

文章编号: 1672-8785(2016)02-0001-06

高工作温度 InAlSb 红外探测器的研究进展

陈 刚¹ 孙维国^{1,2} 吕衍秋^{1,2}

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;

2. 红外探测器技术航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 概括了国外 InAlSb 红外探测器的研究现状、材料性质以及发展趋势, 并介绍了几种不同的器件结构及其性能情况。InAlSb/InSb 红外探测器的设计目标主要是通过抑制暗电流来提高探测器的工作温度。近年来, 基于传统 InSb 探测器的成熟工艺与技术, InAlSb 探测器的性能得到了不断提升。该研究对红外制导、预警等军事领域具有重要的研究意义和应用价值。

关键词: 高工作温度; 红外探测器; InAlSb/InSb; 分子束外延

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.02.001

Progress of High Operating Temperature InAlSb Infrared Detectors

CHEN Gang¹, SUN Wei-guo^{1,2}, LV Yan-qiu^{1,2}

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Infrared Detector, Luoyang 471009, China)

Abstract: The current status, material property and development trend of InAlSb infrared detectors of foreign countries are summarized. Several different device structures and their performance are presented. The main design objective of InAlSb/InSb infrared detectors is to elevate the operating temperature by reducing the dark current. In recent years, the performance of InAlSb infrared detectors is improved continuously on the basis of the mature process and technology of traditional InSb detectors. This research is of significance and application value to the fields of infrared guidance, early warning, etc.

Key words: HOT; infrared detector; InAlSb/InSb; MBE

0 引言

高工作温度 (High Operating Temperature, HOT) 是第三代红外探测器发展的重要分支。InSb 基 InAlSb 红外焦平面探测器是在现有成熟的

InSb 探测器工艺上发展起来的^[1-2]。在 3~5 μm 中波红外波段, 虽然 InSb 红外探测器具有可靠性强、量子效率高、均匀性好等优点, 但其存在的主要问题是波长不可调, 器件的工作温度低, 需要在液氮温度下才能发挥出良好的性

收稿日期: 2016-01-22

作者简介: 陈刚 (1989-), 男, 江西九江人, 硕士生, 主要从事红外探测器技术方面的研究。

E-mail: chgang1027@163.com

能优势^[3]。通过控制掺 Al 组分的大小可以调节 InSb 基 InAlSb 红外探测器的能带宽度和截止波长。当掺 Al 组分为 3% 时, 可以将截止波长由 InSb 探测器的 5.6 μm 降至 4.4 μm ^[4-5]。InSb 基 InAlSb 红外探测器的暗电流仅为 InSb 探测器的 1/20。在 -100 mV 偏压和 90 K 温度下, 其暗电流低至 2 pA; 其工作温度可提高到 110 K^[2], 且响应非均匀性小, 可操作性超过 98%^[5]。因此, 与 InSb 探测器相比, 在不牺牲器件性能的前提下, InAlSb 红外探测器可以大幅降低制冷器的负载, 至少可以减少 20% 的能耗。缩短制冷单元的启动时间和延长使用寿命, 对于空空、地空等军事领域具有极其重要的应用价值。成熟的分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 和金属有机化学气相沉积 (Metal-Organic Chemical Vapour Deposition, MOCVD) 工艺为 InAlSb 提供了可靠的外延生长技术。高工作温度的 InAlSb 红外焦平面探测器在精确制导、前视红外、红外搜索与跟踪、侦查与监视、机载相机、空空导弹预警系统等军事领域以及搜救设备、医用成像、红外监控、光谱仪等民用领域具有广阔的应用前景。

目前, 以色列 SCD 公司在 InAlSb 红外焦平面探测器研究领域处于领先地位。2005 年, 该公司成功研制出了像元间距为 30 μm 的 320 $\times$ 256 元焦平面探测器。与同等性能的 InSb 探测器相比, 其工作温度提升至 100 K, 并成功应用于手持式红外相机。2006 年, 该公司将 InAlSb 红外焦平面探测器的规格扩大到 480 $\times$ 384 元。该探测器

