

〈综述与评论〉

# InAs/GaSb II类超晶格与HgCdTe红外探测器的比较研究

余连杰<sup>1,2</sup>, 邓功荣<sup>1</sup>, 苏玉辉<sup>1</sup>

(1.昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2.微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

**摘要:** HgCdTe、QWIP 和 InAs/GaSb II 类超晶格被公认是第三代红外焦平面探测器的首选。主要对比分析了 HgCdTe 和 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器, InAs/GaSb II 类超晶格具有响应波段宽且精确可控、工作温度高、载流子寿命长、暗电流低和均匀性好等优点, 使其在甚长波、多色以及非制冷红外焦平面阵列等方面具有广阔的发展应用前景。

**关键词:** InAs/GaSb; HgCdTe; II 类超晶格; 红外探测器

**中图分类号:** TN215

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-8891(2012)12-0683-07

## Comparison of Type II InAs/GaSb Superlattices and HgCdTe Infrared Detectors

YU Lian-jie<sup>1,2</sup>, DENG Gong-rong<sup>1</sup>, SU Yu-hui<sup>1</sup>

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2. Science and Technology on Low-light-level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The HgCdTe photodiodes, quantum well infrared photodiodes (QWIP) and type II InAs/GaSb superlattice photodiodes have emerged as the first candidate for third generation infrared detectors. There are many advantages of type II InAs/GaSb superlattice photodiodes over the HgCdTe photodiodes, for example, a highly adjustable broad spectral response range, higher operating temperature, longer carrier lifetime, lower leakage current and greater uniformity. There will be potential applications in the future for type II InAs/GaSb superlattice photodiode in the very long wavelength infrared (VLWIR), multi-color and uncooled infrared Focal Plane Arrays.

**Key words:** InAs/GaSb, HgCdTe, type II superlattices, infrared detectors

## 0 引言

经过几十年的发展, 红外探测器已经从最初的单元、低响应速度的单色探测器发展到目前的大面阵、高性能、高响应速度、高工作温度的多色红外焦平面探测器。目前研制的第三代红外焦平面探测器, 主要是 HgCdTe 探测器和基于 AlGaAs/GaAs 材料的量子阱 (QWIP) 红外探测器。HgCdTe 红外焦平面探测器已经相当成熟, 但是由于受材料均匀性、隧穿暗电流和带隙控制精度等限制<sup>[1]</sup>, 难以制备更大面阵的长波红外 (LWIR) 和甚长波红外 (VLWIR) 器件。QWIP 红外探测器不能吸收垂直入射光, 需要利用光栅进行耦合, 而且要制冷到较低温度下工

作, 且量子效率低。以上这些因素制约了 HgCdTe 和 QWIP 红外探测器的发展。InAs/GaSb II 类超晶格具有与 HgCdTe 相近的吸收系数和响应率, 对垂直入射光有强烈的吸收, 响应波段在 3~30  $\mu\text{m}$  甚至更长范围内可调, 能以光伏模式工作, 工作温度较高, 在长波范围内的响应比 HgCdTe 好<sup>[2]</sup>。近年来人们逐渐把关注的目光集中到 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器的研究上<sup>[3]</sup>。

1977 年, Sai-Halasz 等<sup>[4]</sup>首次提出了 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器。1987 年, Smith 和 Mailhoit<sup>[5,6]</sup>发展了 InAs/Ga(In)Sb 模式, 通过在 GaSb 层中掺入 In 可以调节超晶格的带隙结构, 抑制俄歇复合, 提高了长波超晶格红外器件的光吸收

收稿日期: 2012-07-21.

作者简介: 余连杰 (1977-), 男, 安徽临泉人, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为红外探测器。E-mail: lianjiayu@sina.com.

基金项目: 云南省应用基础研究面上项目, 编号: 2008CD176.

系数,使II类超晶格红外探测器的响应波段扩展到甚长波范围。1994年,Youngdale等<sup>[7]</sup>从理论和实验上分别验证了超晶格中的俄歇复合受抑制,载流子寿命增大,在 $T=77\text{ K}$ 时,InAs/Ga(In)Sb超晶格的俄歇寿命约比相同带隙HgCdTe材料的大两个数量级。最近几年,InAs/GaSb II类超晶格红外探测器取得了较大进展。2006年,Robert Rehm等<sup>[3]</sup>研制出了世界上第一个 $288\times 384$ 中波双色( $3\sim 4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $4\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ )InAs/GaSb II类超晶格焦平面探测器,像元间距为 $40\text{ }\mu\text{m}$ ,在温度为 $73\text{ K}$ 时的NETD分别小于 $30\text{ mK}$ 和 $17\text{ mK}$ ,盲元率分别低于2%和1%。2007年,Walther等<sup>[8]</sup>在3英寸基片上制备出双色 $288\times 384\text{ MWIR}$ ( $3\sim 4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $4\sim 5\text{ }\mu\text{m}$ )InAs/GaSb II类超晶格焦平面探测器,能清晰分辨出人口中呼出的 $\text{CO}_2$ 气体。

InAs/GaSb II类超晶格与HgCdTe和QWIP一起被公认为是第三代红外焦平面探测器的首选材料<sup>[3]</sup>,这三种材料各有优缺点。本文主要比较了HgCdTe和InAs/GaSb II类超晶格红外探测器技术的发展现状和制约因素,展望了InAs/GaSb II类超晶格红外探测器的应用前景。

