

·光电器件与材料·

II类超晶格甚长波红外探测器的发展

王忆锋,余连杰,钱明

(昆明物理研究所,云南 昆明 650223)

摘要:由III-V族半导体材料InAs/GaSb或InAs/Ga_{1-x}In_xSb构成的II类超晶格(T2SL)光电探测器近年来在理论结构设计及试验器件实现方面进展显著。带隙工程和能带结构工程使得T2SL比碲镉汞材料具有某些优势,特别是很小的窄带隙方面。这些特有的性质,例如较大的有效电子质量、重空穴带和轻空穴带之间的较大间距可以抑制俄歇复合,使其成为一种很有吸收力的甚长波红外(VLWIR)探测器材料。通过归纳和分析近年来刊发的有关文献资料,介绍了T2SL/VLWIR探测器发展中的有关问题,例如基本概念、结构、性能优化、数值建模、电学性能等。

关键词:II类超晶格;红外探测器;甚长波红外

中图分类号:TN362

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)02-0045-08

Development of Type-II Superlattices for Very Long Wavelength Infrared Detector

WANG Yi-feng, YU Lian-jie, QIAN Ming

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Type II superlattice (T2SL) photodetectors, which is composed of III-V semiconductor materials InAs/GaSb or InAs/Ga_{1-x}In_xSb, have experienced significant improvements in both theoretical structure design and experimental device realization in the past few years. The bandgap engineering and band structure engineering provides T2SL with some advantages over mercury cadmium telluride materials, particularly for very narrow band gaps. These inherent properties, such as a higher effective electron mass and large separation of the heavy and light-hole bands to suppress Auger recombination, make them an attractive material for very long wavelength infrared (VLWIR) detectors. By summarizing and analyzing of related papers published in recent years, an overview on issues in the development of T2SL/VLWIR detectors is provided, such as basic concepts, structure, performance optimization, numerical modeling, electronic properties and etc.

Key words: type II superlattices; infrared detectors; very long wavelength infrared(VLWIR)

红外波段大致可以分为短波红外(SWIR, 1~3 μm)、中波红外(MWIR, 3~5 μm)、长波红外(LWIR, 8~12 μm)、甚长波红外(VLWIR, 12~25 μm)和远红外(FIR, 25~1 000 μm)。VLWIR探测器对于空间红外系统的研发具有关键作用^[1]。碲镉汞(MCT)是目前的主流红外探测器^[2]。理论计算表

明,基于III-V族半导体材料的II类超晶格(type-II superlattice, 以下简记为T2SL)在VLWIR波段的性能要优于MCT和硅(Si)探测器^[3],并且是仅有的一种理论性能优于MCT的红外材料^[4]。通过对近年来部分文献的归纳分析,介绍了近年来T2SL/VLWIR探测器的研究进展。

收稿日期:2011-01-07

作者简介:王忆锋(1963-),男,湖南零陵人,工学士,高级工程师,曾赴美国内布拉斯加大学林肯分校计算机系做国家公派访问学者,目前主要从事器件仿真研究。

1 窄带隙概念

根据半导体理论,半导体材料的截止波长 λ_c 与禁带宽(厚)度或带隙 E_g (eV)之间的关系为

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g} \quad (\mu\text{m}) \quad (1)$$

其中, $E_g=E_c-E_v$, E_c 为导带底; E_v 为价带顶。根据式(1)算出的部分结果如表1所示。文献中关于窄禁带的定义不尽相同。文中简单地将表1所示各红外波段对应的半导体称为窄禁带半导体。

表1 部分红外波段截止波长 λ_c (μm)与半导体材料带隙 E_g (eV)的关系

$\lambda/\mu\text{m}$	1	3	5	8
E_g/eV	1.24	0.413 3	0.248 0	0.155 0
$\lambda/\mu\text{m}$	12	14	25	30
E_g/eV	0.103 3	0.088 6	0.049 6	0.041 3

对于窄禁带半导体制成的红外探测器来说,其光生载流子的产生机理是带间吸收激发跃迁引起的本征光电导,如图1所示。超晶格文献中多用meV量纲。从表1可以看出,必须选择可使能量小于90 meV的光子产生光跃迁^[5]的窄禁带材料,才有可能实现VLWIR探测。III-V族半导体InAs、GaSb和AlSb的带隙分别是0.41 eV、0.8 eV和1.70 eV^[6],均大于VLWIR探测所要求的带隙;但是它们的合成材料可能具有窄带隙,这类合成材料就是超晶格。

