

金属-砷化镓界面的电调制反射光谱与 Franz-Keldysh 效应研究

王 斌^{1,2}, 徐晓轩^{1,2}, 秦 哲^{1,2}, 宋 宁^{1,2}, 张存洲^{1,2*}

1. 南开大学泰达应用物理学院, 天津 300457
2. 南开大学弱光非线性光子学材料先进技术及制备教育部重点实验室, 天津 300457

摘 要 通过调制光谱这种基础的光学方法来研究 Au-GaAs, Al-GaAs, Ni-GaAs 的金属半导体界面的一些电学性质, 并且加以比较, 其中包括电场、费米能级钉扎和界面态密度等情况。这些界面是通过在 SiN^+ GaAs 样品上沉积金属 (Au, Al, Ni) 生长成的。通过观察电反射谱来研究金属 GaAs 的界面电场和费米能级钉扎的情况, 然后通过傅里叶变换这些所取得的电反射谱来分析这些材料的界面性质。通过测量氦氛激光器诱导产生的光电压和激光器光强之间的关系来得到这些材料的界面态密度情况, 从而进行进一步的研究。

关键词 金属半导体界面; Franz-Keldysh 效应; 光伏效应; 电调制反射谱

中图分类号: TN304.26; O431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2008)08-1701-04

引 言

众所周知和其他的半导体材料表面界面^[1-4]一样, GaAs 材料^[5-9]的表面界面态密度^[10]也很大。这些态在带隙的中间钉扎他们的表面界面的费米能级。由于费米能级的钉扎, 不同的金属, 对金属和半导体之间的肖特基势垒^[11]的高度是不灵敏的。这一点并不像莫特-肖特基方程理论描述的行为那样。所以对于金属半导体界面的电学性质的研究尤为重要, 这一点不仅体现在基础理论的探询上, 更体现在以后器件的应用方面上^[12]。本文运用调制光谱这种基础的光学方法并辅以复傅里叶变换^[13-15]和光伏效应^[16]来研究金属 GaAs 界面的电学性质, 其中包括电场、费米能级钉扎和界面态密度^[17]等情况。

1 实验部分

实验用的样品是由分子束外延 MBE 生长的 SiN^+ 样品。首先在 n^+ GaAs 衬底上生长 $1 \mu\text{m}$ n^+ GaAs 的缓冲层, 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。接下来生长的是 400 nm 厚的 GaAs 本征层, 这样就首先生长出了 SiN^+ GaAs^[18, 19]。在样品背后做欧姆接触。此后在高度真空的情况下在这些 SiN^+ 样品上面沉积 10 nm 厚的金属 (Au, Al, Ni), 这样金属半导体界面就被构造出来了。在样品长成之前不需要做其他的加工处理

了。

电调制反射谱实验装置的构成是这样的: 前端是一个 250 W 的卤钨灯和一个焦距为 0.5 m 的单色仪。单色仪的出射光经过样品的反射, 被 Si 探测器所接收。探测器输出信号, 包括直流部分 R 和交流部分 ΔR , 被输入到 EG&G 5208 锁相放大器中。样品上的调制信号是 77 Hz 的交流方波。氦氛激光器所激发出的光电压由数字万用表直接测量记录, 氦氛激光器的光强由一系列中性密度滤光片控制。

2 结果与讨论

实验得到的结果如图 1 所示。

图 1 是三种样品的电反射谱图, 调制电压为 40 mV 的方波, 图中展示出了大量的 Franz-Keldysh 振荡。可以明显观察到他们的周期不同, 这是由于它们本征层内的电场不同。

根据 Franz-Keldysh 效应的理论, 电场 F 下的半导体材料中的 Franz-Keldysh 振荡的极值有如下关系^[20],

$$\frac{4}{3} [(E_n - E_g)/(\hbar\theta)]^{3/2} + \varphi = n\pi \quad (1)$$

其中 E_g 是能带宽度, E_n 是带隙之上第 n 个 Franz-Keldysh 振荡极值的能量。 φ 是相位参数。

$$(\hbar\theta)^3 = e^2 \hbar^2 F^2 / (2\mu) \quad (2)$$

其中 e 是电子电量, \hbar 是普朗克常数, μ 是电子重孔穴对减少

收稿日期: 2007-02-09, 修订日期: 2007-05-18

基金项目: 国家教育部“振兴计划”基金项目 (A01504) 资助

作者简介: 王 斌, 1980 年生, 南开大学物理科学学院讲师 e-mail: sharevalue@163.com

* 通讯联系人 e-mail: zhangcz@nankai.edu.cn

的质量。可以推导 $(E_n - E_g)^{3/2}$ 和 n 成正比，且斜率是 $(3\pi/4)(\hbar\theta)^{3/2}$ ，由此就可以获得电场 F 的数值。

