

文章编号: 1001 - 9014 (2010) 02 - 0087 - 05

# 高迁移率 GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 二维电子气的微波回旋共振研究

杨 威, 罗海辉, 钱 轩, 姬 扬\*

(中国科学院半导体研究所 超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 掌握微波辐照下的电子态性质是理解高迁移率二维电子气在低磁场区的纵向电阻振荡和零电阻态等新奇物理现象的关键. 基于反射率测量的微波回旋共振技术 (RODCR), 研究了高迁移率、低浓度 GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 二维电子气在 Ka 波段微波辐照下的电子态性质. 通过在不同条件下的 RODCR 测量, 具体讨论了微波交变电场方向、入射激光波长和温度等因素对 RODCR 测量结果的影响规律. 研究表明, RODCR 测量技术为研究二维电子系统的电子态性质提供了简便而有力的手段.

**关键词:** 微波; 反射率; 二维电子气; 回旋共振

**中图分类号:** O472 + . 3; O433. 5 + 9 **文献标识码:** A

## STUDY ON MICROWAVE CYCLOTRON RESONANCE OF HIGH-MOBILITY GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As TWO-DIMENSIONAL ELECTRON GAS

YANG Wei, LUO Hai-Hui, QIAN Xuan, JI Yang\*

(State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The properties of electron states in the presence of microwave irradiation play a key role in understanding the oscillations of longitudinal resistance and the zero-resistance states in a high-mobility two-dimensional electron gas (2DEG) in low magnetic field. The properties of electron states in a high-mobility and low-density GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 2DEG in the presence of Ka-band microwave irradiation were studied by reflectance-based optically detected cyclotron resonance (RODCR). The influences of the direction of microwave alternating electric field, wavelength of the laser, and temperature on RODCR results were discussed. The results show that RODCR measurements provide a convenient and powerful method for studying electron states in 2DEG.

**Key words:** microwave; reflectance; two-dimensional electron gas (2DEG); cyclotron resonance

### 引言

自从 20 世纪 50 年代 Dresselhaus 等人在半导体砷和锗中观测到电子和空穴的回旋共振现象以后<sup>[1]</sup>, 人们利用回旋共振测量技术广泛研究了半导体的能带参数以及载流子的迁移率、浓度和碰撞弛豫过程<sup>[2~4]</sup>, 还通过 Landau 能级与子能带的共振耦合, 精确测量了二维电子气 (2DEG) 子带能量间距<sup>[5]</sup>. 1977 年后发展起来的光学探测回旋共振技

术 (ODCR: optically detected cyclotron resonance) 是微波-远红外回旋共振技术与光致荧光 (PL) 测量技术的结合<sup>[6,7]</sup>. 在 ODCR 测量中, 可以通过测量 PL 谱的变化来观测回旋共振峰<sup>[6~9]</sup>. 虽然 ODCR 具有更高的测量精度, 但是在 PL 信号较弱的材料中, ODCR 测量是难以进行的, 而且电子-空穴复合发光也会导致载流子的分布发生变化, 影响测量结果的准确性. 基于反射率测量的回旋共振技术 (RODCR: reflectance-based optically detected cyclotron res-

收稿日期: 2009 - 05 - 07, 修回日期: 2009 - 10 - 16

Received date: 2009 - 05 - 07, revised date: 2009 - 10 - 16

基金项目: 国家自然科学基金 (10425419); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2009CB929301, 2007CB924900)

作者简介: 杨 威 (1978-), 男, 河北承德人, 博士, 主要从事 GaAs 基半导体微波调制光谱和稀磁半导体噪声谱的研究.

\* 通讯作者: E-mail: jiyang@semi.ac.cn

onance)能有效解决上述问题,而且测量配置也更简单<sup>[10]</sup>.

近年实验研究发现,在微波辐照下,高迁移率的2DEG在低磁场区出现纵向电阻振荡和零电阻态现象,零电阻态出现在满足  $h\nu = \hbar h$  的磁场区间<sup>[11]</sup>. 理论研究表明,这些新奇的物理现象很可能来源于微波对电子分布函数的改变<sup>[12]</sup>. 本文首次采用微波 RODCR 测量技术研究了 GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 高迁移率、低浓度 2DEG 在低磁场区的电子态性质,并探讨了 RODCR 测量结果随微波交变电场方向、入射激光波长和温度等因素的变化规律.