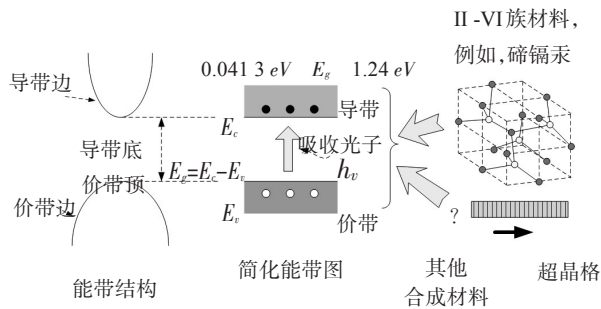


图1 本征半导体红外探测器材料必须满足窄带隙的要求

2 超晶格概念

根据固体物理理论,原子通过原子间的相互作用力结合成固体;其中原子规则排列的固体称为晶体。如果不考虑原子的影响,把晶体中各原子用一个几何点来代替,就得到一个与晶体几何性质相同的点的集合,该集合即称为晶格。有些晶体之间原子规则排列的形式相同,只是原子间的距离不同,

则称之为具有相同的晶格结构。据此定义,因为InAs、GaSb和AlSb均为闪锌矿结构,应可认为它们的晶格结构相同。晶体中最小的周期性单元称为原胞,原胞的边长称为晶格常数。一般将组成材料的晶格常数失配度小于0.5%的搭配称为晶格匹配,失配度大于0.5%时则为晶格失配。InAs、GaSb和AlSb的晶格常数分别为6.058 3 Å、6.095 93 Å和6.135 5 Å^[7],因此又被称为6.1 Å系材料,它们具有晶格匹配较好的特点。例如,InAs/GaSb的晶格失配约为0.6%,虽然略大于晶格匹配要求的失配度大小,但仍然可以视为晶格匹配的2种材料^[8]。

超晶格是由2种不同的半导体材料以很薄的厚度(通常只有晶格常数的几倍到几十倍)交替生长而构成的一种人造周期性结构,但整个结构仍然保持自然晶格的连续性;换言之,超晶格是逐层堆砌原子而成的半导体材料,故从操控手段上说,需要分子束外延(MBE)等高精尖设备^[4]。超晶格的厚度以原子层来计算,文献中常以单层(monolayer, ML)来表示;考虑到不同物质原子大小的不同,可以看出ML是一个相对量。

组成超晶格的2种材料一般应具有相近的能带结构和晶格常数。III-V族半导体InAs、GaSb和AlSb即满足这一要求。

3 调节能带形成势阱

不同的半导体材料具有不同的势能或位势。通常把势能分区均匀的位势称为方形位势。利用方形位势可以构造粒子的势阱,如图2所示。电子势阱和空穴势阱是超晶格理论中要用到的2个重要概念。文中以另外一种叙述方式介绍势阱的形成机制。

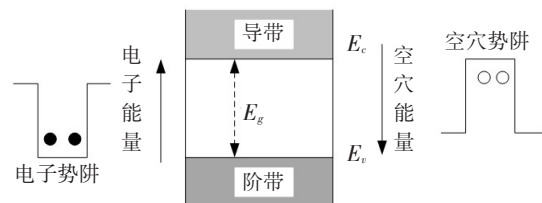


图2 电子势阱和空穴势阱

设想将图3a所示的能带结构以BAB...的周期形式切割为若干等份段,A段和B段的长度分别为a和b。固定B段对应的能带,分别移动A段对应的导带和价带,移动后构成的结构可以有多种形式。例如在图3b

中,将线段 LM 向下平移到 $L'M'$,将线段 RS 向下平移到 $R'S'$,于是原来连续的能带被打断。如果A段的长度 a 小于电子的平均自由程(约100 nm),则 $LL'M'M$ 为电子势阱;类似地,如果B段的长度 b 小于空穴的平均自由程,则 $S'STT'$ 为空穴势阱,这样的体系称为II类体系(type-II system)^[9]。

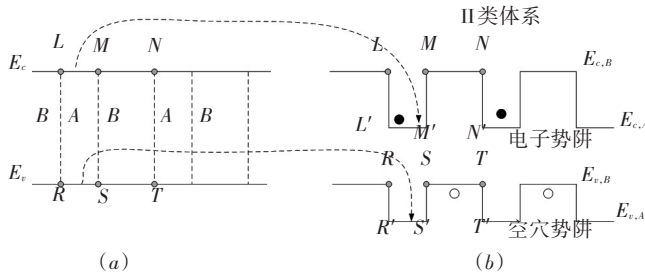


图3 通过能带调节形成电子势阱和空穴势阱

4 从带隙工程看InAs/GaSb/T2SL

由两种不同的半导体材料构成的II类体系即称为II类超晶格(T2SL)。从另外一种角度来说,两种不同的半导体材料其接触面构成异质结(heterojunction);多个异质结形成的体系称为异质结构(heterosturcture)^[9],如图4a所示。