的截止波长为 4.2 μm , 工作温度可达 120 K。国外的 InAlSb 焦平面探测器研究起步较早, 英国 QinetiQ 公司早在 2003 年就研发出了工作温度为 130 K 且能保持良好性能的 256 $\times$ 256 元焦平面器件^[6]。此外, 法国 Montpellier 大学与 Sofradir 公司的合作研究中有相关报道^[7-8]。值得一提的是, 国内几乎没有关于 InAlSb 外延材料及其红外探测器的研究, 而仅有少量关于 InAlSb/InSb 异质结外延材料生长的报道^[13-14], 其他则大多以 InSb 探测器的研究为主。

1 InAlSb/InSb 外延生长技术

1.1 InAlSb 的基本性质

在 III-V 族化合物中, AlSb 与 InSb 之间有着最小的晶格失配度, 而且 AlSb 的能隙值为 1.526 eV, 远大于 InSb 的 0.169 eV。通过 MBE 或磁控溅射外延 (Magnetron Sputter Epitaxy, MSE) 等方法对二元 InSb 进行不同浓度的 Al 掺杂, 可以形成 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ 三元化合物, 其能带宽度明显高于 InSb。InAlSb 材料的最大优势是, 它既可保留 InSb 材料的电学特性, 又可进一步抑制载流子的产生-复合效率, 并可降低器件的暗电流。 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ 的能带宽度会随 Al 组分发生线性变化^[4-5]。如图 1 所示, Al 组分每增加 1%, 能带宽度大约增加 18 meV, 导致截止波长向短波方向移动。此外, 图 2 比较了 InSb 与 InAlSb 在 10 K 下的光致发光 (Photoluminescence, PL) 光谱曲线。可以看出, InAlSb 曲线向短波方向移动, 且