## 1 实验

实验中使用的 2DEG 样品是由分子束外延生长的调制掺杂 GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 异质结所形成的,在 4.2K 时的电子迁移率为  $\mu = 3.2 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ,电子浓度为  $n_{2D} = 9.6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ . 在测量过程中,样品放置于低温磁光杜瓦中,可进行 1.5 ~ 300K 的变温操作,杜瓦中的超导线圈可以产生高达 10T 的磁场. 首先在  $T = 2\text{K}$  和  $B = 0\text{T}$  采用 He-Ne 激光测量了样品的 PL 谱,以确定 GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 异质结界面附近的能带结构,然后在不同的微波交变电场方向、入射激光波长和温度下完成了 RODCR 测量.

图 1 是 RODCR 实验的测量示意图. 为了使微波频率与波段管匹配,选择的微波源为 DH1126 型 8mm 程控雷达综合测试仪,可以输出最大功率 50mW,频率为 33.5 ~ 36.5GHz (属于 Ka 波段)的微波信号. 输出的微波信号经过波导管和样品杆,衰减后照射到样品上的功率大约为 5mW. 连续改变垂直于 2DEG 方向的磁场,以至于电子相邻朗道能级间隔与微波光子能量相近时,电子强烈吸收微波并在朗道能级间共振跃迁,从而改变导带电子的分布. Tsunami 钛宝石激光器出射的激光 (脉宽为 150fs,谱宽为 10nm,重复周期为 13.2ns 的飞秒脉冲激光) 经过衰减和聚焦,最后照射在样品上的功率大约为 0.3mW,反射光经由探测器转换成电信号输入锁相放大器,最后由计算机读取. 当激光的光子能量在样品的带隙附近时,导带电子分布的改变会导致样品介电常数发生变化,这体现在激光反射率的改变上. 设反射光强度变化率为 RODCR,则  $\text{RODCR} = R/R_0$ ,其中  $R_0$  为没有微波照射时样品的反射率,  $R$  为微波照射后样品反射率的变化值.

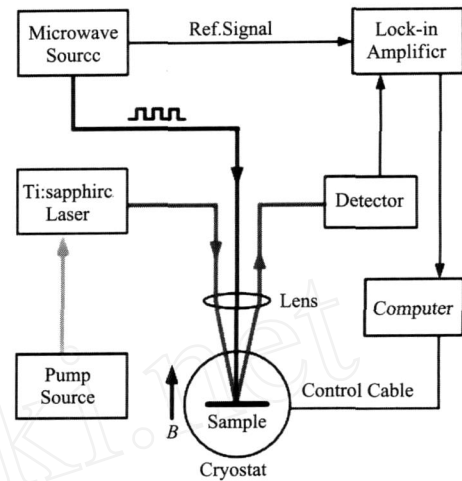


图 1 RODCR 测量示意图

Fig 1 Schematic diagram of the setup for RODCR measurements

## 2 结果与讨论

图 2(a) 是 2DEG 在  $T = 2\text{K}$  和  $B = 0\text{T}$  时测量的 PL 谱及其拟合曲线. 仔细观察实验曲线可以发现,  $\lambda = 816\text{nm}$  ( $E = 1.519\text{eV}$ ) 附近的 PL 峰并不是一个单独的发光峰,采用两个高斯曲线 (峰值分别为 816.1nm 和 816.6nm,半高宽分别为 0.4nm 和 1.2nm) 可以较好地拟合实验数据,说明测到的 PL 谱包含两个独立的发光峰. 短波方向的发光峰对应的是 GaAs 缓冲层中激子复合发光,而长波方向的发光峰对应的是 GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 界面处的激子复合发光<sup>[13]</sup>. 根据 PL 谱可以画出 GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 异质结界面附近的能带示意图,如图 2(b) 所示.

图 3 中显示的是典型的 RODCR 测量曲线,实验中选择激光波长 (816nm) 使激光光子能量对应价带至二维电子系统的能量间隔. 在图中可以看到明显的回旋共振峰, -1075G 峰值处 RODCR 信号接近  $3 \times 10^{-4}$ . 从图 3 可以看到,两条 RODCR 曲线在正负磁场方向是不对称的,这是因为磁场并非严格垂直于 2DEG 平面,导致曲线形状不对称<sup>[14]</sup>,且系统中存在正磁场方向的剩磁. 微波交变电场  $E$  的取向对 2DEG 的回旋共振有显著影响:与  $E$  平行于 2DEG 平面时的测量结果相比,当  $E$  垂直于 2DEG 平面时,谱线半高宽增大,而且峰位向高场方向移动. 只考虑电子在相邻朗道能级间跃迁,且采用抛物线能带近似的情形下,2DEG 的电子回旋共振有效质量为