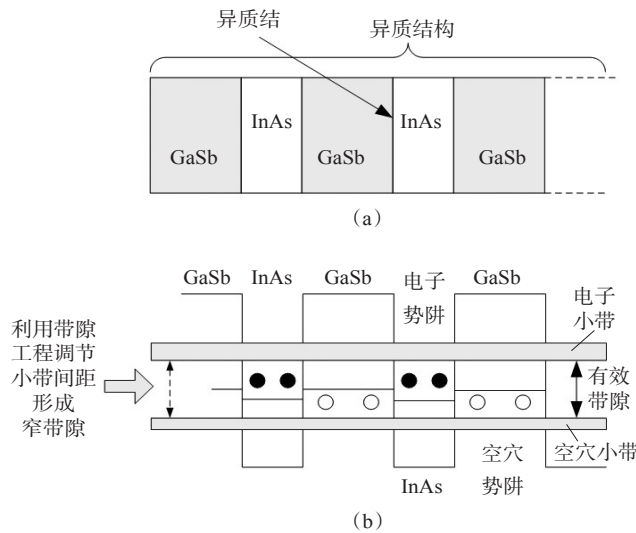


图4 InAs/GaSb/T2SL能带结构,利用带隙工程调节电子小带与空穴小带之间的距离形成特定红外探测波段所要求的窄带隙

T2SL通常由两种III-V族半导体材料构成,其中常见的组合之一是InAs/GaSb,如图4a所示,其中InAs层是电子势阱,GaSb层是空穴势阱。T2SL单

层厚度的典型值约为10 ML^[10],这样的厚度导致各势阱中的粒子由于隧道共振效应隧穿势垒,波函数互相耦合,势阱中分立的粒子能级形成具有一定宽度的小带(miniband),如图4b所示。英语文献中miniband和subband(子带)两个术语有时会同时出现,例如文献之第581页上有一小节标题:“Miniband transport intersubband multiple quantum well detectors”。汉语文献中有将miniband译作“微带”的,也有译作“子带”、“子能带”的。注意到英语中有3个与大小相关的前缀,一个是macro-(宏);另一个是mini-(小),如mini-computer(小型计算机);还有一个是micro-(微)。据此,文中将miniband译作“小带”。小带的典型宽度超过100 meV^[10]。文献[6]将“电子小带”和“空穴小带”分别称为“有效导带(effective conduction band)”和“有效价带(effective valance band)”。

T2SL的电子小带与空穴小带之间的距离称为有效带隙^[11](以下不加区别地简称为带隙)。通过调节半导体材料层的厚度,可以使InAs/GaSb/T2SL的带隙在40~400 meV(3~30 μm)之间变化^[6, 12],这就是带隙工程(bandgap engineering)^[4, 8, 13]的概念。带隙对于InAs层厚度变化最为敏感^[14~17]。用于VLWIR的InAs层厚度较大(典型地为10~20 ML)^[6]。当InAs层变厚时,T2SL的电子小带降低、带隙减小^[8]。例如,如果GaSb层厚固定在10 ML,当InAs的厚度为8 ML时,带隙约为250 meV;InAs的厚度为16 ML时,带隙约为100 meV。文献[15, 17~20]报道了几种工作温度为10 K、截止波长在15~25.8 μm 的VLWIR光电二极管,其中多数基于InAs/GaSb/T2SL。文献[17, 20]报道的InAs/GaSb光电二极管,GaSb层厚度为40 \AA ,通过改变InAs层厚度来调节带隙。对于54 \AA 的InAs层厚度,带隙为73 meV;对于66 \AA 的InAs层厚度,带隙为50 meV,对应的截止波长分别为16 μm 和22 μm ^[14]。

InAs/GaSb/T2SL中,电子和空穴在空间上是分离的,因此光学吸收在空间上是间接的,此类跃迁的光学矩阵元相对较小^[21]。光学吸收需要电子波函数和空穴波函数的显著重叠。窄带隙的实现需要薄层厚度较大,从而使波函数重叠降低,吸收系数减小。具有足够厚度的高质量T2SL结构是这一技术成功的关键^[4]。此外,随着超晶格周期的

增加,波函数的重叠强烈减少^[21],这一点不利于VLWIR应用。

5 从能带结构工程看 InAs/GaInSb/T2SL

由上述可见,InAs/GaSb/T2SL通过控制薄层厚度来调节带隙。而红外探测器材料要同时满足窄带隙和大光学吸收系数的要求。在GaSb层中掺入In可以改善吸收系数^[14],由此形成了另一种常用的T2SL材料体系InAs/Ga_{1-x}In_xSb(x 为In组分,以下简称GaInSb)。

