

含有AlGaAs插入层的InAs/GaAs三色量子点红外探测器

刘珂 马文全 黄建亮 张艳华 曹玉莲 黄文军 赵成城

Three-color InAs/GaAs quantum dot infrared photodetector with AlGaAs inserting layer

Liu Ke Ma Wen-Quan Huang Jian-Liang Zhang Yan-Hua Cao Yu-Lian Huang Wen-Jun Zhao Cheng-Cheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 108502 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.108502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.108502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I10>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于高阻ZnO薄膜的光电导型紫外探测器

Photoconductive UV detector based on high-resistance ZnO thin film

物理学报.2015, 64(19): 198501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198501>

基于垂直晶体管结构的低电压并五苯光电探测器

Low-voltage pentacene photodetector based on a vertical transistor configuration

物理学报.2015, 64(10): 108503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108503>

高速高饱和单行载流子光探测器的设计与分析

Design and analysis of high speed and high saturation uni-traveling-carrier photodetector

物理学报.2014, 63(20): 208502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.208502>

基于内聚区模型的InSb面阵探测器分层研究

Delamination study of InSb infrared focal plane arrays using a cohesive zone model

物理学报.2014, 63(11): 118503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.118503>

基于表面等离子体共振增强的硅基锗金属-半导体-金属光电探测器的设计研究

Design of silicon based germanium metal-semiconductor-metal photodetector enhanced by surface plasmon resonance

物理学报.2013, 62(17): 178502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.178502>

# 含有 AlGaAs 插入层的 InAs/GaAs 三色量子点红外探测器\*

刘珂 马文全<sup>†</sup> 黄建亮 张艳华 曹玉莲 黄文军 赵成城

(中国科学院半导体研究所, 半导体材料科学重点实验室, 北京 100083)

(2015 年 12 月 31 日收到; 2016 年 1 月 27 日收到修改稿)

本文报道了采用分子束外延技术制备的三色 InAs/GaAs 量子点红外探测器. 器件采用 nin 型结构, 吸收区结构是在 InGaAs 量子阱中生长含有 AlGaAs 插入层的 InAs 量子点, 器件在 77 K 下的红外光电流谱有三个峰值: 6.3, 10.2 和 11  $\mu\text{m}$ . 文中分析了它们的跃迁机制, 并且分别进行了指认. 因为有源区采用了不对称结构, 所以器件在外加偏压正负方向不同时, 光电流谱峰值的强度存在一些差异. 不论在正偏压或者负偏压下, 当偏压达到较高值, 再进一步增大偏压时, 都出现了对应于连续态的跃迁峰强度明显下降的现象, 这是由量子点基态与阱外连续态的波函数交叠随着偏压进一步增大而迅速减小导致的.

**关键词:** 量子点红外探测器, 子带跃迁, 光电流谱, 分子束外延

**PACS:** 85.60.Gz, 33.20.Ea, 61.72.uj, 81.15.Hi

**DOI:** 10.7498/aps.65.108502

## 1 引言

基于 GaAs 衬底的 III-V 族化合物半导体材料具有外延生长工艺相对比较成熟和能带结构易于调控等优势, 在国际上被广泛地应用于制备高性能量子阱红外探测器 (quantum well infrared photodetector, QWIP) [1]. 由于在量子阱中电子在垂直入射的红外光照射下没有子带跃迁吸收, 并且由于电子的子带跃迁寿命较低, 因此 QWIP 具有一些缺点. 而量子点红外探测器 (quantum dot infrared photodetector, QDIP) 可以在某种程度上弥补 QWIP 的不足, QDIP 的概念在 1996 年从理论上首次提出 [2], QDIP 相比 QWIP 具有可以吸收垂直入射光、工作温度更高等优点. 在 QWIP 和 QDIP 的研究基础上, 研究者又提出了点在阱中 (dots-in-a-well, DWELL) 结构 [3], 即将量子点嵌入在量子阱之中, 从而利用电子由量子点能级跃迁至量子阱能级来进行红外光探测. 这种 DWELL 红外

探测器既有量子点可以吸收垂直入射红外线的优势, 又有量子阱中的能级可以比较准确地通过材料生长厚度调控的特点, 得到了大量的关注和研究 [4-7]. 为了对探测目标具有更高的辨识能力、展现出更加丰富的目标信息, 需要制备多色红外探测器. 许多研究者将不同探测波长的单色 QWIP 堆叠在一起, 它们之间生长欧姆接触层来制备多色红外探测器 [8-10]. 但是, 这样堆叠而成的多色探测器材料生长厚度大, 增加了工艺成本. 仅生长量子点可以实现双色探测 [11], 但是对量子点的形貌和能级进行精确控制目前仍是一个难题. DWELL 红外探测器也可以实现多色探测 [12], 但是通常是改变量子阱材料的厚度实现探测波长的调控 [13], 而改变 DWELL 结构中量子点生长工艺实现探测波长调控的研究较少.

本文采用分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 技术在 GaAs(001) 衬底上制备了 DWELL 红外探测器, 改变了 InAs 量子点的生长

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61404124, 61474106, 61176014, 61307116, 61290303, 61321063)、中国博士后科学基金 (批准号: 2015M570487) 和航空科学基金 (批准号: 20152436002) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: wqma@semi.ac.cn

工艺, 在其生长过程中引入了 AlGaAs 插入层, 实现了三色红外探测. 器件的上下接触层采用 n 型 GaAs, 其硅掺杂浓度约为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 器件有源区是将 InAs 量子点嵌入  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  量子阱中的 DWELL 结构, 保持量子阱厚度 InAs 量子点在生长的过程中采用多次堆叠的方式, 而且在每次生长 InAs 之间插入薄层 AlGaAs 势垒, 这种多次堆叠的方式可以显著地增加 InAs 量子点的高宽比<sup>[14]</sup>, 用于调控量子点的能级. 生长完成后的样品制备出了单管探测器件, 在 77 K 下采用傅里叶变换光谱仪测试了器件在正偏压和负偏压下的光电流谱. 本文叙述了红外探测器的生长与制备工艺, 并且分析了器件不同偏压下的三色红外光电探测器件的光电特性和物理机理.

## 2 实 验

本实验采用 Veeco Gen II MBE 设备, 在半绝缘 GaAs(001) 衬底上制备了含有 AlGaAs 插入层的 InAs 量子点三色红外探测器. 在外延生长过程中, 利用反射高能电子衍射仪 (reflection high-energy electron diffraction, RHEED) 实时监测样品表面的形貌. 生长过程开始时, 首先将 GaAs 衬底加热至  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  进行脱氧处理, 脱氧完成时, GaAs 衬底的 RHEED 衍射图样由模糊的雾状变为了明亮的斑点. 然后将 GaAs 衬底的生长温度降至  $580 \text{ }^\circ\text{C}$ , 生长厚度为  $0.5 \text{ }\mu\text{m}$  的 n 型 GaAs 下接触层, 其硅掺杂浓度约为  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . 接着生长十个周期的 DWELL 有源区结构. 单周期 DWELL 结构生长方式如下: 首先生长  $2 \text{ nm}$   $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ , 然后在  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  上沉积  $1.5$  原子层 (monolayer, ML) InAs, 在  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  上生长 InAs 的 S-K 临界厚度约为  $1.1 \text{ ML}$ <sup>[14]</sup>, 因此  $1.5 \text{ ML}$  沉积量 InAs 相当于沉积了  $0.4 \text{ ML}$  量子点, 随后交替生长 4 周期的  $1 \text{ nm}$  AlGaAs 插入层和  $0.4 \text{ ML}$  InAs 量子点, 器件生长结构示意图如图 1 所示. 十个周期的 DWELL 有源层生长完之后, 再生长  $0.5 \text{ }\mu\text{m}$  的 n 型 GaAs 上接触层, 作为器件的正电极. 器件在生长结束后, 进行湿法刻蚀和光刻工艺处理, 得到单管器件  $500 \text{ }\mu\text{m} \times 500 \text{ }\mu\text{m}$  的台面结构, 然后在上下 GaAs 接触层上镀蒸镀 Ti/Au 作为电极引出. 将上述单管器件密封装在液氮杜瓦瓶中, 采用 Bruker Vertex 70 傅里叶变换红外光谱仪进行  $77 \text{ K}$  的光电流谱测试. 测试过程中, 通过调控偏压大小和方向, 获得

了器件在不同偏压下的红外光电流谱, 在光电流谱实验中, 将上接触层加正偏压而下接触层加负偏压定义为器件正偏压条件, 相反则为负偏压条件.

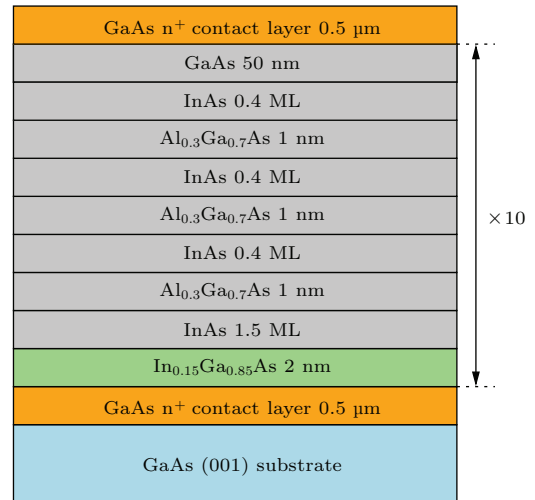


图 1 含有  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  插入层的三色 InAs 量子点红外探测器器件结构示意图

Fig. 1. The schematic drawing of the three-color InAs quantum dot infrared photodetector with  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  inserting layers.

## 3 测试与分析

器件负偏压的光电流谱如图 2 所示. 图 2 表明, 在  $-3 \text{ V}$  的偏置压下, 器件仅在约  $6.3 \text{ }\mu\text{m}$  处有一个吸收峰. 当继续增加偏压至  $-4 \text{ V}$  时,  $6.3 \text{ }\mu\text{m}$  的吸收峰有明显的增强, 同时, 在  $10.2$  和  $11 \text{ }\mu\text{m}$  处出现了两个新的吸收峰, 这两个吸收峰有一定的重叠. 然后继续增加器件的偏置电压, 当偏压由  $-4 \text{ V}$  增加至  $-4.5 \text{ V}$  时, 三个吸收峰都有增强. 然而当继续增加偏置电压至  $6 \text{ V}$  时,  $6.3 \text{ }\mu\text{m}$  的吸收峰有明显减弱, 而  $10.2$  和  $11 \text{ }\mu\text{m}$  处的吸收峰有一定增强. 器件的光电流谱中,  $6.3 \text{ }\mu\text{m}$  峰的  $\Delta\lambda/\lambda$  值较大, 约为  $28.5\%$ , 这是典型的束缚态到连续态跃迁的特征, 这表明  $6.3 \text{ }\mu\text{m}$  这个较宽的吸收峰应该对应电子由量子点基态至量子阱外连续态的跃迁. 而  $10.2$  和  $11 \text{ }\mu\text{m}$  峰有一定的重叠, 对这两个峰进行双峰拟合, 拟合出的两个单独吸收峰的  $\Delta\lambda/\lambda$  值分别仅为  $5.2\%$  和  $5.3\%$ , 这种窄谱响应是典型的束缚态到束缚态跃迁的特征, 因此,  $10.2$  和  $11 \text{ }\mu\text{m}$  的吸收峰被指认为量子点基态至量子点两个激发态 (仍是束缚态) 之间的跃迁. 在负偏压下三个峰所对应的电子跃迁的能带结构如图 3 所示.  $6.3 \text{ }\mu\text{m}$  的峰对应于阱外连续态的跃迁, 所以负偏压仅为  $-3 \text{ V}$  时电子就可以被输运至两极. 而  $10.2$  和  $11 \text{ }\mu\text{m}$  对应的跃迁

终态都在阱内, 电子跃迁至激发态之后, 还需要在较大偏压的辅助下才能从阱中逃逸, 从而形成光电流, 所以在偏压大于  $-4$  V 时,  $10.2$  和  $11$   $\mu\text{m}$  峰值才出现.

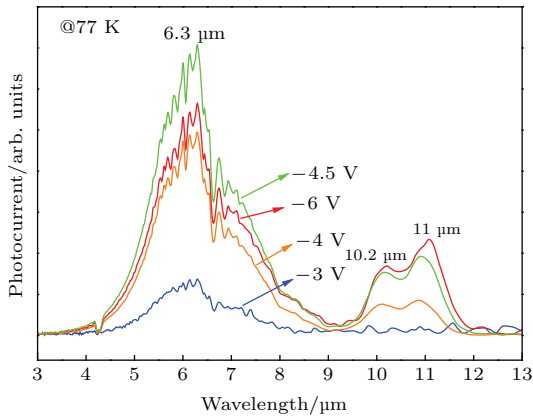


图2 (网刊彩色) 探测器不同负偏压下的光电流谱  
Fig. 2. (color online) The photocurrent spectra of the detector under different negative bias voltages.

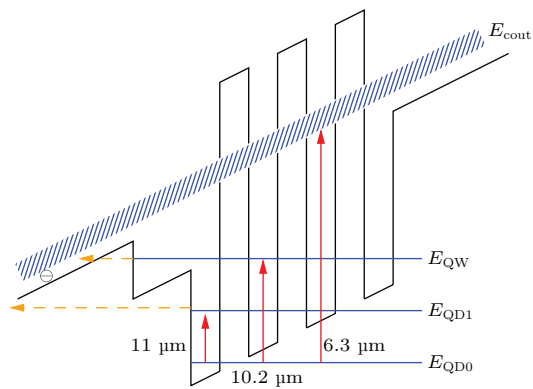


图3 负偏压下探测器的能带示意图  
Fig. 3. The band diagram of the detector under a negative bias voltage.

器件正偏压的光电流谱如图4所示. 图4表明探测器存在多个红外吸收峰, 波长为  $5.8$  和  $10.2$   $\mu\text{m}$  的吸收峰较为明显. 吸收峰的强度在正向偏压由  $3$  V 逐渐加大至  $7$  V 的过程中, 都具有先增大后减小的趋势, 而且波长  $10.2$   $\mu\text{m}$  的吸收峰在电压大于  $4$  V 时开始出现. 吸收峰的强度在  $3$ — $6$  V 增大, 而在  $7$  V 时都出现了明显的下降. 波长为  $5.8$   $\mu\text{m}$  的吸收峰的  $\Delta\lambda/\lambda$  值约为  $18.62\%$ , 应该对应于电子由量子点基态至阱外连续态的跃迁,  $10.2$   $\mu\text{m}$  处的峰轮廓很模糊, 这是因为跃迁至量子点束缚态和量子阱束缚态的两个吸收峰重叠而致. 由于有源区整体是不对称的结构, 对于跃迁至阱内量子点内束缚态

的电子, 在负偏压下与正偏压下电子逃逸所需要越过的势垒是明显不同的, 所以光电流谱存在差异.

器件光电流谱峰值强度随不同偏置电压的变化趋势如图5所示. 图5表明在负偏压由  $-3$  V 增加到  $-5$  V 过程中, 或者当正偏压由  $3$  V 增加到  $6$  V 过程中, 对应于量子点基态至连续态跃迁的峰强度始终增大. 这表明红外探测器是典型的光导型响应. 当偏压继续增大时, 不论正偏压还是负偏压, 这个峰的强度都出现了明显的降低. 这是因为量子点基态波函数与连续态波函数的交叠在电压继续增大时快速减小, 导致了量子吸收效率的降低. 在偏压方向不同时, 量子点基态至连续态跃迁对应的波长分别为  $6.3$  和  $5.8$   $\mu\text{m}$ , 它们之间相差约  $17$  meV, 这可能是因为连续态能级本质上也是能级差较小的分立能级, 所以在不同方向的偏压下, 电子分别跃迁至连续态中不同的能级而致 [11].

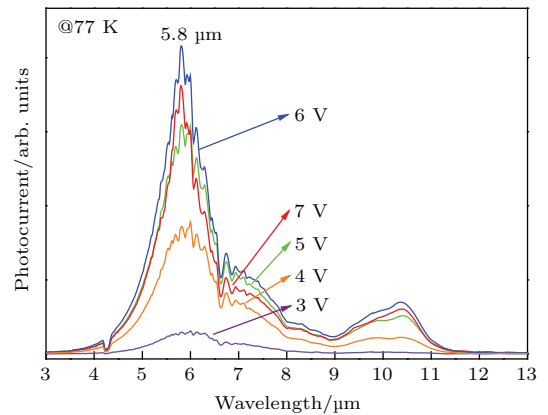


图4 (网刊彩色) 探测器不同正向偏压下的光电流谱  
Fig. 4. (color online) The photocurrent spectra of the detector under different positive bias voltages.

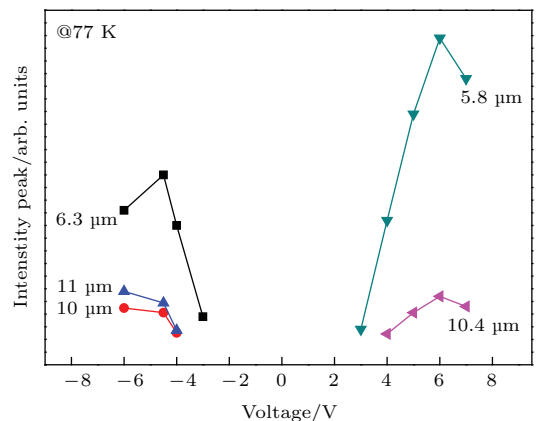


图5 红外探测器不同偏压下峰值强度统计图  
Fig. 5. The peak intensity of the three peaks of the detector response under different bias voltages.

## 4 结 论

本文介绍了实现三色探测的基于 GaAs (001) 衬底的量子点红外探测器. 在  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  量子阱上首先沉积 1.5 ML InAs 形成量子点, 之后在生长 0.4 ML InAs 量子点之间插入 1 nm  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  势垒, 这些  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  势垒层目的是为了提提高 InAs 量子点的高宽比. 采用傅里叶变换红外光谱仪在 77 K 温度下进行三色红外探测器的光电流谱测试. 测试结果表明, 在  $-3\text{ V}$  到  $-7\text{ V}$  之间, 红外探测器可以在 6.3, 10.2 和 11  $\mu\text{m}$  三个波长同时响应. 由于生长的 DWELL 结构是不对称的, 在正偏压时, 探测波长有一定的位移, 在 5.8  $\mu\text{m}$  处有一个吸收峰. 负偏压下, 连续态对应的吸收峰在偏压大于  $-4.5\text{ V}$  时出现了明显下降; 正偏压下, 同样的下降发生在大于 6 V 时. 这主要是由于基态波函数与连续态波函数交叠在减小而致. 这种插入势垒层的方法为制备三色量子点红外探测器提供了参考.

## 参考文献

- [1] Levine B F 1993 *J. Appl. Phys.* **74** R1
- [2] Ryzhii V 1996 *Semicond. Sci. Technol.* **11** 759
- [3] Raghavan S, Rotella P, Stintz A, Fuchs B, Krishna S, Morath C, Cardimona D A, Kennerly S W 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 1369
- [4] Höglund L, Karlsson K F, Holtz P O, Pettersson H, Pistol M E, Wang Q, Almqvist S, Asplund C, Malm H, Petrini E, Andersson J Y 2010 *Phys. Rev. B* **82** 035314
- [5] Tatebayashi J, Khoshakhlagh A, Huang S H, Balakrishnan G, Dawson L R, Huffaker D L, Bussian D A, Htoon G, Klimov V 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 261115
- [6] Perera A G U, Lao Y F, Wolde S, Zhang Y H, Wang T M, Kim J O, Ted S S, Tian Z B, Krishna S 2015 *Infrared Phys. Technol.* **70** 15
- [7] Wolde S, Lao Y F, Perera A G U, Zhang Y H, Wang T M, Kim J O, Ted S S, Tian Z B, Krishna S 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 151107
- [8] Tidrow M Z, Jiang X D, Li S S, Bacher K 1999 *Appl. Phys. Lett.* **74** 1335
- [9] Jiang L, Li S S, Tidrow M Z, Dyer W R, Liu W K, Fastenau J M, Yurasits T R 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 2982
- [10] Huo Y H, Ma W Q, Zhang Y H, Huang J L, Wei Y, Cui K, Chen L H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 098401 (in Chinese) [霍永恒, 马文全, 张艳华, 黄建亮, 卫杨, 崔凯, 陈良惠 2011 物理学报 **60** 098401]
- [11] Ma W Q, Yang X J, Chong M, Yang T, Chen L H, Shao J, Lü X, Lu W, Song C Y, Liu H C 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 013502
- [12] Krishna S, Raghaven S, Winckel G V, Stintz A, Ariyawansa G, Matsik S G, Perera A G U 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 2745
- [13] Ariyawansa G, Perera A G U, Raghaven G S, Winckel G V, Stintz A, Krishna S 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1064
- [14] Wei Y, Ma W Q, Huang J L, Zhang Y H, Huo Y H, Cui K, Chen L H, Shi Y L 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 103507

# Three-color InAs/GaAs quantum dot infrared photodetector with AlGaAs inserting layer<sup>\*</sup>

Liu Ke Ma Wen-Quan<sup>†</sup> Huang Jian-Liang Zhang Yan-Hua Cao Yu-Lian  
Huang Wen-Jun Zhao Cheng-Cheng

(Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100083, China)

( Received 31 December 2015; revised manuscript received 27 January 2016 )

## Abstract

We report on a three-color InAs/GaAs quantum dot infrared photodetector grown by molecular beam epitaxy. The InAs quantum dots with AlGaAs inserting layers are formed on an InGaAs quantum well layer as an absorber region. The detector is an *nin*-type device, and three photocurrent peaks at 6.3, 10.2 and 11  $\mu\text{m}$  are observed at 77 K, respectively. Each peak is designated and the physical mechanism is discussed. The dependences of the intensities of the three peaks on the applied bias voltage are different for the positive and the negative bias conditions due to the asymmetric structure of the absorber region. The peak arising from the transition between the quantum dot ground state and a continuum state becomes weaker when the bias voltage is larger than a certain value. The physical reason is attributed to the decrease of the wavefunction overlap between the two quantum states.

**Keywords:** quantum dot infrared photodetector, intersubband transition, photocurrent spectra, molecular beam epitaxy

**PACS:** 85.60.Gz, 33.20.Ea, 61.72.uj, 81.15.Hi

**DOI:** [10.7498/aps.65.108502](https://doi.org/10.7498/aps.65.108502)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61404124, 61474106, 61176014, 61307116, 61290303, 61321063), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2015M570487), and the Aviation Science Foundation, China (Grant No. 20152436002).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [wqma@semi.ac.cn](mailto:wqma@semi.ac.cn)