

文章编号: 0258-7025(2003)07-0593-04

# 自由电子激光对 GaAs/AlGaAs 异质结构材料 电学性质的影响

张 猛<sup>1</sup>, 林理彬<sup>1</sup>, 邹 睿<sup>1</sup>, 张国庆<sup>2</sup>, 李永贵<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学物理系辐射物理及技术教育部重点实验室, 四川 成都 610064)  
(<sup>2</sup> 中国科学院高能物理所自由电子激光研究室, 北京 100080)

**摘要** 自由电子激光(FEL)辐照样品前和辐照样品时,使用变温霍尔测量系统测试了这种  $n$  型调制掺杂 GaAs/AlGaAs 异质结构材料中准二维电子气(2DEG)的迁移率、电子浓度和电阻率。对比这两种情况下的结果可以发现:1) 迁移率随温度升高而降低,光照使迁移率增大;2) 电子浓度随温度变化关系相对较为复杂,但是平均而言,光照会使电子浓度减小;3) 电阻率随温度升高而升高,光照使电阻率减小,但这种影响不明显。对这些现象给出了具体的分析。

**关键词** 激光技术;电学性质;自由电子激光;异质结构材料;二维电子气;辐照效应

**中图分类号** TN 248.6;TN 241 **文献标识码** A

## Investigation of Electricity Property of GaAs/AlGaAs Heterostructure Material Influenced by FEL

ZHANG Meng<sup>1</sup>, LIN Li-bin<sup>1</sup>, ZOU Rui<sup>1</sup>, ZHANG Guo-qing<sup>2</sup>, LI Yong-gui<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Radiation Physics and Technology of Ministry of Education,  
The Physics Department of Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

<sup>2</sup>The Lab of BFEL, Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China

**Abstract** The Hall measurement equipment has been used to measure the mobility, the electron concentration and the resistivity of the 2DEG in the  $n$ -type modulation-doped GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructure material before and during the sample being irradiated by FEL. Comparing the result of two cases, it is found that: 1) with enhancing temperature, the mobility decreases, and FEL makes the mobility increase; 2) the variety of the electron concentration with the temperature is more complex, but generally speaking, FEL makes electron concentration reduce; 3) with enhancing temperature, the resistivity increases, and FEL makes the resistivity decline, but the effect isn't obvious. These phenomena have all been analyzed in details.

**Key words** laser technique; electricity property; free-electron laser; heterostructure material; 2DEG; irradiation effect

## 1 引 言

$n$  型调制掺杂 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 异质结构能使自由电子与电离施主在空间上分离,在异质界面处积聚的准二维电子气(2DEG)受到的杂质散射大

大减少,能获得极高的迁移率,使得此类结构应用于高频与高速器件(如高电子迁移率晶体管 HEMT)的前景十分诱人,近 20 年来人们一直关注其优越性能。有人曾用不同能量和剂量电子、质子辐照量子阱材料,研究了不同结构量子阱材料受电子、质子

**收稿日期**:2002-04-04;收到修改稿日期:2002-05-10

**基金项目**:国家自然科学基金(基金号:6008802)及全国高校博士点基金资助项目。

**作者简介**:张猛(1976—),男,湖北荆州人,现攻读四川大学物理系核技术及应用专业硕士学位,主要从事自由电子激光对量子阱材料辐照效应及其机理研究。E-mail:chinesezm@sina.com

辐照后的电学和光学性质变化<sup>[1,2]</sup>,这些研究主要是模拟太空和核辐射环境,以便量子阱材料做成的电子器件能在这些环境中工作。

自由电子激光(FEL)是一种新的研究 2DEG 的非线形输运和光学性质的辐照源,由于在量子阱材料中,传导电子被束缚在纳米级的空间范围内,能量(如电子子带能量、电子动能、费米能等)与 THz 光子能量是可比拟的,这样,THz 的辐射场将和 2DEG 强烈耦合。至今对异质结构及量子阱材料的自由电子激光辐照效应的研究进行得不多,主要是理论方面的研究,实验做得很少<sup>[3~6]</sup>,而这些研究也只是在国外进行。

## 2 实验条件

所用样品是中国科学院半导体研究所用 MBE 方法生长的 *n* 型调制掺杂 GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 异质结构材料。样品结构为在 GaAs 缓冲层上生长 10 nm 的 AlGaAs 隔离层,然后生长 30 nm 的 AlGaAs 掺杂层,掺杂硅的浓度为  $N = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,最后在上面生长 30 nm 的  $n^+$ -GaAs 帽层。这种异质结构所具有的能带结构如图 1 所示。