当异质结中的晶格失配达到一定程度,就会产生应变。InAs/GaInSb即属于这种情况。In的引入将增加GaInSb薄层中的晶格常数,由于各层材料中阳离子和阴离子的变化,InAs/GaInSb界面处的晶格失配有约7%^[22],从而引起层间应变,使价带分裂成重空穴小带和轻空穴小带,如图5所示,并且重空穴态成为价带的基态。InAs中的双轴张力使电子小带降低,而GaInSb中的双轴压力使重空穴小带上升^[14]。因此,对于固定的薄层厚度来说,应变使T2SL带隙减小^[14]。或者反之,增加In组分来降低达到给定带隙所需要的薄层厚度,由此增加红外吸收的光学矩阵元^[14],这样通过使用2个独立的变量即组分 x 和薄层厚度,设计空间扩大到可以同时调节带隙和光学吸收系数^[8],并且可以在VLWIR波段获得较大的光学吸收系数^[23]。对于一个给定的截止波长,可能的最大吸收系数出现在两个薄层厚度不相等的时候^[14]。提高吸收系数的另一种方法是在(111)晶向的GaSb衬底上生长T2SL;标准的方法是使用(100)晶向;但是由于(111)晶向较难实现高质量的MBE生长,故少受关注^[14]。

另一方面,如果将重空穴小带与轻空穴小带之间的距离拉开到一定程度,可以抑制俄歇复合,提高载流子寿命^[14],这就是能带结构工程^[6,14](band structure engineering)的概念。但是这些较长的载流子寿命尚待实现^[14]。此外,虽然可以通过调节超晶格的小带间距减少俄歇复合率,但是俄歇过程不能完全消除^[13]。在 n 型超晶格中,可以通过增加GaInSb厚度、使最低导带变平,限制可供俄歇跃迁的相空间来抑制俄歇复合率。但是,这种效果远不如在价带中调节能带结构好^[8]。重空穴小带与轻空穴小带之间必须有足够的间距以抑制俄歇效应^[24]。

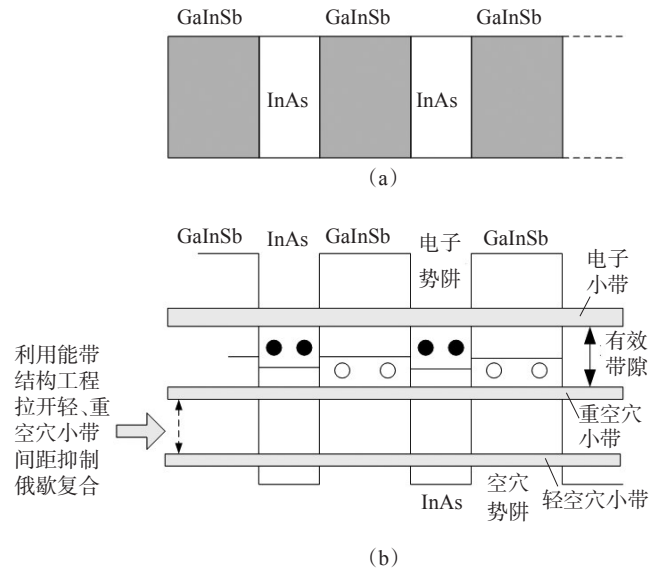


图5 InAs/GaInSb/T2SL能带结构,利用能带结构工程调节重空穴小带与轻空穴小带之间的距离抑制俄歇复合

由于应变平衡上的困难,Ga_{1-x}In_xSb中In的组分 x 一般不超过30%^[14]。严格的界面控制是保持应变平衡的关键^[4]。Ga_{1-x}In_xSb/T2SL对于组分 x 变化不太敏感。例如,对于按照 $x=0.25$ 、 $E_g=62$ meV($\lambda_c=20$ μm)设计的T2SL,若 λ_c 改变2 μm ,需要合金变化3%^[14,15]。对于按照 $\lambda_c=20$ μm 设计的InAs/Ga_{0.75}In_{0.25}Sb/T2SL,InAs层的单层起伏将使截止波长产生 ± 3 μm 的变化^[14]。计算表明^[15],对于InAs(42 \AA)/Ga_{0.77}In_{0.23}Sb(20 \AA)/T2SL,1 ML的厚度(~ 3 \AA)变化可以导致截止波长发生1 μm 的移动;而组分1%的变化可以导致截止波长发生大于0.5 μm 的移动。MBE具有将厚度及组分均匀性控制在1%以内的能力^[14],这意味着将截止波长的均匀性控制在0.1 μm 量级是可以实现的^[15]。文献中没有看到截止波长 λ_c 与薄层厚度和组分 x 两者同时相关的函数表达式。

应变导入的能带分裂沿着生长轴引起较大的能量色散,故InAs/InGaSb可以获得较大的有效电子质量^[8,25],这一点有助于降低带间隧穿暗电流^[4,8]。较大的有效电子质量加上重空穴与轻空穴的分离,可使T2SL在低背景下以较高的工作温度实现BLIP^[4],或者比同样性能的MCT器件具有较高工作温度^[14]。对于同样的截止波长,理论计算表明,T2SL的工作温度要比LWIR/MCT高30 K,比

MWIR/MCT 高 10 K^[4]。另外随着温度的增加, T2SL 带隙往低能端移动, 当温度高于 80 K 时, 移动速率是 0.2 meV/K; 当温度低于 80 K 时, 移动速率更慢^[14]。

