

基于半导体等离子体频率光学调控的太赫兹波调制系统

杨 涛, 葛嘉程, 周 源, 黄 维*

(南京邮电大学 有机电子与信息显示国家重点实验室培育基地, 江苏 南京 210023)

摘要:介绍了一种太赫兹波光学调制系统, 该系统首先通过刀片与半导体之间的狭缝实现太赫兹波和太赫兹表面等离子体波之间的耦合, 然后通过改变照射到本征半导体表面的光强用以调控半导体表面的等离子体频率, 使得半导体表面的等离子体频率在有光照和无光照条件下分别大于和小于其上传输的太赫兹表面等离子体波的频率, 从而实现对在半导体表面传输的太赫兹表面等离子体波以及由其耦合出的太赫兹波的强度调控。该调制方法与传统方法相比具有调控频带宽、速度快、成本低、常温工作等优点, 可用于太赫兹波通讯。仿真和实验结果进一步验证了该调制系统应用的可行性。

关键词: 太赫兹; 表面等离子体波; 半导体; 等离子体频率; 载流子浓度

中图分类号: O441.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0203005

A terahertz wave modulation system based on optical modulation of the plasma frequency of a semiconductor

Yang Tao, Ge Jiacheng, Zhou Yuan, Huang Wei*

(Key Laboratory for Organic Electronics and Information Displays, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: A terahertz (THz) wave optical modulation system was introduced. The modulation was based on the coupling of THz waves and THz surface plasmon by a simple slit between a razor blade and a semiconductor wafer. The modulation process was realized by changing the illumination intensity on the intrinsic semiconductor surface. With or without the optical illumination, the plasma frequency of the semiconductor was larger or smaller than the frequencies of the surface plasmon. Therefore, the THz surface plasmon propagating on the semiconductor and the THz wave coupled from the surface plasmon can be switched on and off. In comparison with conventional THz modulation approaches, this method has the advantages of wide modulation bandwidth, high speed, low cost and room temperature operation etc., which are favorable to THz wave communication applications. The simulation and experimental results prove the feasibility of the THz wave modulation system.

Key words: terahertz; surface plasmon; semiconductor; plasma frequency; carrier density

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2018-10-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61377019); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20151512); 固体微结构国家重点实验室开放课题(M30050); 南京邮电大学校级科研项目(NY217085, NY218074)

作者简介: 杨涛(1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事太赫兹波器件方面的研究。Email: iamtyang@njupt.edu.cn

通讯作者: 黄维(1963-), 男, 中国科学院院士, 教授, 主要从事光电子材料与器件方面的研究。Email: iamwhuang@njupt.edu.cn

0 引言

太赫兹波 (THz Wave) 一般是指频率范围为 100 GHz~10 THz 的电磁辐射, 与微波和可见光等研究比较成熟的波段不同, 现有的电子器件和光学器件很难直接对太赫兹波传输进行控制, 如何有效地控制太赫兹波仍是一个亟待解决的问题。考虑到直接对太赫兹波调控的困难, 文中转而研究如何控制太赫兹表面等离子体波, 从而间接实现对太赫兹波的控制。这是因为太赫兹表面等离子体波与太赫兹波能通过一个简单的耦合系统进行相互转换。

近年来, 国内外学者利用具有周期性结构的波导光栅实现对太赫兹表面等离子体波的调控已做出了大量的研究^[1]。其中一类通过设计刻槽深度渐变的金属光栅和半导体光栅, 从而控制太赫兹表面等离子体波的传播距离^[2]。但是这种调制结构设计复杂, 制作相对困难; 刻槽深度设计所对应的截止频率固定, 从而导致调制的频率范围较小; 同时由于其无法在常温下工作, 空气中水蒸汽会凝结在器件上对太赫兹波传输会产生影响, 从而使得调制效果较差。在这样的研究背景下, 文中通过对太赫兹表面等离子体波在半导体表面传输特性进行研究, 发现太赫兹表面等离子体波能否在半导体表面传输与半导体的等离子体频率直接相关。同时, 刀片狭缝结构的设计也能够使得太赫兹波与太赫兹表面等离子体波实现耦合, 因而设计了一种光学调制系统实现对太赫兹波表面等离子体波的调控。系统通过改变照射在本征半导体表面的光强从而改变半导体的等离子体频率, 可实现对宽频太赫兹表面等离子体波的调制。该方法可以在接近室温的环境下进行, 结构更加简单, 与传统方法^[3-4]相比无需光栅结构调制, 制作成本较低, 调制频率范围更宽。

