以需要首先确定空气隙的最佳值,使开关表现出最优异的性能.在没有外加电场和外加激光时,改变空气隙,计算得到产生等离子体时的共振角(θ_{spr})和共振时太赫兹波反射率 R 关系如图4.从图4(a)可以看出随着空气隙从 $20\text{ }\mu\text{m}$ 到 $90\text{ }\mu\text{m}$ 变化,入射太赫兹辐射的倏逝波和表面等离子体激元有显著的耦合产生表面等离子体共振.当空气隙小于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时,相当一部分能量被反射回棱镜限制了表面等离子体激发;而空气隙大于 $90\text{ }\mu\text{m}$ 时倏逝波太大无法激发等离子体共振.当空气隙 $d_2=20\text{ }\mu\text{m}$ 时,太赫兹波反射率最小值为 $R=68.79\%$.随着空气隙增加,太赫兹波反射率 R 逐渐减小,当空气隙 $d_2=56\text{ }\mu\text{m}$ 时,太赫兹波反射率达到最低 $R=0.04\%$,此时入射太赫兹波能量几乎全部转化为表面等离子体共振,棱镜右侧没有太赫兹波反射.图4(b)是空气隙 $d_2=26\text{ }\mu\text{m}, 56\text{ }\mu\text{m}, 86\text{ }\mu\text{m}$ 时,该太赫兹开关结构的太赫兹波反射率关系曲线.由图可以看出,空气隙 $d_2=56\text{ }\mu\text{m}$,扫描入射角得到共振角 $\theta_{\text{spr}}=54.32^\circ$ 时(图4(a)中细直虚线箭头所指的),太赫兹波反射率最小为 $R=0.04\%$,并且其半高全宽(Full Width at Half Maximum,简称 FWHM)为 0.29° ;当空气隙为 $d_2=86\text{ }\mu\text{m}$ 时,太赫兹波反射率最小值为 $R=46.43\%$;当空气隙为 $d_2=26\text{ }\mu\text{m}$ 时,太赫兹波反射率最小值为 $R=53.94\%$,这是因为传播常数降低使匹配条件被破坏,导致约束减弱及能量耦合的效率下降,所以出现了反射太赫兹波的能量增加.从图4可以确定最佳空气隙为 $d_2=56\text{ }\mu\text{m}$.该结构利用石墨烯层下以及硅分别作为上电极和基电极,当在石墨烯层与硅之间施加偏置电压时,石墨烯电导率会改变,介电常数随之变化,从而实现太赫兹波反射率强度动态控制.图5为太赫兹波反射率随石墨烯化

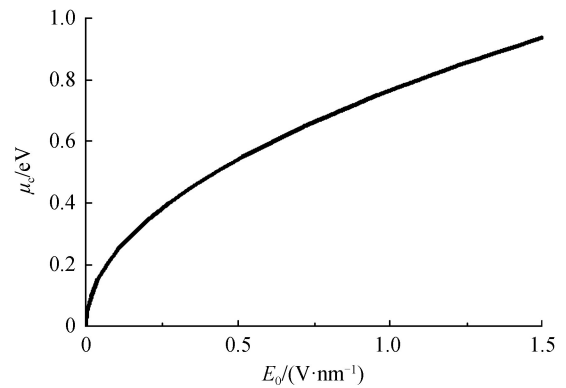
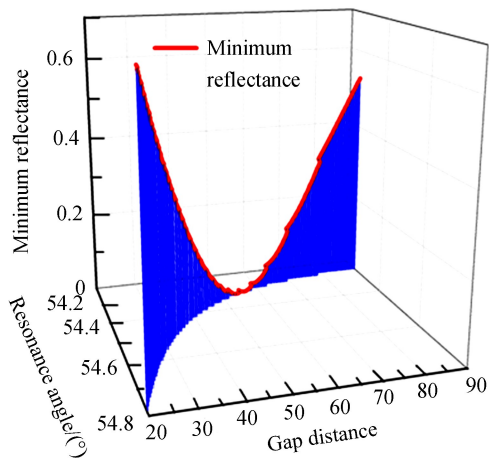
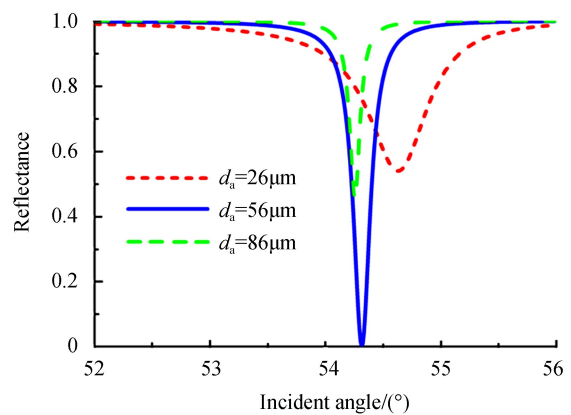


图3 石墨烯化学势与外加电场关系

Fig.3 Relationship between chemical potentials of graphene and applied electric field



(a) Variation of minimum reflectance with resonance angle and gap distance



(b) Variation of reflectance with incident angle for different value of gap distances