6 关于优化设计

电子能带结构决定着半导体的电学、光学性质。就半导体材料设计而言, 关键是如何巧妙、有效地控制电子能带结构, 这一点同样适用于 T2SL 的优化设计^[14]。由于材料参数选项及受其影响的性能参数较多, 故在材料设计中有较大自由度。例如, 通过改变各薄层厚度, 超晶格的构造形式理论上可有数千种之多^[26], 优化设计就是要从中选出满足器件性能要求的参数组合^[14, 27]。在此过程中, 理论建模具有关键作用^[14], 需要数值模型来为超晶格材料的设计提供本质上的指导^[15]。

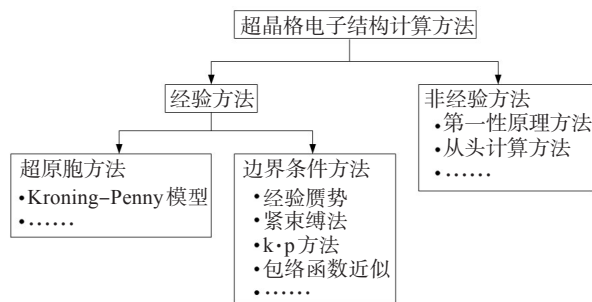


图6 超晶格电子结构计算方法的分类

超晶格电子态的计算要比一般体材料的计算复杂得多, 主要原因是由于它在生长方向上的周期有几个或几十个原子层, 所涉及的原子数远多于体材料。各种计算方法可以分为两大类, 即经验方法和非经验方法, 如图6所示。非经验方法包括第一性原理 (first principle)^[28]、从头计算 (ab initio)^[14] 等, 其基本思想是: 将多原子构成的体系理解为电子和原子核组成的多粒子系统, 并根据量子力学的基本原理最大限度地对问题进行“非经验性”处理。基于详细原子排列的超晶格电子结构的非经验方法尚不实用^[14]。各种经验方法包括 $k \cdot p$ 模型^[13, 14, 29, 30]、经验紧束缚模型 (ETBM)^[7, 19, 22, 26, 31]、赝势模型、包络函数近似 (envelope function approximation, EFA)^[27, 32-34]、转移矩阵法^[30] 等。

Kronig-Penney 模型^[35]精度较低, 基本上是一个工程模型, 它可以看成是一种简单的 $k \cdot p$ 方法, 可以作为一个快捷工具去指导超晶格材料生长和器件制备^[29]。

超晶格电子结构理论又被称为“带边理论”, 这是因为人们最感兴趣的超晶格状态主要是能量位于带边的电子态。在研究半导体体材料时, $k \cdot p$ 方法用于描述导带边和价带边附近的状况特别有效, 因此, 人们很自然地将这一理论引入 T2SL 带边状态的研究, 在此基础上形成了超晶格 $k \cdot p$ 方法, 用于解释 T2SL 的光电性质, 特别是在俄歇复合及载流子寿命方面。 $k \cdot p$ 哈密顿算子中包括的能带数量从简单的 4 能带模型一直到 14 能带模型^[14]。对于在布里渊区中心导带与价带之间跃迁能量的准确预测来说, 可用简单的 4 能带模型^[14]。对于超晶格完整的光学响应计算来说, 需要掌握整个布里渊区的电子结构。在这种情况下, 需要 8 能带甚至更多能带的模型^[14]。有限元方法也被用于 8 能带 $k \cdot p$ 计算以预测吸收谱及能带结构^[36]。界面效应和扩散也被引入 8 能带和 14 能带模型^[37, 38]。虽然 $k \cdot p$ 模型典型地用于准确决定超晶格中的小带束缚能量, 但是它是较为耗时的一项工作^[29]。

与其他方法相比, ETBM 可以计算整个布里渊区的能带结构, 准确描述构成超晶格的各原子层的性状, 研究超晶格界面组分的影响^[39]。ETBM 不需要大量复杂的数值计算^[6], 计算值与实验值吻合得相当好^[39, 40]。

EFA 是一种较为流行的计算超晶格电子结构方法, 其计算量独立于体系中的原子数量^[14]。EFA 可与 $k \cdot p$ 方法结合使用。利用该模型计算得到的设计参数去制备超晶格, 测试数据表明, 该模型在预测 VLWIR 超晶格的带隙和光学吸收谱方面非常成功^[33, 34]。

正如固体能带的计算一样, 超晶格能带的计算也没有一种“绝对”的方法, 需要根据具体情况选择合适的模型进行计算。但不管选用何种理论方法, 均希望计算结果准确性较高^[14]。总体上来看, 各种模型的计算均呈现不同程度的复杂性。可用商用软件包^[28, 29]或自编软件。能否使超晶格能带计算较为简单易行是一个值得探讨的问题。

7 关于 T2SL 器件

T2SL 能带结构和光学吸收系数确定后,即可利用常规的光伏或光导结构来设计 T2SL 探测器。易于制备构成大面阵 FPA 器件是 T2SL 的一个显著优点,故实际研究较多的是用 T2SL 制做光伏器件。

FPA 的质量主要依赖于 2 个参数^[41],一个是量子效率,另一个是暗电流;前者应尽量高,后者应尽量小。理论预测 T2SL 量子效率可与 MCT 相比。但起初量子效率的实际值只能做到 25% 左右^[4]。增加吸收区中的超晶格周期数,可将量子效率提高到 75%^[42]。加入抗反射膜应可以将量子效率提高到 90% 以上^[41]。在保持较高量子效率的同时使探测器串音最小,这一点对于中心间距较小的器件特别重要^[8]。高质量的 III-V 族材料可实现 1~2 Å 的晶片表面粗糙度^[4]。双晶摇摆曲线的半峰宽(full width at half maximum, FWHM)是描述晶体质量的一个重要参数。厚度大于 6 μm 的 T2SL 结构,其 FWHM 约值为 25 arc-sec,量子效率高 于 75%^[4,43]。

当移向较大的截止波长时,T2SL 器件的量子效率可以或多或少地保持同一水平,但是由于热致电流呈指数形式的增加,R0A 可以降低几个数量级,因此对于 VLWIR 器件来说,R0A 的优化变得更为重要。暗电流大将使 R0A 变小。较低的 R0A 值将使 FPA 的暗电流噪声较高,还使得与现有的大多数读出电路难以做到阻抗匹配^[4]。基于三元 GaInSb 层或 AlSb 层,可以引入更复杂的超晶格结构形式如 M 结构^[5,8,26]、W 结构^[29,44]等。例如通过引入适当的 M 结构,可以调节电子小带和空穴小带的相对位置,降低 pn 结电场,使暗电流减小一个数量级^[42]。

光伏器件的核心是 pn 结,其制备同时需要 p 型材料和 n 型材料。使用 III-V 族材料超晶格制备光电二极管的一个优点是在器件的 p 型层和 n 型层中的受主掺杂和施主掺杂相对容易^[14]。晶体掺入杂质后,杂质原子可能占据正常的晶格格点,这种情况称为替位杂质。对于 III-V 族材料的外延生长来说,可供选用、并且性状良好的替位杂质较多^[8]。Si、GaTe 以及 Be(铍)等可用于 p 型和 n 型掺杂^[11]。在 InAs 层掺 Si、GaSb 层掺 Be,较易实现 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的掺杂浓度^[14]。较高的有意掺杂产生的隧穿^[4,45]

是 T2SL 主要的噪声源之一,故高度期望降低背景非有意掺杂^[8]。基于 InAs/GaInSb/T2SL 材料,可以制备多种形式的 p-i-n 光电二极管^[17~19]。文献^[29]介绍了 T2SL/LWIR/VLWIR 双色器件。

8 结束语

虽然 T2SL 在 VLWIR 波段具有一些独特优势,但是由于该类器件主要是基于空间平台的特种应用,没有多少商业市场^[14],故比较之下,VLWIR/T2SL 的研发进展不如 MWIR/T2SL 显著,文中所列文献中所见多为 VLWIR 器件单项性能的测试结果^[3,5,13,14,19,22,24,26,27,29,31,32,44,46],少有整机系统应用的报道。

调节带隙及能带结构是 T2SL/VLWIR 器件设计和优化的主要思路。T2SL 本质上是少数载流子主导的本征半导体材料^[8]。目前,超晶格材料的少数载流子寿命仍然是一个谜^[4],需要对少数载流子寿命有更深入的理解,并且掌握提高少数载流子寿命的方法^[4]。在超晶格材料生长、器件设计与建模、器件工艺等方面需要进一步改进,以使 T2SL 器件达到理论预测值^[47]。需要进一步降低暗电流噪声,具体来说,以 R0A 表示的暗电流噪声应再降低 2 个数量级^[8]。

与 T2SL 相关的另一个问题是表面漏电流。因为这是一种窄带隙材料,故它对于表面态非常敏感。表面漏电流主要由电子隧穿引起,当器件的带隙移向较大波长时,表面漏电流呈指数增加^[14]。除了表面漏电流的抑制外,将超晶格单元光电二极管转化为可实用器件的一个最重要的前提条件是有效钝化^[10],适宜于量产的钝化层必须耐受在整个生产及装配流程中的各种处理。应用于空间环境中的 VLIR/FPA 还需要解决抗辐射的问题^[8]。

另注:限于篇幅,本文所用参考文献未尽列出,特此说明。

参考文献

- [1] M Z Tidrow, W R Dyer. Infrared sensors for ballistic missile defense [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, 42 (3/5):333-336.
- [2] 王忆锋,唐利斌. 第三代碲镉汞器件的研发进展[J]. *光电技术应用*, 2009, 24(5): 17-22.