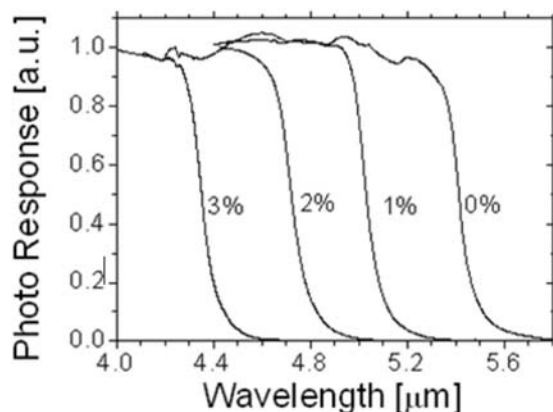


图 1 截止波长与 Al 组分的关系

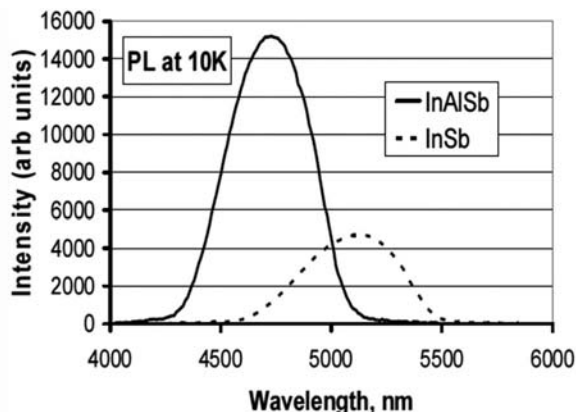


图 2 光谱曲线

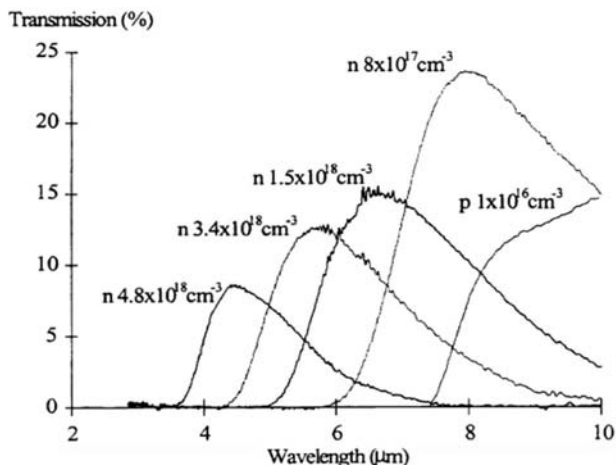


图 3 透射率与掺杂浓度的关系

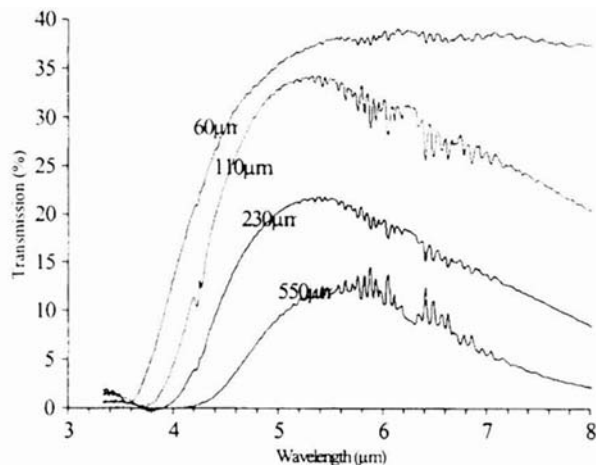


图 4 透射率与衬底厚度的关系

PL 强度增加, 说明随着 Al 组分的增加, InAlSb 的能隙变大。

1.2 InAlSb/InSb 外延生长

1.2.1 衬底材料的掺杂与脱氧

对半导体材料进行适度的掺杂会改变其原有的电学特性。Johnson A D 等人^[9-10]指出, 在对 InSb 衬底掺入 Te 元素而形成 n 型衬底时, 莫斯-布尔斯坦效应的存在会影响入射红外辐射的透射率。图 3 所示为厚度为 550 μm 的 InSb 衬底的掺杂特性。随着 Te 的掺杂浓度由 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 升至 $4.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, InSb 基片的透射率呈下降趋势, 且起始波长往短波方向移动。另一方面, 为了提高器件的量子效率, 他们对 InSb 衬底进行了适当减薄。图 4 为衬底厚度与透射率之间的关系图。实验结果表明, 为了最大限度地减少自由电子吸收, InSb 的最优厚度约为 40 μm, 且 Te 的最优掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

此外, InSb 容易与空气中的氧原子结合形成 In 和 Sb 的氧化物。这会对外延晶体的性能产生重要影响。因此, 在生长前, 需要对衬底表面进行脱氧处理。常用的氧原子去除方法包括离子轰击、高真空度下的热退火、干法或湿法腐蚀等。另外也有少数关于氢原子清洗的报道, 与热退火相比, 这种方法需要相对较低的温度, 对衬底材料的损伤小。但该方法需要通过高温激发来产生氢原子, 成本较高, 而且无法控制氢原子流量的空间分布, 因而会造成表面积较大的衬底

脱氧不均匀。Tessler R 等人^[11]则采用氢分子清洗方法, 在 $5 \times 10^6 \text{ Torr}$ 压力和 250 °C 温度下清洗 30 min, 去除了表面氧原子, 使得表面形态表现得非常平整光滑。