图 2 是电调制反射谱的 $(E_n - E_g)^{3/2}$ 与 n 的关系。图中直线为实验数据对方程(1)的拟合结果。从线的斜率可以推出界面电场。所推出的电场分别为 23.2, 20.3 和 17.2 $\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

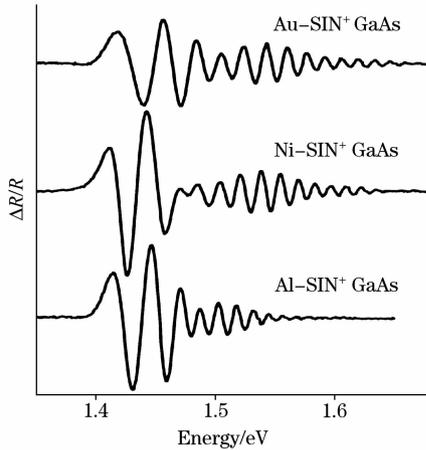


Fig. 1 Electroreflectance spectra of the Au-, Ni- and Al-SiN⁺ GaAs samples at room temperature. The modulation voltage was 40 mV_{P-P} square wave

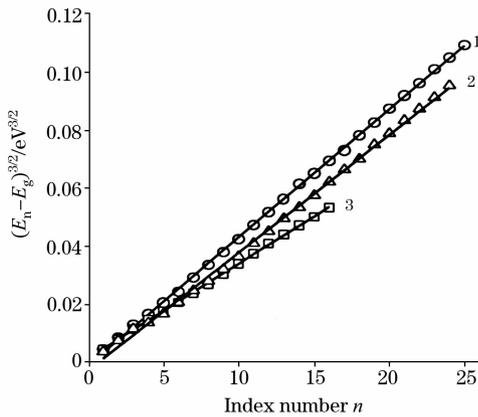


Fig. 2 Plots of $(E_n - E_g)^{3/2}$ as a function of FKOs' index n for the ER spectra in Fig. 1. The straight lines are least-square fits to Eq. (1)

1: Au-SiN⁺ GaAs; 2: Ni-SiN⁺ GaAs; 3: Al-SiN⁺ GaAs

图 3 是傅里叶变换后的电调制反射谱图。其中实线是傅里叶变换后的实部，虚线是虚部。Au-GaAs 和 Al-GaAs 的结果和理论是互相吻合的，而 Ni-GaAs 的谱线型就比较复杂了，这种复杂的线型可能预示着特殊的界面性质。我们可以计算出费米能级钉扎分别为 Au-GaAs 是 0.93 eV, Ni-GaAs 是 0.81 eV 和 Al-GaAs 是 0.69 eV。

由于 SiN⁺ 样品的本征层内电场一致，所以表面的费米能级钉扎 V_F 可以由下式得出

$$V_F = Fd \quad (3)$$

其中 d 是本征层的厚度。

通过测量光伏电压和激光器光强并且相除，可以得到样品的界面态密度。假设整个被照亮的区域 A_P 中，只有一小部分是有效的界面态区域 A_S ^[21]，可以得到金半界面的光伏电压为

$$V_P = \frac{\eta k_B T}{e} \ln\left(\frac{J_P}{rJ_0} + 1\right) \quad (4)$$

其中 k_B 是波尔兹曼常数， η 是理想因子。参数 r 是一个几何学因数，由 A_S/A_P 来定义。由于参数 r 也等于界面态密度与表面原子密度的比值，所以

$$r = \frac{A_S}{A_P} = \frac{D_S}{D_0} \quad (5)$$

标准的 GaAs 表面原子密度 $D_0 = 6.310 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 。由此可以得到 SiN⁺ 结构的光致电流密度 J_P 和饱和电流密度 J_0 ，

$$J_P = eP\gamma(1 - R)/\hbar\omega \quad (6)$$

$$J_0 = \frac{A^{**} T^2}{BT^{3/2} + 1} \exp(-eV_F/k_B T) \quad (7)$$

其中 P 是激光照明强度， R 是反射率， γ 是量子效率。对于 SiN⁺ 结构来说，常数 $A^{**} = 8.0 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，常数 $B = 3.3 \times 10^{-4} \text{ K}^{-3/2}$ 。通过拟合可以得到 V_P/P 和因数 r 从而能计算出界面态密度 D_S 。

