

光子晶体对太赫兹波的调制特性研究*

张 戎 曹俊诚[†]

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

(2009 年 7 月 13 日收到; 2009 年 11 月 9 日收到修改稿)

利用传输矩阵方法研究了掺杂半导体 n-GaAs/聚碳酸酯一维光子晶体的太赫兹波透射谱. 研究结果发现, 与一般由两种介电材料组成的一维光子晶体不同, 由于掺杂半导体中自由载流子对太赫兹波存在较强的吸收, 所以这种材料组成的一维光子晶体除可形成光子带隙外, 还可以增强 n-GaAs 对太赫兹波的透射. 同时还提出了一种基于这种一维光子晶体的太赫兹波调制器, 通过外加电压控制半导体中电子浓度的大小可实现对太赫兹透射波幅度的调制.

关键词: 掺杂半导体光子晶体, 太赫兹波, 太赫兹波的调制

PACC: 4225B, 7865K, 4280S

1. 引 言

太赫兹 (THz) 波通常是指频率在 0.1—10 THz 的电磁波. 由于很多材料本身对 THz 波没有响应, 且长时间以来这一频段的很多相关器件 (如 THz 源、探测器、调制器、开关、棱镜等) 都极度匮乏, 所以这一频段通常被称作“THz 空白”. 为填补这一空白人们进行了大量的研究工作^[1-7]并取得了一定的进展, THz 量子级联激光器的研制成功便是这一领域一个重要的里程碑^[1]. 然而, 人们在控制和操纵 THz 波方面仍相对滞后, 尤其在对通信带宽需求日益膨胀、无线通信即将进入 THz 频段的今天, 实现对 THz 波的高速调制显得非常紧迫^[8]. 近年来, 光子晶体^[9]、特异材料^[10,11] (metamaterials) 等人造电磁材料的迅速发展为人们研究 THz 波的控制方法开辟了一条新的道路. 作为一类新型的光学材料, 光子晶体引起了越来越多的注意. 光子带隙的存在使得光子晶体表现出许多非常有趣且重要的光学性质, 具有广阔的应用前景. 一般的光子晶体是由两种介电常数存在差异的介电材料周期分布而成, 而最近也有一些工作对金属/介电材料组成的一维和三维光子晶体进行了研究^[12-14], 结果表明, 这种结构能够显著提高金属对可见光和红外光的吸收,

而合理的器件结构设计和材料参数选择甚至可以使金属在可见光波段透明, 这与 Fabry-Perot (FP) 腔透射共振现象有关.

掺杂半导体中的载流子吸收在远红外、THz 这种长波段非常显著^[2], 这一问题在将量子级联激光器推广到 THz 波段时就曾遇到过. 理论研究指出, 载流子吸收率与波长的依赖关系为 λ^p (p 在 1.5—3.5 之间)^[15], 即波长越长吸收越明显. 高的载流子吸收耗散掉大量的 THz 光场能量, 人们不得不通过设计新的波导结构才得以解决这一问题. 然而, 高载流子吸收也可以用来调制 THz 光, 制成 THz 通信中的关键器件之一——THz 调制器^[16,17]. 本文的工作便是将掺杂半导体应用到一维光子晶体中, 研究了 n 型掺杂 GaAs/介电材料聚碳酸酯 (PC) 组成的一维光子晶体的 THz 波透射谱, 并提出一种控制 THz 波透射强度的方法, 期望对 THz 波实现较好的调制.

2. 结构与理论模型

这里考虑的一维光子晶体中, 掺杂半导体为 n 型 GaAs, 介电材料选取 PC, 折射率为 1.6, 结构如图 1 所示. 这里在不涉及半导体微观结构及其和光电磁波微观相互作用机制的情况下, 利用经典电磁理

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB310402)、国家自然科学基金 (批准号: 60721004)、上海市科学技术委员会基础研究重大项目 (批准号: 06dj14008) 和中国科学院“百人计划”资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn

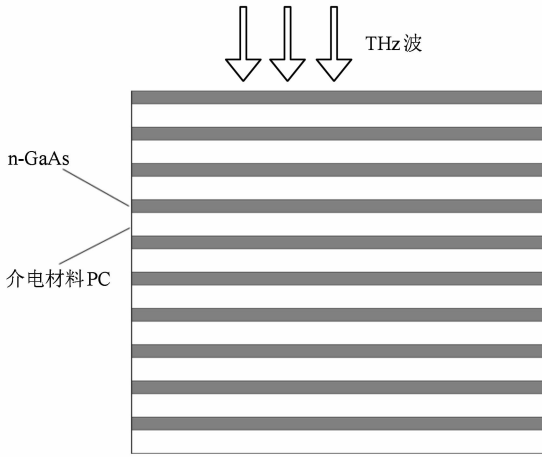


图1 一维 n-GaAs/PC 光子晶体结构示意图 灰色部分为 n-GaAs 层,白色部分为 PC 层,n-GaAs 层与 PC 层呈一维周期性交替分布

论来研究这一结构的光学性质. 比如观察本征 GaAs 的透射谱可以发现在 33—37 meV 附近存在一个暗区,来源于 GaAs 中光学声子的吸收^[18],本文的模拟中不包括这一效应,也不讨论这一区域的模拟

结果,同时这一效应也不会对其他部分的计算结果产生影响.

考虑自由载流子吸收,根据 Drude-Lorentz 模型,n-GaAs 的介电常数 $\varepsilon_r(\omega)$ 可以表示为^[19,20]

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) + i\varepsilon_r''(\omega)$$

$$\varepsilon_r'(\omega) = 12.96 - \frac{\omega_p^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

$$\varepsilon_r''(\omega) = \frac{\omega_p^2 \tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)},$$

式中 $\varepsilon_r'(\omega)$ 和 $\varepsilon_r''(\omega)$ 分别表示介电常数的实部和虚部, τ 为 Drude 弛豫时间, ω_p 为等离子体频率,两者均与掺杂浓度有关.

图2给出了掺杂浓度 n 分别为 10^{18} 和 10^{17} cm^{-3}

时 n-GaAs 的折射率 ($n_r = \sqrt{\varepsilon_r}$) 随频率的变化关系. 从图2可以发现,频率较高时 n-GaAs 的折射率实部趋于常数 3.55,且远大于折射率虚部,而当频率较低时折射率虚部迅速变大,反映出载流子对长波长 THz 波的强烈吸收,载流子浓度越高,吸收越强烈. 下面我们将根据这一吸收特性对这一结构的 THz 波透射谱进行研究.

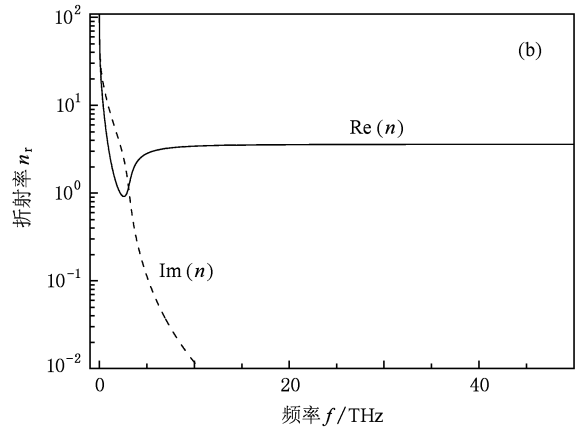
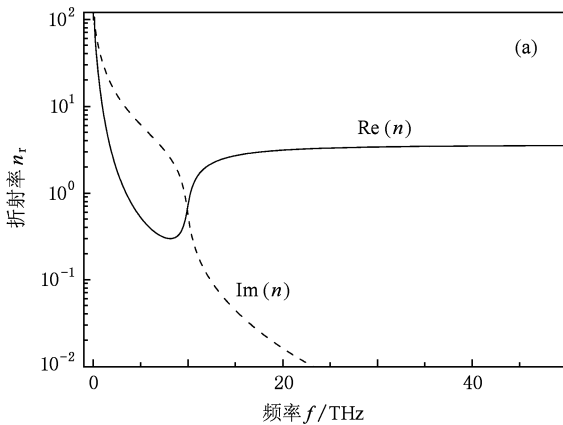


图2 n-GaAs 折射率随频率的变化 (a) 掺杂浓度为 10^{18} cm^{-3} , (b) 掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3}