1.2.2 InAlSb/InSb 材料的生长

由于 AlSb 的晶格常数小于 InSb 的晶格常数, 而且两者之间存在 5.3% 的晶格失配度, 在此条件下异质外延 InAlSb 在生长至不到 1 个原子层时即会产生应变^[14]。为了得到高质量的 InAlSb/InSb 晶体材料, 以色列 SCD 公司曾试图采用 MOCVD 方法来制作异质结。他们得到的电流-电压特性曲线表明, 基于 MOCVD 和 MBE 工艺制备的二极管质量均佳, 它们在 -100 mV 偏压和 90 K 温度下的暗电流均为 $4 \text{ fA}/\mu\text{m}^2$ 。1994 年, Maigne P 等人^[12]采用 MSE 方法首先在 InSb 基片上生长出了厚度为 0.3 μm 的缓冲层, 随后又生长出了厚度为 0.1 μm 的 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ 层。其中, Al 的含量范围为 15% ~ 64%, 生长温度控制在 693 K。他们得出的结论是, InAlSb 层的临界厚度是由均衡模型所得厚度的 5 倍, 而且弛豫系数与归一化厚度之间成线性关系。

在不同温度下, 采用 MBE 方法生长 InAlSb/InSb 外延层。当 V/III 比为 1.5、生长速度为 1 μm/h、厚度为 3 μm、Al 组分含量为 6% 时, 得出的最优生长温度为 680 K^[3]。低温或者高的 Al 组分浓度都可能会导致失配位错、表面起伏和微裂纹的产生。在 680 K 温度下, 在原有

结构上生长一层厚 $1.5\ \mu\text{m}$ 的 InSb 盖帽层, 中间 InAlSb 层的厚度分别为 $20\ \text{nm}$ 和 $50\ \text{nm}$ 。实验结果表明, 夹层厚度为 $50\ \text{nm}$ 的外延片的表面比较粗糙, 其临界厚度处于 $20\sim 50\ \text{nm}$ 之间。而且经推断, 未加覆盖层系统的临界厚度将远小于 $0.05\ \mu\text{m}$ 。此外, 在材料生长的应变弛豫研究中, 通过对比试验比较了不同 Al 组分含量所导致的各种应变弛豫。在厚度一样的前提下, Al 含量高的外延层弛豫度更高。而当 Al 含量相同时, 厚外延层的弛豫度更高。

另外, 国内也开展了关于 InAlSb/InSb 薄膜材料生长的研究。文献 [13] 提出, 通过 InSb 衬底的脱氧和退火工艺的优化、Al 组分的控制以及缓冲层优化处理工艺的改善, 可以减少薄膜缺陷, 提高晶体质量。文献 [14] 也从多方面的实验研究了薄膜质量的影响因素, 比如分析生长温度与弛豫大小之间的关系, 并通过优化束流比以及退火工艺等来改善薄膜的表面形貌。

2 InAlSb/InSb 焦平面探测器的结构及性能

高工作温度红外探测器设计的主要目的是抑制暗电流, 包括产生-复合电流、扩散电流、直接隧穿电流、陷阱辅助隧穿电流和表面漏电流。而 MBE 和 MOCVD 等材料生长技术日趋成熟, 为实现半导体的能带工程提供了重要依据。特别是对于 III-V 族化合物半导体, 研究人员可以根据需求设计不同的材料结构。下面对几种高工作温度 InSb 基 InAlSb 红外探测器的结构及性能进行介绍。

2.1 PIN 结构

与 PN 结型光电二极管相比, PIN 光电二极管具有较小的时间常量。其特点是, 在掺杂浓度很高的 P 型半导体与 N 型半导体之间夹着一层较厚的高阻本征半导体 I 层。此结的内电场基本集中在 I 层, 使 PN 结的结间距拉大, 结电容变小。随着反偏电压的增大, 结电容变得更小, 从而提高了 PIN 光电二极管的频率响应。

SCD 公司在 InSb 基片上外延生长了低 Al 组分的 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{Sb}$ ($0 < x < 3\%$) PIN 结构薄膜。其中, n 型光吸收区为非故意掺杂, 厚度为 $3\sim 5$