1 太赫兹波光学调制系统的结构与原理

1.1 太赫兹表面等离子体波在半导体表面的传输特性

在该调制系统中, 使用半导体而不是金属作为太赫兹表面等离子体波的传输介质, 这是因为半导体的载流子浓度和等离子体频率可以通过自由载流子的光注入实现对其表面载流子浓度的控制, 而金属却不可以。根据 Drude 模型^[5], 半导体的介电常数

由公式(1)给出:

$$\tilde{\epsilon}_2 = \epsilon + i\epsilon' = \epsilon_{\text{static}} \left[1 - \frac{\omega_p^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} + i \frac{\omega_p^2 \tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)} \right] \quad (1)$$

式中: ϵ_{static} 为静态介电常数; $\tau = (\mu m^*)/e$ 为驰豫时间; ω 为太赫兹表面等离子体波的角频率; m^* 为载流子有效质量。半导体的角等离子体频率为:

$$\omega_p = 2\pi f_p = \sqrt{\frac{n_i e^2}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{static}} m^*}} \quad (2)$$

式中: n_i 为半导体载流子浓度; f_p 为半导体等离子体频率; e 为电荷电量; ϵ_0 为绝对介电常数。

根据表面等离子体波的色散方程, 沿着半导体-空气界面的方向和垂直于界面的上下两个方向的传播常数分别由下式给出^[6]:

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\tilde{\epsilon}_1 \tilde{\epsilon}_2}{\tilde{\epsilon}_1 + \tilde{\epsilon}_2}} = A + Bi \quad (3)$$

$$k_{z(\text{air})} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\tilde{\epsilon}_1^2}{\tilde{\epsilon}_1 + \tilde{\epsilon}_2}} = C + Di \quad (4)$$

$$k_{z(\text{semiconductor})} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\tilde{\epsilon}_2^2}{\tilde{\epsilon}_1 + \tilde{\epsilon}_2}} = E + Fi \quad (5)$$

式中: $\tilde{\epsilon}_1$ 和 $\tilde{\epsilon}_2$ 分别为空气和半导体的介电常数; c 为真空中的光速; A 、 C 、 E 为沿上述三个方向的相位常数; B 、 D 、 F 为沿着上述三个方向的衰减常数。因此, 表面等离子体波沿着半导体和空气界面方向的传播距离和垂直于界面的两个方向的衰减距离分别为:

$$\delta_{\text{spp}} = \frac{1}{2B} \quad (6)$$

$$\delta_{\text{air}} = \frac{1}{|D|} \quad (7)$$

$$\delta_{\text{semiconductor}} = \frac{1}{|F|} \quad (8)$$

1.2 太赫兹波光学调制系统结构

所构建的太赫兹波光学调制系统结构如图 1 所示。在一个本征半导体表面上方放置两个刃口垂直指向本征半导体表面的金属刀片, 在两个金属刀片之间放置调制光源。当调控开关打开时, 调制光源发出的光束照射到表面等离子体波所经过的本征半导体表面, 本征半导体表面接收光照而激发产生电子-空穴对, 使得半导体表面载流子浓度增加, 相应地半

导体表面的等离子体频率也将增大。当从刀片的外侧向第一个刀片的刃口与本征半导体晶片的间隙处发射太赫兹波，在本征半导体晶片表面会激发出同频率的太赫兹表面等离子体波^[6-7]。由公式(1)可知，当半导体等离子体频率大于太赫兹波频率时，半导体对于该频率太赫兹波的介电常数为负数，因此所激发的太赫兹表面等离子体波可以在该半导体表面传播。而当调制光强照射到半导体表面使得半导体等离子体频率小于太赫兹波频率时，半导体对于该频率太赫兹波的介电常数为正数，因此不能在该半导体和空气的界面传播太赫兹表面等离子体波。由此可知，通过调控半导体表面上方的光源，就可以使得半导体表面的等离子体频率分别大于和小于所要调控的太赫兹波频率，就可以使得半导体表面的太赫兹表面等离子体波发生通断，从而使得从第二个刀片耦合出的太赫兹波的强度发生变化，实现对太赫兹波的强度调制。