3. THz 波的透射谱

取掺杂浓度 n 分别为 10^{18} 和 10^{17} cm^{-3} , n-GaAs/PC 结构的周期数为 10, 参考文献[12]中材料厚度的取法,取 n-GaAs 层的厚度 $d_{\text{n-GaAs}} = 0.5c/\omega_p$, 介电材料层的厚度 $d_{\text{PC}} = c/\omega_p$, 由于 $n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时 $d_{\text{n-GaAs}} = 0.5c/\omega_p = 0.668 \mu\text{m}$, 为方便起见本文的模拟中均选取这一厚度,相应的 $d_{\text{PC}} = 1.336 \mu\text{m}$. 考

虑正入射的情况,采用传输矩阵方法^[21-23]计算得到的透射谱如图3所示.

作为参照,图3(a),(b)给出了模拟得到的 THz 波对于单层厚度为 $6.68 \mu\text{m}$ 的 n-GaAs 膜的透射谱,其厚度相当于多层结构中 10 层 n-GaAs 厚度的总和. 参考折射率分布(图2),对比单层膜和光子晶体多层结构的模拟结果可以发现下列现象:(1)图3中的振荡来源于器件结构带来的 FP 共振,多层结构相比于单层膜出现了光子带隙,在光子带隙中电

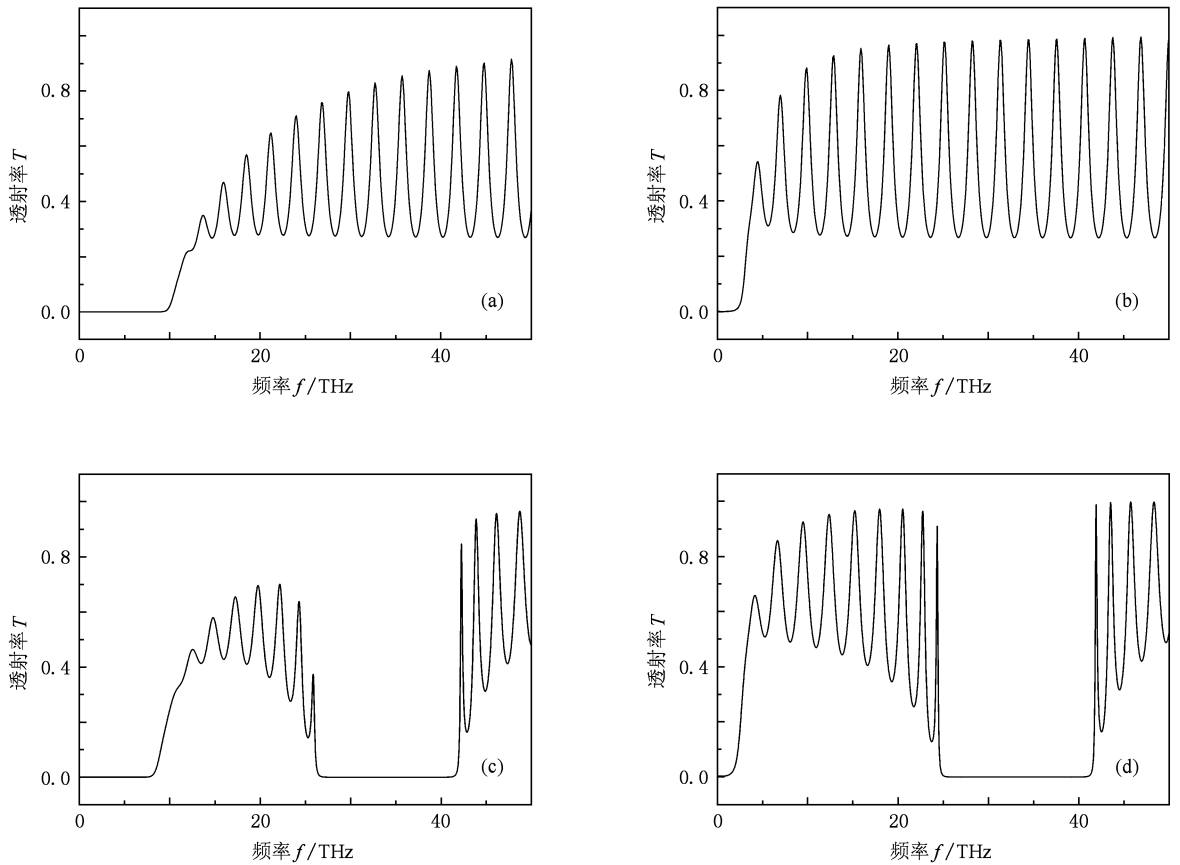


图3 计算模拟得到的THz波透射谱 (a) 掺杂浓度为 10^{18} cm^{-3} 时单层 n-GaAs 膜的透射谱, 膜厚为 $6.68 \mu\text{m}$; (b) 掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3} 时单层 n-GaAs 膜的透射谱, 膜厚为 $6.68 \mu\text{m}$; (c) 掺杂浓度为 10^{18} cm^{-3} 时 n-GaAs/PC 多层结构的透射谱; (d) 掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3} 时 n-GaAs/PC 多层结构的透射谱