图4 不同空气隙时的共振角及共振时的太赫兹波反射率关系和太赫兹波反射率与空气隙的关系曲线

Fig.4 Variation of minimum reflectance with resonance angle and gap distance and Variation of reflectance with incident angle for different value of gap distances

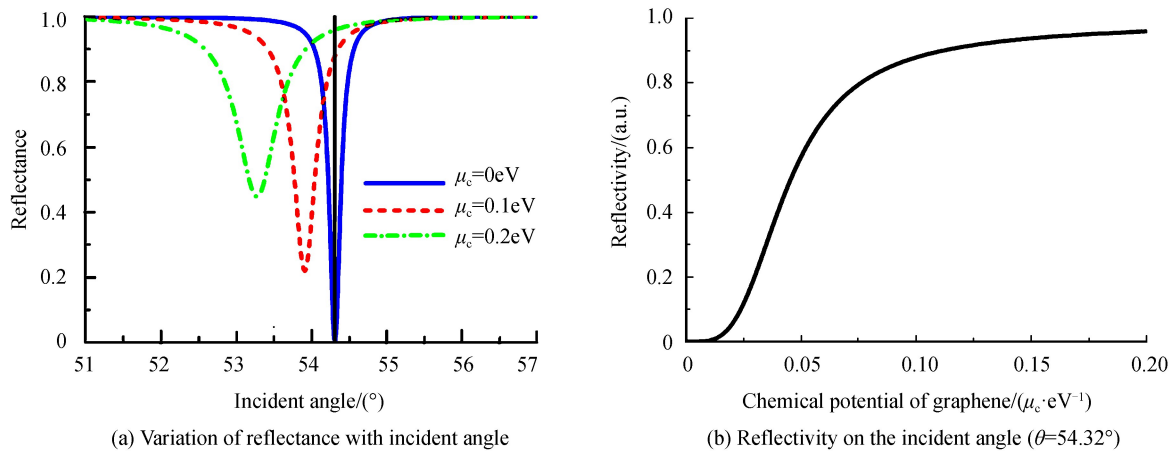


图5 太赫兹波反射率在不同入射角和固定入射角($\theta=54.32^\circ$)下随石墨烯化学势变化关系
Fig.5 Variation of reflectance with incident angle and dependence of the reflectance on the incident angle ($\theta=54.32^\circ$) for different chemical potentials of graphene

学势变化关系,此时石墨烯化学势分别为 $\mu_c = 0\text{ eV}, 0.1\text{ eV}, 0.2\text{ eV}$.由图可见,随着石墨烯化学势增加,共振角变小.当无外加偏压(石墨烯化学势 $\mu_c = 0\text{ eV}$)时,入射角等于共振角 $\theta = \theta_{\text{spr}} = 54.32^\circ$ 时(图5(a)中细直虚线箭头所指的),该结构产生等离子体共振,太赫兹波反射率几乎为零,太赫兹探测器探测不到反射太赫兹波,太赫兹波开关处于“关”状态.当石墨烯化学势增加到 $\mu_c = 0.1\text{ eV}$,太赫兹波反射率迅速变大达到 $R = 87.90\%$.随着石墨烯化学势增加到 $\mu_c = 0.2\text{ eV}$,太赫兹波反射率 $R = 95.89\%$,棱镜结构接近全反射,太赫兹探测器可以探测反射太赫兹波,此时确定为太赫兹波开关“开”状态.太赫兹波开关的消光比定义为 $-10\log P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$,根据该公式计算得到该电控太赫兹波开关的消光比为 33.8 dB .图6表示灵敏度与石墨烯化学势关系曲线,其中灵敏度为共振角(θ_{spr})变化率与石墨烯化学势 μ_c 变化比值.从图中可以看出,当外加偏压使石墨烯的化学势增大时,其灵敏度随之变大.

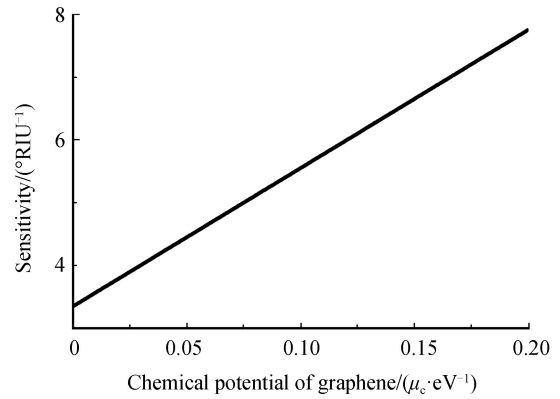


图6 结构中石墨烯的化学势变化对器件灵敏度的影响($\theta=54.32^\circ$)
Fig.6 Variation of sensitivity with chemical potentials of graphene($\theta=54.32^\circ$)

3 结论

根据表面等离子体共振以及通过改变石墨烯化学势从而改变其介电常数原理设计了一个多层结构太赫兹波开关.由于表面等离子激元对结构参数相当敏感,空气隙的变化会直接影响该开关性能,所以首先分析确定了空气隙的最佳值,使开关表现出最优异的性能.在没有外加电场时,通过对空气层厚度的控制,太赫兹波反射率达到 0.04% ,此时入射太赫兹波能量几乎全部转化为表面等离子体共振,太赫兹波基本无反射.另外,分析确定了石墨烯化学势对太赫兹波反射率的影响.结果表明,当石墨烯化学势从 0 eV 增加到 0.2 eV ,太赫兹波的反射率从零增加到 95.89% ,从零反射变成全反射.综上所述,通过外部电压偏置能使太赫兹波的反射率可以快速地由 0 切换到 1 ,开关消光比达到 33 dB ,该结构可以实现对太赫兹波高效切换控制.

