

内嵌自组装 InAs 量子点调制掺杂场效应管 的光电特性*

曾宇昕¹ 刘伟¹ 杨富华¹ 徐萍¹ 章昊¹ 边历峰¹ 谭平恒¹ 郑厚植¹ 曾一平²

(1 中国科学院半导体研究所 超晶格国家重点实验室, 100083 北京)

(2 中国科学院半导体研究所 新材料部, 100083 北京)

摘要: 研究了阱中生长自组装 InAs 量子点的光谱特性, 获得了室温 $1.265\mu\text{m}$ 近红外荧光发光, 探讨了与量子点尺寸分布相关的发光峰随温度的超常红移现象. 制备了内嵌 InAs 量子点的异质结调制掺杂场效应晶体管, 获得了高耐压的场效应器件电学特性, 并有望制成新型红外光电探测场效应管.

关键词: InAs 量子点; 光致发光谱; 调制掺杂; 场效应晶体管

EEACC: 2520S PACC: 7865P

中图分类号: TN432 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0238-05

1 引言

低维自组装应变量子点(QD)正日益受到人们的广泛关注, 该结构不仅有助于人们探索低维结构体系中的原理性问题, 还具有潜在的器件应用前景, 有关报道了自组装 InAs 量子点在量子点激光器^[1,2]、光存储器^[3]、光探测场效应管^[4~6]等方面的应用. 随着半导体制造技术的发展, 用 MBE 设备可以在大失配材料体系上采用 Stranski-Krastanow (SK) 模式生长高质量的低维量子结构材料, 在此方法中, 沉积在不同衬底材料上的外延层超过一定临界厚度就能形成所谓的零维量子点结构, 这也是目前制备 InAs 量子点常用的方法之一. 近年来人们的研究兴趣仍是期望将 InAs/GaAs 量子点的发光波长扩展到 $1.3\mu\text{m}$ 的光通信波段, 采用 InGaAs 或 InAlAs 等材料作为 InAs 量子点应力缓冲层的“阱中生长量子点”(dots-in-well or DWELL) 结构是一种扩展 InAs 量子点发光波长的有效方法^[7~9], 该方法用 InGaAs 作为盖层, 其目的是减小 InAs 量子点所承受的应力, 同时可以抑制 In 的偏析, 但是研究内容多是关注材料生长和光学性能分析, 关于该

QD-DWELL 结构的器件应用方面的报道尚不多见.

本文研究了内嵌 InAs QD-DWELL 的调制掺杂 GaAs/AlGaAs 场效应晶体管(MOD-FET)的光电特性. 观测到 InAs QD-DWELL 样品近 $1.3\mu\text{m}$ 波长附近的发光, 光致发光(PL)峰位随温度升高发生超常红移现象, 红移量约为 98meV. 制备了内嵌 InAs QD 的调制掺杂场效应结构, 并对器件电学特性进行了测试, 获得了高耐压值的器件 $I-V$ 特性.

2 器件结构及工艺

图 1, 2 给出了样品结构及对应能带结构示意图. 实验样品由 MBE 设备生长, 采用 n^+ GaAs (100) 衬底, 在 600°C 温度下生长 500nm GaAs 缓冲层, 其上生长 100nm $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 缓冲层; 然后生长调制掺杂层, 首先是 40nm 掺 Si ($1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 层, 紧接着生长 20nm $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 间隔层(spacer layer), 随后生长 20nm 本征 GaAs 量子阱(QW)层. 调制掺杂层生长完毕后, 以 20nm AlAs 作为势垒层, 接着在 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 阱中以 S-K 模式生长自组装 InAs QD, 先在 AlAs 垒层上沉积

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(批准号: 2001CB309300)