磁波的透射率为零. 由于载流子浓度不同造成介电常数不同, 导致两种浓度下半导体中光程存在差异, 所以光子禁带的位置略有偏差. 需要说明的是, 由于结构参数的原因, 光子带隙的位置不在 $0.1\text{--}10 \text{ THz}$ 范围内, 且光子带隙的形成并非掺杂半导体所带来的新特性, 所以光子带隙将不是这里关注的焦点. (2) 透射强度与折射率虚部密切相关, 即与载流子吸收密切相关. 当折射率虚部大于 0.1 时, 无论对于单层膜还是多层结构, 透射强度均明显衰减; 而当折射率虚部小于 0.01 时, 图 3 中透射的振荡幅度逐渐趋于平稳, 说明此时载流子吸收可近似忽略. (3) 除去光子带隙的影响, 低频部分多层结构的透射强度高于单层膜, 且出现非零透射时的频率有所降低. 比如掺杂浓度为 10^{18} cm^{-3} 时, 对比图 3(a) 与 (c) 可知, 在图中最左端频率较低时载流子吸收严重, 单层膜与多层结构的 THz 波透射率几乎均为零, 当频率增至 9.8 THz 时单层膜出现了 1% 的透射, 而对于多层结构, 出现 1% 透射的频率点为 7.5 THz . 同

样, 对于掺杂浓度为 10^{17} cm^{-3} 时, 单层膜与多层结构出现 1% 透射率的频率分别为 2.2 和 1.4 THz .

关于透射强度的增强和非零透射的频率降低可以作如下解释: 电磁波在吸收介质中的穿透深度可表示为 $d_{\text{depth}} = \lambda/4\pi\text{Im}(n)$, 当介质厚度大于 d_{depth} 时, 电磁波大部分被吸收或反射, 透射部分可以忽略. 但如果将单层厚膜分解成多层薄膜与电介质间隔的组合, 电磁波可透过单一薄层, 再由于多层结构 FP 共振作用, 从而使透射有所增强. 这与金属/介电材料一维光子晶体对可见光与红外光吸收和透射增强的性质非常类似^[12].

4. 对 THz 波的调制作用

THz 波段一般是指 $0.1\text{--}10 \text{ THz}$, 且由以上模拟结果可以看出, 半导体中载流子吸收对 10 THz 以下的 THz 波影响较大. 当频率较高时, 载流子吸收明显下降, 掺杂半导体的折射率虚部变得非常小, 此

时本文所考虑的结构与两种介电材料组成的一维光子晶体性质无明显差别. 所以, 下面重点研究 0.1—10 THz 频段器件的特性.