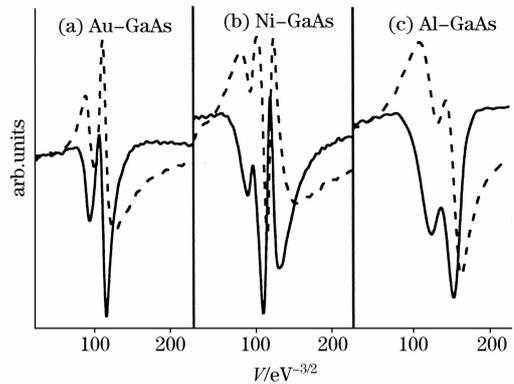


Fig. 3 Real parts (solid lines) and imaginary parts (dashed lines) of the FT spectra for the ER spectra in Fig. 1

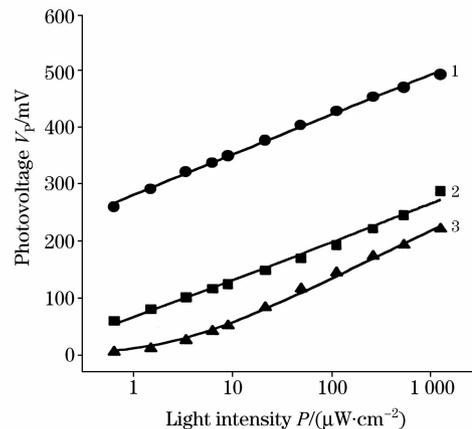


Fig. 4 The measured photo voltage V_P of the Au-, Al- and Ni-SiN⁺ GaAs samples as a function of the exciting He-Ne laser intensity P . The solid lines are least-square fits to Eq. (4)

1: Au-SiN⁺ GaAs; 2: Al-SiN⁺ GaAs; 3: Ni-SiN⁺ GaAs

拟合图 4 中的数据得到 $\eta=1.18, 1.14$ 和 1.42 , 并且 $r=0.26, 0.032$ 和 65 , 从而计算界面态密度 $D_s=1.6 \times 10^{14}, 2.0 \times 10^{13}$ 和 $4.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 。对于 Ni-GaAs 的结果来说比较特殊, 它的态密度是表面原子密度的 60 多倍。同时我们也发现 Ni-GaAs 的 η 值远大于 1, 这个可能解释为什么 Ni-GaAs 的傅里叶变换电调制光谱异常。

3 结 论

本文研究了 Au-GaAs, Al-GaAs, Ni-GaAs 三种样品的界面的 Franz-Keldysh 效应和光伏效应, 实验中我们在电调制反射谱图中观测到了大量的 Franz-Keldysh 振荡。傅里叶

变换后的电调制反射谱图显示出 Au-GaAs, Al-GaAs 的实部、虚部和模都很好的符合理论上的模型, 但同时 Ni-GaAs 却出现很特殊的谱线。在电调制反射谱图中得到的费米能级钉扎的结果分别是 $0.93, 0.69$ 和 0.81 eV 。通过拟合光伏电压和激光光强的数据相除而得到的 r 因子依次是 $0.26, 0.032, 65$, 态密度依次是 $1.6 \times 10^{14}, 2.0 \times 10^{13}$ 和 $4.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 。Ni-GaAs 的结果很特殊, 这可能能解释为什么它的傅里叶变换电调制反射谱图异常。我们将做后续的实验继续深入研究。