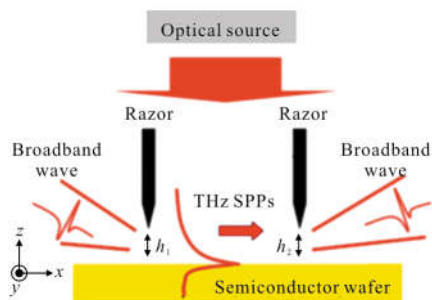


图 1 太赫兹波光学调制系统结构示意图

Fig.1 Schematic of the THz wave optical modulator

1.3 半导体材料的选取

为了使得该太赫兹波调制系统可以在常温下以较小的光强调制幅度工作，所选取的半导体为本征半导体，并且它在常温下的等离子体频率在太赫兹波频段范围内^[8]。由公式(2)可知，常温下等离子体频率在太赫兹波频段的本征半导体材料的载流子浓度在 $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 附近。本征半导体砷化铟(InAs)和本征碲化铟(InSb)满足条件，常温下本征 InSb 的载流子浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，等离子体频率为 1.9 THz，本征 InAs 的载流子浓度为 $7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ，等离子体频率为 0.4 THz。

根据公式(1)可以计算出常温下本征半导体 InSb 和 InAs 对于各频率太赫兹波的复介电常数。如图 2

所示，图中带圆点虚线为复介电常数虚部，黑色带正方形虚线为复介电常数实部。从图中也可以看出只有当太赫兹波频率小于半导体等离子体频率时，半导体的介电常数的实部才是负值，太赫兹表面等离子体波才可以在其上传播。

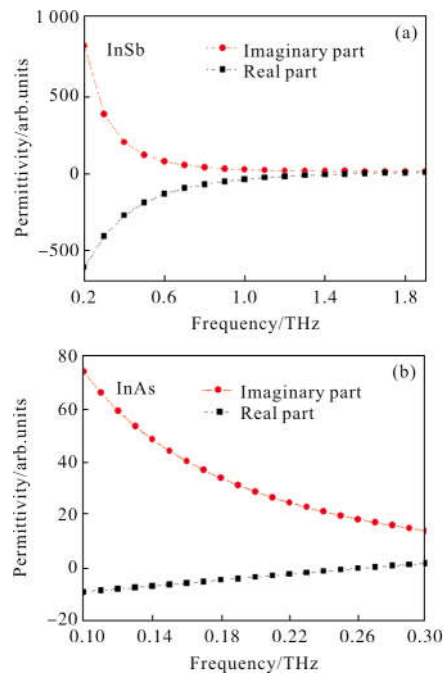


图 2 常温下 InSb 和 InAs 对于各频率太赫兹波的复介电常数
Fig.2 Complex permittivity of InSb and InAs for THz waves with different frequencies at normal temperature

根据公式(2)可得到如图 3 所示的几种本征半导体等离子体频率和载流子浓度关系，由图 3 可知当载流子浓度变化相同量级时，InSb 等离子体频率在太赫兹频段频率变化范围最大，那意味着采用较少的光强变化就可以实现对较宽频段范围内太赫兹波的调制。因此实验中选取本征 InSb 作为太赫兹表面等

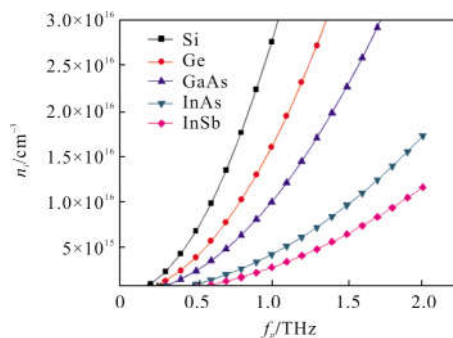
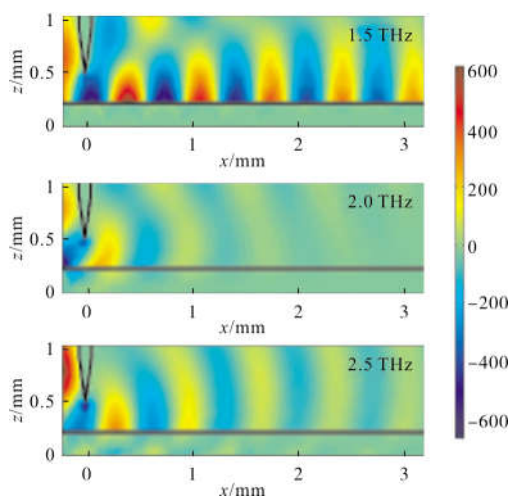