- [3] H Mohseni, A Tahraoui, J Wojkowski, et al. Very long wavelength infrared type-II detectors operating at 80 K [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(11):1572–1574.
- [4] Meimei Z Tidrow. Type II strained layer superlattice: A potential future IR solution[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, 52(6):322–325.
- [5] Darin Hoffman, Binh-Minh Nguyen, Edward Kwei-wei Huang, et al. The effect of doping the M-barrier in very long-wave type-II InAs/GaSb heterodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(3):031107(3页).
- [6] Manijeh Razeghi, Binh-Minh Nguyen. Band gap tunability of Type II Antimonide-based superlattices[J]. *Physics Procedia*, 2010, (3):1207–1212.
- [7] Vaidya Nathan, Manijeh Razeghi. Type II Superlattice Infrared Detectors and Focal Plane Arrays[C]//SPIE, 2007, 6542:654209(11页).
- [8] L Zheng, M Z Tidrow, A Novello, et al. Type II Strained Layer Superlattice: A Potential Infrared Sensor Material for Space[C]//SPIE, 2008, 6900:69000F(10页).
- [9] Paul Harrison. Quantum wells, wires and dots—Theoretical and computational physics of semiconductor nanostructure (second edition) [M]. England: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [10] F Fuchs, L Burkle, R Hamid, et al. Optoelectronic properties of photodiodes for the mid- and far-infrared based on the InAs/GaSb/AlSb materials family[C]//SPIE, 2001, 4288:171–182.
- [11] Robert Rehm, Martin Walther, Johannes Schmitz, et al. InAs/GaSb superlattice focal plane arrays for high-resolution thermal imaging[C]// SPIE, 2005, 5957:595707.
- [12] Y Wei, M Razeghi. Modeling of type-II InAs/GaSb superlattices using an empirical tight binding method and interface engineering[J]. *Physical Review B*, 2004, 69(8):085316(7页).
- [13] M Razeghi, H Mohseni, G J Brown. Type-II Binary Superlattices for Infrared Detector[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2001, 39(12):S257–S263.
- [14] Gail J Brown. Type-II InAs/GaInSb Superlattices for Infrared Detection: an Overview[C]//SPIE, 2005, 5783:65–77.
- [15] K A Anselm, H Ren, M Viela, et al. Long-wavelength infrared InAs/InGaSb type-II superlattice photovoltaic detectors[C]// SPIE, 2001, 4288:183–190.
- [16] H J Haugan, F Szmulowicz, G J Brown, et al. Band gap tuning of InAs/GaSb type-II superlattices for mid-infrared detection[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 96(5):2580–2585.
- [17] H Mohseni, Y Wei, Razeghi. High-performance type-II InAs/GaSb superlattice photodiodes[C]//SPIE, 2001, 4288:191–199.
- [18] Y Wei, A Gin, M Razeghi, et al. Advanced InAs/GaSb superlattice photovoltaic detectors for very long wavelength infrared applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(18): 3262–3264.
- [19] Y Wei, A Gin, M Razeghi, et al. Type II InAs/GaSb superlattice photovoltaic detectors with cutoff wavelength approaching 32 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(19):3675–3677.
- [20] H Mohseni, M Razeghi, G J Brown, et al. High-performance InAs/GaSb superlattice photodiodes for the very long wavelength infrared range[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(15): 2107–2109.
- [21] Mohamed Henini, Manijeh Razeghi. Handbook of infrared detection technologies[M]. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd., 2002.
- [22] M Razeghi, Y Wei, A Gin, et al. High performance Type II InAs/GaSb superlattices for mid, long, and very long wavelength infrared focal plane arrays[C]//SPIE, 2005, 5783:86–97.
- [23] Cory J Hill, Alexander Soibel, Sam A Keo, et al. Demonstration of large format mid-wavelength infrared focal plane arrays based on superlattice and BIRD detector structures[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, 52(6):348–352.
- [24] V Nathan, A Anselm, C H Lin, et al. InAs/InGaSb Type2 Strained Layer Superlattice IR Detectors[C]//SPIE, 2002, 4650:185–198.
- [25] E Aifer, E Jackson, B Bennett, et al. Suppression of bulk defects in antimonide superlattice infrared photodiodes[C]//Material Research Society Symposium Proceedings, 2002, 722: K10.1.1–12.
- [26] Binh-Minh Nguyen, Darin Hoffman, Pierre-Yves De launay, et al. Very high performance LWIR and VLWIR Type-II InAs/GaSb superlattice photodiodes with M-structure barrier[C]//SPIE, 2008, 7082:708205(12页).
- [27] Gail J Brown, Frank Szmulowicz. InAs/InGaSb superlattices for very long wavelength infrared detection[C]//SPIE, 2001, 4288:200–208.
- [28] Seong-gon Kim, Sungho Kim, Jun Shen, et al. Interface Structures of III – V Semiconductor Heterostructures[J]. *International Journal of Quantum Chemistry*, 2003, 95: 561–571.
- [29] Leye Aina, Harry Hier, Ayub Fathimulla, et al. High

- detectivity dilute nitride strained layer superlattice detectors for LWIR and VLWIR applications[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, 52:310-316.
- [30] Seung-Hwan Kim, Sheng S Li. Theoretical investigation of InAs/GaInSb type-II superlattice. infrared detectors for longwavelength and very longwavelength infrared applications[J]. *Physica E*, 2003 (16):199-208.
- [31] M Razeghi, Y Wei, A Hood, et al. Type II Superlattice Photodetectors for MWIR to VLWIR Focal Plane Arrays[C]//SPIE, 2006, 6206:62060N(7页).
- [32] G J Brown, F Szmulowicz, K Mahalingam, et al. Recent Advances in InAs/GaSb Superlattices for Very Long Wavelength Infrared Detection[C]//SPIE, 2003, 4999:457-466.
- [33] K A Anselm, H Ren, M Viela, et al. Long-wavelength infrared InAs/InGaSb type-II superlattice photovoltaic detectors [C]//SPIE, 2001, 4288:183-190.
- [34] C-H Lin, A Anselm, C -H. Kuo, et al. Type-II InAs/InGaSb SL photodetectors [C]//SPIE, 2000, 3948:133-144.
- [35] 王忆锋, 唐利斌. Kronig-Penney能带模型的MATLAB分析与计算[J]. *激光与红外*, 2010, 40(7): 770-774.
- [36] E H Aifer, E M Jackson, G Boishin, et al. Very-long wave ternary antimonide superlattice photodiode with 21 μm cutoff [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(25): 4411-4413.
- [37] F Szmulowicz, H Haugan, G J Brown. Effect of interfaces and the spin-orbit band on the band gaps of InAs/GaSb superlattices beyond the standard envelope-function approximation [J]. *Physical Review B*, 2004, 69(15):155321(17页).
- [38] W H Lau, M E Flatté. Effect of interface structure on the optical properties of InAs/GaSb laser active regions [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(10):1683-1685.
- [39] Y Wei, M Razeghi. Modeling of type-II InAs/GaSb superlattices using an empirical tight-binding method and interface engineering[J]. *Physical Review B*, 2004, 69(8): 085316(7页).
- [40] Y Wei, M Razeghi, G J Brown, et al. Modeling type-II InAs/GaSb superlattices using empirical tight-binding method: new aspects [C]//SPIE, 2004, 5359:301-308.
- [41] Manijeh Razeghi. Nanostructured Sensors[J]. *SPIE Professional*, 2008(7):(3页).
- [42] Pierre-Yves Delaunay, Binh-Minh Nguyen, Darin Hoffman, et al. Substrate removal for high quantum efficiency back side illuminated type-II InAs/GaSb photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(23): 231106(3页).
- [43] P Y Delaunay, M Razeghi. High-performance focal-plane array based on type-II InAs/GaSb superlattice heterostructures [C]//SPIE, 2008, 6900: 69000M(10页).
- [44] E H Aifer, J G Tischler, J H Warner, et al. Dual band LWIR/VLWIR type-II superlattice photodiodes [C]//SPIE, 2005, 5783:112-122.
- [45] D Hoffman, B M Nguyen, P Y Delaunay, et al. Beryllium compensation doping of InAs/GaSb infrared superlattice photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(14):143507(3页).
- [46] Andrew Hood, Manijeh Razeghi, Edward H Aifer, et al. On the performance and surface passivation of type II InAs/GaSb superlattice photodiodes for the very-long-wavelength infrared[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(15):151113(3页).
- [47] Jagmohan Bajaj, Gerry Sullivan, Don Lee. Comparison of Type-II Superlattice and HgCdTe Infrared Detector Technologies[C]//SPIE, 2007, 6542:654209(11页).

(上接第44页)

- [3] 端木琼, 刘常杰. 基于FPGA的高分辨率时间數位转换器设计[J]. *现代科学仪器*, 2008(5):33-35.
- [4] 姚萍萍, 赵欣, 张毅, 等. 激光测高仪中基于现场可编程门阵列的高精度飞行时间测量[J]. *中国激光*, 2008, 35(5):752-755.
- [5] 王海, 周渭, 刘畅生, 等. 一种新的短时间间隔测量方法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(2):267-271.
- [6] 张廷华, 樊桂花, 孙华燕. 基于FPGA的高精度时间间隔测量方法研究与实现[J]. *光学技术*, 2006, 32(s): 452-454.
- [7] 冯国旭, 常保成. 高精度激光测距技术研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(11):1137-1140.
- [8] 童世华, 付蔚. 谈ASIC、FPGA/CPLD的区别与发展[J]. *重庆职业技术学院学报*, 2007, 16(6):146-149.