曾宇昕 男, 1974 年出生, 博士研究生, 主要从事半导体器件物理研究. Email: yxzeng@red.semi.ac.cn

2004-11-01 收到, 2004-12-08 定稿

4nm $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 作为应力缓冲层(SRL),接着将系统温度降为 500°C 生长 2.5ML 的 InAs QD,然后再用 10nm SRL $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 作为量子点覆盖层.量子点生长完毕后系统温度回升至 600°C 再生长 60nm $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 覆盖层和 30nm 高掺杂 GaAs($3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)欧姆接触层.生长过程中衬底样品保持匀速旋转,以获得高质量均匀量子点结构.

n^+ GaAs	30nm	$\text{Si}^+ 3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
i- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	60nm	
$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	10nm	SBL layer
InAs QD	2.5ML	S-K, 500°C
$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	4nm	SBL layer
i-AlAs	20nm	
i-GaAs QW	20nm	
i- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	20nm	
n- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	40nm	$\text{Si}^+ 10^{18} \text{cm}^{-3}$
i- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	100nm	
i-GaAs	500nm	
n^+ GaAs substrate	(100)	

图1 QD-DWELL 调制掺杂结构示意图

Fig. 1 Schematic of QD-DWELL MOD structure

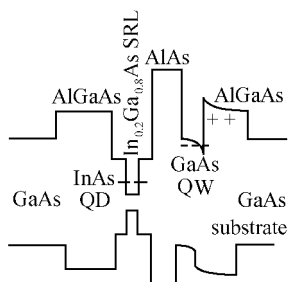


图2 QD-DWELL 调制掺杂结构能带示意图

Fig. 2 Energy-band structure of the QD-DWELL MODFET

样品的光致发光测试系统为傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet760 FTIR).使用 He-Ne 激光器作为激发光源,激发光波长为 632.8nm,激光功率为 15mW.测试过程中样品置于氦循环制冷系统中,温度在 $10 \sim 300\text{K}$ 范围连续可调.输出荧光信号用液氮冷却的 Ge 探测器接收.

本研究样品的器件结构采用常规场效应器件工艺制备,首先用湿法腐蚀方法隔离出内嵌 InAs 量子点的台面($20\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$),台面上制备 NiAu 肖特基电极,栅长为 $5\mu\text{m}$.台面两侧的源极、漏极蒸镀 AuGeNi/Au 欧姆接触电极,源漏间距为 $30\mu\text{m}$.实验样品 InAs QD-DWELL 的调制掺杂 GaAs/Al-

GaAs 场效应晶体管(MODFET)的 $I-V$ 特性用 HP 4140B PA 电学特性测试仪测得.

3 实验结果与讨论

3.1 光学特性测试

样品随温度变化的光致发光光谱如图 3,4 所示.图 3 表征的是 InAs QD 的发光,由图中可以看出,InAs QD 的发光峰呈现良好的高斯型分布,在低温下,InAs QD 的发光峰半高宽(FWHM)约为 60meV,表明阱中生长的 InAs QD 均匀性较好.10K 温度下,量子点发光峰位于近红外的 $1.159\mu\text{m}$,随着温度的升高,InAs QD 的发光峰位逐渐红移,室温下发光峰位在 $1.265\mu\text{m}$,接近于实验预先设想的 $1.3\mu\text{m}$ 发光波段.

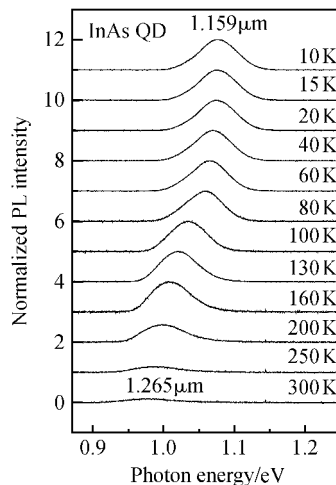


图3 不同温度下样品中 InAs 量子点发光谱

Fig. 3 PL spectra of InAs QD at different temperatures

图 4 是 GaAs 材料(包括量子阱层)的光致发光光谱.以 15K 为例,低温下样品的 PL 谱观测到两个明晰的尖峰(分别位于 1.5159eV 和 1.5349eV),高能侧 1.5349eV 的发光峰被认为来自于 20nm 宽的 GaAs 量子阱中的基态 $E_0 - \text{HH}_1$ 辐射跃迁,发光峰的半宽仅为 4meV,预示着量子阱界面质量良好.该发光峰随着温度的升高而逐渐衰减并展宽,当温度大于 200K 时,发光峰猝灭.在 PL 谱低能侧还观测到一个较宽的发光峰,中心位置约为 1.5116eV (820nm),从峰形和峰位判断该宽峰是 GaAs 带边的发光.随着温度的升高,GaAs 的发光峰位红移,