图 3 不同半导体等离子体频率和载流子浓度关系
Fig.3 Relationship between the plasma frequency and the carrier density of different semiconductors

离子体波的载体。

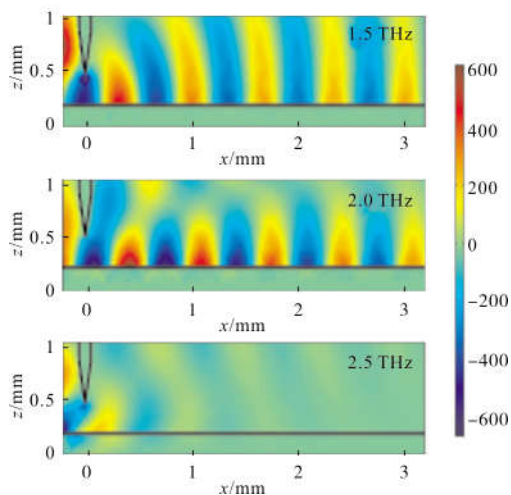
2 太赫兹表面等离子体波光学调制的仿真研究

为了验证该调制系统的可行性,采用有限元法(FEM)进行二维仿真。研究了不同频率(1.5、2.0、2.5 THz)的太赫兹波所激发的太赫兹表面等离子体波在不同光强调控下在不同等离子体频率的本征 InSb 半导体表面上的传输特性。仿真采用如图 1 所示的实验结构,假设等离子体频率在半导体表面是均匀的。采用 p 偏振的太赫兹波以 67° 的角度入射到半导体与刀片构成的狭缝内。半导体与刀片之间的距离为 500 μm。图 4 是仿真所得到的电场强度分布图。图 4(a)是没有调制光强照射的情况,此时本征 InSb 半导体表面的等离子体频率为 1.9 THz。由图 4(a)中的电场强度分布图可知,只有频率为 1.5 THz 的表面等离子体波能够在半导体表面传播。而频率为 2.0 THz 和 2.5 THz 的太赫兹波不能在半导体表面激发和传播太赫兹表面等离子体波,这是由于此时太赫兹波频率 2.0 THz 和 2.5 THz 大于本征 InSb 半导体的等离子体频率 1.9 THz。图 4(b)是有调制光强照射的情况,由于半导体载流子浓度增大,此时本征 InSb 半导体表面的等离子体频率相应增大。此时,频率为 2.0 THz 的太赫兹波可以在半导体表面激发和传播太赫兹表面等离子体波。而频率为 2.5 THz 的太赫兹波由于其频率大于半导体表面的等离子体频率,因而不能在半导体表面激发和传



(a) 无调制光强照射的情况

(a) Without uniform optical illumination



(b) 有调制光强照射的情况

(b) With uniform optical illumination

图 4 频率分别为 1.5、2.0、2.5 THz 的表面等离子体波在本征 InSb 半导体表面的电场空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of the electric field amplitudes of THz surface plasmon components with frequencies of 1.5, 2.0, 2.5 THz, respectively, on the surfaces of intrinsic InSb semiconductors

播太赫兹表面等离子体波。因此,对于频率为 2.0 THz 的太赫兹表面等离子体波就可以通过照射光强的改变对其进行调制。如果在半导体表面再放上第二个刀片,就可以实现对该频率太赫兹表面等离子体波耦合出的太赫兹波的强度调制。由此可见,仿真结果与上述理论计算结果一致。

3 太赫兹波光学调制的实验研究

笔者对立陶宛 EKSPLA 公司生产的太赫兹时域光谱测量系统(THz-TDS)进行改装后进行基于表面等离子体波的太赫兹波光学调制实验。所用的 THz-TDS 性能参数如下:(1) 光谱范围 0.2~3.5 THz;(2) 信噪比 1 000:1@0.6 THz;(3) 时域谱具有亚皮秒的分辨率。其中系统所用飞秒激光器由美国 Coherent 公司制造,飞秒激光器的波长调节范围为 340~1 600 nm(实验中采用波长 800 nm),产生的激光脉冲重复频率为 80 MHz,脉冲宽度为 100 fs。

