

量子点红外探测器研究进展

雷亚贵¹, 于进², 张平雷¹, 张冬燕¹, 王戎瑞¹

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015; 2. 国防科工局审核中心, 北京 100037)

摘要:量子点红外光电探测器(QDIP)凭借自身的优点,未来很有可能与碲镉汞(HgCdTe)红外探测器、量子阱红外光电探测器(QWIP)和非制冷微测辐射热计相竞争。目前,普遍采用自组织方法生长量子点,研究主要集中在:①隧道量子点红外探测器(T-QDIP);②量子阱中量子点(DWELL)红外探测器;③Si基QDIP;④Ge QDIP。本文阐述正在研究的几种QDIP,并对下一代传感器用QDIP进行预测。

关键词:量子点红外光电探测器;隧道量子点红外探测器;量子阱中量子点;Ge QDIP

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Development of quantumdot infrared photodetector

LEI Ya-gui¹, YU Jin², ZHANG Ping-lei¹, ZHANG Dong-yan¹, WANG Rong-rui¹

(1. North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China;

2. Evaluation Center of SASTIND, Beijing 100037, China)

Abstract:Quantumdot infrared photodetector(QDIP) will probably compete with HgCdTe, QWIP and uncooled microbolometer in the future because of its itself merits. Currently, QDs are grown by self-organized method. The study is focused on ①tunneling QDIP(T-QDIP);②quantum dots-in-a-well(DWELL)IP;③Si-based QDIP;④Ge QDIP. Several kinds of QDIP being developed are introduced and the QDIP used for the next-generation sensors are forecasted in this paper.

Key words:QDIP;T-QDIP;DWELL;Ge QDIP

1 引言

量子点红外光电探测器是近十几年发展起来的一种新型红外探测器,目前正处于研究当中^[1-3]。它是在半导体超晶格、量子阱基础上发展起来的,属于低维限制系统,物理特性与原子极为相似,被称为“人造原子”,是当前研究的新热点。

在量子点微观结构中,由于受到三个维度的束缚,电子能量在三个维度上都是量子化的,并且随着量子点尺寸的减小,其分裂的能级间距也会变大。通过控制量子点几何形状和尺寸可改变其电子态结构,实现对量子点器件的电学和光学性质的“剪裁”^[4-5]。

目前红外系统多采用HgCdTe、InSb、QWIP以及VOx非制冷红外探测器,它们也存在一些不尽人意

的地方:碲镉汞、InSb红外探测器虽然有高的探测灵敏度,但必须在低温制冷的条件下工作;量子阱红外探测器不能吸收正入射的红外辐射光,因而效率低;非制冷红外探测器的优点是不需要制冷器,可在室温下工作,但是就目前的水平而言,其探测率还处于较低的状况,还有未解决的问题,只能应用于中低端红外系统中。量子点红外探测器克服了量子阱红外探测器的缺点,具有可有效吸收垂直入射的红外光提高探测器性能、可能实现室温工作而不需要制冷器等优点。目前的研究中,QDIP工作波段主要是

作者简介:雷亚贵(1970-),女,高级工程师,从事科技信息管理工作。E-mail:lyg5145@sina.com

收稿日期:2009-08-12

中波红外和远红外,由于其自身具有的优点,未来将与 HgCdTe, QWIP 和非制冷微测辐射热计等探测器展开竞争。

目前普遍采用自组织镉(镓)砷/镓(铝)砷((In(Ga)As/Ga(Al)As)作为量子点探红外探测器的有源层,已制成了 640×512 元焦平面阵列,而且用于了热成像。近几年,研究主要集中在:

(1)采用了新型结构即双势垒谐振隧道滤波器的 T-QDIP,以进一步降低暗电流。实验表明,在 300 K 时, QDIP 的暗电流低达 1 A/cm^2 。

(2)研究采用量子阱中量子点(DWELL)红外探测器结构, DWELL 设计特点是把 InAs 量子点有源区埋置在 InGaAs 量子阱中。 DWELL 探测器在中波红外、长波红外和甚长波红外可以偏压可调谐并且可多色工作。美国喷气推进实验室(JPL)已研制成 LWIR 640×512 元 DWELL QDIP FPA,其中在半绝缘 GaAs 衬底上生长 30 叠层 InAs/InGaAs LWIR DWELL QDIP 材料。这种 DWELL 采用反射光栅改进探测器灵敏度,像元间距为 $25 \mu\text{m}$,有效像元尺寸为 $23 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$ 。采用标准的钢柱倒装焊与 640×512 元 CMOS 读出集成电路(ROIC)进行混合集成。该 FPA 已经显示出极好的图像质量,其像元合格率大于 99%。在工作温度 60 K 和偏压 -350 mV 下,测得 FPA 的 NETD 为 40 mK,其中背景温度为 300 K,采用 $f/2$ 光学装置,这与理论预计的 NETD 为 25 mK 十分接近。

(3)研究 Si 基 QDIP,这样可以用完全成熟的 Si 超大规模集成技术把光学和电子器件集成在 Si 基底上,这是降低成本普遍采用的途径。

(4)利用 Ge QD 制作 QDIP 也取得重大的进展,其中有中波红外 p-i-p Ge QDIP、中红外和远红外 n-i-n Ge QDIP 以及近红外($1.31 \sim 1.55 \mu\text{m}$) p-i-n Ge QDIP。这些探测器是为不同应用目的而设计的,而且在不同程度上都获得了相关器件性能,显示出 QDIP 的特性,但从总体上说, Ge QDIP 器件技术远不如 InAs/GaAs QDIP 成熟。

本文重点说明当前国际上研究的量子点红外探测器所采用的技术以及发展趋势。

2 国外量子点红外探测器的研究进展^[6-7]

2.1 n-i-n InAs QDIP

n-i-n InAs QDIP 采用不是故意掺杂的有源区,利用不同的量子点盖层材料(GaAs, InGaAs, Al-

GaAs)调谐工作波长,并改进 QDIP 性能。已演示中波红外($3 \sim 5 \mu\text{m}$)和长波红外($8 \sim 12 \mu\text{m}$)波段垂直入射工作,具有高的探测率,还演示了多色工作的潜在能力。

n-i-n QDIP 的特点:一是加偏压时,电子注入就增强,在光照下,主要对光电流有贡献,因此暗电流保持极低;二是采用低温($< 350 \text{ }^\circ\text{C}$)徙动增强外延(MEE)技术,而不是高温($\sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$)MBE 技术,生长 QD 盖层。QD 生长所用材料是在半绝缘 GaAs(001)衬底上原位淀积二元 InAs。所用的生长技术是固体源 MBE。为了产生不同类型 QDIP 结构,每一种类型都要加四种不同盖层材料中的一种,即 GaAs, AlGaAs, InGaAs 和 InGaAlAs。通过势垒层化学组分和基底-小岛-盖层失配来感应三维应力分布,调节三维量子约束势,控制 QD 最可能的尺寸和处理 QD 电子结构的盖层材料。这样就能进而设计 QDIP 的工作波长和其他性能。

(1)带有 GaAs 阻挡层的 QDIP

在这类 QDIP 中,所用的吸收区由 5 层的点状小岛生长的 InAs QD 组成,并盖有 GaAs 层。根据光致发光激励(PLE)、光致发光(PL)和傅里叶变换红外(FTIR)光谱测量,光电响应峰值波长出现在 $7.2 \mu\text{m}$ ($\sim 174 \text{ meV}$)、峰值波长光谱宽度(FWHM)为 $\sim 0.99 \mu\text{m}$,因此 $\Delta\lambda/\lambda = 14\%$ 。对波长 $7.2 \mu\text{m}$ 响应包括了从基束缚态到较高束缚态的带内跃迁。用室温黑体测量了器件的响应率,在 77 K 温度下 0 V 偏压时为 1.3 mA/W ,而 0.7 V 偏压时为 4.11 A/W ,约增加了 3 个数量级。随着偏压和温度的增加,暗电流明显增加。对于偏压 $< 0.7 \text{ V}$ 和温度 $T > 100 \text{ K}$ 情况,暗电流随温度指数地增加,因此认为在这温度范围内,暗电流起源于热离子发射。在温度低于 100 K 时,相继的谐振隧穿和声子辅助隧穿是暗电流的主要分量。