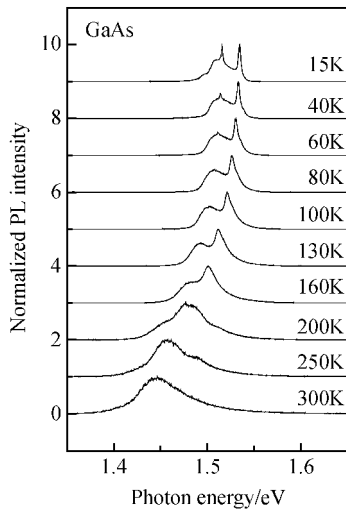


图 4 不同温度下样品中 GaAs 量子阱发光谱

Fig. 4 PL spectra of GaAs QW at different temperatures

呈现出体材料带边随温度升高而收缩的典型效应。对于 1.5159eV 的尖锐荧光峰来源,由于其叠加在 GaAs 带边发光上,且随温度升高而迅速猝灭,因此这个峰位的发光很可能来自某种受主杂质的辐射复合发光。

图 5 显示出对应的 InAs QD 发光谱峰位及半高宽(FWHM)随温度的变化关系,随着温度的升高,半高宽先逐渐减小,当温度高于 100K 后再显著增大。这种半高宽的急剧增大,显然与高温下量子点中载流子热布居有关。对于本实验生长的 2.5ML 厚 InAs QD-DWELL,其发光峰能量随着温度升高的红移明显大于 InAs 和 GaAs 的带边红移,无法用 Varshni 经验公式进行有效的拟合。图 5 中的虚线是进行参考对比的 Varshni 公式拟合的 InAs 峰位随温度的变化曲线,而实验值(■)的变化规律与之相比存在明显偏离,在整个温度变化范围内,InAs QD-DWELL 发光峰位红移量约为 98meV。研究人员也曾报道了 InAs/GaAs 量子点随温度的发光峰能量超常红移和半宽变窄的现象^[10],认为这主要是由于载流子随温度升高而造成的热激活与热迁移过程引起的。我们认为本实验量子点发光峰位随温度超常红移现象和量子点的尺寸分布涨落有关系,一定温度下,某种尺度量子点的载流子复合发光占主导,其他簇量子点中载流子或者逃逸出量子点进入浸润层而导致发光热猝灭;或者热弛豫隧穿到主要尺寸量子点中更低的能级位置参与复合发光过程,从而造成发光峰红移。

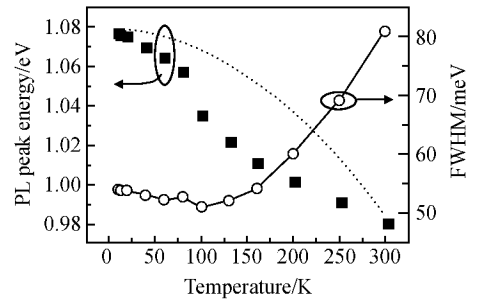


图 5 样品中 InAs QD 半高宽及发光峰位随温度的变化关系曲线

Fig. 5 Temperature dependences of InAs QD PL peak energy and FWHM

3.2 MODFET 电学特性测试

制备的调制掺杂场效应晶体管(MODFET)结构如图 6 所示,异质结 GaAs/AlGaAs 结构中 20nm 宽的 GaAs 量子阱层作为场效应管的导电沟道。图 7 所示为 77K 时样品的 $I-V$ 特性曲线,观测到器件饱和特性良好,源漏耐压值较高。未加栅压($V_{gs}=0$)时,沟道饱和漏电流约为 $100\mu A$;这是由于异质结调制掺杂结构 GaAs 量子阱中二维电子气(2DEG)在源漏电压驱动下形成的,因此本器件结构类似于常规耗尽型 n 沟道场效应晶体管。在栅极电压调制