μm ; p 区为 Be 掺杂, 浓度约为 $10^{18}\ \text{cm}^{-3}$, 厚度为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$; 台面腐蚀高度为 $2\sim 6\ \mu\text{m}$, 最终制备成 320×256 元焦平面探测器。在 $87\ \text{K}$ 温度和 $-100\ \text{mV}$ 偏压下, 该器件的暗电流低至 $2\ \text{pA}$; $90\ \text{K}$ 下的暗电流为 $1.5\sim 2.5\ \text{pA}$, 可操作性为 99.5% , 残余非均匀性小于 0.01% , 工作温度可以达到 $110\ \text{K}$ 。这相当于 InSb 红外探测器在 $77\ \text{K}$ 下的工作性能。此外, Al 组分的大小对器件高温性能的稳定性的影响。为了保证残余非均匀性尽可能地低, 暗电流的分布越窄越好。随着 Al 组分的掺入, 器件的峰值暗电流和半高宽可以达到 $2.16\ \text{pA}$ 和 $280\ \text{fA}$ 。如图 5 所示, 当 Al 组分含量为 1% 时, InAlSb 探测器的 V 曲线宽度大于 InSb 探测器, 即温度波动对前者的残余非均匀性的影响更小。由此可见, InAlSb 红外探测器不仅可以提高工作温度, 而且还可以保证在此高温下工作的稳定性。

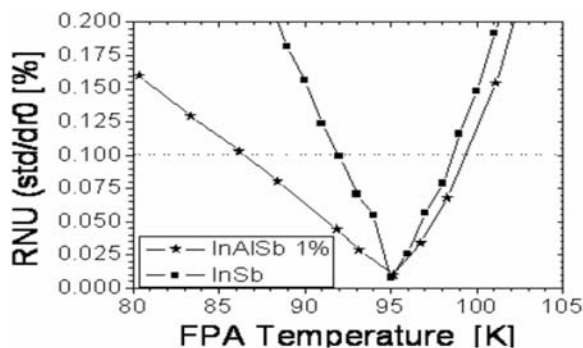


图 5 两种探测器的残余非均匀性比较

2.2 nBn 结构

势垒探测器是由 White A M 在 1983 年的文献中提出来的。作为其中的一种类型, nBn 结构 [15] 假设在 n 型异质结的光吸收区内嵌入一个宽能隙薄层, 然后再覆盖一层窄带接触层。该结构主要是利用插入的单极势垒在丝毫不影响光电流通过的情况下抑制暗电流和表面漏电流。这就要求吸收层与势垒层之间必须具有较小或者几乎为零的价带能隙差。这对材料的能带要求相对较高, 在传统的探测器材料 (如 InSb 和 HgCdTe) 中很难实现。但晶格几乎匹配的 InAs、GaSb 和 AlSb 材料体系都能满足以上要求, 所以这种结构在 II 类超晶格中得到了广泛应用。

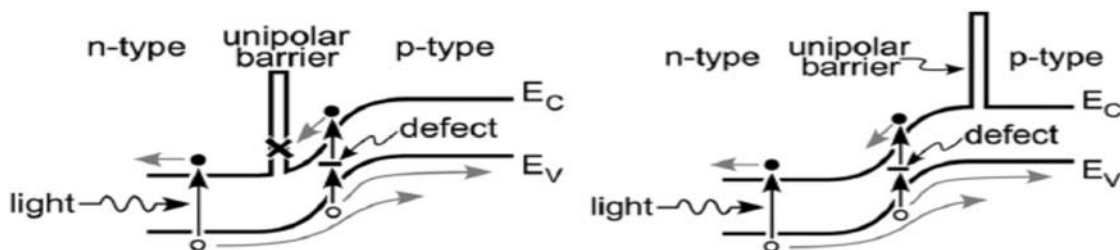


图 6 势垒层分别位于 n 区和 p 区的结构

N-(Be) InSb cap layer	
$N_{\text{cap}} \sim 1.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	200nm
In ₈₀ Al ₂₀ Sb barrier layer	
n.i.d	70nm
InSb Active layer	
$N_{\text{abs}} \sim 1.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	1 μm
N-(Te) InSb buffer layer	
$N_{\text{d}} \sim 4.10^{17} \text{ cm}^{-3}$	400nm