图 5 是实验装置图。图中一个分束镜首先将入射的飞秒激光光束分为两束:一束作为激发光;一束作为探测光。由于泵浦端光导天线和探测端的光导天线对飞秒激光功率要求不同,这两束光的功率

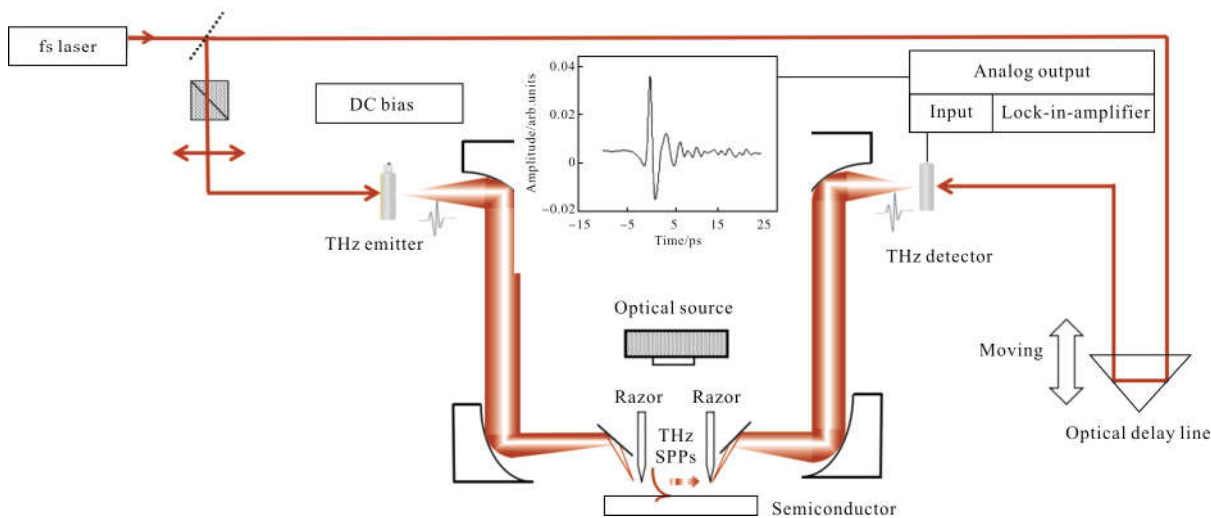


图 5 太赫兹波光学调制系统实验装置图

Fig.5 Experimental setup of the THz wave optical modulator

分配由分束镜前的一个 1/2 波片进行分配。因为照射到光导天线上的飞秒激光光斑面积较大,激发太赫兹波的效率比较低,因此分别在光导天线之前安置了反射镜和透镜,通过调节反射镜和透镜控制飞秒激光光斑大小和光斑照射位置,让更多的飞秒激光能量照射在光导天线上。从光导天线发出的太赫兹波通过金属刀片激发表面等离子体波在本征 InSb 半导体表面传输。光强调制是通过对一个 LED 灯 (CREE,U2,18 000 lux)进行开关来实现,使得 LED 灯发出的光照射或没有照射在 2 inch (1 inch=2.54 cm) 大小的本征 InSb 半导体晶圆表面。刀片与半导体之间的距离等实验参数与仿真中的参数相同。尽可能确保刀片刃口与本征半导体晶圆表面的距离小于最大频率的太赫兹表面等离子体波在空气中的衰减距离,同时两个刀片之间的距离小于最大频率的太赫兹表面等离子体波在半导体表面的传播距离。

因为在原有 THz-TDS 光路中加入了半导体和刀片等结构,原有 THz-TDS 系统中太赫兹波的光程会增加,因此需要再重新调整光路,使得分束镜后的两路光至探测端光导天线的光程基本相同,这样才可以使得探测端的光导天线测得太赫兹波信号。由于入射的飞秒激光的功率比较大(最大功率为 100 mW),而光导天线所能承受的最大功率只在 50 mW 以下,在接收端会额外添加一个衰减器,对接收端接收到的飞秒激光功率进行调节。通过锁

