

文章编号:1001-5078(2012)01-0045-06

· 红外材料与器件 ·

GaSb 基的 InAs/GaSb II 类超晶格背景载流子浓度的测量

徐志成, 陈建新, 何 力

(中国科学院上海技术物理研究所, 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 高质量的 InAs/GaSb II 类超晶格 (SLs) 材料生长在晶格匹配的 GaSb 衬底上, 由于 GaSb 衬底具有良好的导电性, 传统的霍尔测量难以直接得到外延超晶格材料的载流子浓度等电学参数, 所以, 如何准确地获得 InAs/GaSb 超晶格外延材料中的载流子浓度成为了研究人员关注的焦点之一。主要介绍了 InAs/GaSb II 类超晶格背景载流子浓度测量的四种典型的方法: 低温霍尔技术; 变磁场霍尔技术以及迁移率谱拟合; 衬底去除技术; 电容-电压技术。并给出了各种方法的基本原理, 评价了每种方法的优缺点。

关键词: InAs/GaSb II 类超晶格; 背景载流子浓度; GaSb 衬底; 霍尔测量; 迁移率谱; 去衬底; 电容-电压

中图分类号: TN213 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.01.010

Measurement of the background carrier concentration of type-II InAs/GaSb superlattices based on GaSb

XU Zhi-cheng, CHEN Jian-xin, HE Li

(Key Laboratory of infrared image materials and devices, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: High-quality type-II InAs/GaSb superlattices are on lattice-matched GaSb substrates. However, since there is no commercial semi-insulating GaSb substrate, traditional Hall measurement has difficulty to obtain the carrier concentration of the InAs/GaSb superlattices. Therefore, how to accurately acquire the carrier density of epitaxial SLs is a major task in the material growth optimization. Through years of research, several techniques have been developed to measure the carrier concentration of the thin films grown on conducting substrates. In this paper we review five typical approaches: ① low-temperature Hall technique; ② variable magnetic field Hall technique and mobility spectrum analysis; ③ growing an electrically isolating lattice matched AlGaAsSb buffer layer; ④ the technique of removing the substrate; ⑤ capacitance-voltage measurement. We discuss their basic principles, and comment on their advantages and disadvantages.

Key words: type-II InAs/GaSb superlattice; background carrier concentration; GaSb substrate; Hall measurement; mobility spectrum; removing substrates; capacitance-voltage

1 引 言

自从 InAs/GaSb II 类超晶格概念^[1]提出至今, 由于其独特的能带结构和在红外探测领域巨大的应用价值, 国内外的研究人员对这种新型的红外探测材料投入了越来越多的关注。在 InAs/GaSb II 类超晶格材料 (SLs) 中, InAs 层的导带底端处于 GaSb 层

的价带顶之下, 使得电子限制在 InAs 层中, 而空穴限制在 GaSb 层中, 因此可以通过改变 InAs 层或 GaSb 层的厚度, 实现其探测波长从 3 ~ 30 μm 的变

作者简介: 徐志成, 男, 在读博士, 主要从事红外探测用 II 类超晶格 InAs/GaSb 材料的研究。E-mail: xuzhch@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2011-04-07; 修订日期: 2011-07-18

化,制备中波、长波、甚长波红外探测器^[2-5]。

在过去的十多年中,InAs/GaSb II类超晶格得到了迅速的发展^[6-8],但目前报道的InAs/GaSb II类超晶格探测器性能与其理论预期还有相当大的差距。为了进一步提高InAs/GaSb II类超晶格探测器的水平,仍有许多工作要开展。对于p-i-n型光伏探测器,i层背景载流子浓度对整个红外探测器件的性能有着至关重要的作用,它在很大程度上决定着少数载流子的寿命和扩散长度,进而影响探测器的量子效率以及探测率。因此准确测定InAs/GaSb II类超晶格材料中的背景载流子浓度对发展该类探测技术十分关键,这也是生长材料时必不可少的一个环节。InAs/GaSb超晶格材料一般生长在晶格匹配的GaSb衬底上,然而,当前商用的GaSb衬底都是导电的,用传统的霍尔测量方法对GaSb衬底上生长的InAs/GaSb超晶格材料进行载流子浓度测量时,所测得的电导是InAs/GaSb外延层的电导与GaSb衬底的电导之和,并且GaSb衬底的厚度($\sim 500\text{ }\mu\text{m}$)远远大于外延层超晶格的厚度($1\sim 4\text{ }\mu\text{m}$),所以来自于衬底的电导贡献更大。为了准确地测量出InAs/GaSb超晶格中的背景载流子浓度,必须利用更有效的方法除掉GaSb衬底对测量结果的影响。目前,国际上研究InAs/GaSb超晶格材料中背景载流子浓度的主要方法有:①低温霍尔技术;②变磁场霍尔技术与迁移率谱拟合;③生长电学隔离的AlGaAsSb缓冲层;④衬底去除技术;⑤电容-电压(C-V)技术。本文主要介绍了这五种典型的研究GaSb基InAs/GaSb超晶格材料中背景载流子浓度的方法,以及它们的原理,并分析了每种方法的优缺点。

2 测试方法介绍

2.1 低温霍尔技术

红外探测用材料载流子浓度测量的最直接简单的方法就是恒磁场霍尔测量。图1是霍尔测量用薄膜样品示意图,A,B,C,D分别代表样品表面的四个电极,范德堡证明了^[9]:

$$\exp(-\pi R_{AB,CD}d/\rho) + \exp(-\pi R_{BC,DA}d/\rho) = 1 \quad (1)$$

其中, $R_{AB,CD} = V_{CD}/I_{AB}$; I_{AB} 表示A,B电极之间通过的电流值; V_{CD} 表示A,B之间通过 I_{AB} 电流时,在C,D之间测得的电势差; $R_{BC,DA}$ 有类似的定义; d 和 ρ 分别表示薄膜样品的厚度和电阻率。由公式(1),我

们可以根据实验数据推导出薄膜样品电阻率 ρ 。另外,根据霍尔效应的原理,范德堡推导出了薄膜样品的霍尔迁移率公式^[9]:

$$\mu = \frac{d}{B} \frac{\Delta R_{AB,CD}}{\rho} \quad (2)$$

式中, B 表示垂直于薄膜样品的磁场; $\Delta R_{AB,CD}$ 表示加磁场 B 前后 $R_{AB,CD}$ 的变化量。因此,在恒磁场的条件下,根据公式 $1/\rho = ne\mu$,便可得出载流子浓度 n 。

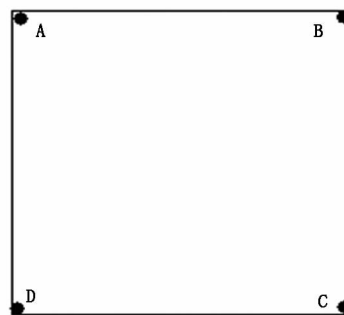
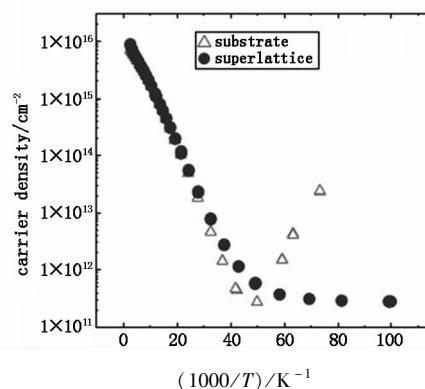
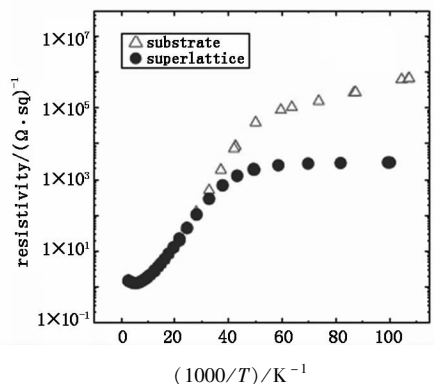


图1 霍尔测量用薄膜样品(A,B,C,D分别表示样品表面的四个电极)

如前所述,因GaSb衬底是导电的,所以常温下测得的结果是外延层与GaSb衬底电导之和,并且来自于衬底的电导贡献更大。但是,在低温时($< 20\text{ K}$),载流子在GaSb衬底中的导电模式发生改变^[10],对霍尔电压的贡献可以忽略,因此低温时,用恒磁场技术可以测量得到超晶格的电学信息。美国空军实验室的Haugan^[10]等研究人员利用此方法测得了GaSb衬底和GaSb基InAs/GaSb超晶格材料的载流子浓度以及面电阻随温度的变化曲线图2(a)、图2(b)。超晶格薄膜材料由110个周期的7 MLInAs/8 MLGaSb构成,总厚度 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。



(a) GaSb衬底(substrate)与GaSb基InAs/GaSb超晶格材料(superlattice)的载流子面密度随温度的变化曲线图



(b) 两者的面电阻随温度的变化曲线

图2 温度的变化曲线图^[10]

从图2(a)中可以看到,当温度小于20 K时,衬底中的载流子浓度随着温度的下降反而上升,此异常变化是GaSb衬底的特点,这是由于在20 K温度以下,衬底的导电模式转变为跳跃电导造成的,这种非带间传输的导电方式对霍尔电压没有贡献,另外,通过图2(b),可以很明显地看出,在20 K温度以下,衬底的面电阻要比超晶格材料的面电阻高两个数量级,因此低温时,GaSb衬底的导电作用可以忽略,所以,10 K时测得的载流子浓度可以看成全部来自于InAs/GaSb超晶格材料。如图2(a)所示,温度为10 K时,研究人员测得了P型的载流子,浓度是 $1.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$,转换为体密度为 $3.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

2.2 变磁场霍尔技术和迁移率谱拟合

对于多层材料或单层材料多载流子体系,存在不止一种的导电载流子,每种载流子的电学性质,如浓度、迁移率等也不尽相同。在变化的磁场环境下,迁移率不同的载流子就会形成不同的导电沟道,此时材料总电导率可以分解为各种载流子的电导率之和。对于单载流子材料,在变磁场下,可以得到材料的电导率张量的横向和纵向分量,分别为^[12]:

$$\sigma_{xx}(H) = en\mu / [1 + (\mu H)^2] \quad (3)$$

$$\sigma_{xy}(H) = en\mu^2 H / [1 + (\mu H)^2] \quad (4)$$

通过转换,可得到多载流子系统的电导率张量的横、纵向分量:

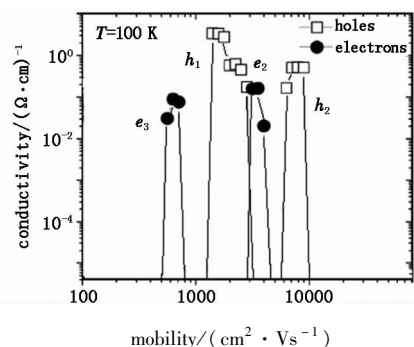
$$\sigma_{xx}(H) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\mu) d\mu}{1 + (\mu H)^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{xy}(H) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\mu H s(\mu) d\mu}{1 + (\mu H)^2} \quad (6)$$

其中, $s(\mu)$ 表示迁移率为 μ 的载流子的电导率组分。所以,首先利用变磁场霍尔技术测得材料电导

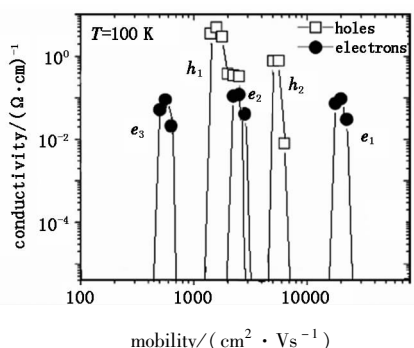
率张量的横向和纵向分量,然后利用迁移率谱^[11]算法,便可以分析出 $S(\mu)$ 随 μ 变化的迁移率谱图,通过迁移率谱图我们可以分析出每种载流子的浓度、迁移率等电学性质。

GaSb基的InAs/GaSb超晶格材料,属于双层的材料系统,T. V. Chandrasekhar Rao和J. Antoszewski^[12]等研究人员正是使用变磁场霍尔技术,通过定量迁移率谱算法^[13]得到了各温度下的迁移率谱,研究人员列出了100 K时GaSb衬底与GaSb基InAs/GaSb超晶格材料的迁移率谱,如图3所示。



(a) 100 K 温度时 GaSb 衬底的迁移率谱

(共有四种载流子,电子 e_2, e_3 ,空穴 h_1, h_2)



(b) 100 K 温度时 GaSb 基 II 型

InAs/GaSb 超晶格样品的迁移率谱

(共有五种载流子,电子 e_1, e_2, e_3 ,空穴 h_1, h_2)

图3 迁移率谱图^[12]

比较以上两图,我们可以很明显地看出图3(b)中载流子 e_1 的出现,显然此n型载流子便是来自于超晶格薄膜中。文章中给出的超晶格由500周期的9 MLInAs/9 MLGaSb构成,总厚度为 $3 \mu\text{m}$,通过简单的计算可以得到100 K温度下电子 e_1 的体密度约为 $2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

2.3 电学隔离层生长

为了抑制来自与GaSb衬底的平行电导,德国的L. Bürkle^[14]等研究人员在GaSb衬底与SL之间生长了一层电学绝缘的AlGaAsSb缓冲层,在比较低

的温度下, AlGaAsSb 绝缘层可以有效地抑制衬底导电电荷对测试结果的影响。在 77 K 的测试温度下, 测得的外延超晶格的电导率比来自与衬底的电导率高近 500 倍。

研究人员首先在 p - 型 GaSb 衬底上生长晶格匹配的 AlGaAsSb 缓冲绝缘层, 然后再生长 150 周期 10 MLInAs/5 ML Ga_{0.75}In_{0.25}Sb 超晶格外延薄膜。他们利用变磁场霍尔技术得到了外延材料在 70 K 温度下的迁移率谱, 如图 4 所示。从图中可以看到, 在 360 °C 的生长温度下外延得到的材料的迁移率谱中有明显的电子峰, 其迁移率为 15000 cm²/V · s, 通过计算得到载流子浓度为 1.5 × 10¹⁶ cm⁻³, 同理得到 380 °C 生长温度下外延材料的背景载流子浓度为 5.6 × 10¹⁵ cm⁻³。

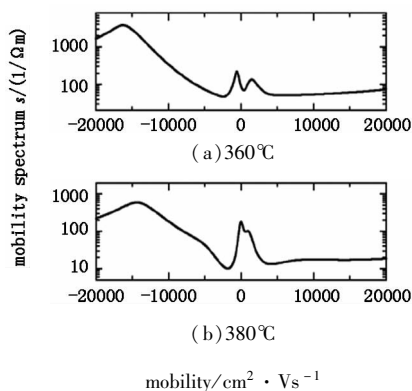


图 4 70 K 测量温度下, InAs/(GaIn)Sb 超晶格材料的迁移率谱

(从图 4(a) 到图 4(b), 生长温度分别为 360 °C 和 380 °C。其中负迁移率对应为电子, 正迁移率对应空穴^[14])

2.4 去衬底技术

由于 GaSb 衬底的导电特性, 为了达到消除 GaSb 衬底中载流子对 InAs/GaSb 超晶格电学测量的影响, 去衬底技术是有效的手段之一。目前, 商业用 GaSb 衬底厚度大概为 500 μm, 外延薄膜厚度为 1 ~ 4 μm, 先采用机械抛磨方法将衬底减薄到 ~100 μm, 再利用化学腐蚀的方法将 GaSb 衬底彻底去除。因为, GaSb 材料与 InAs/GaSb 超晶格材料的腐蚀选择比并不高, 所以, 为了在腐蚀 GaSb 衬底的同时, 保证外延层不受损坏, 必须在 GaSb 衬底与 InAs/GaSb 超晶格外延层之间生长一层刻蚀阻挡层。

法国的 P. Christol^[15] 等科研人员利用了去衬底的方法, 他们选择了 100 nm 厚的 InAsSb 材料作为刻蚀阻挡层, 在去衬底前, 首先把整个材料贴在宝石片上, 图 5 是去衬底的示意图。

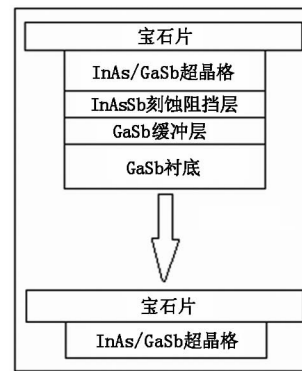


图 5 去衬底示意图

(超晶格 (SL) 外延层由 600 周期的 8 MLInAs/8 MLGaSb 构成, 总厚度 3 μm, 刻蚀阻挡层 (etch stop layer) 材料为 InAsSb (100 nm))

GaSb 衬底去掉以后, 再运用恒磁场霍尔测量方法, 便可以得到 InAs/GaSb 超晶格薄膜材料的载流子浓度, 研究人员给出了载流子浓度随温度的变化曲线, 如图 6 所示。值得注意的是, 随着温度的下降, 在 120 K 时, InAs/GaSb 超晶格中的载流子由 n 型变为了 p 型。100 K 时, 空穴浓度为 2.8 × 10¹⁵ cm⁻³。

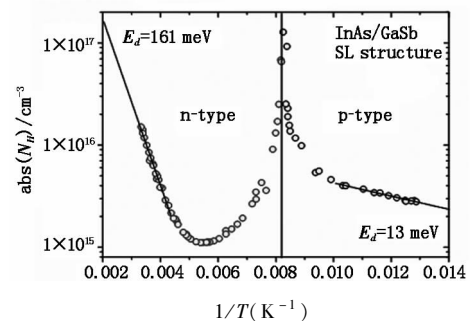


图 6 600 周期 8 MLInAs/8 MLGaSb 超晶格薄膜中载流子浓度随温度的变化曲线

(在 120 K 时, InAs/GaSb 超晶格中的载流子由 n 型变为了 p 型^[15])

2.5 电容 - 电压测量 (C - V 测量)

由 pn 结电容效应可知, 当 pn 结上所加反向偏压变化时, 由于空间电荷区 (耗尽层) 宽度的变化, pn 结的势垒电容也会有所不同。对于 p⁺n 结或 n⁺p 结, 当加反向偏压时, 空间电荷区可以近似认为全部在轻掺杂结一侧, 依此, 可以得到公式^[16]:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_D - V)}{A^2 \epsilon_r \epsilon_0 q N_B} \quad (7)$$

其中, V_D 表示 p⁺n 结或 n⁺p 结的内建电势; N_B 是轻掺杂一侧的杂质浓度。所以, 利用 C - V 测量技术, 根据实验结果做出 $\frac{1}{C^2} - V$ 的关系曲线, 由公式 (7) 可知, 取斜率便可求得轻掺杂一边的杂质浓度 N_B 。

美国西北大学量子器件中心的 Hood^[16] 等研究人员,正是通过 C-V 测量的方法得到了 GaSb 基的 II 型 InAs/GaSb 超晶格单元器件中背景载流子浓度。研究人员设计了 PIN 型的器件结构,未掺杂的吸收区(I 区)厚度 2 μm,80 K 温度时,单元器件的截止波长 4.8 μm。当 PIN 型器件加反向偏压时,空间电荷区近似认为全部在 I 区,通过 C-V 测量,便可以得到未掺杂的 I 区中的背景载流子浓度,图 7 是研究人员得到的 I 区背景载流子浓度随温度的变化曲线图。在温度为 70 K 时,超晶格单元器件吸收区中的背景载流子浓度为 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。

法国的 Cervera^[17] 等研究人员也利用 C-V 测量的技术得到了 InAs/GaSb 超晶格单元器件的背景载流子浓度,未掺杂的吸收区(I 区)由 1 μm 后的 8 MLInAs/8 MLGaSb 周期性构成,器件在 80 K 温度时,截止波长 4.9 μm,测得的背景载流子浓度 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

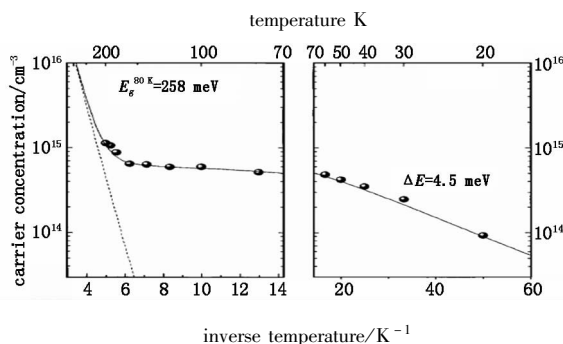


图 7 PIN 结构的 InAs/GaSb 超晶格单元器件的吸收区(I 区)中载流子浓度随温度的变化曲线^[17]

3 实验方法比较

以上介绍过的就是目前测量和分析 GaSb 基的 InAs/GaSb 超晶格材料中背景载流子浓度的几种最典型的方法。前四种方法都是基于本征材料的测量,实质都是霍尔测量技术,C-V 测量的方法则需要单元器件结构。当然,每种方法都有自己的特点。恒磁场霍尔测量操作最简单,然而只有在超低温下(20 K 以下)测得的结果才有意义,所以利用此方法难以得到红外探测器件在工作温度下(76 K)的背景载流子浓度。变磁场霍尔测量以及迁移率谱拟合,可以得到各个温度下的载流子浓度,不过迁移率谱拟合的方法计算复杂,耗时大,对材料的质量要求高。同理,电学隔离层生长的方法,仍然需要借助于迁移率谱拟合。去衬底的方法测到的结果准确性最高,得到的结果更有说服力,为了完整地去掉衬底并且保证外延薄膜不受损伤,就需要在 GaSb 衬底与

外延薄膜之间生长刻蚀阻挡层,更重要的是保证刻蚀阻挡层不会对外延材料的质量产生影响。对于 PIN 型的单元器件结构,C-V 测量是得到背景载流子浓度的有效方法,而且实验过程简单,但是,C-V 测量并不能确定载流子的导电类型。所以,为了得到更加全面而且准确的背景载流子的信息,我们要根据自身的实验条件选择合适的方法,或者将各种方法进行结合。

4 结论

低温霍尔技术,变磁场霍尔测量下的迁移率谱拟合,电学隔离层的生长,去衬底技术,以及 C-V 测量是分析 GaSb 基的 InAs/GaSb 超晶格材料中背景载流子浓度的有效方法,为了全面准确的得到背景载流子信息,我们应根据自身的实验条件选择合适的方法,目前,各实验室测得的 II 型 InAs/GaSb 超晶格背景载流子浓度为 10^{15} cm^{-3} 量级。

参考文献:

- [1] Sai-Halasz G A, R Tsu, L Esaki. A new semiconductor superlattice [J]. Appl. Phys. Lett., 1977, 30 (12): 651 - 653.
- [2] M Ra Zeghi, Y Wei, A Gin, et al. High performance type-II InAs/GaSb superlattices for mid, log, and very long wavelength infrared focal plane arrays [J]. SPIE, 2005, 5783: 86 - 97.
- [3] Cor J Hill, Jian V Li, Jason M Mumolo, et al. MBE grown type-II superlattice photodiodes for MWIR and LWIR imaging applications [J]. SPIE, 2007, 6660: 66600H. 1 - 66600H. 10.
- [4] C Cervera, J B Rodriguez, R Chaghi, et al. Characterization of midwave infrared InAs/GaSb superlattice photodiode [J]. J. Appl. Phys., 2009, 106 (2): 02450. 1 - 024501. 5.
- [5] Binh-Minh Nguyen, Darin Hoffman, Pierre-Yves Delaunay, et al. Very high performance LWIR and VLWIR type-II InAs/GaSb superlattice photodiodes with M-structure barrier [J]. SPIE, 2008, 7082: 708205. 1 - 70820. 12.
- [6] Manijeh Razeghi, Binh-Minh Nguyen, Pierre-Yves Delaunay, et al. High operating temperature MWIR photon detectors based on type-II InAs/GaSb superlattice [J]. SPIE, 2010, 7608: 76081Q. 1 - 76081Q. 10.
- [7] JB Rodriguez, E Plis, S J Lee, et al. Type-II InAs/GaSb strain layer superlattice detectors for higher operating temperatures [J]. SPIE, 2007, 6542: 654208. 1 - 654208. 10.
- [8] Binh-Minh Nguyen, Darin Hoffman, Yajun Wei, et al. Very high quantum efficiency in type-II InAs/GaSb superlattice photodiode with cutoff of 12 μm [J]. Appl. Phys.

- Lett. ,2007,90(23):231108. 1 – 231108. 3.
- [9] L J van der PAUW. A method of measuring specific resistivity and hall effect of discs of arbitrary shape[J]. Philips Res. Repts. ,1958,13(1):1 – 9.
- [10] H J Haugan, S Elhamri, G J Brown, et al. Growth optimization for low residual carriers in undoped midinfrared InAs/GaSb superlattices [J]. J. Appl. Phys. , 2008, 104(7):073111. 1 – 073111. 4.
- [11] W A Beck, J R Anderson. Determination of electrical transport properties using a novel magnetic field-dependent hall technique [J]. J. Appl. Phys. , 1987, 62 (2): 541 – 554.
- [12] T V Chandrasekhar, Rao, J Antoszewski, et al. Quantitative mobility spectrum analysis of carriers in GaSb/InAs/GaSb superlattice[J]. J. Vac. Sci. Technol. , 2008, B, 26 (3):1081 – 1083.
- [13] J Antoszewski, D J Seymour, et al. Magneto-transport characterization using quantitative mobility-spectrum analysis [J]. J. Electron. Mater. ,1995,24(9):1255 – 1262.
- [14] L Bürkle, F Fuchs, J Schmitz, et al. Control of the residual doping of InAs. GaIn. Sb infrared superlattices[J]. Appl. Phys. Lett. ,2000,77(11):1659 – 1661.
- [15] P Christol, C Cervera, R Chaghi, et al. Electronic properties of InAs/GaSb superlattice detectors to evaluate high temperature operation[J]. SPIE, 2010, 7608:76081U. 1 – 76081U. 11.
- [16] A Hood, D Hoffman, Y Wei, et al. Capacitance-voltage investigation of high-purity InAs/GaSb superlattice photodiodes[J]. Appl. Phys. Lett. , 2006, 88 (5):052112. 1 – 052112. 3.
- [17] C Cervera, J B Rodriguez, R Chaghi, et al. Characterization of midwave infrared InAs/GaSb superlattice photodiode [J]. J. Appl. Phys. , 2009, 106 (2): 024501. 1 – 024501. 5.