## 1 HgCdTe 和 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器的比较

与HgCdTe红外探测器相比,InAs/GaSb II类超晶格红外探测器具有响应波段精确可控、响应波段宽、工作温度高、载流子寿命长、量子效率高、暗电流低和均匀性好以及优异的光学和电学性能等优点。下面分别给与详细介绍。

### 1.1 响应波段宽,且精确可调

InAs/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Sb II类超晶格和Hg<sub>1-y</sub>Cd<sub>y</sub>Te材料的带隙都能在 $0\sim 0.4\text{ eV}$ 可控,也即其响应波段可调。Hg<sub>1-y</sub>Cd<sub>y</sub>Te的带隙主要是受化学组分控制<sup>[9]</sup>,

因此Hg<sub>1-y</sub>Cd<sub>y</sub>Te的带隙对Cd组分 $y$ 的改变非常敏感。InAs/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Sb II类超晶格的带隙对In组分 $x$ 的改变不敏感,特别是在截止波长超过 $12\text{ }\mu\text{m}$ 的波段范围( $E_g<0.1\text{ eV}$ )内,而对于超晶格层的厚度则十分敏感,如图1所示<sup>[10]</sup>。

对于固定的InAs层厚度( $26\text{ }\text{\AA}$ ),GaSb层厚度越大,截止波长也越短;对于固定的GaSb层厚度( $27\text{ }\text{\AA}$ ),InAs层厚度越大,截止波长也越长。InAs/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Sb II类超晶格的带隙对InAs层厚度的改变最为敏感,例如对于截止波长为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 的InAs/Ga<sub>0.75</sub>In<sub>0.25</sub>Sb超晶格,当InAs层变化一个分子层时,超晶格的截止波长漂移约为 $\pm 3\text{ }\mu\text{m}$ <sup>[11]</sup>。当生长速度缓慢时,MBE生长工艺可以把超晶格层厚度误差控制在半个原子层内。通过调节超晶格的周期数以及InAs和GaSb层的厚度,可以使InAs/InGaSb II类超晶格探测器的响应波段在短波红外(SWIR)到甚长波红外(VLWIR,  $14\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ )范围内精确可调。目前已经研制出截止波长接近 $32\text{ }\mu\text{m}$ 的InAs/GaSb II类超晶格红外探测器,在 $T=34\text{ K}$ 时的峰值( $\lambda_p=15\text{ }\mu\text{m}$ )探测率可达 $1.05\times 10^{10}\text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ <sup>[12]</sup>。

### 1.2 工作温度高

通过调节InAs/GaSb II类超晶格的应变、能带及优化材料设计,可以抑制俄歇复合,降低暗电流,使探测器在较高温度下工作。理论计算表明,对于性能相同的截止波长为 $11\text{ }\mu\text{m}$ 的HgCdTe和InAs/GaSb II类超晶格探测器,InAs/GaSb II类超晶格探测器的工作温度比HgCdTe探测器约高 $15\text{ K}$ <sup>[9]</sup>。温度对两种材料带隙的影响不相同,HgCdTe的带隙对温度很敏感,温度越高,HgCdTe的带隙越大<sup>[1]</sup>。而温度对InAs/GaSb II类超晶格的带隙影响不大,当温度高于 $80\text{ K}$ 时,随着温度升高,其带隙以 $0.2\text{ meV/K}$ 的速度减小<sup>[11]</sup>。而当温度低于 $80\text{ K}$ ,超晶格

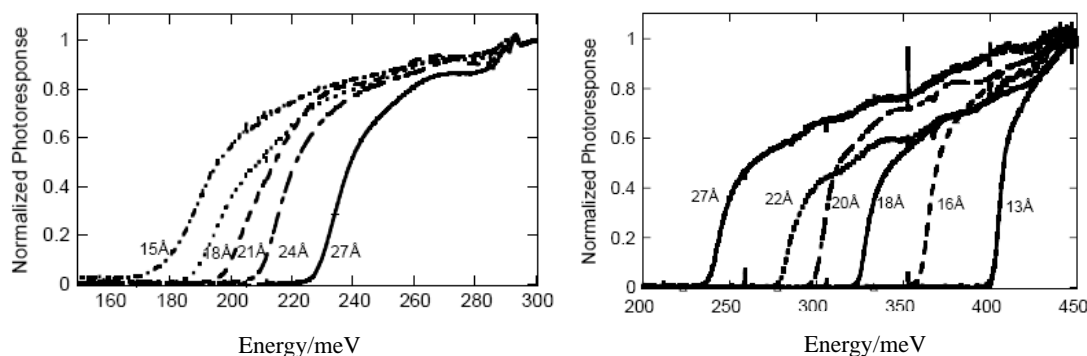


图1 层厚对超晶格光谱响应的影响( $T=10\text{ K}$ ): (a) $d_{\text{InAs}}=26\text{ }\text{\AA}$ ,  $d_{\text{GaSb}}=15\sim 27\text{ }\text{\AA}$ ; (b) $d_{\text{GaSb}}=27\text{ }\text{\AA}$ ,  $d_{\text{InAs}}=13\sim 27\text{ }\text{\AA}$   
Fig. 1 Composite of photoresponse spectra ( $T=10\text{ K}$ ): (a) $d_{\text{InAs}}=26\text{ }\text{\AA}$ ,  $d_{\text{GaSb}}=15\sim 27\text{ }\text{\AA}$ ; (b) $d_{\text{GaSb}}=27\text{ }\text{\AA}$ ,  $d_{\text{InAs}}=13\sim 27\text{ }\text{\AA}$