半导体中的载流子浓度直接影响到载流子吸收的大小. 结合 n-GaAs 的折射率分布, 由图 3 的模

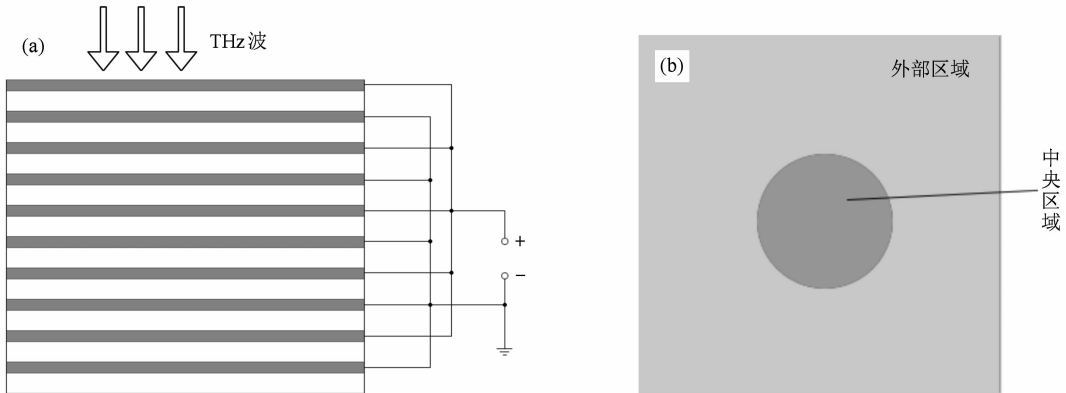


图4 THz 调制器的结构设计图 (a) 器件结构示意图, 灰色层为 n-GaAs, 白色层为介电材料 PC, 将 n-GaAs 的奇数层和偶数层配对组成平行板电容器, 分别与电源正负极相连; (b) 偶数层 n-GaAs 的俯视图

如图 4(a) 所示, 将邻近的两层 n-GaAs 作为一对平行板电容器, 加上电压后极板中电子浓度将发生变化. 使用电磁场高斯定理可以得到极板上电子浓度随电压的变化关系为

$$\Delta\rho = \frac{\varepsilon_0 U}{d_{\text{n-GaAs}} d_{\text{PC}} e},$$

其中 U 为外加电压, e 为电子电量.

如果采用上述的结构参数, 要使 $\Delta\rho$ 达到 10^{17} cm^{-3} 量级, 则 U 应为数千伏, 这会导致器件中电场过强. 所以我们改变结构参数, 参照文献 [13] 中金属/介电材料光子晶体, 这里取 n-GaAs 层为 10 nm 厚, PC 层为 200 nm 厚, 这样若干伏的电压便可以使电子浓度改变达到 10^{17} cm^{-3} 量级, 器件中电场也不会过强. 加电压后上极板电子浓度降低, 对 THz 波的吸收变小, 透射幅度变强. 由于电容器充电时, 上极板电子变少下极板电子必然要变多, 为避免下极板电子浓度变大而造成吸收变强从而影响器件的性能, 可以将 n-GaAs 偶数层 (电容器下极板) 设计成两个区域, 如图 4(b) 所示. 图 4(b) 中的中央深灰色圆区域和外部较大的浅灰色区域互相绝缘, 中央区域可为轻掺杂的 GaAs 层或未掺杂层, 外部区域可为 GaAs 掺杂层或金属层, 还要求外部区域面积

拟结果可以发现, 低的载流子浓度情况下折射率虚部降低, 材料吸收明显下降, 因此我们可以考虑控制 n-GaAs 中载流子浓度来控制器件对 THz 波的吸收强度, 从而实现对透射幅度的调制. 具体的器件结构设计如图 4 所示.

比中央区域大很多, 以保证平行板电容器的条件近似成立. 将外部区域与下电极相连形成电容器下极板, 这样中央区域的电子浓度将不会受外加电压的影响. 对应于整个器件的中央区域, 外加正电压实际只降低了奇数层 n-GaAs 的电子浓度而不会增加偶数层电子浓度, 从而使 THz 波透射增强.

我们对一个具体的 THz 调制器进行了模拟, 该器件结构由 25 个周期组成, 每个周期包含 4 层, 第一层为电子浓度为 10^{17} cm^{-3} 的 n-GaAs 层, 层厚为 10 nm; 第二层和第四层为 200 nm 厚的 PC 层; 第三层为电子浓度为 10^{15} cm^{-3} 的 n-GaAs 层, 层厚为 10 nm. 模拟结果如图 5 所示.