相放大器(Sr-810,Stanford)将接收端探测到的信号进行放大后传输到电脑上。

接收端直接测得的是太赫兹波时域信号,通过对该太赫兹波时域信号进行傅里叶变换就可以将测得的时域信号转成频域信号。图 6 为不同调制作用下所测得的太赫兹波频域信号。图 6 中的实线为半导体表面没有光照时的太赫兹波频域信号,虚线为光通量为 18 000 lux 的可见光照射本征 InSb 半导体表面时的太赫兹波频域信号。图 6 表明,当没有调制光照射时,因为常温下本征 InSb 半导体的等离子体频率为 1.9 THz,因此探测端可以测得频率低于 1.9 THz 的太赫兹波信号,但无法测得频率高于 1.9 THz 的太

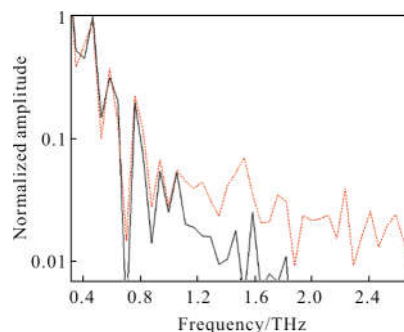


图 6 对本征 InSb 表面进行光强调制时 THz-TDS 系统所测太赫兹波频谱曲线图

Fig.6 Spectral curves of THz waves measured by the THz-TDS system when the intrinsic InSb surface is modulated by light intensity

赫兹波信号；而当有调制光照射时，因为本征 InSb 半导体的等离子体频率也相应增加，因此探测端可以测得频率高于 1.9 THz 的太赫兹波信号。该实验证明了该太赫兹波光强调制系统可以对频率范围在 1.9~2.7 THz 之间的太赫兹波实现开关控制。

4 结 论

文中介绍了一种新型的基于半导体等离子体频率调控的太赫兹波光学调制系统。该系统通过对太赫兹表面等离子体波的光学调控实现对由其耦合出的太赫兹波的调控。由于太赫兹表面等离子体波只能在介电常数实部符号相反的两个介质的界面传播，通过一个调制光源发出调制光束照射本征半导体的表面，使得本征半导体表面的等离子体频率在调制过程中分别大于和小于太赫兹等离子体波的频率，这样就可以控制半导体表面的介电常数，从而实现对太赫兹表面等离子体波的调控，继而实现对太赫兹波的强度调制。仿真和实验中以 InSb 本征半导体作为太赫兹表面等离子体波的传播介质，通过光照强度改变 InSb 本征半导体表面的等离子体频率，从而实现了频率稍高于 InSb 本征半导体等离子体频率的太赫兹波的开关控制。

参考文献：

- [1] Wang Yue, Wang Xuan, He Xunjun, et al. Progress in terahertz surface plasmonics [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(13): 137301. (in Chinese)
- [2] Wang Wenbo, Guo Baoshan. Control of the propagation distance of surface plasmons aave in terahertz spectrum [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 45 (2): 224001. (in Chinese)
- [3] Jaime Gómez Rivas, Kuttge M, Kurz H. Low-frequency active surface plasmon optics on semiconductors [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(8): 824-824.
- [4] Jaime Gómez Rivas, Sánchez-Gil J A, Kuttge M, et al. Optically switchable mirrors for surface plasmon polaritons propagating on semiconductor surfaces [J]. *Physical Review B*, 2006, 74(24): 245324.
- [5] van Exter Martin, Grischkowsky D. Optical and electronic properties of doped silicon from 0.1 to 2 THz [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 56(17): 1694-1696.
- [6] Yang Tao, Li Yuanyi, Ivanov Stantchev Rayko, et al. Detection of defects on the surface of a semiconductor by terahertz surface plasmon polaritons [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(15): 4139-4144.
- [7] Jaime Gómez Rivas, Janke C, Haring Bolivar Peter, et al. Transmission of THz radiation through InSb gratings of subwavelength apertures [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 847-859.
- [8] Wu Xiaojun, Pan Xuecong, Quan Baogang, et al. Optical modulation of terahertz behavior in silicon with structured surfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(12): 121112.