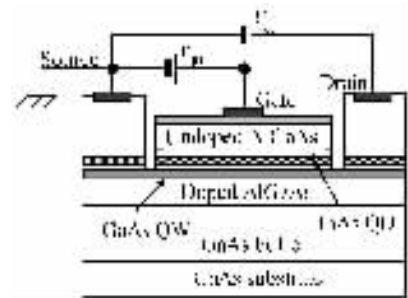


图 6 QD 调制掺杂场效应管结构示意图

Fig. 6 Schematic structure of QD-MODFET

作用下,即施加正向栅压($V_{gs} > 0$),漏电流逐级增大;施加负向栅压($V_{gs} < 0$),漏电流逐级减小,说明样品上施加的栅极电压能够显著影响沟道层 2DEG 电流的大小。注意到相比于正向栅压,负栅压对漏电流的调制更加明显,变化更大,这显然与栅极 NiAu 肖特基结在正、反向偏压下势垒高度的差异有关。栅压对漏极电流的影响,其中存在两种可能的调制机制:一方面栅极电压影响 InAs 量子点中载流子的空间分布,从而间接影响近邻 GaAs 量子阱沟道电流;另一方面,栅极电压可以直接调制 GaAs 量子阱

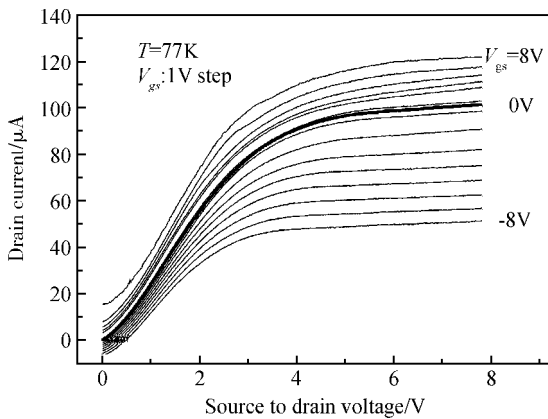


图7 QD MODFET 的 $I_{ds}-V_{ds}$ 特性曲线

Fig. 7 $I_{ds}-V_{ds}$ curves of the QD MODFET device

中沟道电子在源漏电场下的输运。根据本实验现象，我们认为后者的影响更为显著。然而，本器件结构区别于常规异质结场效应晶体管 (HFET) 之处在于：在 GaAs 沟道层之上还生长了一层所谓的内嵌 InAs 量子点层，由于 InAs 量子点和近邻的 GaAs 量子阱间距只有 20nm，量子点中的填充电子与量子阱中 2DEG 由于库仑力而相互作用。该层 InAs 量子点结构对近红外光 (如 $1.3\mu\text{m}$) 的探测响应势必会影响 GaAs 量子阱沟道 2DEG 的输运，从而改变器件源漏电流输出特性，有望开辟光电探测场效应晶体管的全新应用领域，促进光电集成 OEIC 技术的发展。该课题研究正在进一步深入开展，相关研究结果作者将另文报道。

4 结论

采用阱中生长量子点的方法制备了内嵌自组装 InAs 量子点调制掺杂场效应晶体管，获得了 InAs/InGaAs 量子点在近 $1.3\mu\text{m}$ 波段的光致发光光谱，观测到 InAs 量子点的发光峰位随温度升高的超常红移现象，认为该现象与量子点尺寸的不均匀分布有关系。研究了内嵌 InAs 量子点场效应晶体管的 $I-V$ 电学性质，获得了高耐的 MODFET 的输出特

性，为进一步研究量子点红外光探测对调制掺杂场效应晶体管的影响奠定了基础。

参考文献

- [1] Huffaker D L, Park G, Zou Z, et al. $1.3\mu\text{m}$ room-temperature GaAs-based quantum dot laser. *Appl Phys Lett*, 1998, 73 (18): 2564
- [2] Chang F Y, Wu C C, Lin H H. Effect of InGaAs capping layer on the properties of InAs/InGaAs quantum dots and lasers. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(25): 4477
- [3] Imamura K, Sugiyama Y, Nakata Y, et al. New optical memory structure using self-assembled InAs quantum dots. *Jpn J Appl Phys*, 1995, 34: 1445
- [4] Kosaka H, Rao D S, Robinson H D, et al. Single photoelectron trapping, storage, and detection in a field effect transistor. *Phys Rev B*, 2003, 67: 045104
- [5] Shields A J, O'sullivan M P, Farrer I, et al. Detection of single photons using a field-effect transistor gated by a layer of quantum dots. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(25): 3673
- [6] Koike K, Sasa S, Inoue M, et al. Electron transport in a sub-micron-scale AlGaAs/GaAs field-effect transistor with InAs nanodots as the floating gate. *J Vac Sci Technol*, 2003, 21(2): 710
- [7] Nishi K, Saito H, Sugou S, et al. A narrow photoluminescence linewidth of 21meV at $1.35\mu\text{m}$ from strain-reduced InAs quantum dots covered by InGaAs grown on GaAs substrates. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(8): 1111
- [8] Liu H Y, Hopkinson M, Harrison C N, et al. Optimizing the growth of $1.3\mu\text{m}$ InAs/InGaAs dots-in-a-well structure. *J Appl Phys*, 2003, 93(5): 2931
- [9] Wang X D, Liu H L, Niu Z C, et al. Study of self-assembled InAs quantum dot structure covered by $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 \leq x \leq 0.3$) capping layer. *Acta Physics Sinica*, 2000, 49(11): 2230 (in Chinese) [王晓东, 刘海龙, 牛智川, 等. 不同组分 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 \leq x \leq 0.3$) 覆盖层对自组织 InAs 量子点的影响. *物理学报*, 2000, 49(11): 2230]
- [10] Xu Z Y, Lu Z D, Yang X P, et al. Carrier relaxation and thermal activation of localized excitons in self-organized InAs multilayer grown on GaAs substrates. *Phys Rev B*, 1996, 54(16): 54

Optical and Electrical Investigation of Embedded Self-Assembled InAs Quantum Dot Modulation Doped Field-Effect-Transistors^{*}

Zeng Yuxin¹, Liu Wei¹, Yang Fuhua¹, Xu Ping¹, Zhang Hao¹, Bian Lifeng¹,
Tan Pingheng¹, Zheng Houzhi¹, and Zeng Yiping²

(1 *State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
Chinese Academic of Sciences, Beijing 100083, China*)

(2 *Novel Material Department, Institute of Semiconductors, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The optical properties of dot-in-a-well(DWELL) self-assembled InAs quantum dots(QDs) are investigated, whose photoluminescence (PL) wavelength reaches around 1.265 μm at room temperature. The abnormal red shift of the PL peak of InAs QDs with the increasing of the temperature is closely related with the inhomogeneous size distribution of the QD. A hetero-structure modulation doped field effect transistor (MODFET) with embedded InAs QDs is fabricated, and high electric field I - V characteristics of the device are observed. It is proposed that an MODFET embedded with InAs QDs presents a novel type of field effect photon detector.

Key words: InAs quantum dot; photoluminescence; modulation doped; field effect transistor

EEACC: 2520S **PACC:** 7865P

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0238-05

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(No. 2002CB309300)

Zeng Yuxin male, was born 1974, PhD candidate. He is engaged in research on semiconductor device physics. Email: yxzeng@red.semi.ac.cn

Received 1 November 2004, revised manuscript received 8 December 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics