

〈材料与器件〉

## nBn 型 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器光电特性研究

胡 锐, 邓功荣, 张卫锋, 何雯谨, 冯江敏,  
袁 俊, 莫镜辉, 史衍丽

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 设计了 nBn 结构的 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器, 从理论和实验两方面对 nBn 器件的暗电流特性进行了研究, 研究结果表明: 理论计算的暗电流和实际测试结果趋势一致。另外, 研制了 p-i-n 结构器件并与 nBn 器件进行了比较, 测试结果显示: 在 77 K 温度下, nBn 器件的暗电流要比 p-i-n 器件暗电流小 2 个量级。温度升高到 150 K 时, nBn 器件暗电流变大 2 个量级, 而 p-i-n 器件暗电流变大 4 个量级; nBn 器件峰值探测率下降到 1/5, p-i-n 器件峰值探测率下降 2 个量级。可见 nBn 器件适合高温工作, 适合高性能红外焦平面探测器的研制。

**关键词:** nBn; 超晶格; InAs/GaSb; 暗电流; Shockley-Read-Hall

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2014)11-0863-05

## Electrical and Optical Properties of nBn Based on Type-II InAs-GaSb Strained Layer Superlattice Infrared Detectors

HU Rui, DENG Gong-rong, ZHANG Wei-feng, HE Wen-jin, FENG Jiang-min,  
YUAN Jun, MO Jing-hui, SHI Yan-li

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** An infrared detector based on type-II InAs/GaSb strain layer superlattice with the nBn design has been designed. Dark current of the nBn device was studied through the theoretic calculation and the experiment. The results show that dark current of the theoretic calculation is consistent with the trend of the experimental results. In addition, the p-i-n device was developed, and compared with the nBn device. Test results present that dark current of the nBn device is two orders of magnitude lower than dark current of the p-i-n device at 77 K. When the temperature rises to 150 K, dark current of the nBn device increases by two orders of magnitude, and dark current of the p-i-n device increases by four orders of magnitude; the specific detectivity  $D^*$  of the nBn device reduces to 1/5, and the  $D^*$  of the p-i-n device decreases by over two orders of magnitude. Therefore nBn devices are suitable to work at high temperature, which will be fit to development of high performance infrared focal plane arrays.

**Key words:** nBn, superlattice, InAs/GaSb, dark current, Shockley-Read-Hall

## 0 引言

InAs/GaSb II 类超晶格<sup>[1]</sup>作为红外探测材料具有优越的光电性能, 在实空间电子空穴物理分离, 通过能带结构的调整, 可实现对俄歇复合的有效抑制, 其量子效率高, 暗电流小, 微带带隙可调, 是

第三代红外焦平面探测器的最优选材料之一<sup>[2-3]</sup>。

降低器件暗电流是提高探测器性能的关键, 国内外科研人员在此方面做了大量的研究工作<sup>[4]</sup>。2006 年, S. Maimon 和 G. W. Wicks 提出了 nBn 结构的红外探测器结构设计<sup>[5]</sup>, 美国西北大学<sup>[6-11]</sup>、新墨西哥大学<sup>[12-18]</sup>等在此结构设计上做了大量研究工

收稿日期: 2014-09-16; 修订日期: 2014-10-26.

作者简介: 胡锐 (1988-), 男, 山东汶上人, 硕士, 研究方向是红外探测器的研究与设计。

通讯作者: 史衍丽 (1969-), 女, 山东郓城人, 研究员, 博士生导师, 研究方向是探测器物理与器件研究, E-mail: ylishikm@hotmail.com.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目, 编号: U1037602。

作,在 nBn 器件低暗电流、高温工作、多色器件等方面的研究取得了出色的成绩,为 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器开辟了新的发展方向。

本文理论计算了 nBn 器件的暗电流密度,并实际研制了 nBn 和 p-i-n 两种器件,测试分析了  $I$ - $V$  特性、暗电流的温度特性,验证了 nBn 器件在降低器件暗电流和提高工作温度方面的优势。