图 5(a), (b) 分别为加电压前后的 THz 波透射谱, 外加电压为 3.6 V, 内插图 0.1—600 THz 的透射谱, 可以观察到 FP 共振引起的振荡和光子带隙, 而我们所关心的频率范围为方框中的部分 (0.1—10 THz). 从图 5 可以发现, 未加电压时载流子吸收在 2 THz 以下部分非常明显, 加电压将奇数层电子浓度由 10^{17} cm^{-3} 降低到 10^{15} cm^{-3} 后, 透射率有了大幅度提高. 对于 1 THz 的入射波, 当电压由 0 V 增至 3.6 V 时, 透射率从 60% 增至 86%, 如图 6 所示. 而从图 5 中可以看出, 对于 1 THz 以下的 THz 波, 透射

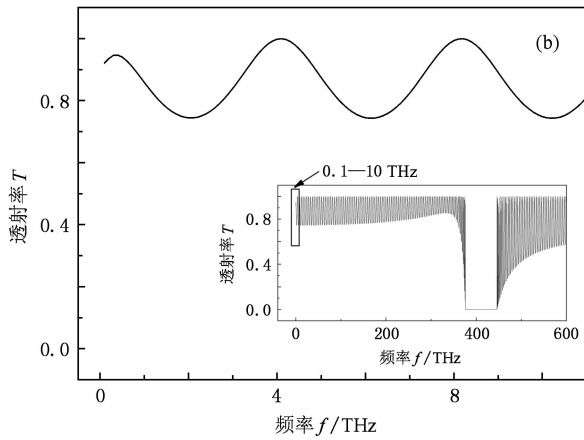
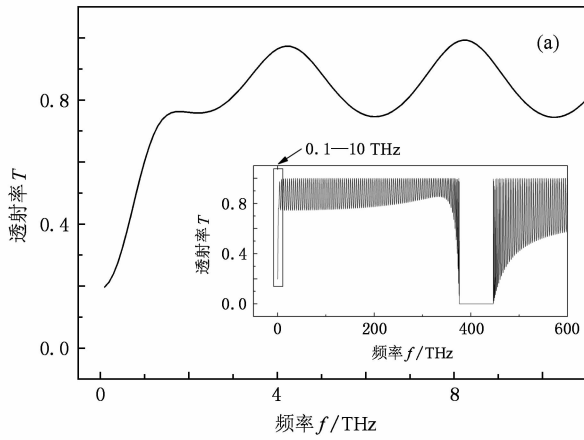


图5 THz 调制器对 THz 波的调制特性 内插图为 0.1—600 THz 的透射谱。(a)未加电压时 THz 波的透射谱,(b)加电压后 THz 波的透射谱,此时每周期第一层 n-GaAs 的电子浓度为 10^{15} cm^{-3}

率变化更加明显,可见这种结构对 1 THz 左右的 THz 波具有较好的调幅作用。

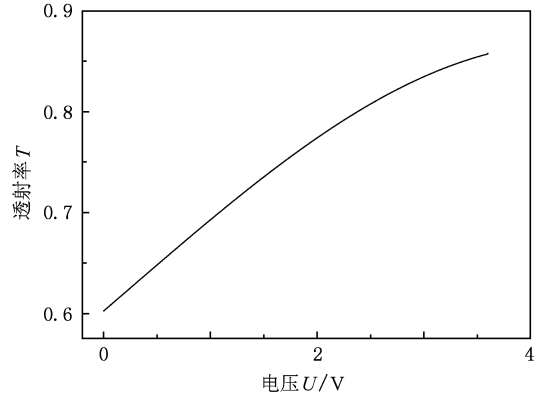


图6 入射波频率为 1 THz 时,透射率随外加电压的变化关系

5. 结 论

本文利用传输矩阵方法模拟了 n 型 GaAs 掺杂半导体/介电材料 PC 组成的一维光子晶体对 THz 波的透射谱. 研究表明,由于 n-GaAs 的载流子吸收主要影响到 10 THz 以下的频段,所以相比于单层膜,这种多层结构除可形成光子禁带以外,还会使低频部分 THz 波透射增强,非零透射频率降低. 利用载流子吸收随浓度变化的特性,还研究了一种基于这种光子晶体的 THz 调制器,通过改变外加电压来调节 n-GaAs 层中的载流子浓度,控制 THz 波的透射率从而实现 THz 波幅度的调制. 虽然由材料的特性和结构的特征可以预知,这种多层周期结构对光的色散会比较严重,但其对于 1 THz 左右的单频 THz 波有着较好的调幅作用,可用于太赫兹量子级联激光器出射光的调制.

[1] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, Beere H E, Linfield E H, Davies A G, Ritchie D A, Iotti R C, Rossi F 2002 *Nature* **417** 156
 [2] Williams B S 2007 *Nat. Photon.* **1** 517
 [3] Tonouchi M 2007 *Nat. Photon.* **1** 97
 [4] Liu H C, Luo H, Song C Y, Wasilewski Z R, SpringThorpe A J, Cao J C 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum.* **14** 374
 [5] Li H, Cao J C, Han Y J, Guo X G, Tan Z Y, Lue J T, Luo H, Laframboise S R, Liu H C 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 043101
 [6] Cao J C, Li H, Han Y J, Tan Z Y, Lue J T, Luo H, Laframboise S, Liu H C 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 953
 [7] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, Gossard A C, Taylor A J, Averitt R D 2006 *Nature* **444** 597

[8] Koch M 2007 *Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects* (Berlin: Springer) p325
 [9] Yablonovitch E 1993 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 283
 [10] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
 [11] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **47** 2075
 [12] Yu J F, Shen Y F, Liu X H, Fu R T, Zi J, Zhu Z Q 2004 *J. Phys.: Condens. Matter* **16** L51
 [13] Aly A H, Ryu S W 2009 *Int. J. Mod. Phys. B* **23** 2297
 [14] Zhou R L, Chen X S, Zeng Y, Zhang J B, Chen H B, Wang S W, Lu W, Li H J, Xia H, Wang L L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3506 (in Chinese) [周仁龙、陈效双、曾勇、张建标、陈洪波、王少伟、陆卫、李宏建、夏辉、王玲玲 2008 物理学报

- 57 3506]
- [15] Shen X C 2002 *Spectrum and Optical Properties of Semiconductor* (Beijing: Science Press) p202 (in Chinese) [沈学础 2002 半导体光谱和光学性质 (北京: 科学出版社) 第 202 页]
- [16] Ostmann T K, Pierz K, Heinb G, Dawsonc P, Koch M 2004 *Proc. SPIE* **5593** 521
- [17] Kadlec F, Kuzel P 2007 *Proc. SPIE* **6581** 65810
- [18] Liu H C, Song C Y, SpringThorpe A J, Cao J C 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4068
- [19] Kohen S, Williams B S, Hu Q 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 053106
- [20] Li H, Cao J C, Lue J T 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 103113
- [21] Ji J R 2007 *Advanced Optics* (Beijing: Science Press) p132 (in Chinese) [季家镛 2007 高等光学教程 (北京: 科学出版社) 第 132 页]
- [22] Wang H, Li Y P 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2172 (in Chinese) [王 辉、李永平 2001 物理学报 **50** 2172]
- [23] Wang T B, Liu N H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5878 (in Chinese) [王同标、刘念华 2007 物理学报 **56** 5878]

Research on modulation property of photonic crystals in terahertz range *

Zhang Rong Cao Jun-Cheng[†]

(State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(Received 13 July 2009; revised manuscript received 9 November 2009)

Abstract

In this work, the terahertz transmission spectrum through a one-dimensional (1D) photonic crystal made from doped semiconductor n-GaAs/polycarbonate is studied by the transfer-matrix method. We show that, compared with most photonic crystals made from two different dielectrics, the doped semiconductor/dielectrics 1D photonic crystals can not only form the photonic gap, but also enhance the terahertz transmission through n-GaAs. We also propose and research a terahertz modulator based on the 1D photonic crystals, the transmitted terahertz waves through which can be modulated by different carrier densities in the semiconductor by varying the applied voltage.

Keywords: doped semiconductor photonic crystal, terahertz wave, modulation of terahertz waves

PACC: 4225B, 7865K, 4280S

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2007CB310402), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60721004), the Major Program for Basic Research of the Science and Technology Committee of Shanghai, China (Grant No. 06dj14008) and the "Hundred Talents Program" of Chinese Academy of Sciences.

[†] Corresponding author. E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn