

一种基于能带工程设计的 CaAsSb/InP 异质结双极晶体管*

刘 唐 崔得良 徐现刚

(山东大学晶体材料国家重点实验室 济南 250100)

摘 要 异质结晶体管(HBT)的性能与其材料体系密不可分,利用能带工程可以大大优化器件的结构,提高器件性能.文章从分析 HBT 的能带结构及设计要求入手,介绍了一种利用能带工程设计的基于 GaAsSb/InP 材料体系的新型 HBT 器件的结构及其性能,分析了该器件与其他材料体系器件相比所具有的优异特性,说明了对 HBT 的各区材料,其带边的相对位置所起的重要作用.最后,文章还报道了近期的实验情况,说明了 GaAsSb/InP 体系 HBT 的实际性能与理论预言一致.

关键词 异质结晶体管,能带工程, GaAsSb/InP

A NOVEL GaAsSb/InP HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTOR BASED ON BANDGAP ENGINEERING

LIU Zhe TANG Zhe CUI De-Liang XU Xian-Gang

(State Key Laboratory of Crystal Material, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract The characteristics of a heterojunction bipolar transistor(HBT) depends closely on the properties of the material system and can be improved greatly by bandgap engineering. A novel HBT system consisting of GaAsSb/InP heterostructures and based on bandgap engineering has much better device characteristics than other material systems. Furthermore, the relative position of the bandedge plays a very important role in each of the HBTs. Recent results show that the actual properties of these GaAsSb/InP HBTs are consistent with the predictions of theoretical analysis.

Key words heterojunction bipolar transistor, bandgap engineering, GaAsSb/InP

1 引言

在美国物理学家 H. Kroemer 于 1957 年首先提出异质结概念之后^[1],异质结双极型晶体管(heterojunction bipolar transistor, HBT)作为半导体器件的重要组成部分,逐渐受到了人们的重视.但在早期,由于受当时半导体异质结材料生长工艺的局限, HBT 的性能还不够理想,在一定程度上限制了它的应用.近年来,随着超晶格理论、低维物理的长足发展和分子束外延、有机金属气相沉积技术日趋成熟,使异质结材料的质量不断提高,新的异质结器件不断出现.在此基础上借助能带工程理论,可以大大优化 HBT 的器件性能,使其在各个领域得到广泛的应用. Kroemer 也因为对 HBT 的重要贡献而获 2000 年诺贝尔

物理学奖.根据他的理论^[2],和同质结晶体管相比,异质结双极晶体管有许多优点:(1)发射效率高;(2)基区电阻小;(3)因为 V_{be} 较小,减小了发射极基边效应;(4)大大提高了频率响应 f_T 和 f_{max} ;(5)HBT 可以采用某些高温性能好的材料,所以工作温度可达 300℃ 以上.

第一代电子材料 Si 的异质结材料体系 GeSi/Si 与 Si 衬底兼容,但是其 HBT 的击穿电压小,高频工作特性不理想,如图 1 所示.第二代电子材料是 III-V 族化合物半导体,因其化合物种类繁多而成为非常重要的异质结材料.早期出现的异质结材料

* 国家自然科学基金(批准号 60025409)资助项目
2001-05-21 收到初稿 2001-07-18 修回

AlGaAs/GaAs的制备工艺比较成熟, HBT的击穿电压比 Si/SiGe 高一些, 但随着截止频率 f_T 的增加, 击穿电压变小, 远不能满足日益发展的光通信的需要. 采用 InP 体系异质结可以克服上述缺点. 从图 1 比较可知, 在较高的 f_T 时, InP 体系的 HBT 仍具有较大的击穿电压. InP 双异质结 HBT 更是其中的佼佼者. 另外, 以 InP 为衬底的材料较 Si, GaAs 衬底有着独特的优点: 首先, InP 与 GaAs 和 Si 相比, 具有高的电子饱和速度, 基于 InP 衬底的晶体三极管是目前速度最快的; 其次, 它还与目前常用的光通信光源器件衬底兼容, 易于实现光电器件集成. 最近美国的 TRW 等公司已在进行基于 InP 衬底的晶体三极管的市场开发. 本文主要介绍一种新型异质结双极型晶体管材料体系 GaAsSb/InP, 报道其器件的优异性能, 并分析其广阔的发展前景.

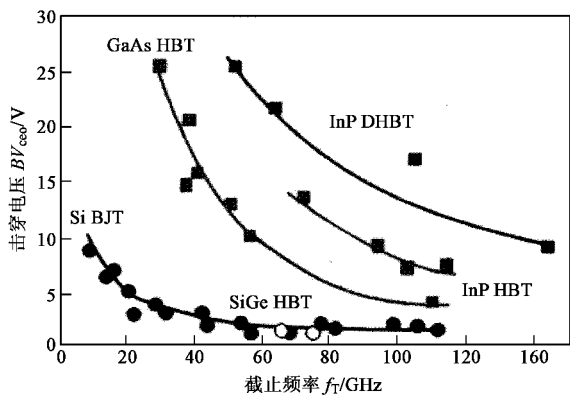


图 1 不同材料体系 HBT 的击穿电压与 f_T 的关系

2 HBT 基本设计要求

GaAsSb/InP 双异质结 HBT 是基于能带工程设计的. 所谓能带工程是指人们可以通过改变半导体异质材料的组分或掺杂分布, 来调制半导体器件的能带结构, 优化器件性能. 为了较清楚地说明 GaAsSb/InP HBT 器件的结构和性能的优越性, 首先要分析 HBT 的设计要求及能带结构.

异质结的能带结构比同质结要复杂得多, 不能简单地归结为结两边费米能级相同即可, 而要考虑许多因素, 诸如: 两材料的电子亲和能、禁带宽度、导电类型、掺杂浓度及界面态密度等. 电子亲和能及禁带宽度的不同决定了形成异质结后, 在界面处两种材料的带边是不连续的. 掺杂浓度、界面电场强度、自建电场决定了耗尽区的宽度, 可由泊松方程具体算出^[3]. 若不考虑界面态的影响, 由以上参数可近似

得到理想的突变异质结能带图. 有了这个能带近似模型, 我们可以进行 HBT 的设计分析了.

首先, 从能带结构角度出发, 考虑导电类型为 N-p-N 型的单异质结晶体管 SHBT (即基区与发射区为异质结, 基区与集电区为同质结), 应采用基区材料为窄禁带, 发射区为宽禁带的结构设计. 这样设计的目的在于: 对于 N-p-N 型 HBT, 发射区材料的禁带比基区宽, 在异质结处, 基区的价带边比发射区价带边高, 空穴从基区向发射区注入要受到价带高势垒的阻碍, 可以有效地防止 p 型基区价带中空穴向发射区扩散, 提高电子发射效率^[2]; 同时可采用重掺杂的薄基区, 降低基区电阻, 在室温工作下, 可以忽略同质结晶体管必须解决的载流子从基区到发射区的回注问题. 而对同质结, 则因为基区空穴的扩散作用, 基区不能掺杂过高.

早期人们只对发射区进行了优化, HBT 的性能有了很大提高, 但是近期的研究表明, 集电区在决定 HBT 的微波特性方面也起很大作用. 若将集电区与基区也设计成异质结结构, 就成了双异质结晶体管 (DHBT). 为了提高击穿电压, 集电区材料禁带应较大. 所以, 从能带结构角度考虑, HBT 的设计要求是: 发射区禁带要宽, 集电区的禁带要宽, 基区的禁带要窄并且厚度要薄. 从掺杂分布来讲, 基区要重掺杂.