的带隙以更慢的速度减小<sup>[13]</sup>。对于甚长波 InAs/GaSb II类超晶格探测器, 当温度从 20 K 升高到 90 K 时, 截止波长 (50%) 从 17.6  $\mu\text{m}$  变化到 19.1  $\mu\text{m}$ , 其带隙只偏移 5.5 meV。而对于相同截止波长的 HgCdTe 探测器, 其带隙改变约为 23 meV<sup>[14]</sup>。

图 2 比较了 InAs/GaSb II类超晶格与 HgCdTe 红外探测器的探测率与温度的关系<sup>[15]</sup>。可以看出, 当两种探测器的 p 型掺杂浓度均为  $N_A=10^{17}\text{cm}^{-3}$ , 带隙均为 114 meV, 截止波长为 11  $\mu\text{m}$  时, 在室温背景下, 39.8  $\text{\AA}$  InAs/15  $\text{\AA}$  GaSb 和 HgCdTe 探测器的背景限工作温度分别为 130 K 和 90 K, 而 41  $\text{\AA}$  InAs/25  $\text{\AA}$  GaSb 的背景限温度约为 110 K。而在相同温度下, InAs/GaSb II类超晶格探测器的探测率要明显高于 HgCdTe 红外探测器的探测率。这也从一个方面说明了在长波及甚长波范围, InAs/GaSb II类超晶格探测器比 HgCdTe 探测器有优势。

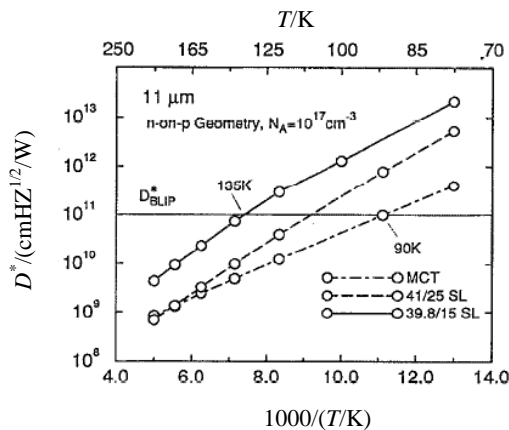


图 2 InAs/GaSb II类超晶格及 HgCdTe 探测器的探测率与温度的关系

Fig.2  $D^*$  of type- II InAs/GaSb superlattices and HgCdTe ideal PV detectors as a function of temperature

由于 InAs/GaSb II类超晶格的轻-重空穴分裂抑制了俄歇复合, 增大了载流子寿命<sup>[16]</sup>, 使超晶格可以在更高温度下工作, 因此适合制作快速响应的高工作温度红外探测器<sup>[9,17]</sup>。

### 1.3 俄歇复合受抑制, 暗电流小

长波 (8~14  $\mu\text{m}$ ) 及甚长波 (14~20  $\mu\text{m}$ ) 红外探测器的工作温度相对较低 ( $T<80\text{K}$ ), 因此其漏电流以隧穿电流为主。InAs/GaSb II类超晶格具有较大的电子有效质量, 例如带隙同为 0.1 eV 时, InAs/GaSb II类超晶格的电子有效质量  $m_e^*\approx 0.02\sim 0.03 m_0$ , 而 HgCdTe 的电子有效质量则为  $m_e^*=0.009 m_0$ <sup>[14]</sup>。较大的电子有效质量抑制了 InAs/GaSb II类超晶格中的俄歇复合, 提高了载流子的俄歇复

合寿命, 使空间电荷区的隧穿电流下降。InAs/GaSb II类超晶格的带-带间的俄歇复合和辐射复合寿命的理论分析表明, 与 HgCdTe 具有相同带隙的 p 型俄歇复合速度受到各自状态的影响, 而对 n 型俄歇复合的速度则无影响<sup>[9,18]</sup>。InAs/GaSb II类超晶格较大的轻-重空穴分离, 可抑制俄歇复合及有关的暗电流<sup>[16]</sup>。Grein 等<sup>[18]</sup>的理论计算表明, 对于具有相同带隙的 InAs/GaSb II类超晶格和 HgCdTe, InAs/GaSb II类超晶格的俄歇载流子寿命约比 HgCdTe 大三个数量级。77 K 时得到波长为 10  $\mu\text{m}$  的 InAs/Ga(In)Sb II类超晶格与 HgCdTe 的载流子寿命的理论计算和实际测量值如图 3 所示<sup>[16]</sup>。在低载流子浓度时, 理论和实验的差异是由于在理论计算中没有考虑 Shockley-Read 复合造成的。在低掺杂水平下, 实验测得 HgCdTe 的载流子寿命约比 InAs/Ga(In)Sb 超晶格的载流子寿命大两个数量级<sup>[16,19]</sup>。对于较高载流子浓度, InAs/GaSb 超晶格的载流子寿命则比 HgCdTe 的载流子寿命约大两个数量级。当载流子浓度大于  $2\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$  时, 理论和实验值十分吻合。隧穿电流限制了 LWIR 和 VLWIR HgCdTe 探测器的性能, 而 LWIR 和 VLWIR InAs/GaSb II类超晶格的性能则不受隧穿暗电流的限制<sup>[14,20]</sup>。因此在 LWIR 和 VLWIR 红外探测方面, InAs/GaSb II类超晶格比 HgCdTe 有优势。