图 7 两种不同的 nBn 结构

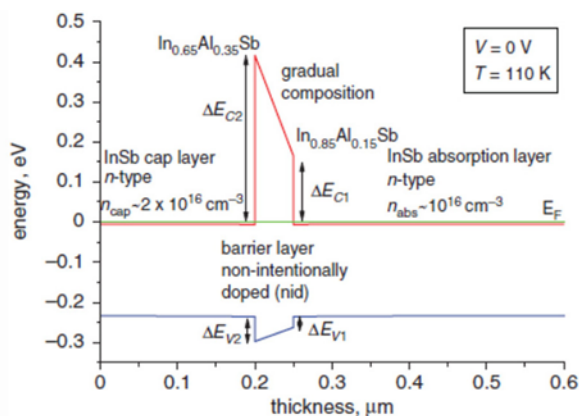


图 8 能带示意图

nBn 结构的最大特点是没有耗尽层, 或者说是用高的势垒层代替了原来 PN 结中的耗尽层。单极势垒红外探测器的相关研究指出, 生长在 p 区的单极势垒可以有效阻挡表面漏电流, 而生长在 n 区的单极势垒则可阻挡包括陷阱辅助隧穿电流、直接隧穿电流和肖克莱 - 里德 - 霍尔 (Shockley-Read-Hall, SRH) 暗电流等在内的结生暗电流 (见图 6) [17]。与传统的 InSb 探测器相比, n 区势垒型探测器所得到的 $R_0 A$ 值可以高达 10^6 量级。

近期, Ecirgen A 等人 [7-8] 从 PIN 结构出发, 将 nBn 结构与现有的 InSb 探测器技术相结合, 成功研制出了基于 nBn 结构的高工作温度 InSb/InAlSb/InSb 红外探测器。他们把 InAlSb 作为势垒层, 设计了两种 nBn 结构的器件, 并解决了高 Al 组分异质结外延生长的晶格失配问题。他们生长了厚度约为 50 nm 的 InAlSb 势垒阻挡层。在第一种结构中, Al 的组分含量固定为 20%, 吸收区和盖帽层的掺杂浓度均为 10^{16} 量级。图 7 为外延结构的示意图。而在另一种结构中, Al

的组分含量从 15% 缓慢增至 35%。图 8 为该结构的能带图。

在 77 K 温度和 -50 mV 偏压下, 器件的暗电流密度大约降至 10^{-9} A/cm^2 。与标准的 PIN 型 InSb 探测器相比, 其截止波长并无太大差异, 但暗电流降低了 2 个数量级, 原因在于这种 nBn 结构大大降低了器件的产生 - 复合电流 [7]。在 -50 mV 偏压下, 与 PIN 型 InAlSb/InSb 探测器以及 Sofradir 公司生产的 PN 型探测器 (INSPIR MW, 384×288 元, 像元间距为 25 μm) 相比, 该器件的工作温度可以达到 120 K, 比前者提高了 20 K, 比后者甚至高出了 40 K [16]。

2.3 pBn 结构

Ashley T 等人 [6] 改变了原有的外延 InSb 器件结构, 设计出了一种具有单极势垒层的 pBn 结构, 即在 n 型 InSb 光吸收区与 p 型 InSb 接触区之间插入了一层很薄的 p 型 In_{1-x}Al_xSb 层, 如图 9 所示。其中, n⁺ 区的 Si 掺杂浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度为 4 μm ; n 区的掺杂浓度为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 厚度为 2.5 μm ; p⁺ 区的 Be 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度为 1 μm ; 凭借两者之间的势