致谢: 诚挚感谢中国科学院半导体所金鹏副研究员的大力支持。

参 考 文 献

- [1] Sarula, HAN Yuan-chun(萨茹拉, 韩元春). Journal of Inner Mongolia University for Nationalities(内蒙古民族大学学报), 2003, 10(01): 14.
- [2] YUE Jia-xing(岳家兴). College Physics(大学物理), 2006, 25(6): 60.
- [3] JIA Yu, MA Bing-xian, et al(贾 瑜, 马丙现, 等). Journal of Zhengzhou University • Natural Science(郑州大学学报 • 自然科学版), 1999, 31(1): 38.
- [4] WU Chang-shu, TIAN Qiang, et al(吴畅书, 田 强, 等). Chinese Journal of Semiconductors(半导体学报), 2003, 24(5): 34.
- [5] JIN Xiao-feng, et al(金晓峰, 等). Journal of Fudan University • Natural Science(复旦学报 • 自然科学版), 2001, 40(3): 249.
- [6] SHENG Bai-zhen(盛柏桢). Research & Progress of Solid State Electronics(固体电子学研究进展), 1993, 13(1): 93.
- [7] MAO Zhen-wei, LI Fan-qing(毛振伟, 李凡庆). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 1993, 13(6): 97.
- [8] YANG Rui-xia, HU Kai-sheng, ZHOU Zhi-hui, et al(杨瑞霞, 胡恺生, 周智慧, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 1999, 19(1): 22.
- [9] TAN Hong-lin, ZHANG Peng-xiang, LIU Xiang, et al(谭红琳, 张鹏翔, 刘 翔, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2001, 21(4): 498.
- [10] YAN Zu-wei, BAN Shi-liang, LIANG Xi-xia(闫祖威, 班士良, 梁希侠). Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol(内蒙古大学学报自然科学版), 2001, 32(6): 621.
- [11] ZHANG Li-chun, GAO Yu-zhi(张利春, 高玉芝). Chinese Journal of Semiconductors(半导体学报), 1989, 10(4): 3.
- [12] Sze S M. Physics of Semiconductor Devices(2nd Edition). New York: John Wiley & Sons, 1981.
- [13] Jin P, Pan S H, Li Y G, et al. Semicond. Sci. Technol., 2006, 21(6): 786.
- [14] Jin P, Pan S H, Liang J B. J. Appl. Phys., 2000, 88(11): 6429.
- [15] Jin P, Pan S H, Li Y G, et al. Appl. Surf. Sci., 2003, 218: 210.
- [16] YAN Yong-mei, YANG Jin-ci(颜永美, 杨锦赐). Semiconductor Technology(半导体技术), 1992, 17(3): 64.
- [17] DING Wen-ge, YU Wei, YANG Yan-bin, et al(丁文革, 于 威, 杨彦斌, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(10): 1798.
- [18] Van Hoof C, Deneffe K, De boeck J, et al. Appl. Phys. Lett., 1989, 54(7): 608.
- [19] Shen H, Dutta M. J. Appl. Phys., 1995; 78(4): 2151.
- [20] Aspnes D E, Studna A A. Phys. Rev. B., 1973; 7(10): 4605.
- [21] Yin X, Chen H-M, Pollak F H, et al. J. Vac. Sci. Technol. A, 1992, 10(1): 131.

Study of Electreflectance Spectrum and Franz-Keldysh Effect at Metal-GaAs Interfaces

WANG Bin^{1,2}, XU Xiao-xuan^{1,2}, QIN Zhe^{1,2}, SONG Ning^{1,2}, ZHANG Cun-zhou^{1,2*}

1. TEDA Applied Physics School, Nankai University, Tianjin 300457, China

2. The Key Laboratory of Advanced Technique and Fabrication for Weak-Light Nonlinear Photonics Materials, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300457, China

Abstract Electronic properties (electric field, Fermi level pinning and density of interface states) of Au-GaAs, Al-GaAs and Ni-GaAs interfaces were studied by optical methods. These interfaces were fabricated by depositing metals (Ni, Au and Al) on specialized surface-intrinsic-n⁺ (SIN⁺) GaAs samples. Electreflectance (ER) was used to study the electric fields and Fermi level pinnings of metal-GaAs interfaces. Fourier transformation (FT) of ER spectra was used to analyze these interfacial properties. Assuming that only a fraction of the total illuminated area was the effective interface state area, the density of interface states was obtained by measuring the relation between the photovoltage induced by an exciting He-Ne laser beam and the illumination intensity of the laser beam.

Keywords Metal-Semiconductor interfaces; Franz-Keldysh effect; Photovoltage effect; Electreflectance(ER)

(Received Feb. 9, 2007; accepted May 18, 2007)

* Corresponding author

《光谱学与光谱分析》对来稿英文摘要的要求

来稿英文摘要不符合下列要求者,本刊要求作者重写,这可能要推迟论文发表的时间。

1. 请用符合语法的英文,要求言简意明、确切地论述文章的主要内容,突出创新之处。

2. 应拥有与论文同等量的主要信息,包括四个要素,即研究目的、方法、结果、结论。其中后两个要素最重要。有时一个句子即可包含前两个要素,例如“用某种改进的 ICP-AES 测量了鱼池水样的痕量铅”。但有些情况下,英文摘要可包括研究工作的主要对象和范围,以及具有情报价值的其他重要信息。在结果部分最好有定量数据,如检测限、相对标准偏差等;结论部分最好指出方法或结果的优点和意义。

3. 句型力求简单,尽量采用被动式,通常应有 2000 个印刷字符,300 个英文单词为宜,不能太短;也不要太长。用 A4 复印纸单面隔行打印。

4. 摘要不应有引言中出现的内容,换言之,摘要中必须写进的内容应尽量避免在引言中出现。摘要也不要对论文内容作解释和评论,不得简单重复题名中已有的信息;不用非公知公用的符号和术语;不用引文,除非该论文证实或否定了他人已发表的论文。缩略语、略称、代号,除相邻专业的读者也能清楚地理解外,在首次出现时必须加以说明,例如用括号写出全称。