1 器件结构设计及制备

1.1 nBn 器件原理

nBn 器件结构如图 1 所示,主要由 n 型吸收层(n)、势垒层(B)和 n 型接触层(n) 3 部分组成。其中势垒层要足够厚和高,使得电子很难隧穿过势垒,而且通过热激发后也难于越过。

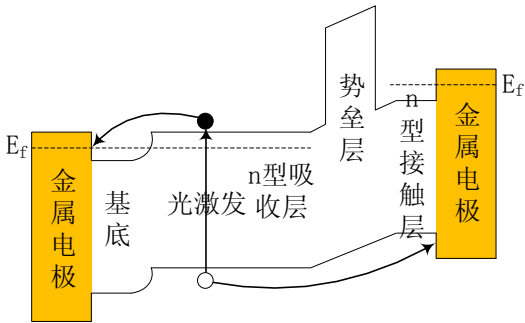


图 1 nBn 器件结构示意图

Fig.1 Heterostructure schematic of the nBn structure

1.2 nBn 器件结构

本文设计的器件如图 2 所示,底层和顶层是掺杂浓度为  $1\times10^{19}\text{cm}^{-3}$  的 GaSb 层,厚度  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ;底层之上是 n 型掺杂浓度为  $4\times10^{18}\text{cm}^{-3}$  的 InAs/GaSb 超晶格接触层,结构是 8ML/8ML,一共 10 个周期;接触层上面是非有意掺杂(n.i.d)的 InAs/GaSb 超晶格吸收层,结构同样为 8ML/8ML,一共 50 个周期;吸收层之上是  $0.1\text{ }\mu\text{m}$  厚的 AlGaSb 势垒层,初步设定 Al 的组分为 0.2;势垒层与顶层之间是一层 InAs/GaSb 超晶格接触层。

GaSb $0.1\text{ }\mu\text{m}$ $n_{\text{doping}}=1\times10^{19}\text{cm}^{-3}$	
InAs/GaSb 8ML/8ML 10 周期	InAs
$n_{\text{doping}}=4\times10^{18}\text{cm}^{-3}$	
Al <sub>0.2</sub> GaSb $0.1\text{ }\mu\text{m}$	
吸收层	InAs/GaSb 8ML/8ML 50 周期 n.i.d
InAs/GaSb 8ML/8ML 10 周期	InAs
$n_{\text{doping}}=4\times10^{18}\text{cm}^{-3}$	
GaSb $0.1\text{ }\mu\text{m}$ $n_{\text{doping}}=1\times10^{19}\text{cm}^{-3}$	

图 2 nBn 器件结构设计图

Fig.2 The structure of the device based on nBn design

1.3 器件制备

在 GaSb 衬底上,采用分子束外延(MBE)生长 InAs/GaSb 超晶格材料,通过光刻、湿法腐蚀、金属沉积等工艺后制备出红外探测器,光敏元直径为  $\phi 200\text{ }\mu\text{m}$ 。

2 器件暗电流的理论计算

2.1 超晶格微带

利用 Crosslight Apsys 光电子器件模拟分析软件对 InAs/GaSb II 类超晶格吸收层能带进行计算,计算结果如图 3 所示。图中可以看出通过求解薛定谔方程计算出的波函数形成了 2 条微带,这就是超晶格层之间波函数耦合所形成的微带,2 条微带的带隙差在  $0.28\sim0.5\text{ eV}$  之间,对应的响应波长为  $2.5\sim4.4\text{ }\mu\text{m}$ ,为中波红外的响应范围。

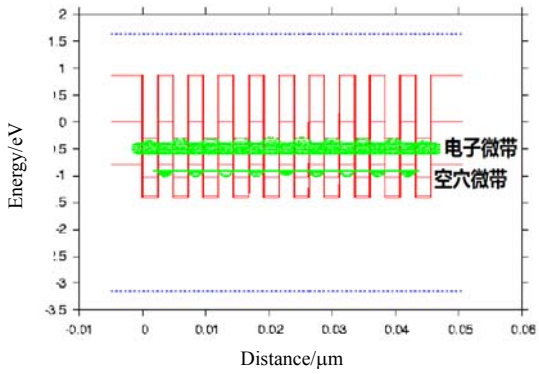


图 3 InAs/GaSb 类超晶格吸收层能带

Fig.3 The band of type-II InAs/GaSb strain layer superlattice absorbing layer

2.2 nBn 型器件暗电流理论计算

本文中定义器件顶层加正电压时是给器件施加正偏电压,图 4、图 5、图 6 分别为 nBn 器件平衡态、正偏 1 V 和反偏 1 V 的能带结构图。

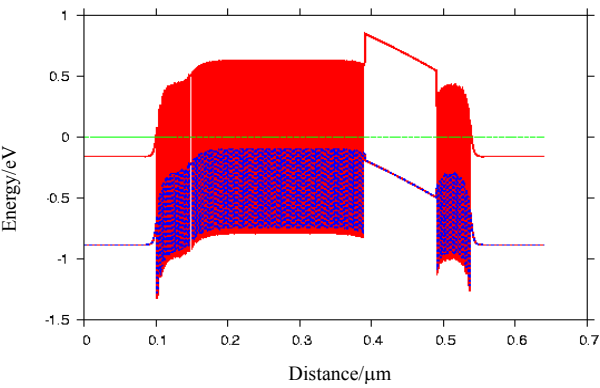


图 4 nBn 器件零偏时的能带图

Fig.4 The band of the nBn device at 0V

从图 4 中可以得到:势垒层与吸收层、接触层

与势垒层之间形成异质结, 由于它们的费米能级差异导致势垒发生倾斜; 吸收层、接触层与势垒层的导带带阶大、价带带阶小, 形成对电子的阻挡, 能很好地阻止由于热激发形成的暗电流。

从图 5、图 6 中可以得到: 外加偏置电压压降几乎落到势垒区, 当对器件施加+1 V 偏置电压时, 吸收层、接触层与势垒层的导带带阶变小、价带带阶变大, 使得少数载流子(空穴)被大的势垒阻挡, 吸收层的多数载流子(电子)能顺利到达电极而被收集, 电流增大; 加偏置电压-1 V, 相比零偏压时, 势垒倾斜方向发生改变, 吸收层、接触层与势垒层的价带偏移更小, 使得载流子更容易通过势垒层到达电极。