参考文献

- [1] WANG Zhao-lu, LIU Hong-jun, HUANG Nan, *et al.* Efficient terahertz-wave generation via four-wave mixing in silicon membrane waveguides[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(8): 8920-8928.
- [2] SIEGEL P H. Terahertz Technology[J]. *IEEE Transaction on Microwave Theory & Technology*, 2002, **50**(3): 910-928.
- [3] YOUNG Bin-ji, EUI S L, JIN S J, *et al.* Enhancement of the detection of THz sommerfeld wave using a conical wire waveguide[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(1): 271-278.

- [4] HENDRY E, LOCKYEAR M J, RIVAS J G, *et al.* Ultrafast optical switching of the THz transmission through metallic subwavelength hole arrays[J]. *Physical Riview B*, 2007, **75**(23): 235305.
- [5] YARAHMADI M, MORAVVEJ M K, YOUSEFI L. Subwavelength graphene-based plasmonic THz switches and logic gates. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, **5**(5): 725-731.
- [6] ZHANG Xiao-yu, TAN Ren-bing, ZHANG Xin, *et al.* Terahertz filters based on frequency selective surfaces for high-speed terahertz switch[J]. *Applied Physics*, 2013, **113**(1): 014504.
- [7] STEWING F, KLEINE-OSTMANN T, KOCH M. A new class of improved-efficiency THz filters for on-chip detection of biomaterials[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, **41**(2): 79-82.
- [8] ARLINE M M, MARIANO A K, PIERRE K, *et al.* Metal mesh resonant filters for terahertz frequencies[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(32): 6064-6069.
- [9] HE Ting, ZHANG Bo, SHEN Jing-ling, *et al.* High-efficiency THz modulator based on phthalocyanine-compound organic films[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **105**(5): 053303.
- [10] SREEKANTH K V, ZENG Shu-wen, YONG K T, *et al.* Sensitivity enhanced biosensor using graphene-based one-dimensional photonic crystal[J]. *Sensors and Actuator B:Chemical*, 2013, **182**(1):424-428.
- [11] PANDEY S, KUMAR G, NAHATA A. Slot waveguide-based splitters for broadband terahertz radiation[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(22): 23466-23471.
- [12] MARKIDES C, THEMISTOR C, TANVIR H, *et al.* Multimode interference 3 dB splitters in hollow core metallic waveguides for low-loss THz wave transmission[J]. *IEEE Journal of Selected Topic in Quantum Electronics*, 2013, **19**(1): 8500606.
- [13] LI Jiu-sheng, HE Jin-long, HONG Zhi. Terahertz wave switch based on silicon photonic crystals[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(22): 5034-5037.
- [14] LI Jiu-sheng, YAO Jian-quan. Novel optical controllable terahertz wave switch[J]. *Optics Communications*, 2008, **281**(23): 5697-5700.
- [15] CHEN Hou-tong, PADILLAW J, GOSSARD A C, *et al.* Active terahertz metamaterials devices[J]. *Nature*, 2006, **444**(7119): 597-660.
- [16] ZHANG Hui, GUO Peng, CHEN Ping, *et al.* Liquid-crystal-filled photonic crystal for terahertz switch and filter[J]. *Journal of The Optical Society of America B-optical Physics*, 2009, **26**(1): 101-106.
- [17] GOMEZ-DIAZ J S, PERRUISSEAU-CARRIER J. Graphene-based plasmonic switches at near infrared frequencies[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(13): 15490-15504.
- [18] SUEN J Y, LI W, TAYLOR Z D, *et al.* Characterization and modeling of a terahertz photoconductive switch[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(14): 1258.
- [19] SONG K, MAZUMDER P. Dynamic terahertz spoof surface plasmon-polariton switch based on resonance and absorption[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, **58**(7): 2172-2176.
- [20] CHEN Lin, XU Ning-ning, SINGH L, *et al.* Defect-Induced Fano resonances in corrugated plasmonic metamaterials [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, **5**: 1600960.
- [21] CHEN Lin, WEI Yu-ming, ZANG Xiao-fei, *et al.* Excitation of dark multipolar plasmonic resonances at terahertz frequencies[J]. *Science Reports*, 2016, **6**: 22027.
- [22] LIANG Zhen-jiang, LIU Hai-xia, NIU Yan-xiong, *et al.* Design and performance analysis of THz microcavity-enhanced graphene photodector[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(16): 168101.