$$m^* = \frac{eB}{c} = \frac{eB}{2v} \quad (1)$$

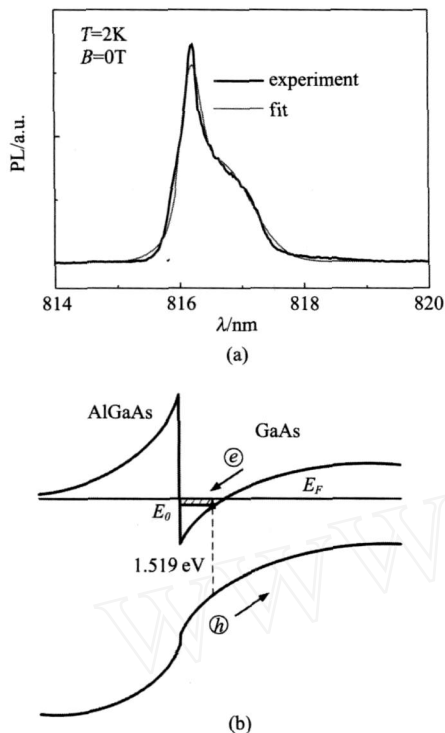


图 2 (a)  $T=2\text{K}$  和  $B=0\text{T}$  时测量的 PL 谱及其拟合曲线 (b) GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As 异质界面附近的能带示意图  
 Fig 2 (a) The experimental PL spectrum and the fitted curve by Gaussian function at  $T=2\text{K}$  and  $B=0\text{T}$  (b) schematic energy band structure near the interface of GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As heterojunction

其中,  $e$  为电子电荷,  $B$  为磁场强度,  $\omega_c$  为回旋共振频率,  $\nu$  为微波频率. 对于图 3 中的谱线,  $\nu = 35.5\text{GHz}$ ,  $B$  取正负磁场方向峰值处磁场强度的平均值, 则根据式 (1) 可以得到  $E$  垂直和平行 2DEG 平面时的有效电子质量  $m^*$  分别为  $0.08m_0$  和  $0.069m_0$ .  $E$  平行样品时得到的  $m^* = 0.069m_0$  接近于抛物线能带近似下普遍认可的数值  $0.067m_0$ , 而  $E$  垂直样品时得到的  $m^* = 0.08m_0$  明显大于这个数值. 由回旋共振峰的半高宽  $2b$  和吸收强度  $A$  可以确定电子散射时间 [2],

$$= \frac{2}{b \sqrt{1 - 2A}} \quad (2)$$

测试结果表明, 在  $E$  垂直 2DEG 和  $E$  平行 2DEG 两种情况下, 样品对微波的吸收强度都比较小,  $\sqrt{1 - 2A}$  相差不大, 与  $b$  成反比, 由此可知, 当  $E$  垂直样品时, 值小于  $E$  平行样品时的值. 这说明, 电子在垂直 2DEG 方向 ( $z$  方向) 的交变电场作用下, 在  $xy$  平面内运动速度增加, 也就是动能增加, 从而引起很强的能带非抛物线性, 这就解释了  $E$  垂

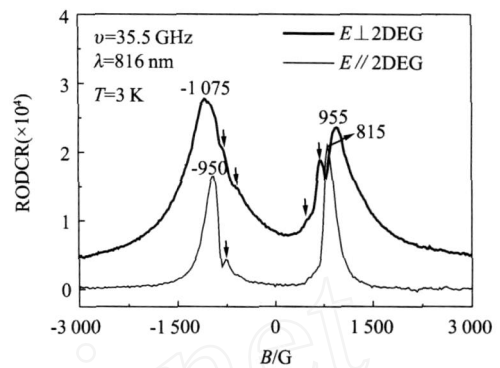


图 3 温度  $T=3\text{K}$  激光波长  $\lambda=816\text{nm}$  时, 微波交变电场  $E$  垂直和平行 2DEG 平面时的 RODCR 测量曲线.  $\text{RODCR} = R/R_0$ , 为无量纲单位  
 Fig 3 Two RODCR experimental curves measured with the alternating electric field of the microwave perpendicular and parallel to the 2DEG plane, respectively, at  $T=3\text{K}$  and  $\lambda=816\text{nm}$ .  $\text{RODCR} = R/R_0$

直样品时电子较大的  $m^*$  [15]. 几个弱峰出现的位置大致为主峰对应磁场的  $1/2$  和  $3/4$  处, 我们认为,  $1/2$  处的峰对应 “ $h\nu = nh_c$ ,  $n=2$ ” 的朗道能级跃迁 [16], 但是  $3/4$  处的峰的来源还不清楚.

图 4 显示了温度和微波频率一定的情况下, RODCR 测量曲线随激光波长的变化关系, 由下至上各个曲线对应的波长为 806, 808, 810, 812, 814, 816, 818 和 820nm. 从图中可以看到, RODCR 信号强烈依赖于激光的波长 (光子能量), 将不同激光波长下回旋共振主峰 ( $B = -1075\text{G}$ ) 对应的 RODCR 值列于图 4 的插图中, 可以清楚地看到 RODCR 峰值随激光波长的变化情况. 在测量过程中, 由于采用了飞秒脉冲激光, 虽然激光波长对应于价带至费米面的能量, 但是在激光脉冲入射的那一刻, 它对电子分布的影响不能反映到自身的反射光上, 而上一个激光脉冲入射时间在 13.2ns 之前, 它激发的电子此时已经弛豫, 对电子分布的影响已经消失, 所以激光本身没有影响它所测量的电子分布的改变. 当  $\lambda = 816\text{nm}$  时, 2DEG 对激光共振吸收, 微波导致的电子分布的变化对激光吸收率的影响 (RODCR 信号) 也就最大; 当  $\lambda$  减小, 2DEG 对激光的吸收率逐渐降低, RODCR 信号也就逐渐较小; 当  $\lambda > 816\text{nm}$ , 激光光子能量不满足价带至 2DEG 费米面的跃迁要求, 2DEG 对激光的吸收率迅速降低, RODCR 信号也就快速下降.

图 5 显示了激光波长和微波频率一定的情况下, RODCR 测量值随温度的变化关系. 从图 5 可以看到, RODCR 信号对温度非常敏感, 随着温度升高,

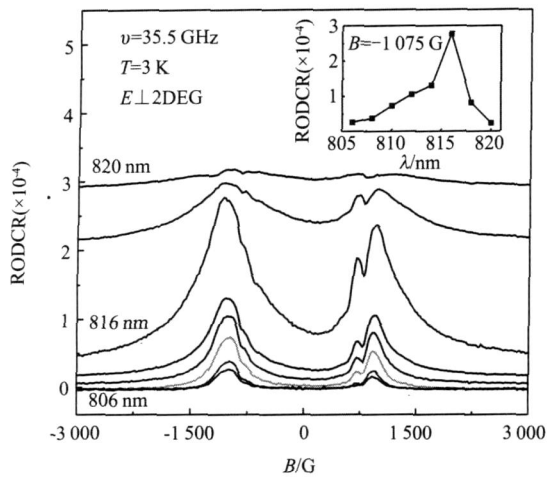


图4 温度  $T=3\text{K}$ ，微波交变电场  $E$  垂直 2DEG 平面时不同激光波长下的 RODCR 曲线。插图显示的是 RODCR 曲线的主共振峰值与激光波长的关系

Fig 4 The RODCR curves at various laser wavelengths with alternating electric field of the microwave perpendicular to the sample at  $T=3\text{K}$ . Inset: the dependence of RODCR peak values on wavelength

回旋共振峰的幅度迅速下降，当温度升高到 40K 时，回旋共振峰值已经非常微弱。将不同温度下回旋共振主峰 ( $B = -1075\text{G}$ ) 对应的 RODCR 值列于图 5 的插图中，可以清楚地看到回旋共振峰值随温度升高而减小。对于  $h\nu = \hbar\omega_c$  的情形，由  $\nu = 35.5\text{GHz}$ ，可知朗道能级间距为  $0.147\text{meV}$ ， $\hbar\omega_c = K_B T$  对应  $T = 1.7\text{K}$ ，也就是说，在所测量温度范围 ( $T < 3\text{K}$ ) 内， $K_B T > \hbar\omega_c$ 。随着温度升高，电子热动能的增加使量子效应减弱，回旋共振条件下电子在朗道能级间的跃迁几率降低，对费米面附近电子分布的影响随之减弱，这就是 RODCR 曲线的回旋共振峰值随温度升高而降低的原因。

### 3 结论

首次利用微波 RODCR 测量技术观测了高迁移率 2DEG 在低磁场下的回旋共振现象，这为研究二维电子系统电子态性质提供了简便而有力的手段。重点研究了微波交变电场方向、激光波长和温度等因素对 RODCR 信号的影响规律。当微波交变电场垂直于样品表面时， $m^*$  高达  $0.08m_0$ ，这是由于  $z$  方向的微波交变电场使电子在  $xy$  平面内动能增加，引起很强的能带非抛物线性。RODCR 曲线的峰值强烈依赖于激光的波长，并在激光共振吸收波长出现最大值，这取决于样品对激光的吸收率随激光的变化关系。RODCR 信号随着温度升高而快速下降，但是在  $T = 30\text{K} \sim 18\hbar\omega_c/K_B$  的温度下，在 RODCR 曲线

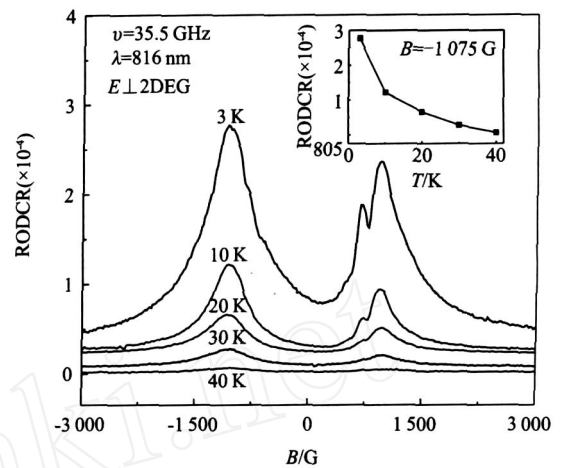


图5 激光波长  $\lambda = 816\text{nm}$ ，微波交变电场  $E$  垂直 2DEG 平面时不同温度下的 RODCR 曲线。插图显示的是 RODCR 曲线的主共振峰值与温度的关系

Fig 5 The RODCR curves at various temperature with alternating electric field of the microwave perpendicular to the sample,  $\lambda = 816\text{nm}$ . Inset: the dependence of RODCR peak values on temperature

仍可观测到明显的回旋共振峰。

致谢 感谢 V. Umansky 提供样品，并感谢与吴晓光和刘国才进行的有益讨论。

### REFERENCES

- [1] Dresselhaus G, Kip A F, Kittel C. Cyclotron resonance of electrons and holes in silicon and germanium crystals[J]. *Phys Rev*, 1955, **98**(2): 368—384.
- [2] CHEN Zhang-Hai, HU Chan-Ming, LU Pu-Lin, et al. Study on cyclotron resonance of two-dimensional electron gas in GaAs/AlGaAs heterojunction[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈张海, 胡灿明, 刘普霖, 等. GaAs/AlGaAs 异质结中二维电子气的回旋共振研究. *红外与毫米波学报*), 1997, **16**(2): 107—113.
- [3] Murphy S Q, Schlesinger Z, Nelson S F, et al. Electron-cyclotron resonance in silicon/silicon-germanium heterostructures[J]. *Appl Phys Lett*, 1993, **63**(2): 222—224.
- [4] Cole B E, Chamberlain J M, Henini M, et al. Cyclotron resonance in ultra-low-hole-density narrow p-type GaAs/(Al, Ga)As quantum wells[J]. *Phys Rev B*, 1997, **55**(4): 2503—2511.
- [5] CHEN Zhang-Hai, HU Chan-Ming, LU Pu-Lin, et al. Resonant subband-Landau-level coupling for high-lying subbands of two-dimensional electron gases in GaAs/AlGaAs heterojunction[J]. *Acta Physica Sinica* (陈张海, 胡灿明, 刘普霖, 等. GaAs/AlGaAs 异质结中二维电子气子能带的 Landau 能级耦合. *物理学报*), 1998, **47**(3): 494—501.
- [6] Baranov P G, Veschchunov Y P, Zhitnikov R A, et al. Optical detection of microwave resonance in germanium by means of luminescence of electron hole drops[J]. *Sov Phys-JETP Lett*, 1977, **26**: 249—252.

(下转 122 页)

整个传输过程中,只有在时间反演聚焦时刻才可以被探测出来,而在其它时间里信号是很难被检测出来的.从而,说明了时间反演技术的时间聚焦特性降低了信号在时间上被非法截取的概率,提高了无线传感器网络的信息在空间传播的安全性.

#### 4 结论

时间反演技术的时-空间聚焦特性能够提高无线传感器网络信息在空间传播的抗检测/截获性能,降低了信号在空间被非法截取的概率,提高了无线传感器网络的信息在空间传播的安全性.

#### REFERENCES

- [1] Pathan A S K, Lee H W, Hong C S. Security in wireless sensor networks: issues and challenges[J]. *IEEE*, 2006, **2**(3): 1043—1048.
- [2] Fink M. Time reversal of ultrasonic fields—part I: basic principles[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, **39**(5): 555—566.
- [3] Fink M. Time reversal of ultrasonic fields—part II: basic principles[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, **39**(5): 567—578.
- [4] ZHANG Guang-Min, HONG Jing-Song, WANG Bing-Zhong. Advances in the research of rectenna of wireless sensor network[J]. *Telecommunications Science* (张光旻, 洪劲松, 王秉中. 无线传感器网络中的整流天线技术研究进展. *电信科学*), 2007, **4**(7): 59—65.
- [5] Barton R J, Chen J, Huang K, et al. Optimality properties and performance analysis of co-operative time-reversal communication in wireless sensor networks[J]. *IET Commun*, 2007, **1**(1): 64—70.
- [6] Barton R J, Zheng R. Order-optimal data aggregation in wireless sensor networks using cooperative time-reversal communication[J]. *IEEE*, 2006, **7**(6): 1050—1055.
- [7] Qiu R C, Zhou C M, Zhang J Q, et al. Channel reciprocity and time-reversed propagation for ultra-wideband communications[J]. *IEEE Antennas and wireless Propagation letters*, 2006, **5**(1): 269—273.
- [8] Mills R F, Prescott G E. A comparison of various radiometer detection models[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, **32**(1): 467—473.
- [9] WANG Dang-Wei, MA Xin-Yi, WANG Shao-Gang, et al. New approach to radar target identification using a generalized likelihood ratio test[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王党卫, 马兴义, 王少刚, 等. 一种基于广义似然比检测的雷达目标识别新方法. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4): 311—315.
- [7] Wright M G, Ahmed N, Koohian A, et al. Far-infrared optically detected cyclotron resonance observation of quantum effects in GaAs[J]. *Semicond Sci Technol*, 1990, **5**(5): 438—441.
- [8] Hai P N, Chen W M, Buyanova I A, et al. Direct determination of electron effective mass in GaNAs/GaAs quantum wells[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, **77**(12): 1843—1845.
- [9] Dagnelund D, Vorona I, Wang J, et al. Optically detected cyclotron resonance studies of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y/\text{GaAs}$  quantum wells sandwiched between type-II AlAs/GaAs superlattices[J]. *J. Appl Phys*, 2007, **101**(7): 073—705.
- [10] Kioseoglou G, Cheong H D, Yeo T, et al. Reflectance-based optically detected resonance studies of neutral and negatively charged donors in  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  quantum wells[J]. *Phys Rev B*, 2000, **61**(8): 5556—5561.
- [11] Mani R G, Smet J H, Von Klitzing K, et al. Zero-resistance states induced by electromagnetic-wave excitation in  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  heterostructures[J]. *Nature*, 2002, **420**(6916): 646—650.
- [12] Dmitriev I A, Mirlin A D, Polyakov D G, et al. Cyclotron-resonance harmonics in the ac response of a 2D electron gas with smooth disorder[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **91**(22): 226802.
- [13] Ashkinadze B M, Voznyy V, Cohen E, et al. Condensation of bulk excitons on a magnetized two-dimensional electron gas in modulation-doped heterojunctions[J]. *Phys Rev B*, 2002, **65**(7): 073311.
- [14] Chen W M, Monemar B, Soman E, et al. Effect of a hot two-dimensional electron gas on optical properties of modulation-doped GaAs/AlGaAs heterostructures[J]. *Semicond Sci Technol*, 1992, **7**(3B): B253—B255.
- [15] Ando T. Self-consistent results for a  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  heterojunction. I. Subband structure and light-scattering spectra[J]. *J. Phys Soc Jpn*, 1982, **51**(12): 3893—3899.
- [16] Moreau S, Byszewski M, Sadowski M L, et al. Optically detected cyclotron resonance in a high mobility 2D electron gas[J]. *Physica E*, 2006, **32**(1-2): 203—206.

(上接 90页)