可以利用响应率和噪声测量,计算探测率 D^* 。在温度 77 K 和 0.1 V 偏压下,获得了最好的性能,其中峰值探测率是 $1.4 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$,相应的响应率为 12 mA/W ,背景限(BLIP)温度是 60 K。随着温度增加到 100 K 时,在 0.1 V 偏压下的峰值探测率降低到 $1 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$,这是由于响应率下降和噪声电流增加所致。

(2)带有 AlGaAs 阻挡层的 QDIP

利用 GaAs 阻挡层的 QDIP 暗电流较大,其原因

是:GaAs 中不均匀掺杂分布和本底杂质,和/或 QD 之间空间“漏电”。业已证明,有效利用阻挡层的 AlGaAs 层可以降低暗电流和提高 D^* 。在 InAs/GaAs QD 层一边上加单层 AlGaAs 阻挡层做成 QDIP。还有 InAs QD 之间引入一层薄的 AlGaAs 势垒层做成 QDIP。这种阻挡层填充量子点之间的空间,而留 QD 顶部不覆盖。这里所用的方法是,把 AlGaAs 约束层用在 QD 层之下和 GaAs 盖层顶上。这样立刻使 GaAs 盖层有效地转向 InAs 小岛四周,进入量子阱,因此 InAs 小岛就是量子阱中的量子点。

与 GaAs 阻挡层 QDIP 相比,AlGaAs 阻挡层的光谱响应曲线向短波偏移,对所有光电响应峰值都出现在 $6.2 \mu\text{m}$,而 GaAs 阻挡层的峰值波长大于 $7 \mu\text{m}$ 。但是,AlGaAs 阻挡层 QDIP 的 BLIP 温度增加到 110 K ,而 GaAs 阻挡层 QDIP 为 60 K 。测得 AlGaAs 阻挡层 QDIP 噪声电流要比不用 AlGaAs 阻挡层的 QDIP 低得多。在温度 77 K 和偏压 -0.7 V 下获得了最好的性能,其中峰值探测率是 $10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$,而相应的响应率为 $14 \text{ mA}/\text{W}$ 。随着温度增加到 300 K ,在 0.5 V 偏压下,峰值探测率也随之降到 $1.1 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

(3) 采用 InGaAs 阻挡层和应变减缓层的 QDIP

采用 InGaAs 阻挡层可使工作波长延伸至 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 大气窗延伸。在这里采用了后者的方法。在 GaAs 盖层中加 In,通过下列两个效应改变 QD 约束势:①In 的化学效应降低了能带边,因此能带不连续性限制了约束势;②InAs 小岛材料和 InGaAs 盖层之间伴随着晶格失配的减小,减小了应变,因此降低了能带边不连续性。应变减轻效应允许生长更多的自组装量子点(SAQD)层,而仍然使缺陷密度保持可接受的程度。

例如 2ML InAs/InGaAs $\times 10$ QDIP 的暗电流、峰值响应率和噪声电流密度测量表明,在温度 78 K 和偏压 -2.2 V 下获得最高探测率为 $2 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

(4) 双色 QDIP

在这里首先引入一种大的 InAs QD 概念。其中,在 $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度下以 $0.054 \text{ ML}/\text{s}$ 较慢生长速度淀积 2.5 ML InAs 并加盖层 $30 \text{ ML In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$,接着淀积 170 ML GaAs 填充层,从而构成大的 QD,对其构成的 QDIP 称之为 2.5 ML QDIP 。由 2.5 ML

InAs/InGaAs QD $\times 5$ 制成 QDIP,与 InAs/GaAs QDIP 相比,在 n-i-n 结相似情况下,其 80 K 温度时的暗电流约低 100 倍,其主要原因是采用了较厚的填充层。

2.2 高温隧道 InAs 量子点红外探测器 (T-QDIP)^[8]

与 QWIP 不同,QDIP 中自组织 In(Ga)As/GaAs 量子点的态密度对电子和空穴基态和激发态用展宽 δ -函数表示。即使低能态的态密度是分立的,但在高能量时,它趋向于变成类三维连续态。因此,在温度 150 K 以上时,激发态电子占据是主要的。这样在上述一般 n-i-n QDIP 设计中面临的重大问题。在目前许多变异质结结构设计中,都是为了降低暗电流,但也降低了光电流和响应率。

为了进一步降低暗电流,而且更重要的是暗电流要从光电流中分离出来,最近已研制出一种新型 QDIP 异质结构,其中在吸收区采用了双势垒谐振隧道滤波器加入到每个量子点层中。当能量与峰值探测波长一致时,电子隧穿概率增加,而当能量偏离最佳值时,隧穿概率明显减小。因此,对暗电流有贡献的载流子输运在高温下具有宽的能量分布,而在这时被阻止,从而会降低暗电流。业已证明,T-QDIP 是一种十分通用的器件,可以用在若干感兴趣的波段内高温焦平面阵列中。

为了与普通 QDIP 比较,T-QDIP 采用的每个 QD 周期总厚度是相同的,所以有源区在加相同偏压下其电场是基本相同的,并从理论上计算了两种器件暗电流密度在 150 K 和 200 K 温度下与偏压的关系。与普通 QDIP 相比,预计 T-QDIP 暗电流可降低 2 个数量级。计算的 T-QDIP 暗电流密度起伏是由于量子谐振隧穿造成的,但在实际器件中,多谐振双势垒通过散射可平滑暗电流起伏。

(1) 中波红外和远红外 T-QDIP

从理论分析表明,双势垒隧道异质结构可以大幅度降低 QDIP 中暗电流。在最后设计中,QD 隧道势垒另一边加上一层 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 势垒,就能产生一个量子阱。并且认为从量子点光激发电子产生准束缚最后态。把这些态设计与双势垒异质结构中隧道态谐振,而且改变 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 势垒离量子点层的距离,可以调节量子阱内态的能量位置,因此提供了吸收峰值波长的可调性。

T-QDIP 异质结构是用 MBE 在 (001) 半绝缘

GaAs 衬底上生长的,并用标准三步光刻、湿式蚀刻和接触金属化工艺,制作垂直 n-i-n 台面型 QDIP。对器件的暗电流测量表明,在 +1 V 偏压下, J_{dark} 在温度 80 K, 160 K 和 300 K 下分别为 1.61×10^{-8} , 1.01×10^{-3} 和 1.55 A/cm^2 。对于 QDIP 来说,这些值极低。

(2) 太赫兹波 T-QDIP

对于探测太赫兹辐射,量子点中的约束态和量子阱中准束缚态之间的能量间隔只得小于 10 meV。为此,在器件有源区生长了 $\text{In}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}/\text{GaAs}$, 代替普通的 InAs 量子点。例如采用 MBE 在 GaAs(001) 衬底上生长的太赫兹 T-QDIP 完整异质结构。

把制成的器件置于对于 10 ~ 80 μm 波长透明窗的氩杜瓦,进行器件性能测量。在 1 V 偏压下,测得器件的暗电流密度在温度 4.2 K, 80 K 和 150 K 下分别为 4.77×10^{-8} , 2.03×10^{-2} 和 4.09 A/cm^2 。这些值与其他太赫兹探测器相比是极低的,而且是处于双势垒隧道异质结构存在所致。在温度 4.6 K 和偏压 1 V 下测得峰值响应率为 0.4 A/W, 峰值波长为 50 μm 附近,这与计算的 QD 束缚态和量子阱内准束缚态之间能量差 24.6 meV (50.4 μm) 一致,截止波长为 ~75 μm , 相当于 ~4.0 THz。在 1 V 偏压下,测得峰值 D^* 在 4.6 K 和 80 K 下分别为 $1.64 \times 10^8 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 和 $4.98 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

2.3 InAs 量子点红外焦平面阵列^[9]

在过去 10 年中已对自组织量子点带间跃迁红外探测器进行了广泛研究,而最近两年中,世界上至少有 4 个研究小组分别演示了 QD 焦平面阵列。尽管量子带间 QDIP 取得了进展,但从目前 QDIP 中尚未得到所需要的光谱响应。在这里介绍以量子阱中量子点 (DWELL) 结构中子带间跃迁为基础的 QDIP。DWELL 探测器代表了普通 QWIP 和最近 QDIP 之间的优点集成。DWELL 结构除了暗电流低之外,还能更好地控制工作波长和跃迁性质。最近,美国喷气推进实验室已利用 DWELL 结构做出了世界第一台 640 × 512 元热像仪。

(1) 量子阱中量子点红外探测器

目前有两种类型 DWELL 结构。第一种是埋在 InGaAs 衬底中的 InAs 量子点并由 GaAs 势垒包围,称之为 InGaAs DWELL。第二种是埋在 GaAs 衬底中 InAs(或 InGaAs)量子点并由 AlGaAs 势垒包围,称之为 AlGaAs DWELL。第二种结构的优点是异质

结构中唯一应变是由 InAs QD 产生的,因此可以生长更多数量的 DWELL 堆。目前,由新墨西哥大学 (UNM) 生长的 InGaAs DWELL 包括 15 堆 DWELL 异质结构,它在两层 n^+ 掺杂 GaAs 接触层之间;由 JPL 生长的 AlGaAs DWELL 包括 30 堆 DWELL 异质结构。采用标准接触光刻、等离子刻蚀和金属化工艺制成单元台面型 n-i-n DWELL 探测器。并测量了单元 InGaAs DWELL 探测器光谱响应特性,把底部 InGaAs 量子阱宽度从 1 nm 改变到 6 nm,探测器的工作波长就从 7.2 μm 改变到 11 μm 。用标准黑体测量表明,15 堆 DWELL 探测器 D^* 在 77 K 温度下为 $7 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。也观察 DWELL 探测器多色响应。这些探测器具有 MWIR (3 ~ 6 μm)、LWIR (8 ~ 11 μm) 和 VLWIR (~25 μm) 的光电响应。其中,10 μm 波长处峰值 (124 meV < ΔE_c) 可能是量子点中束缚态至量子阱中束缚态的跃迁;在 5 μm 波长附近峰值 (250 meV > ΔE_c) 可能是从一个量子点中的束缚态到接近量子阱顶的准束缚态跃迁,以波长 25 μm 为中心的 VLWIR 峰值可能是量子点中两个态之间的跃迁,因为计算的量子点能级之间能量间隔是 50 ~ 60 meV (20 ~ 25 μm)。

(2) DWELL FPA 的发展

曾利用 30 堆 InAs/GaAs QD 有源区的 256 × 256 元 MWIR FPA,获得了 135 K 温度下烙铁的图像,因此可以预计这种技术有希望用来开发高温工作的 FPA。一年之后,采用 30 堆 InAs/GaAs/Al-GaAs DWELL 异质结构研制成 640 × 512 元 LWIR ($\lambda \sim 8 \mu\text{m}$) 热像仪。在 60 K 温度下获得高质量图像,而 NETD 为 40 mK。而后,利用异质结构中不同量子约束跃迁的 DWELL FPA 也实现了双色成像,即在 MWIR ($\lambda \sim 4.5 \mu\text{m}$) 和 LWIR ($\lambda \sim 8.5 \mu\text{m}$) 获得双色成像,而且可以进行搭配,改变偏压可以改变 MWIR 和 LWIR 产生的电子比。QDIP 快速进展在很大程度上是由于它建立在 QWIP 产业发展起来的成熟 GaAs 技术基础上。

JPL 研制了 640 × 512 元 LWIR DWELL QDIP FPA,在 3 in 半绝缘 GaAs 衬底上用 MBE 生长 30 堆 InAs/InGaAs LWIR DWELL QDIP 材料,并加工成 640 × 512 元 FPA。采用反射光栅改进探测灵敏度。这种 FPA 像元间距是 25 μm ,有效像元面积为 23 $\mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$ 。一个 3 in GaAs 片子可加工成 12 个 FPA。选用了 7 个 FPA 与 640 × 512 元直接注入

CMOS 读出集成电路(ROIC)进行混合集成,其像元合格率达 99%,说明这种 GaAs 基技术具有很好的产品合格率。在 60 K 温度下和 -350 mV 偏压下,测得 FPA 的 NETD 为 40 mK,其中背景温度为 300 K,并采用 $f/2$ 光学装置,多路传输器的读出噪声是 $500 e^-$ 。实验测得 FPA 的吸收量子效率是 5.0%,比没有光栅耦合探测器相比增加 1.8 倍。

2.4 Ge/Si 自组织量子点红外探测器^[10]

自组织 Ge 量子点是在 Si 衬底上生长而成,因此有可能用现今的 Si 基工艺进行单片集成。目前,已制作成长波远红外(8 ~ 12 μm) p-i-p 和 n-i-n Ge QDIP 以及 1.3 ~ 1.55 μm 光通信用 p-i-n QDIP。业已证明,Ge QD 具有电致发光特性。因此,Ge QD 材料有望用于长波红外(8 ~ 12 μm)探测器和光纤通信用光电子器件。

(1) Ge 量子点材料制备

用 MBE 和 CVD 生长 Ge 自组装量子点(SAQD),是获得纯 Ge 淀积而不存在高位错密度的有希望的方法。通常采用 SK 生长方式在 Si 上生长 SAQD,并在 Si 上制作新型器件。然而,SK SAQD 长期存在 QD 尺寸和位置难以控制的问题,最近几年为此采用许多新的方法解决上述问题。通常的选择性生长技术即用加图案辅助生长 QD(PAQD)就能获得尺寸均匀和位置可控的 QD。另外,还根据 QD 的垂直相关性生长出多层量子点(MLQD)。

(2) 中波红外 p-i-p Ge QDIP

近 10 年来,中波红外 Ge QDIP 制作取得重大的进展,例如在双面抛光 Si(100)晶片上制作的中波红外光电二极管结构,其中掺硼浓度为 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$,有源区被埋在两层 $P^+ \text{Si}$ 层之间(200 nm),而每个边上有 100 nm 的 Si 本征间隔层。有源区包括 20 周期的掺硼 Ge QD 层,并由 20 或 50 nm Si 势垒隔离。对 Ge 各层采用不同的掺杂浓度,从 $0.6 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 至 $6 \times 10^{18}/\text{cm}^3$,标称 Ge 淀积厚度是 15 nm。用标准光刻工艺加工成尺寸为 $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ 和 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 的台面。

(3) 中波红外和远红外 n-i-n Ge QDIP

对于高响应率应用,具有 n 型有源区的光电探测器更有利,因为 p 型器件通常具有很短的载流子寿命,这是由于在 Si 和 Ge 中有效质量大和价带结构复杂。由于在 Si(100)衬底上生长的 Ge QD 中存在非消逝对角线外质量张量,n 型探测器可以进行

垂直入射探测。另外,在 QDIP 中由于量子约束,可以增加载流子寿命。

用固体源 MBE 在 n 型 Si(100)衬底上生长出符合器件结构要求的 n-i-n Ge QDIP,并用标准工艺加工成为 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 台面型二极管。

(4) 近红外(1.31 ~ 1.55 μm) p-i-n Ge QDIP

p-i-n Ge QDIP 结构取其 II 类配准能带结构中带间跃迁的优点,而且与现代 Si 工艺完全兼容。通过适当控制生长参数,使 Ge QD 适应于 1.31 ~ 1.55 μm 光通信应用。

业已表明,在 Si(001)衬底上加纳米图案选择性生长 Ge PAQD,其横向尺寸小至 30 nm、高度约为 5 nm,密度可高达 $10^{11}/\text{cm}^2$,而且利用自组装双模共聚物方法获得纳米级图案,这样很有希望实现有序化生长 Ge QD。已成功地研制出中波红外(2.4 ~ 4.8 μm) p-i-p Ge QDIP、中波红外至远红外的 n-i-p Ge QDIP 和光通信用(1.31 ~ 1.55 μm) p-i-n Ge QDIP。目前,Ge/Si QDIP 研究的规模和器件性能以及成熟程度远不如 InAs/GaAs QDIP,但由于 Ge 和 Si 工艺的成熟程度和实现单片集成的优点吸引更多的研究人员参与开发,今后会得到迅速发展。

3 对下一代传感器用的 QDIP FPA 预测

QDIP 技术发展很快,面临着主要技术问题如何变成成熟的商业化技术。当前 QDIP 技术要考虑两个方向:

第一种市场是低成本、大批量和中等性能(较低速度和合理的信噪比)热像仪,它们是民用如救火、工业监控、安全监视等需要的,而且也是军用如单兵热像仪、瞄准具、无人值守监视系统等需要的。这个市场目前主要由微测辐射热计占领,因为它们室温下具有极好的成像质量,但是帧速较低。为了满足这种应用的需求,QDIP 工作温度能增加到 200 ~ 250 K 范围内,就能用低成本热电制冷器代替昂贵的斯特林机械制冷器,因此就能大幅度减小成像系统的尺寸和成本。低成本和快速光探测器相结合,这对于热探测器在低成本市场可能是一个直接竞争者。目前,QDIP 的最近进展,可使背景限温度高达 200 K,因此有望成为低成本研究方向;

第二种应用是低产量和高性能红外热像仪,这是车载、机载和远程监视系统所需要的。目前,这方面市场在 MWIR 波段中主要是 InSb FPA,而在 LWIR 波段中主要是 HgCdTe FPA。对于 QDIP 要进

入此市场中,它们需要在热像仪(最好在像元级)中采用功能增强技术。

下面介绍几种增强功能的可能方法。

3.1 利用光子晶体的多光谱/超光谱像元

探索在探测器中限定光子晶体腔(微腔)的可能性。在现有光子晶体设计中,其 Q 因子可以做得很大,约 10^5 。这样可以放大光谱响应,增加响应率和灵敏度,而且使光谱响应变窄,从而实现多光谱/超光谱探测。

3.2 具有相继或准同时寄存的并置多色传感器

可以用量子约束斯塔克效应(QCSE)实现光谱自适应传感器,其中利用DWELL异质结构中QCSE实现偏压可调谐波长。一种快速的方法是,利用DWELL结构中的多种跃迁,从而利用同一个有源区获得并置的双色探测器,如MWIR/MWIR, LWIR/LWIR或MWIR/LWIR双色探测器。

3.3 利用电压可调MEMS反射镜的光谱捷变传感器

国外下一代光谱捷变传感器研究工作做的很多,其中在像元级上把红外传感器与微机电系统(MEMS)滤光片结合起来。不仅可以利用加到可调滤光片上的偏压连续调谐FPA中子集像元,而且可以利用谐振腔增强探测器的信噪比。

3.4 利用雪崩光电二极管增强增益

利用探测器增益的量子点器件,称之为量子点雪崩光电二极管(QDAP),预计其性能比普通QDIP要高。在QDAP中,子带间量子点探测器通过隧道势垒与雪崩光电二极管(APD)耦合。隧道势垒降低了暗电流,而APD提供所需要的光电流增益,以

提高信噪比。

参考文献:

- [1] Manijeh Razeghi, et al. Quantum-dot infrared photodetectors and focal plane arrays[J]. SPIE, 2006, 6206:6206I.
- [2] S D Gunapala, et al. Long-wave infrared(LWIR) quantum dot infrared photodetector focal plane array [J]. SPIE, 2006, 6206:6206J.
- [3] E Towe, D Pal. The promise of quantum-dot infrared photodetectors[J]. SPIE, 2006, 6206:6206K.
- [4] Wei Zhang, et al. InAs quantum dot infrared photodetectors(QDIP) on InP by MOCVD[J]. SPIE, 2004, 5543: 22-30.
- [5] S D Gunapala, et al. Quantum well to quantum dots: 640 × 512 pixel long-wavelength infrared(LWIR) quantum dot infrared photodetector(QDIP) imaging focal plane array[J]. SPIE, 2006, 6295:6295O1.
- [6] Pallab Bnattacharya. Quantum-Dot Opto-electronic Devices[J]. P IEEE, 2007, 95(9): 1723-1740.
- [7] Joe C. Campbell. Quantum-Dot Infrared Photodetectors[J]. P IEEE, 2007, 95(9): 1815-1827.
- [8] Pallab Bnattacharya. High-Temperature Tunneling Quantum-Dot Intersublevel Detector for Mid-Infrared to Terahertz Frequencies [J]. P IEEE, 2007, 95(9): 1828-1837.
- [9] Sanjay Krishna. Quantum dot based infrared focal plane arrays[J]. P IEEE, 2007, 95: 1838-1852.
- [10] Kang L Wang. Ge/Si self-assembled quantum dots and their opto-electronic device application [J]. P IEEE, 2007, 95(9): 1866-1883.