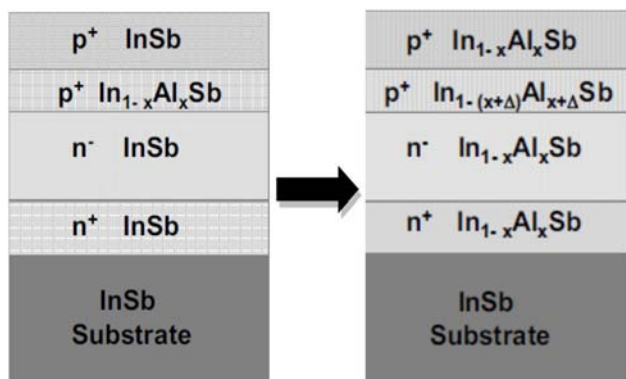
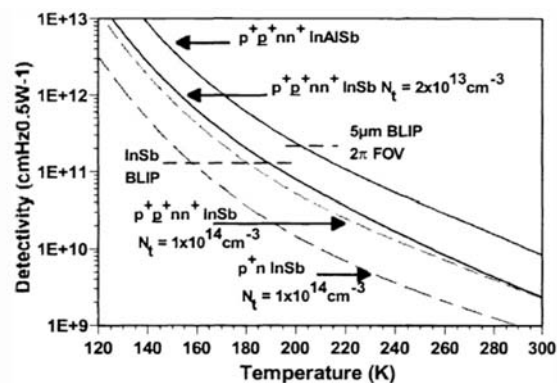


图 9 pBn 结构的示意图

图 10 比探测率 D^* 与温度的关系图 11 $\text{In}_{0.965}\text{Al}_{0.035}\text{Sb}$ 探测器获得的图像 (由左至右, 工作温度分别为 80 K、100 K 和 130 K)

垒差来阻挡载流子的产生-复合作用,从而降低暗电流。在 100 K 温度下,他们设计的像元间距为 40 μm 的 256 $\times$ 256 元面阵结构的噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 小于 15 mK,可操作性为 99%。

为了实现更高的工作温度,他们在 InSb 基片上生长了 $\text{In}_{0.965}\text{Al}_{0.035}\text{Sb}$ 材料,并通过调节势垒层中 Al 的掺杂含量来调节势垒高度。实验结果表明,在 80 K 温度下,基于此种结构的器件的 R_0A 值可达到 $1 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$,比传统的 InSb 器件高出 2 个数量级;在不牺牲性能的前提下,其工作温度可提升至 130 K。图 10 所示为 InSb 探测器和 InAlSb 探测器的比探测率 D^* 的变温线。显然,对于 InAlSb 探测器来说,在 150 K 的工作温度下,其 D^* 值仍然保持在 $10^{12} \text{ cm}^2 \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。图 11 为 256 $\times$ 256 元 $\text{In}_{0.965}\text{Al}_{0.035}\text{Sb}$ 探测器获得的图像。

3 结束语

目前,第三代红外探测器正朝着大面阵、双

色及多光谱、高工作温度、高集成度、小型化以及智能化方向发展。在高工作温度探测器研究领域,镓基化合物半导体扮演着重要的角色。众多研究机构和顶尖公司都对此展开了大量研究,其内容涉及 InAsSb、HgCdTe 和 II 类超晶格等多个方面,同时也取得了长足的进步。另外,MBE 和 MOCVD 等材料生长技术的发展也将会使人们制作出更为精细的 InAlSb 多层结构。随着器件制备工艺的日益完善,InAlSb 红外探测器的性能及其技术不断发展。提高工作温度可以在很大程度上满足军事武器对红外探测器尺寸、重量和能耗 (Size, Weight and Power, SWaP) 方面的要求。高工作温度红外探测器将会在现代战争中发挥重要作用,尤其是在地(舰)空、反坦克、空空等快速启动导弹以及机载、舰载、车载、单兵用光电设备中有着广泛的应用前景。

(下转第 21 页)