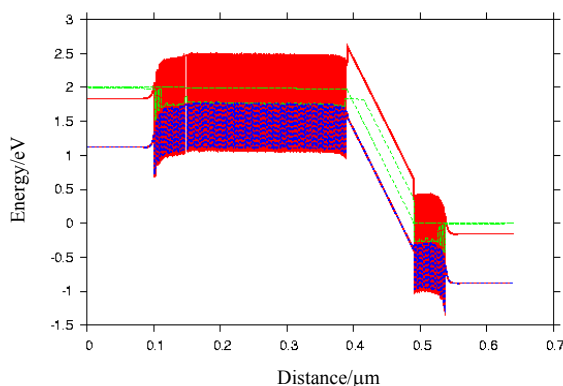


图 5 nBn 器件在+1 V 偏压时的能带图

Fig.5 The band of the nBn device at +1 V

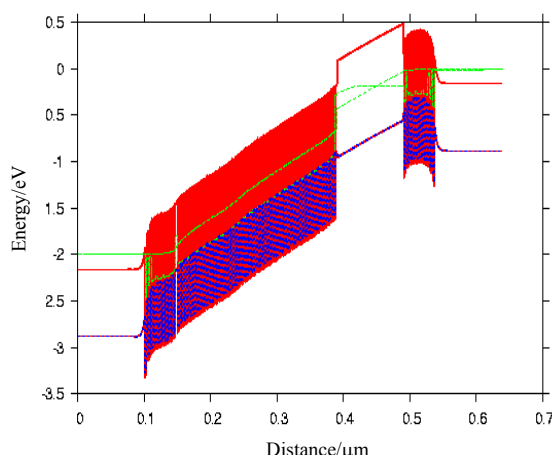


图 6 nBn 器件在-1 V 偏压时的能带图

Fig.6 The band of the nBn device at -1 V

基于上述能带结构, 结合器件漂移扩散模型, 对器件 77 K 温度的暗电流密度进行了理论计算, 计算结果如图 7 所示, 在-1 V~+1 V 的计算范围内, 体现了较好的整流特性, 负向暗电流小, 正向暗电流大。

### 3 实验结果与讨论

将制备好的 nBn 和 p-i-n 器件封装到变温杜瓦中, 温度为 77~200 K, 采用 Keithley 2400 Source Meter 对器件进行室温背景下的  $I$ - $V$  特性测试, 进而得到器件的暗电流密度曲线。

#### 3.1 器件的暗电流

图 8 所示为 77 K 下 nBn 器件与 pin 器件暗电流密度测试结果。

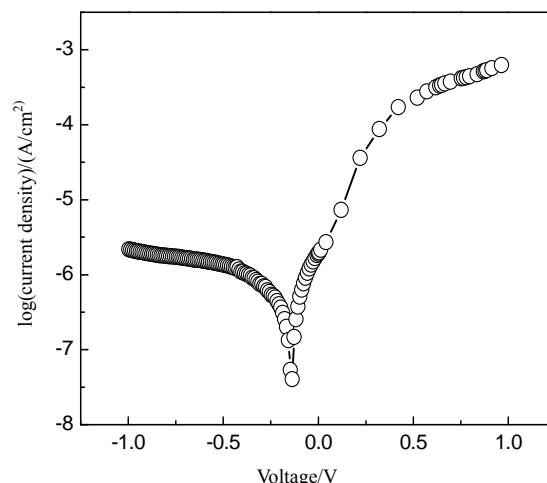


图 7 77 K 下 nBn 器件的暗电流密度理论计算曲线

Fig.7 The dark current density of the nBn device at 77 K through the theoretic calculation

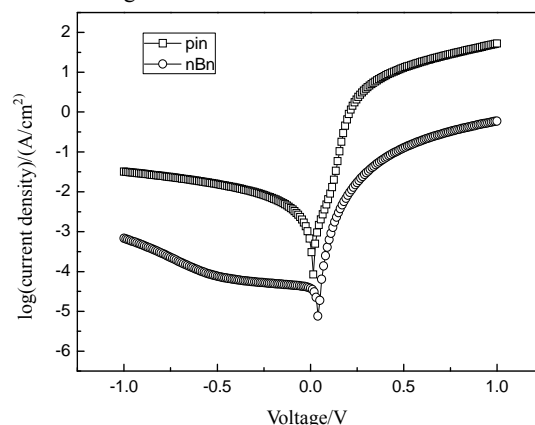


图 8 77 K 下 nBn 器件与 pin 器件暗电流密度实验值

Fig.8 The dark current density of the nBn device and the p-i-n device at 77 K on experiment

结合图 7、图 8 可以得到, nBn 器件的暗电流密度曲线的理论计算结果和实验值趋势一致, 体现了很好的整流特性。在负偏电压下, 由于实际器件无法达到理论计算的理想状态, 所以出现了一定偏差; 在正偏电压下, 偏压施加大到一定程度, 吸收层的能带抬高后, 将会高过势垒层, 此时势垒层起不到阻挡作用, 就会形成较大的暗电流, 而目前理论计

算的能带图中吸收层比势垒层低，势垒层阻挡了电子的移动，因此计算出的暗电流略小。

A. Rogalski 指出了 p-n 结二极管红外探测器暗电流主要由 3 种机制决定<sup>[19]</sup>，即  $I_{\text{dark}}=I_{\text{SRH}}+I_{\text{diff}}+I_{\text{surf}}$ 。 $I_{\text{SRH}}$  为耗尽区 Shockley-Read-Hall 产生电流、 $I_{\text{diff}}$  为扩散电流、 $I_{\text{surf}}$  为表面漏电流。图 8 中 77 K 温度下，nBn 结构器件的暗电流要比 p-i-n 结构小 2 个量级。nBn 结构的器件工作在几乎平带的状态，耗尽区窄，因此相比 p-i-n 结构，器件基本消除了  $I_{\text{SRH}}$ ，主要是少数载流子的扩散电流  $I_{\text{diff}}$ ，可见 nBn 结构的器件在降低器件暗电流的优势。

3.2 器件暗电流的温度特性

nBn 器件的暗电流温度特性如图 9 所示，在正偏电压下，器件的暗电流随温度变化不明显，而在负偏电压下，器件的暗电流随着温度从 77 K 增大到 180 K 时，暗电流增大，在 -2 V 偏压处暗电流增大了约 1 个量级，这是由于随着温度的升高，器件的扩散电流增大所致。

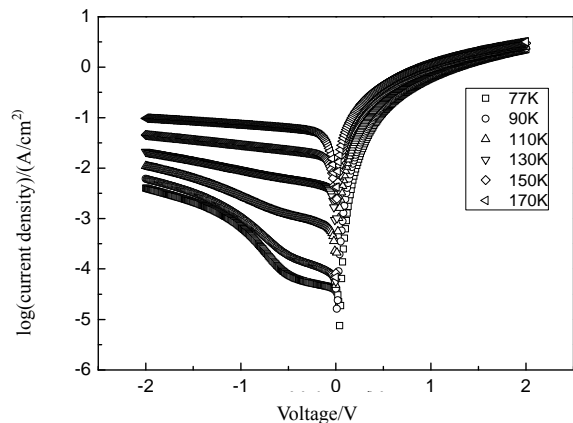


图 9 不同温度下 nBn 器件的暗电流密度曲线

Fig.9 The dark current density of the nBn device at different temperature

3.3 nBn 与 pin 器件性能

500K 黑体温度，测试了两种器件的探测率，工作温度为 77~180 K，nBn 器件反向 100 mV 偏压、p-i-n 器件零偏下测试。测试结果与上述暗电流研究结果得到了综合性能表，见表 1。

从表 1 中明确得到：nBn 器件与 p-i-n 器件在 77 K 温度下探测率相当，随着工作温度的升高，nBn 器件的暗电流和探测率都要优于 p-i-n 器件，与 77 K 时的器件性能相比，150 K 时，nBn 器件峰值探测率下降到 1/5，p-i-n 器件峰值探测率下降 2 个量级。进一步体现了 nBn 器件暗电流小、探测率高和高温

工作的特点。

表 1 nBn 器件与 p-i-n 器件的综合性能

Table 1 The performance of the nBn device and the p-i-n device		
参 数	nBn 器件	p-i-n 器件
暗电流 (77~150 K)	变大 1 个量级	变大 4 个量级
峰值探测率 /(cm·Hz <sup>1/2</sup> W <sup>-1</sup> ) (77K)	4.75×10 <sup>11</sup>	5.0×10 <sup>11</sup>
峰值探测率 (77~150 K)	下降到 1/5	下降 2 个量级

4 结论

设计并研制了 nBn 结构的 InAs/GaSb II 类超晶格探测器，在 77 K 温度下，器件的暗电流 nBn 要比 p-i-n 小 2 个量级。温度升高到 150 K 时，暗电流 nBn 器件变大 2 个量级，而 p-i-n 器件变大 4 个量级；nBn 器件峰值探测率下降到 1/5、p-i-n 器件下降 2 个量级。77 K 温度下，相对光谱响应为 2~4.3 μm，峰值探测率达到 4.75×10<sup>11</sup> cm·Hz<sup>1/2</sup>W<sup>-1</sup>，器件性能处于国内领先水平。实验结果显示：nBn 结构的器件暗电流小、探测率高、适合高温工作，适合高温高性能红外焦平面探测器的研制。

参考文献:

[1] Sai-Halasz G A, Tsu R, Esaki L. A new semiconductor superlattice[J]. *Applied Physics Letters*, 1977, **30**(12): 651-653.

[2] Smith L, Mailhot C. Proposal for strained type-II superlattice infrared detectors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, **62**(6): 2545-2548.

[3] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择[J]. *红外技术*, 2013, **35**(1): 1-8.

[4] Shi Yan-li, Hu Rui, Zhang Wei-Feng, et al. Temperature Characteristic of InAs/Ga(In)Sb Middle Wavelength Infrared Detectors[C]//*Proc. of SPIE*, 2013, **8907**: 02-1-9.

[5] Maimon S, Wicks G W. nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(151109): 1-3.

[6] Razeghi M, Wei Y, Gin A, et al. High performance Type II InAs/GaSb superlattices for mid, long, and very long wavelength infrared focal plane arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 2005, **5783**: 86-97.

[7] Yajun Wei, Junjik Bae, Aaron Gin, et al. High quality type II InAs/GaSb superlattices with cutoff wavelength ~3.7 μm using interface engineering[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **94**(7):

- 4720-4722.
- [8] Mohseni H, Razeghi M, Brown G J, et al. High-performance InAs/GaSb superlattice photodiodes for the very long wavelength infrared range[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, **78**(15): 2107-2109.
- [9] Hooman Mohseni, Yajun Wei, Manijeh Razeghi, et al. High performance type-II InAs/GaSb superlattice photodiodes[C]//*Proc. of SPIE*, 2001, **4288**: 191-199.
- [10] Mohseni H, Litvinov V I, Razeghi M. Interface-induced suppression of the Auger recombination in type-II InAs/GaSb superlattices[J]. *Physical Review B*, 1998, **58**(23): 378-380.
- [11] Pierre-Yves Delaunay, Binh Minh Nguyen, Darin Hoffman, et al. Background limited performance of long wavelength infrared focal plane arrays fabricated from M-structure InAs/GaSb superlattices[C]//*Proc. of SPIE*, 2009, **7222**: 0W-1-10.
- [12] Khoshakhlagh A, Jaeckel F, Hains C, et al. Background carrier concentration in midwave and longwave InAs/GaSb type II superlattices on GaAs substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**: 051109-1-3.
- [13] Khoshakhlagh A, Rodriguez J B, Plis E, et al. Bias dependent dual band response from InAs/Ga(In)Sb type II strain layer superlattice detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**: 263504-1-3.
- [14] Plis E, Myers S, Khoshakhlagh A, et al. InAs/GaSb strained layer superlattice detectors with nBn design[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, **52**: 335-339.
- [15] Plis E, Myers S, Kuttly M N, et al. Lateral diffusion of minority carriers in InAsSb-based nBn detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**: 123503-1-3.
- [16] Khoshakhlagh A, Myers S, Kim H, et al. Long-Wave InAs/GaSb superlattice detectors based on nBn and Pin designs[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, **46**(6): 959-963.
- [17] Plis E, Rodriguez J B, Balakrishnan G, et al. Mid-infrared InAs/GaSb strained layer superlattice detectors with nBn design grown on a GaAs substrate[J]. *Semiconductor Science Technology*, 2010, **25**: 085010-1-4.
- [18] Kim H S, Plis E, Bishop G D, et al. Mid-IR focal plane array based on type-II InAs/GaSb strain layer superlattice detector with nBn design[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**: 183502-1-3.
- [19] Rogalski A. New Ternary Alloy Systems for Infrared Detectors[C]//*Proc. of SPIE*, 1994, **1845**: 84-92.