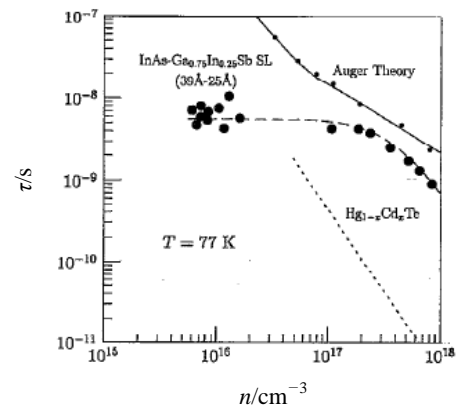


图 3 InAs/Ga(In)Sb 超晶格 (带隙约 120 meV) 的载流子寿命 (载流子浓度的函数) 的测量值和理论计算值比较 ( $T=77\text{K}$ ) [●为试验值, ◆为理论值]

Fig.3 Comparison of measured and calculated carrier lifetimes of InAs/GaInSb SLS (about 120 meV energy gap) at 77 K as a function of carrier density. [Experimental data (●) and theory data (◆)]

### 1.4 光吸收系数大, 量子效率高

InAs/GaSb II类超晶格材料中的电子和空穴的空间分离降低了其光吸收系数。Smith 和 Mailhot<sup>[5,6]</sup>提出了一种提高 LWIR 超晶格吸收系数的方法, 就

是在 GaSb 层中加入 In, 使较薄的超晶格层产生较小的带隙, 从而可提高 LWIR 器件的吸收系数。In 含量越高, InAs/Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>Sb 超晶格的吸收越强, 如图 4 所示<sup>[13]</sup>。实验表明, 当带隙等于 0.115 eV 时, 其光吸收系数与相同带隙的 HgCdTe 的光吸收系数相当。

InAs/GaSb II 类超晶格带间跃迁, 可以吸收正入射, 量子效率大于 30%。测量结果表明, 选择适当厚度的超晶格层, 可以使其量子效率超过 70%<sup>[21]</sup>。美国西北大学研制出截止波长为 5 μm 的 InAs/GaSb II 类超晶格中波探测器, 在  $T=77\text{ K}$  时量子效率为 32%,  $T=300\text{ K}$  时量子效率为 25%。 $T=65\text{ K}$  时截止波长为 15 μm 的量子效率为 16%<sup>[22]</sup>。在  $T=77\text{ K}$  时, 截止波长为 12 μm 的 LWIR InAs/GaSb II 类超晶格探测器的量子效率高达 54%<sup>[23]</sup>。

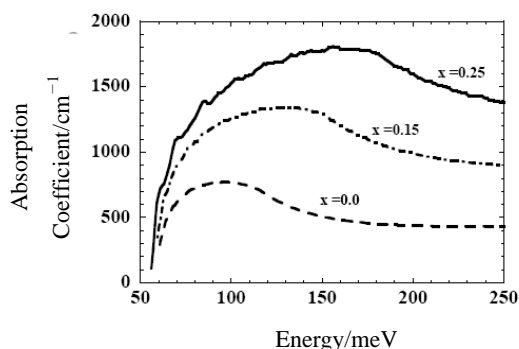


图 4 InAs/Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>Sb 超晶格的理论吸收系数与 In 组分的关系

Fig.4 The calculated absorption coefficient spectra for three different InAs/Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>Sb superlattice designs with varying indium content

### 1.5 电学性能好, 探测率高

InAs/GaSb II 类超晶格具有大的电子有效质量  $m_e^*=0.03m_0$  (而 HgCdTe 的  $m_e^*=0.009m_0$ ), 因此隧穿电流较小<sup>[24]</sup>, 电学性能超过 HgCdTe。对于长波及甚长波红外探测器, 由于其工作温度相对较低 ( $T<80\text{ K}$ ), 因此其漏电流主要为隧穿电流。而 LWIR 和 VLWIR InAs/GaSb II 类超晶格探测器的性能则不受隧穿暗电流的限制<sup>[14]</sup>。HgCdTe 较小的电子有效质量使带-带间的隧穿电流显著增大, 因此使 LWIR 探测器的面阻抗  $R_0A$  下降约几个数量级。理论计算表明, 在相同工作温度和截止波长时, InAs/GaSb II 类超晶格探测器的探测率明显比 HgCdTe 探测器的大<sup>[9,25]</sup>。在温度约为 110 K 时, InAs/GaSb 的最大探测率  $D^*$  约为 HgCdTe 最大探测率  $D^*$  的 4.5 倍。图 5 比较了 HgCdTe 的俄歇复合限制理论探测率 (实线) 与 InAs/GaSb II 类超晶格红

外探测器的探测率实验值<sup>[26]</sup>。室温时, 截止波长为 10.6 μm 的 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器的探测率大于  $10^8\text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ , 这比相应的 HgCdTe 的探测率大<sup>[27]</sup>。可以看出, InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器在长波及甚长波范围很有竞争力。

### 1.6 均匀性好

利用比较成熟的 III-V 族材料的 MBE 生长方法, 可以制备出高均匀性的 II 类超晶格材料。Delaunay 等<sup>[28]</sup>报道的截止波长为 12 μm 的 320×256 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面阵列, 工作温度可达 185 K, 其可操作像元数接近 97%。

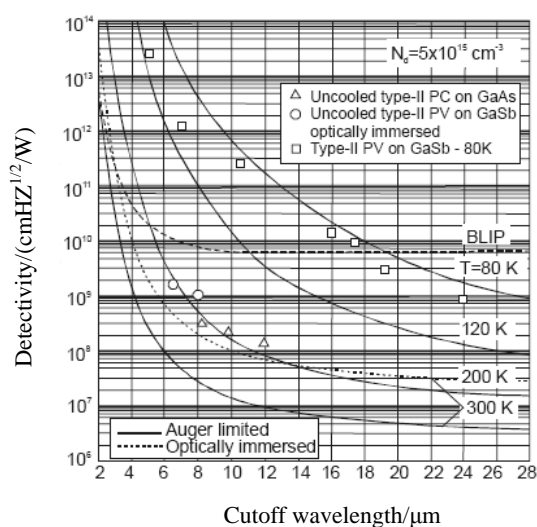


图 5 HgCdTe 的俄歇复合限制理论探测率与 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器的探测率实验值比较

Fig.5 Calculated performance of Auger generation-recombination limited HgCdTe detectors compared to type II superlattice experimental data

## 2 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器研究新进展

最近几年, InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器在多色、大面阵方面取得了较大进展。2010 年, AIM 研制出 288×384 双波段 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器, 在温度为  $T=81\text{ K}$  的平均 NETD 值分别为 17.9 mK 和 9.9 mK。2011 年, Gautam 等<sup>[29]</sup>研制出了响应波段涵盖短波红外 (SWIR)、中波红外 (MWIR) 和长波红外 (LWIR) 的三色 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器, 在工作温度为 77 K 时, SWIR、MWIR 和 LWIR 器件的截止波长  $\lambda_c$  分别为 3.0 μm、4.7 μm 和 10.1 μm, 量子效率分别为 14.9% ( $\lambda=2.5\text{ μm}$ )、12.7% ( $\lambda=4\text{ μm}$ )、10.7% ( $\lambda=8.94$

$\mu\text{m}$ ), 探测率分别为  $1.4 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 、 $1.8 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$  和  $1.5 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。2011 年, Haddadi 等<sup>[30]</sup>报道了  $1024 \times 1024$  长波 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器, 像元尺寸为  $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ , 截止波长为  $11 \mu\text{m}$ 。在波长为  $7.9 \mu\text{m}$  时, 量子效率为 81%。在帧频为 15 Hz、积分时间为 0.13 ms 的 300 K 室温背景下进行了成像演示, 获得了清晰的图像。在工作温度分别为 81 K 和 68 K 时, 可操作像元数分别为 95.8% 和 97.4%, NETD 分别为 27 mK 和 19 mK。2012 年, Huang 等<sup>[31]</sup>报道了世界上第一个  $640 \times 512$  双波段 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器。器件截止波长分别为  $9.5 \mu\text{m}$  和  $13 \mu\text{m}$ , 在温度为  $T=81 \text{ K}$  的平均 NETD 值分别为 15 mK 和 20 mK。2012 年, Sundaram 等<sup>[32]</sup>也报道了  $1024 \times 1024$  长波 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器, 工作温度为 77 K, 截止波长为  $9.5 \mu\text{m}$ , NETD 约为 30 mK, 量子效率为 50%, 可操作像元约为 96%。

最近 2 年国内在 II 类超晶格红外探测器的研究方面已经取得了显著进展, 如中科院半导体所马文全研究组目前已成功研制出锑化物 II 类超晶格中波、长波和甚长波红外探测器<sup>[33,35]</sup>, 并首次成功研制出了长波/甚长波双色窄带型红外探测器原型器件<sup>[36]</sup>, 其响应光谱如图 6 所示。其所生长的 InAs/GaSb II 类超晶格长波及甚长波材料的 XRD 卫星峰半宽是目前世界上已有报道中最好的结果, 而且器件具有较高的量子效率。中波红外探测器在  $T=77 \text{ K}$  时的截止波长 (50%) 为  $4.8 \mu\text{m}$ , 在  $4.2 \mu\text{m}$  处的探测率为  $2.4 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ , 并可实现室温探测 (图 6(a))<sup>[33]</sup>。长波红外探测器在  $T=77 \text{ K}$  时的截止波长 (50%) 为  $9.6 \mu\text{m}$  (图 6(b)), 峰值响应率为  $3.2 \text{ A/W}$ , p-i-n 型红外探测器结构 X 射线双晶衍射卫星峰半宽只有  $17 \text{ arcsec}$ <sup>[34]</sup>。甚长波红外探测器在  $T=77 \text{ K}$  温度下的截止波长 (50%) 为  $14.5 \mu\text{m}$  (图 6(c)), Johnson 噪声限制的探测率为  $4.3 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ , p-i-n 型器件结构 X 射线双晶衍射卫星峰半宽只有  $21 \text{ arcsec}$ <sup>[35]</sup>。还成功研制出通过改变偏压极性实现长波/甚长波双色探测的窄带型 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器, 如图 6(d)所示, 此器件在  $T=77 \text{ K}$  时的截止波长 (50%) 分别为  $10 \mu\text{m}$  和  $16 \mu\text{m}$ , 两个波段之间的光学串扰只有约 10%<sup>[36]</sup>。

另外中科院上海技物所<sup>[37]</sup>、昆明物理所<sup>[38-40]</sup>等单位也在近年开展了 InAs/GaSb II 类超晶格红外探

测器材料和器件的研究工作, 并取得了一定进展。

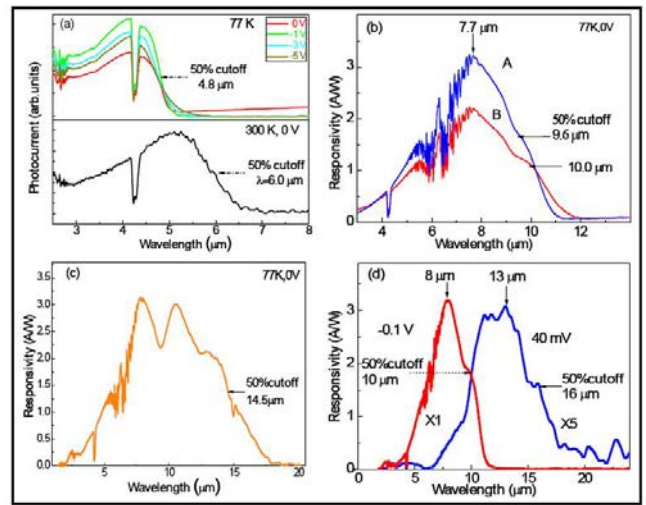


图 6 II 类超晶格中波(a)、长波(b)、甚长波(c)及长波/甚长波双色(d)红外探测器的响应光谱

Fig.6 Spectral responsivity of the MWIR(a), LWIR(b), VLWIR(c) and LWIR/VLWIR two-color(d) type II superlattice photodetectors

### 3 InAs/GaSb II 类超晶格的表面钝化问题

最近几年, InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器取得了较大进展, 已经有双色焦平面研制成功, 并且获得了清晰图像。研究表明<sup>[9]</sup>, 在相同条件下, InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器的探测率的理论值远大于相应 HgCdTe 的理论值, 但是目前几家世界知名研究组的实验值远小于理论值。目前还存在一些问题需要解决, 如 InAs/GaSb II 类超晶格材料的生长、工艺、衬底准备和器件钝化等。表面漏电流是 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器暗电流的主要来源, 通过改善表面钝化技术, 可以抑制其暗电流, 提高探测器的性能。已经有许多钝化技术被研究, 但是没有一种钝化工艺技术能适应所有波长的 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器。因此为了提高性能, 必须选择合适的 InAs/GaSb II 类超晶格表面钝化技术。

### 4 结论

与 HgCdTe 相比, InAs/GaSb II 类超晶格在长波及甚长波红外焦平面探测器和双色红外探测方面具有一定的优势和发展潜力, 是第三代红外焦平面探测器重要的备选材料和器件。InAs/GaSb II 类超晶格在高性能中波、InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器在过去几年取得了很大进展, 理论上已经预测到其具有较高性能, 并从实验上证明, 如俄歇复合受抑制,

工作温度高。但是还有一些问题需要解决,如表面钝化和工艺处理技术的优化等,如果解决了这些问题,就可以大大提高 InAs/GaSb II类超晶格红外探测器的性能,使其达到理论预测值,在中波到甚长波红外探测领域将会得到更为广泛的应用。由于 HgCdTe 红外探测器的技术较成熟,尽管 InAs/GaSb II类超晶格红外探测器技术具有一定的竞争力,但是在短期内还不可能取代 HgCdTe 技术。

## 参考文献:

- [1] Willardson R K, Beer Albert C. *Semiconductors and Semimetals*[M]. New York: Academic Press, 1981.
- [2] Smith D L, McGill T C, and Schulman J N. Advantages of the HgTe-CdTe superlattice as an infrared detector material[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**:180-182.
- [3] Robert Rehm, Martin Walther, Johannes Schmitz, et al. 2nd and 3rd Generation Thermal Imagers based on Type-II Superlattice Photodiodes[C]//*Proc. of SPIE*, 2006, **6294**: 629404.
- [4] Sai-Halasas G A, Tsu R and Esaki L. A new semiconductor superlattice[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**: 651-653.
- [5] Smith D L and Mailhot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors[J]. *J. Appl. Phys.* 1987, **62**: 2545-2548.
- [6] Mailhot C and Smith D L. Electronic structure of (001) and (111) growth axis InAs-Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Sb strained-layer superlattices[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B.*, 1987, **5**: 1268-1273.
- [7] Youngdale E R, Meyer J R, Hoffman C A, et al. Auger lifetime enhancement in InAs-Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Sb superlattices[J]. *Appl. Phys. Lett.* 1994, **64**: 3160-3162.
- [8] Martin Walther, Robert Rehm, Joachim Fleissner, et al. InAs/GaSb type-II short-period superlattices for advanced single and dual-color focal plane arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 2007, **6542**: 654206.
- [9] Grein C H, Young P M, Flatté M E, et al. Long wavelength InAs/InGaSb infrared detectors: Optimization of carrier lifetimes[J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**: 7143-7152.
- [10] Brown G J, Szmulowicz F, Haugan H, et al. Design of InAs/Ga(In)Sb superlattices for infrared sensing[J]. *Microelectronics Journal.*, 2005, **36**: 256-259.
- [11] Brown G J, Houston S, Szmulowicz F, et al. Type-II Superlattice Photodiodes: an Alternative for VLWIR Detection[C]//*Proc. of SPIE.*, 2003, **5074**: 191-198.
- [12] Yajun Wei, Aaron Gin, Manijeh Razeghi, et al. Type II InAs/GaSb superlattice photovoltaic detectors with cutoff wavelength approaching 32  $\mu\text{m}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(19): 3675-3677.
- [13] Gail J. Brown, Type-II InAs/GaInSb Superlattices for Infrared Detection: an Overview[C]//*Proc. of SPIE*, 2005, 5783:65-77.
- [14] Wei Y, Gin A, Razeghi M, et al. Advanced InAs/GaSb superlattice photovoltaic detectors for very long wavelength infrared applications[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(18): 3262-3264.
- [15] Young P M, Grein C H, Ehrenreich H, et al. Temperature limits on infrared detectivities of InAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Sb superlattices and bulk Hg<sub>x</sub>Cd<sub>1-x</sub>Te[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**: 4774-4776.
- [16] Youngdale E R, Meyer J R, Hoffman C A, et al. Auger lifetime enhancement in InAs-Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Sb superlattices[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**: 3160-3162.
- [17] Grein C H, Cruz H, Flatté M E, et al. Theoretical performance of very long wavelength InAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Sb superlattice based infrared detectors[J]. *Appl. Phys. Lett.* 1994, **65**: 2530-2532.
- [18] Grein C H, Young P M, Ehrenreich H. Minority carrier Lifetimes in ideal InGaSb/InAs superlattice[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**: 2905-2907.
- [19] Yang O K, Pfahler C, Schmitz J, et al. Trap centers and minority carrier lifetimes in InAs/GaInSb superlattice long wavelength photodetectors[C]//*Proc. of SPIE.*, 2003, **4999**: 448-456.
- [20] Young M H, Chow D H, Hunter A T, et al. Recent advances in Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Sb/InAs superlattice IR detector materials[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 1998, (123/124): 395-399.
- [21] Field M, Sullivan G J, Ikhlasi A. et al. Electrical and optical performance of InAs/GaSb superlattice LWIR detectors[C]//*Proc. of SPIE*, 2006, **6127**: 61270V.
- [22] Andrew Hood, Manijeh Razeghi, Vaidya Nathan, et al. Performance characteristics of high-purity mid-wave and long-wave infrared type-II InAs/GaSb superlattice infrared photodiodes[C]//*Proc. of SPIE*, 2006, **6127**: 61270U.
- [23] Binh-Minh Nguyen, Darin Hoffman, Yajun Wei, et al. Very high quantum efficiency in type-II InAs/GaSb superlattice photodiode with cutoff of 12 $\mu\text{m}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2007, **90**: 231108.
- [24] Omaggio J P, Meyer J R, Wagner R J, et al. Determination of band gap and effective masses in InAs/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Sb superlattices[J]. *Appl. Phys. Lett.* 1992, **61**: 207-209.
- [25] Jagmohan Bajaj, Gerry Sullivan, Don Lee, et al. Comparison of Type-II Superlattice and HgCdTe Infrared Detector Technologies[C]//*Proc. of SPIE*, 2007, **6542**: 65420B1-8.
- [26] A. Rogalski. Competitive technologies for third generation infrared photon detectors[C]//*Proc. of SPIE*, 2006, **6206**: 62060S1-15.
- [27] Piotrowski J, Rogalski A. Uncooled long wavelength infrared photon detectors[J]. *Infrared Physics & Technol.*, 2004, **46**: 115-131.
- [28] Pierre-Yves Delaunay, Binh Minh Nguyen, Darin Hoffman et al. 320  $\times$  256 infrared Focal Plane Array based on Type II InAs/GaSb superlattice with a 12  $\mu\text{m}$  cutoff wavelength[C]//*Proc. of SPIE.*, 2007,

- 6542: 654204.
- [29] Gautam N, Naydenkov M, Myers S, et al. Three color infrared detector using InAs/GaSb superlattices with unipolar barriers[J]. *Appl. Phys. Lett.* 2011, **98**: 121106.
- [30] Haddadi A, Darvish S R, Chen G, et al. High Operability 1024×1024 Long Wavelength Infrared Focal Plane Array Base on Type-II InAs/GaSb Superlattice[C]// *Proceedings of AIP Conference*, 15th International Conference on Narrow Gap Systems (NGS15), 2011, **1416**: 56-58.
- [31] Edward Kwei-wei Huang and Manijeh Razeghi. World's first demonstration of type-II superlattice dual band 640×512 LWIR focal plane array [C]//*Proc. of SPIE*, 2012, **8268**: 82680Z.
- [32] Sundaram M, Reisinger A, Dennis R, et al. 1024×1024 LWIR SLS FPAs: status and characterization[C]//*Proc. of SPIE*, 2012, **8353**: 8353-35.
- [33] Jianliang Huang, Wenquan Ma, Yulian Cao, et al. Mid Wavelength Type II InAs/GaSb Superlattice Photodetector Using SiO<sub>x</sub>N<sub>y</sub> Passivation[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2012, **51**: 074002.
- [34] Zhang Yanhua, Wenquan Ma, Yulian Cao, et al. Long Wavelength Infrared InAs/GaSb Superlattice Photodetectors With InSb-Like and Mixed Interfaces[J]. *IEEE J. Quantum Electron.* 2011, **47**(12): 1475-1479.
- [35] Yang Wei, Wenquan Ma, Yanhua Zhang, et al. High Structural Quality of Type II InAs/GaSb Superlattices for Very Long Wavelength Infrared Detection by Interface Control[J]. *IEEE J. Quantum Electron.* 2012, **48**(12): 512-515.
- [36] Yanhua Zhang, Wenquan Ma, Yang Wei, et al. Narrow-band long-/very-long wavelength two-color type-II InAs/GaSb superlattice photodetector by changing the bias polarity[J]. *Appl. Phys. Lett.* 2012, **100**: 173511.
- [37] 徐庆庆, 陈建新, 周易, 等. InAs/GaSb 超晶格中波焦平面材料的分子束外延技术[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(5): 406-408.
- [38] 史衍丽, 余连杰, 田亚芳. InAs/(In)GaSb II类超晶格红外探测器研究现状[J]. *红外技术*, 2007, **29**(11): 621-626.
- [39] 王忆锋, 余连杰, 田紫. II类超晶格双光谱红外探测器光谱串音的量化分析计算[J]. *红外技术*, 2011, **33**(5): 293-295.
- [40] 史衍丽. 锑基II类超晶格红外探测器-第三代红外探测器的最佳选择[J]. *红外技术*, 2011, **33**(11): 621-624.

## 全国第十四届红外加热暨红外医学发展研讨会征文通知

由中国光学学会红外与光电器件专业委员会、中国光学光电子行业协会红外分会、中国电子学会量子电子学与光电子学分会、国家红外及工业电热产品质量监督检验中心、锦州市光学学会、云南省光学学会、中国机械工程学会工业炉分会、中国电工技术学会电热专业委员会联合主办, 国家红外及工业电热产品质量监督检验中心、江阴市霖肯科技有限公司承办, 《红外技术》编辑部、《工业加热》编辑部协办的全国第十四届红外加热暨红外医学发展研讨会, 定于2013年10月在江苏省无锡市召开。

本届会议主要反映与交流近年来, 红外加热技术及红外医学领域的新成果和新进展。会议重视学术交流的质量与成效, 扩展各学科及技术领域之间的信息交流, 最大限度地推动红外加热与红外医学技术应用及产业化。为此, 在开展正常学术交流的同时, 本届会议将增加相关的行业技术信息交流; 并就广大企业普遍关注的专业技术问题, 邀请国内红外光电领域的知名专家、学者到会做专题技术报告。热诚欢迎从事红外加热与红外医学研究及工程应用的科研人员踊跃投稿并参会! 大会专家委员会届时将评选会议优秀论文, 并被推荐到中文核心期刊《红外技术》和《工业加热》期刊发表。

### 一、应征论文范围

1. 红外辐射加热技术在国民经济中地位、作用及发展前景的综述、评论文章;
2. 红外辐射与物质相互作用, 红外加热理论与机理的研究;
3. 红外辐射加热元件、红外辐射涂料的新成果、新工艺及相关技术研究;
4. 各种红外辐射加热装置的优化设计与制造及应用实例剖析;
5. 红外加热测试技术、物质的红外光谱及相关技术研究;
6. 红外辐射加热技术在节能减排方面的研究成果;
7. 红外辐射加热在生物学与医学中的应用等;
8. 红外医学新仪器、新材料、新技术、新成果及国内外发展动向;
9. 红外医学的临床理论研究, 临床应用研究;
10. 红外辐射加热技术在建筑供暖领域的应用研究;
11. 红外辐射加热技术在日常生活领域的应用研究;
12. 相关的红外激光、微波、毫米波研究与应用。

二、应征论文作者请在2013年9月10日前, 将论文全文的电子文档发送到 E-mail: 1171288057@qq.com 或 zengyu18@sina.com; 或寄到: 国家红外及工业电热产品质量监督检验中心(邮政编码: 430048) 曾宇教授收。并请作者注明详细通讯地址、工作单位及职务、职称和邮政编码。

三、经审稿录用的论文摘要集, 将由《红外技术》编辑部、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社编辑出版。

四、会议筹备组的通信地址: 武汉市东西湖区金银湖东二路5号, 国家红外及工业电热产品质量监督检验中心(邮政编码: 430048);

联系人: 曾宇, 吴迪; E-mail: 1171288057@qq.com, zengyu18@sina.com。

电话: 027-68853723, 85808990; 传真: 027-85795691。

全国第十四届红外加热暨红外医学发展研讨会筹备组