其次, 从晶格的完整性来考虑. 异质结界面处晶格的不连续性可导致界面晶格缺陷, 产生界面态, 它不仅会引起复合电流, 而且还会影响异质结的能带结构. 界面态与晶格失配密切相关, 界面悬挂键密度与晶格的失配度成正比. 所以最基本的也是最关键的解决方法是要选择具有相近晶格常数和热膨胀系数的材料, 使界面附近的晶格相对连续完整, 减少缺陷. 对于多元 III-V 族半导体可以通过调整固溶体的成分来改变其晶格常数, 达到异质结晶格匹配的目的^[3]. 图 2 给出了常见的 III-V 族半导体的能隙与晶格常数. GaAs, GaSb, InAs 是三种化合物, 由 GaAs 到 GaSb 以及到 InAs 之间经过的曲线是它们的连续固溶体: $GaAs_xSb_{1-x}$ 和 $Ga_xIn_{1-x}As$, 当其组分 $x \approx 0.5$ 时, 可以与 InP 衬底达到晶格匹配.

3 GaAsSb/InP HBT 体系的研究

结合前面的讨论, 我们已对 HBT 的能带结构及设计有了基本的了解, 下面将介绍 GaAsSb/InP 的基本参数和能带结构.

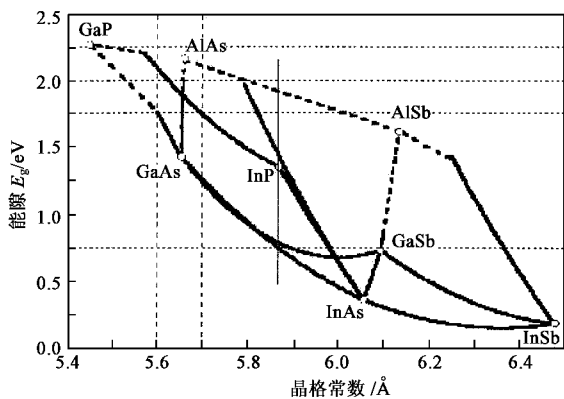


图2 常见半导体材料的能隙与晶格常数的关系

由图2可知,当 $Sb \approx 0.5$ 时GaAsSb与InP晶格匹配.GaAs_{0.5}Sb_{0.5},InP的禁带宽度分别是0.76eV和1.35eV.采用低温光荧光技术,可以测量出它们的详细能带结构,如图3所示^[4].两者带隙相对错开,为II型异质能带结构.GaAsSb/InP能带结构的具体参数是这样的:GaAsSb导带位于InP导带之上180meV,价带高于InP价带736meV.可以做成以GaAsSb为基区、InP为集电区和发射区的双异质结晶体管(DHBT).GaAsSb基区与InP集电区界面不存在电子势垒,以扩散运动传输通过基区的电子在InP集电区有较高的能量,以弹道方式发射(ballistically),高速传输到集电极上^[5],这样可获得较高的截止频率 f_T .同时InP发射区与GaAsSb基区间有0.736eV的价带差别(与其他材料的HBT相比,这是较大的价带差),对基区空穴形成有效的限制,可阻止空穴扩散、隧穿进入发射区,有效地降低了基区至发射区的复合电流,同时使得基区可以进行窄而高掺杂,减少电子渡越基区时间,进一步提高器件的微波特性.

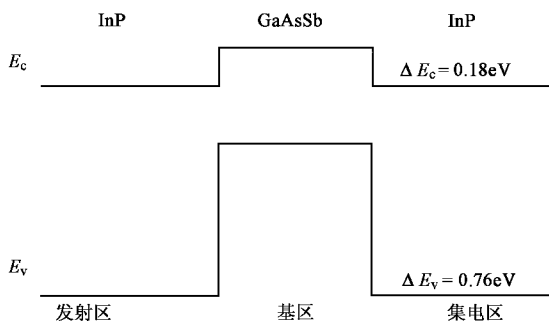


图3 InP/GaAsSb/InP DHBT 能带结构

目前在InP衬底上的HBT一般采用与基晶格匹配的InGaAs为基区.InGaAs/InP异质结构的能带是:InGaAs导带边低于InP的导带边210meV,价带边高

于InP价带边370meV,如图4所示.该结构的集电结存在问题,电子通过基区后,受到InP导带边形成的210meV势垒的阻碍,电子要隧穿过该势垒才能进入InP集电区,这严重地影响了电子的传输速度,器件的微波性能受到影响.它与本文提出的新型材料GaAsSb/InP相比,具有明显的不足.但是在高掺杂时,p型GaAsSb的空穴迁移率大约是GaAs的一半,这可能是由GaAsSb中的分凝与合金散射造成的,它对器件性能产生了一定的影响.

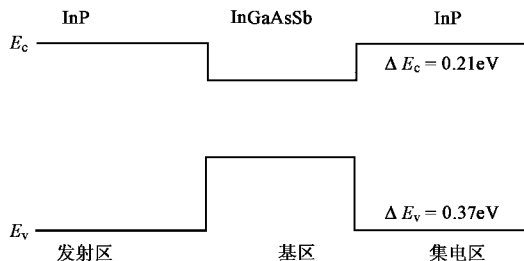


图4 InP/InGaAs/InP DHBT 能带结构

GaAsSb/InP HBT虽然优化了集电结,但当用InP做发射区时,其发射结还存在问题,这是由于InP的导带低于GaAsSb的导带造成的,电子发射受到阻碍.对此问题需要从能带类型入手,GaAsSb/InP是目前为数较少的II型能带结构HBT,同样以InP为衬底的InGaAs/InP是I型能带结构.I型结构的能带特点是两种材料的禁带一个包含另一个.以InP为发射区,InGaAs为基区的HBT不存在上述问题.因此发射结应该采用I型能带结构的异质材料.本文研究的GaAsSb材料为新颖器件的设计提供了另一个自由度,它可与AlInAs/InGaAs/InGaAsP/InP异质体系晶格匹配,从能带图来看,此体系中的AlInAs的异带位于GaAsSb之上,用其当作发射区可以克服上述缺点.因此从能带的角度考虑,最优的HBT结构是:AlInAs(发射区)/GaAsSb(基区)/InP(集电区),如图5所示.

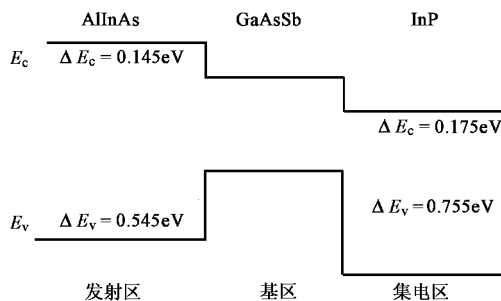


图5 理想的AlInAs/GaAsSb/InP DHBT 的能带结构

上述设计说明,对 HBT 各区材料,不但能隙是其中的关键参数,而且带边的相对位置更起重要的作用,应加以整体考虑.为了进一步验证上述设计思想,采用金金属有机化学气相沉积(MOCVD)制备了基于上述能带工程考虑的 InP/GaAsSb/InP DHBT 器件材料,其结构如表 1 所示.发射区面积为 $80 \times 80 \mu\text{m}^2$ 的 DHBT 的器件实验结果表明,集电极和基极的电流理想因子分别为 1.00 和 1.06,如图 6 所示.这预示着具有高质量的发射极-基极和集电极-基极异质结的性能,与理论预言一致.该器件具有如此好的电流理想因子属于首次报道^[6].发射区面积为 $5 \times 12 \mu\text{m}^2$ 的 DHBT 在 $J_c = 1 \text{A}/\text{cm}^2$ 时,开启电压为 $V_{\text{BE}} = 0.4 \text{V}$,并且其共发射极的集电极电流偏置电压仅为 $V_{\text{CE,OFF}} = 0.015 \text{V}$,这种 DHBTs 的击穿电压可高达 $BV_{\text{CEO}} = 6 \sim 8 \text{V}$.初步的微波测量结果显示,DHBTs 的电流放大增益截止频率(f_T)超过 75GHz,经过优化器件结构和材料质量,HBT 的微波特性可以进一步提高.以上初步结果显示,GaAsSb/InP 异质结是非常有希望的新一代 HBT 材料.

表 1 InP/GaAsSb/InP 异质结晶体三极管的结构

	300nm	InGaAs S	$N : 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$
发射区	150nm	InP S	$N : 3 \times 10^{17} / \text{cm}^3$
基区	40nm	GaAsSb C	$p : 4 \times 10^{19} / \text{cm}^3$
集电区	300nm	InP S	$N : 1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$
	200nm	InGaAs S	$N : 1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$
		InP 衬底	

综上所述,我们由分析 HBT 的能带结构及设计要求入手,利用能带工程分析了新型材料体系

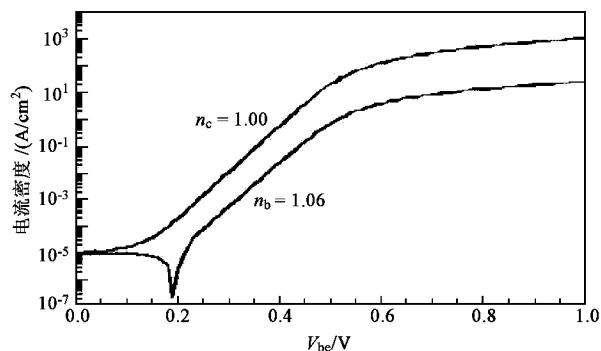


图 6 $80 \times 80 \mu\text{m}^2$ InP/GaAsSb/InP DHBT 的伽马(Gummel)特性

GaAsSb/InP HBT 的结构和特性,指出了该器件同其他材料体系相比所具有的优异特性,进一步分析了其存在的问题并提出了相应的解决方案.上述结果表明,对于 HBT 的设计,不但要考虑材料的能隙大小,而且更重要的是要考虑各部分之间的能带边的相对位置.实验结果表明,GaAsSb/InP 体系 HBT 的实际性能与理论预言一致.该体系的 HBT 非常有希望成为下一代光通信和无线通信的重要元件.

参 考 文 献

- [1] Kroemer H. RCA Review, 1957, 18: 332
- [2] Kroemer H. Proc. IEEE, 1982, 70: 13
- [3] 叶良修. 半导体物理(上册). 北京: 高等教育出版社, 1983. 457—465; Yie L. X. Physics of Semiconductors (part I). Beijing: Higher Education Press, 1983. 457—465 (in Chinese)]
- [4] Hu J, Xu X G *et al.* Appl. Phys. Lett., 1998, 73: 2799
- [5] Xu X G, Hu J *et al.* Appl. Phys. Lett., 1999, 74: 976
- [6] McDermott B T, Gertner E R *et al.* Appl. Phys. Lett., 1996, 68: 1386

· 物理新闻 ·

一 句 话 新 闻

美国贝尔实验室的 C. Gmachl 教授和他的同事们制作了第一台宽带半导体激光器. 现有的激光器都只能发射脉冲光束, 而这台新颖的半导体激光器可以发射连续的红外光线, 波长可延续在 $2 \mu\text{m}$ 范围. 他们准备进一步改进这台装置, 使它能发射可见光线, 从而可使它用于燃气探测、计量学和光通信等方面.

(云中客摘自 Nature 2002, 415: 883)

匈牙利布达佩斯大学以 T. Unger 教授为首的研究组对一些古代作为美容的粉末(保存在法国的卢浮宫内)进行了 X 射线衍射试验, 这些物质主要是硫化铅(方铅矿)和碳化铅(白铅矿)的粉末. 从晶体衍射的结果中, 他们发现早在 4000 年前, 古埃及已经掌握了对晶体的粉碎、筛选、混合锻烧和退化的工艺, 因而也揭示了古埃及在整容和防腐方面的许多制作技艺.

(云中客摘自 J. Appl. Phys., 2002, 91: 2455)