

# 太赫兹量子阱探测器性能研究及提高

高继红, 贾敬岳, 张月衡\*, 沈文忠  
(上海交通大学 物理与天文系, 上海 200240)

**摘要:**提出了一个砷化镓基( $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{As}$ )太赫兹量子阱探测器,并对其光电流谱和背景噪声限制温度进行了表征,得到峰值响应频率为6.78 THz,背景噪声限制温度为16 K.理论上,首先,考虑多体效应对器件能带结构的影响,计算得峰值响应频率为6.64 THz,考虑到制备过程中的误差(THz器件较中红外器件,铝组分低,阱宽窄),理论与实验吻合的较好,证实了多体效应在太赫兹量子阱探测器中的重要影响;然后,对器件的电流电压特性进行研究,计算得到背景噪声限制温度为17.5 K,与实验吻合.太赫兹量子阱探测器较低的工作温度,极大限制了其应用,提出了两种实现高温探测的方法:(1)引入光学汇聚天线,提高器件背景限制温度,计算结果表明当引入增强系数为 $10^6$ 倍的天线时,其背景噪声限制温度达到97 K(远高于液氮温度77 K);(2)太赫兹量子阱探测器与太赫兹量子级联激光器联用,可实现信号噪声限制模式,从而实现高温探测.计算表明,当激光器功率达到 $0.003 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ ,器件的工作温度可达77K.

**关键词:**太赫兹量子阱探测器;多体效应;高温探测;背景噪声限制;信号噪声限制  
**中图分类号:**0469 **文献标识码:**A

## Study on the performance and optimization of terahertz quantum-well photodetectors

GAO Ji-Hong, JIA Jing-Yue, ZHANG Yue-Heng\*, SHEN Wen-Zhong  
(Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** A newly designed terahertz quantum-well photodetector (THz QWP) sandwiched between GaAs and  $\text{Al}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{As}$  material was demonstrated. Experimentally, we measure the response photo-current spectra and the current-voltage curve and obtain the peak response of 6.78 THz and background-noise-limited performance (BLIP) temperature of 16 K. Theoretically, we investigated the many body effect to the band structure of THz QWP and calculate the peak response of 6.64 THz which is in agreement with the experiment. So, many-body effect must be included in the design of THz QWPs. Then, we calculate the BLIP temperature of 17.5 K which is fitted well with the measurement. However, the low BLIP temperature is the main factor limiting applications of THz QWPs; we propose two schemes to improve the operating temperatures. Firstly, a scheme using an optical antenna to increase the BLIP temperature is proposed. Calculation shows the device is expected to achieve BLIP at 76 K when employing a  $10^6$  enhancement antenna. The second scheme is to use a THz quantum cascade laser as signal source to achieve photon-noise-limited performance (PLIP) at high temperatures. Simulations show that when the illumination intensity reaches  $0.01 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ , the operation temperature could be 77 K.

**Key words:** terahertz quantum-well photodetector, many-body effect, background-noise-limited performance, photon-noise-limited performance

**PACS:** 71.15.-m

收稿日期:2014-11-29,修回日期:2015-10-10

Received date: 2014-11-29, revised date: 2015-10-10

基金项目:国家自然科学基金(11074167,91221201,61234005),863计划(2011AA010205)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11074167,91221201,61234005), 863 Program (2011AA010205)

作者简介(Biography):高继红(1989-),女,山东济宁人,硕士研究生,主要研究领域为太赫兹量子阱探测器及微小信号探测的理论与实验研究. E-mail: gaojihong1989@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: yuehzhang@sjtu.edu.cn

## 引言

高性能半导体太赫兹探测器在物理、化学、通信、医学、军事、检测等领域有广阔的应用前景,是太赫兹器件发展的重要方向<sup>[1-4]</sup>. 随着太赫兹源-太赫兹量子级联激光器 (THz QCL) 的快速发展和技术突破<sup>[5-7]</sup>,高性能太赫兹探测器的需求愈发迫切. 基于 GaAs/AlGaAs 周期性结构的量子阱探测器凭借其灵活、高速等优势引来越来越多的关注. 相比于其他太赫兹探测器如:LiTaO<sub>3</sub> 晶体, Si 辐射测定仪以及基于低温超导薄膜的热电探测器,太赫兹量子阱探测器 (THz QWP) 有以下几个特点:(1) 为窄带探测器且峰值响应频率可通过改变基态和第一激发态之间的能量差调节;(2) 由于其本征载流子寿命较短,故可实现太赫兹领域的高速、高频探测;(3) 成熟的 GaAs 制备技术使得制备大规模均匀、高分辨和长期稳定的焦平面探测阵列成为可能,有利于实现实时太赫兹成像体系.

THz QWP 沿用中红外量子阱探测器的设计,通过调节其能带结构改变子带间跃迁的能量,从而改变探测器探测波长. 刘惠春组首先在实验上提出了太赫兹频段范围内的量子阱探测器 (v265, v266, v267) 并进行了表征<sup>[8-9]</sup>. 郭旭光等人基于以上几个器件,就多体效应对 THz QWP 的影响进行了研究<sup>[10]</sup>. Ferre 等人理论上考虑多体效应的影响,并提出一种低暗电流的设计<sup>[11]</sup>. 然而目前的 THz QWP 的实验报道特别有限,所有的理论研究都基于以上三个器件,且尚未优化. 此外,对于 THz QWP 的高温探测,相关研究相当有限,我们首次针对特定器件提出高温探测的方案,并进行细致研究.

本文结构:首先,通过自洽求解,理论上得到器件的能带结构,同时研究了 THz QWP 的暗电流、光电流特性. 然后,实验上,我们对样品的性能进行了表征. 验证了多体效应对 THz QWP 的能带结构及其峰值响应频率的影响,在今后的 THz QWP 设计工作中不可忽略. 同时,我们对样品的暗电流,光电流特性进行了实验研究,并提出了两种实现 THz QWP 高温探测的方法,一是采用光学汇聚天线、提高其背景背景噪声限制 (BLIP) 温度,二是通过将 THz QWP 与 THz QCL 联用,提高其信号噪声限制 (PLIP) 温度.

## 1 理论与模型

### 1.1 自洽求解能带结构

在设计 QWP 时,为得到最高探测灵敏度,一般量子阱中只保留基态能级,且第一激发态与势垒高度持平,从而保证激发电子能快速逃逸形成输运电流,进而提高器件的响应率. 对于中红外 QWP,由于势垒高度大,子带间跃迁能量大,多体效应对量子阱子带能级的确定和探测器峰值响应频率的影响可忽略不计. 但在太赫兹波段,由于量子阱的势垒高度较小,子带间跃迁能量较小,多体效应(主要是交换相关能和退极化能)对 QWP 能带和响应频率的影响不可忽略.

对于量子阱中的电子,在有效质量的近似条件下, $z$  方向的薛定谔方程可表示为:

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{m^*} \frac{\partial}{\partial z} \right] + V_{\text{QW}}(z) + V_{\text{H}}(z) + V_{\text{xc}}(z) \right\} \varphi_{l,k_z}(z) = \varepsilon_{l,k_z} \varphi_{l,k_z}(z) \quad (1)$$

其中, $m^*$  是电子有效质量, $\hbar$  是普朗克常数, $V_{\text{QW}}$  为导带带阶的周期势能函数, $V_{\text{H}}$  是哈特利势能,可由泊松方程得到<sup>[10, 12]</sup>, $V_{\text{xc}}$  是交换相关势能,可由密度泛函理论的局域 LDA 近似求得<sup>[10, 12-13]</sup>.  $\varphi_{l,k_z}$  和  $\varepsilon_{l,k_z}$  分别是对应于子带指标  $l$  和波矢  $k_z$  的  $z$  方向的电子波函数和本征能级.

上述薛定谔方程、哈特利势能  $V_{\text{H}}$  和交换相关能  $V_{\text{xc}}$ ,三者相互影响,需自洽求解. 我们用平面波展开法求解三者的耦合方程,不断迭代,直至收敛得到自洽解,即比较每次迭代的费米能级  $E_{\text{F}}$ ,一旦满足收敛条件:  $|(E_{\text{F}(i)} - E_{\text{F}(i-1)}) / E_{\text{F}(i)}| \leq 0.0001$ <sup>[6]</sup>,则认为达到了自洽,其中  $E_{\text{F}(i)}$  是第  $i$  次迭代的费米能级. 解出薛定谔方程后,可得到对应于子带指标  $l$  和波矢  $k_z$  的  $z$  方向的本征能级  $\varepsilon_{l,k_z}$ ,即电子在  $z$  方向上的能量是确定的,但在  $x$ - $y$  方向上,其能量可取任意值,即对于  $\varepsilon_{l,k_z}$  的二维电子气子带,其电子服从费米-狄拉克分布,所以处于该子带上的电子数为:

$$N_{l,k_z}(E_{\text{F}}) = \frac{m_{\text{average}}}{\pi \hbar^2} k_{\text{B}} T \ln \left[ 1 + \exp \left( \frac{E_{\text{F}} - \varepsilon_{l,k_z}}{k_{\text{B}} T} \right) \right] \quad (2)$$

式中, $m_{\text{average}}$  是电子平均有效质量, $k_{\text{B}}$  为玻尔兹曼常数, $T$  为器件工作温度,由于总电子数守恒, $E_{\text{F}}$  可由下式反解得到.

$$\sum_{l,k_z} N_{l,k_z}(E_{\text{F}}) = N_{\text{3Ddope}} L_{\text{dope}} N_{\text{QW}} \quad (3)$$

其中, $N_{\text{3Ddope}}$  是量子阱的中心掺杂浓度, $L_{\text{dope}}$  是中心掺杂长度, $N_{\text{QW}}$  为周期数.

### 1.2 暗电流

暗电流是衡量探测器性能的重要指标,其大小直接影响器件的探测率. THz QWP 具有工作电压

低、势垒宽等特点,故隧穿暗电流(散射辅助隧穿暗电流和阱间隧穿暗电流)相比于热激发暗电流可忽略,根据 3D 载流子漂移模型,暗电流的表达式为<sup>[14]</sup>:

$$J_{\text{dark}} = eN_{3\text{D}}v_{\text{drift}} \quad (4)$$

其中,  $v_{\text{drift}}(F) = \mu F / [1 + (\mu F / v_{\text{sat}})^2]^{1/2}$  为势垒上方自由电子的漂移速率,  $\mu$  为低场迁移率,  $v_{\text{sat}}$  为电子输运的饱和速率,  $N_{3\text{D}}$  为高于势垒的 3D 态上自由电子的态密度,可近似表示为:

$$N_{3\text{D}} = 2 \left( \frac{m_b^* k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{V_b - E_F}{k_B T}\right) \quad (5)$$

其中,  $m_b^*$  是势垒中电子的有效质量,  $V_b$  为势垒高度。

### 1.3 光电流

量子阱探测器由子带间跃迁产生电流,根据光源的不同,激发电流可分为背景光电流和信号光电流.光电流的大小可表示为<sup>[14]</sup>:

$$J_{\text{photon}} = e\phi_{\text{ph}}\eta^{(1)}N_{\text{QW}}g_{\text{photon}} \quad (6)$$

其中,  $\phi_{\text{ph}} = \int dv (\pi \sin^2 \frac{\theta}{2}) \chi(\nu) L_B(\nu)$  为入射光子数通量,其中  $L_B(\nu) = \frac{2\nu^2}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T_B} - 1}$  为光子辐射度,  $T_B$  为背景温度,  $\theta$  为入射角度,  $\chi(\nu) = \frac{\Gamma^2}{(h\nu - h\nu_p)^2 + \Gamma^2}$  为 QWP 常用的谱线模型,  $\nu_p$  为峰值响应频率,  $\eta = N_{\text{QW}}\eta^{(1)} = \frac{e^2 h}{4\varepsilon_0 n_r m_w^* c} \frac{\sin^2 \theta}{\cos \theta} N_{3\text{Ddopa}} f$   $\frac{1}{\pi} \frac{\Gamma}{(h\nu - E_{21})^2 + \Gamma^2}$  为量子阱吸收效率,  $f = \frac{4\pi m_w^* \nu}{\hbar} |\langle \varphi_2 | z | \varphi_1 \rangle|^2$  为吸收振子强度,  $m_w^*$  是阱中电子的有效质量,  $g_{\text{photon}} \approx \tau_c \nu / NL_p$  为光电流增益,  $\tau_c$  为电子俘获时间,对于 THz QWP,  $\tau_c = 10 \text{ ps}$ ,  $L_p$  为单周期量子阱结构长度(阱宽与垒宽之和)。

### 1.4 BLIP 温度

BLIP 温度是决定探测器性能的另一个重要指标,定义为在该温度下,探测器的暗电流与背景光电流相等.一般来讲,器件最好工作在 BLIP 温度之下以获得最佳性能.由式(4)、(6)可得,THz QWP 的 BLIP 温度由下式决定:

$$\eta^{(1)} \tau_c \phi_{\text{B,ph}} = 2 \left( \frac{m_b k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} L_p \exp\left(-\frac{V_b - E_F}{k_B T}\right) \quad (7)$$

## 2 实验与讨论

### 2.1 器件制备与测量

在特定峰值响应频率下,我们考虑了包括电子间交换相关能(静态多体效应)和退极化相互作用(动态多体效应)对 THz QWP 的影响,得到了优化的器件参数,并据此生长、制备出了相应的器件。

设计的太赫兹量子阱层状结构通过分子束外延法在半绝缘的 GaAs 衬底上生长而成,激活层为 35 个周期的 GaAs/AlGaAs 量子阱结构,单周期中 GaAs 势阱层的厚度为 12 nm,中心 7 nm 掺 Si,掺杂浓度为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,AlGaAs 势垒层厚为 64 nm,Al 组分为 4%. 该设计中,垒宽约为阱宽的 5 倍,可有效抑制阱间隧穿暗电流( $< 10^{-6} - 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ ). 激活层的上下分别是 400 nm 和 800 nm 的 GaAs 接触层,其中掺杂浓度为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  的 Si,来抑制自由载流子吸收和太赫兹频域内的等离子体反射。

材料长好后,运用光刻及湿法刻蚀,进行标准 QWP 工艺制备,得到不同尺寸方形台面的器件,上电极采用实形电极.为较好的进行光学表征,对样品  $45^\circ$  抛光,从而保证太赫兹辐射以  $45^\circ$  角入射.图 1 为待表征的 THz QWP 器件,以及  $45^\circ$  入射的示意图.实验样品的尺寸为  $400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ 、 $600 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ 、 $1000 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$  三种尺寸,经暗电流测量,发现器件均匀性良好,此处以  $400 \times 400 \mu\text{m}$  为例,进行各项性能的表征。

在表征过程中,为保证足够的低温环境,器件需放入液氮杜瓦,同时通过加热器实现变温.器件的光电流谱用傅里叶光谱仪(Bruker IFS 66 S/V)测量,测量过程中使用了 Mylar 6u 分束器和拓展光源。

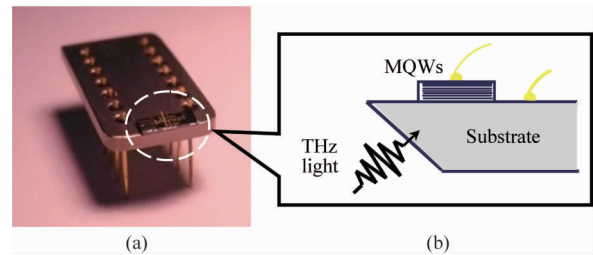


图 1 (a) 器件图片, (b)  $45^\circ$  光耦合入射结构  
Fig. 1 (a) the picture of tested device, (b)  $45^\circ$  edge facet light-coupling geometry

### 2.2 光电流谱

为验证 THz QWP 优化设计的可靠性,首先进行了光电流谱的测量.如图 2(a),实线表示 10 K 下样品的光电流谱,其峰值响应频率为  $226 \text{ cm}^{-1}$  ( $44 \mu\text{m}$ ,  $6.78 \text{ THz}$ ),  $256 \sim 292 \text{ cm}^{-1}$  无光电流响应,是由基底 GaAs 光学声子的吸收造成,一些小吸收峰,如  $312$ 、 $338 \text{ cm}^{-1}$  处,由双声子吸收产生,

362  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰由 AlAs 声子吸收产生. 样品较宽的光谱响应说明主要是由束缚态到连续态的跃迁.

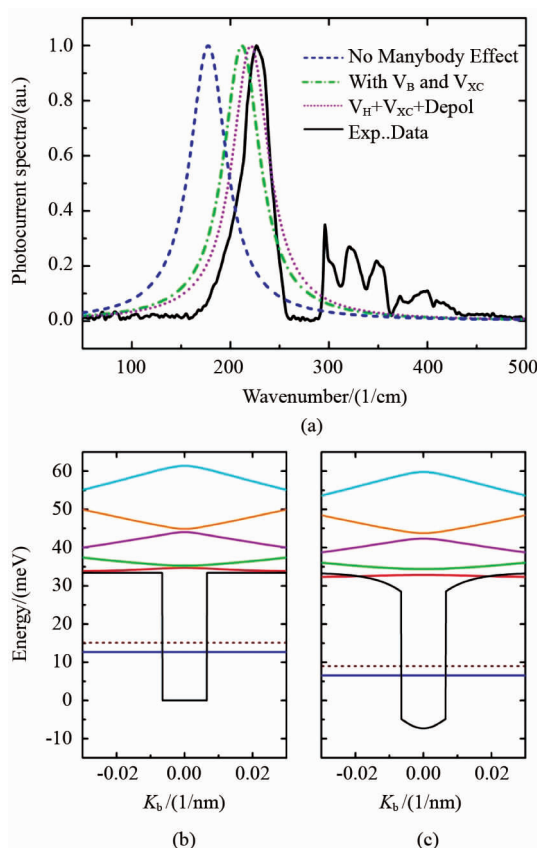


图2 (a)理论计算和实验测量的光电流谱,(b)不考虑多体效应,计算的能带结构,(c)考虑交换相关能计算的能带结构

Fig.2 (a) Calculated and experimental photocurrent spectra of the device. Calculated band structure of the device (b) without and (c) with exchange - correlation potential

为进一步说明多体效应的影响,图2(a)给出了不考虑交换相关能的光电流谱,用虚线表示,峰值响应频率为 177  $\text{cm}^{-1}$  (57  $\mu\text{m}$ , 5.3 THz);考虑交换相关能影响的谱线,用点划线表示,峰值响应频率为 211  $\text{cm}^{-1}$  (47  $\mu\text{m}$ , 6.3 THz);考虑交换相关能和动态退极化能的谱线,用点线表示,峰值响应频率为 221  $\text{cm}^{-1}$  (45  $\mu\text{m}$ , 6.64 THz). 从图2(a)可看出,考虑多体效应后的器件,峰值响应频率的理论计算与实验结果符合的很好,二者的微小差异主要由样品生长中,Al组分、阱宽等的实际值与理论值的微小误差造成. 由此可得,不同于中红外 QWP,设计 THz QWP 时,必须考虑多体效应对器件能带结构的影响,同时需注意声子吸收对探测器性能的影响.

图2(b)、(c)为根据样品参数计算的能带图,黑色实线为能带的轮廓图,虚线为费米能级,其他实线为各个能级,其中,(b)未考虑多体效应,(c)考虑了交换相关能. 通过比较可得,考虑交换相关能后,能带的轮廓发生变化,第一激发态由 34.2 meV 下降至 32.9 meV,基态由 12.8 meV 下降至 6.5 meV,降低了 6.3 meV,进一步证实了多体效应在 THz QWP 计中的重要影响. 第一激发态与量子阱沿持平,较宽光响应谱验证了束缚态到连续态的跃迁过程.

### 2.3 BLIP 温度

实验上,通过测量样品的电流电压曲线,比较暗电流与背景光电流来确定 BLIP 温度. 背景光电流一般在 300 K 的背景,90°的视角下测量. 图3是测量的电流电压曲线,实线为暗电流,虚线为暗电流与背景光电流之和. 通过比较暗电流与背景光电流,得到 BLIP 温度为 16 K. 由公式(7)计算的 BLIP 温度为 17.5 K,与实验相符. 但实验值略低于理论值,部分原因是 GaAs 声子对背景光的吸收降低了光子数通量大小,进而造成了 BLIP 温度的降低.

图3表明,暗电流随温度下降急剧减小,但随温度继续降低,减小速率变慢,主要原因是当温度较高时,暗电流主要是热激暗发电流,而在低温下,热激发暗电流减小而阱间隧穿暗电流的作用开始显著. 同时,当偏压加至接近限制偏压 0.6 V 时,暗电流和背景光电流骤然增大至少 10 倍,当温度为 12.7 K 时,暗电流更是增大了 100 倍. 主要原因是在高偏压下,许多被限制在量子阱中的电子,由于第一个量子阱的碰撞电离,大量电子获得额外能量,通过势垒隧穿出来,形成输运电子,详细研究见<sup>[15-16]</sup>.

## 3 高温探测

### 3.1 光学汇聚天线

量子阱探测器多数的应用,比如被动热成像,信号光是非常弱的,因此,与背景光电流和暗电流相比,信号光电流简直可以忽略不计. 为提高工作性能,需要降低量子阱探测器的工作温度,以保证背景光电流占主导,即 BLIP 工作模式. 由于 THz QWP 的势垒低,且热激发暗电流随势垒高度的下降呈指数级增长,所以 THz QWP 的 BLIP 温度很低,这极大限制了 THz QWP 的广泛应用.

试图通过缩小器件尺寸来降低暗电流,进而提高 BLIP 温度. 但较长的波长决定了 THz QWP 的最小尺寸,并且过小的尺寸会降低器件对光的吸收. 通



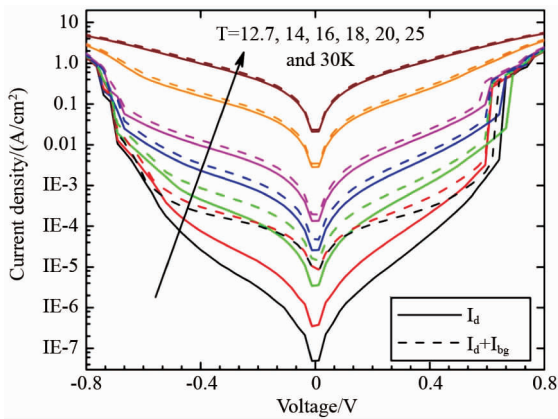


图3 器件的电流-电压特性曲线,其中实线为暗电流,虚线为暗电流与背景光电流之和(视场为 $90^\circ$ ,背景为300 K)

Fig. 3 Current-voltage curves under dark condition (solid) and under  $90^\circ$  FOV and background temperature is 300 K

常的解决方案是使用天线将入射光汇聚.因此,采用一个太赫兹天线便可在不降低吸收的前提下,将器件缩小到微米尺寸.本文重点估算了安装天线后BLIP温度可提高多少.图4(a)的插图形象地描绘了天线与THz QWP的安装结构.设定光场增强系数为 $K_{\text{antenna}}$ ,根据式(7)可得加入天线后BLIP温度为:

$$\eta^{(1)} \tau_c \phi_{B,ph} K_{\text{antenna}} = 2 \left( \frac{m_b k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} L_p \exp\left( - \frac{V_b - E_F}{k_B T} \right) \quad (8)$$

图4(a)为计算的BLIP温度与 $K_{\text{antenna}}$ 的依赖关系.如图所示,当光场增强系数为 $10^2$ 时,BLIP温度为25 K;当光场增强系数为 $10^4$ 时,BLIP温度为41 K;当光场增强系数为 $10^6$ 时,BLIP温度为97 K,已高于液氮温度,因此引入光学天线可有效提高THz QWP的工作温度.

### 3.2 PLIP工作模式

在QWP的一些应用中,需要工作在室温背景辐射环境,并利用激光作为信号源,典型的应用包括痕迹气体测量和差分探测<sup>[17-19]</sup>,特别是在3-24  $\mu\text{m}$ 范围,很适合做灵敏痕迹气体探测,随着QCL技术的发展,提供了灵敏度高、体积紧凑的激光光源.当使用强信号时,探测器能够在很大程度上容忍背景噪声甚至探测器噪声.因此,当采用大功率QCL为信号源时,THz QWP有望提高工作温度,实现液氮温度下的激光光谱测量.当THz QWP的工作温度高于BLIP温度时,信号光电流大于暗电流与背景光

电流之和,我们定义这种状态为信号噪声限制工作模式(PLIP工作模式).当THz QWP与QCL联用时,通过提高信号功率密度,可使信号光电流远远大于背景光电流从而实现PLIP工作模式.

联立式(4)和(6),得到满足暗电流与信号光电流相等的临界信号光功率:

$$P_{\text{plip}} = h\nu_p \frac{N_{3D} L_{\text{period}}}{\tau_c \eta^{(1)}} \quad (9)$$

图4(b)为器件的PLIP温度与信号光功率密度的关系,如图所示,PLIP温度随着信号光功率密度的增加而显著提高.当信号光功率密度高于 $0.003 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ 时,器件即可实现77 K下的PLIP探测.

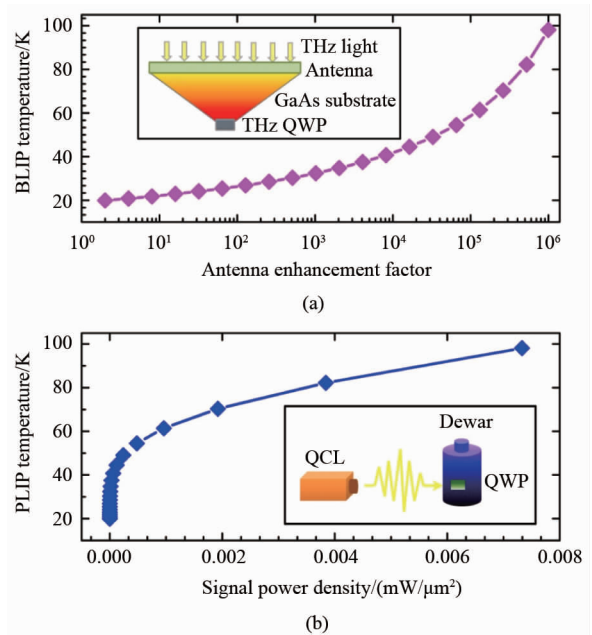


图4 (a)在背景温度为300 K,视场为 $90^\circ$ 的条件下,计算的不同天线增强系数对应的BLIP温度,插图描绘了安装上天线的THz QWP. (b)理论上,不同信号功率密度对应的PLIP温度,插图为THz QWP与QCL的联用示意图

Fig. 4 (a) Calculated BLIP temperature for different antenna enhancement factor, the background temperature is 300 K and FOV is  $90^\circ$ . The inset depicts the schematic of an optical-antenna-coupled THz QWP. (b) Calculated PLIP temperature for different signal power density. The inset depicts combined use of a QCL and a THz QWP.

## 4 结论

提出了一种镓砷基( $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{As}$ )太赫兹量子阱探测器.首先,理论结合实验系统的研究了多体效应对其能带结构的影响,结果显示峰值响应频率的理论值为6.64 THz,与实验值6.78 THz相符,证实了多体效应在THz QWP设计中不可忽略.

然后,系统研究了该器件的电流-电压特性,得到其背景噪声限制温度为 16 K. 最后,为提高 THz QWP 的工作温度,提出了两种方案:(1)采用光学汇聚天线提高器件的 BLIP 温度,当引入增强系数为  $10^6$  的天线时,BLIP 温度可达到 97 K(高于液氮温度);(2)将器件与太赫兹量子级联激光器联用实现信号噪声限制模式,即可提高工作温度,结果显示当激光器功率高于  $0.003 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$  时,工作温度可提高至 77 K.

## References

- [1] YANG Guang-Kun, YUAN Bin, XIE Dong-Yan, *et al.* Analysis on the use of THz technology in the military application [J]. *Laser & Infrared*(杨光鲲, 袁斌, 谢东彦, 等. 太赫兹技术在军事领域的应用. *激光与红外*), 2011, **41** (4):376-380.
- [2] YAO Jian-Quan. Introduction of THz-wave and its applications [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science)*(姚建铨. 太赫兹技术及其应用. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*), 2010, **22** (6):703-707.
- [3] CAO Jun-Cheng. *Semiconductor terahertz sources, detectors and applications* [M]. Beijing: Science Press(曹俊诚. 半导体太赫兹源、探测器与应用. 北京: 科学出版社), 2012:5-7.
- [4] WEI Hua. The prospects for THz detection techniques development [J]. *Infrared Technology*(魏华. 太赫兹探测技术发展展望. *红外技术*), 2010, **32**(4):231-234.
- [5] Fathololoumi S, Dupont E, Chan C W I, *et al.* Terahertz quantum cascade lasers operating up to  $\sim 200 \text{ K}$  with optimized oscillator strength and improved injection tunneling [J]. *Optical Express*, 2012, **20**(4): 3866-3876.
- [6] Freeman J R, Brewer A, Madéo J, *et al.* Broad gain in a bound-to-continuum quantum cascade laser with heterogeneous active region [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99** (24): 241108.
- [7] Walther C, Fischer M, Scalari G, *et al.* Quantum cascade lasers operating from 1.2 to 1.6 THz[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(13):131122.
- [8] Liu H C, Song C Y, SpringThorpe A J, *et al.* Terahertz quantum-well photodetector [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(20): 4068.
- [9] Luo H, Liu H C, Song C Y, *et al.* Background-limited terahertz quantum-well photodetector [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(23): 231103.
- [10] [10] Guo X G, Tan Z Y, Cao J C, *et al.* Many-body effects on terahertz quantum well detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(20): 201101.
- [11] Ferré S, Razavipour S G, Ban D. Terahertz quantum well photodetectors with improved designs by exploiting many-body effects [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(8): 081105.
- [12] Graf M, Dupont E, Luo H, *et al.* Terahertz quantum well infrared detectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, **52**(6): 289-293.
- [13] Gunnarsson O, Lundqvist B. Exchange and correlation in atoms, molecules, and solids by the spin-density-functional formalism [J]. *Physical Review B*, 1976, **13**(10): 4274-4298.
- [14] Schneider H, Liu H C. *Quantum well infrared photodetectors: Physics and applications* [M]. Springer, 2007.
- [15] Gomez A, Berger V, Péré-Laperne N, *et al.* Barrier breakdown in multiple quantum well structure [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(20): 202110.
- [16] Delga A, Doyennette L, Buffaz A, *et al.* Space charge mediated negative differential resistance in terahertz quantum well detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **110**(1): 013714.
- [17] Tittel F K, Bakhirkin Y, Kosterev A A, *et al.* Recent advances in trace gas detection using quantum and interband cascade lasers[J]. *Review of Laser Engineering-Laser Society of Japan*. 2006, **34**(4): 275-282.
- [18] Grant P, Dudek R, Buchanan M, *et al.* Room-temperature heterodyne detection up to 110 GHz with a quantum-well infrared photodetector [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*. 2006, **18**(21): 2218-2220.
- [19] Capasso F. High-performance midinfrared quantum cascade lasers [J]. *Optical Engineering*. 2010, **49**(11): 111102-111102-9.