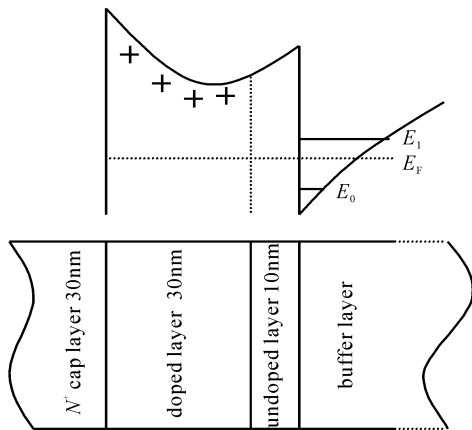


图 1 GaAs/AlGaAs 异质结构能带示意图

$E_F$  为费米能级,  $E_0, E_1$  分别为基态能级和第一激发态能级

Fig. 1 Schematic diagram of energy band of GaAs/AlGaAs heterostructure

$E_F$  is the Fermi level, and  $E_0, E_1$  are the

lowest subband and the first-excited subband, respectively

把样品置于小型制冷机的样品室,该制冷机能在 10~300 K 温度范围内工作。首先用范德堡法测量了样品不加光时的变温霍尔效应,然后在与宏脉冲功率密度相对应的电场强度为 25 kV/cm,波长为 8.92  $\mu\text{m}$  的 FEL 辐照下在线测试变温霍尔效应。

自由电子激光是中国科学院高能物理研究所的 BFEL,激光波长连续可调,峰值功率密度高,具有微秒和皮秒时间结构,输出比较稳定,是一种光束质量很好的中红外激光。图 2 所示的是它的时间结构。测试霍尔效应所加的磁场为  $24 \times 10^{-2} \text{ T}$ ,通过样品的电流为 40  $\mu\text{A}$ 。

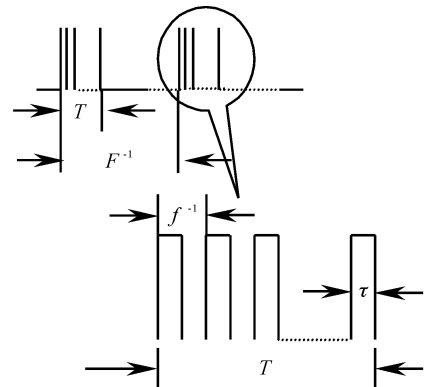


图 2 FEL 时间结构示意图

在一个宏脉冲中包含许多微脉冲,  $F$  为宏脉冲重复频率,  $f$  为微脉冲重复频率,  $T$  为宏脉冲宽度(3~4  $\mu\text{s}$ ),  $\tau$  为微脉冲宽度(3~4 ps)

Fig. 2 Schematic diagram of FEL time structure

A macro-pulse includes many micro-pulse,  $F$  is the repeat frequency of macro-pulse,  $f$  is the repeat frequency of micro-pulse,  $T$  is the width of macro-pulse (3~4  $\mu\text{s}$ ),  $\tau$  is the width of micro-pulse (3~4 ps)

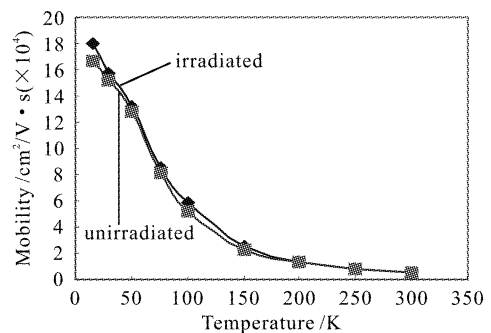


图 3 FEL 光照前后迁移率随温度的改变

Fig. 3 Mobility vs temperature before/during irradiated by FEL

## 3 实验结果

图 3~5 为实验结果,分别表示未光照与光照时迁移率  $\mu$ , 电子浓度  $n$ , 电阻率  $\rho$  随温度的变化,它们是根据实验结果得到的曲线。这里的迁移率、电子浓度、电阻率分别是霍尔迁移率、面电子浓度和面电阻率。可以看出随温度的降低,迁移率缓缓上升,在小于 150 K 后迁移率迅速增大。电子浓度大小随温

度变化呈现一定的波动,在 50~150 K 范围内,电子浓度随温度升高而降低。电阻率在小于 77 K 时随温度升高缓慢增大,在大于 77K 后随温度升高增大较快。

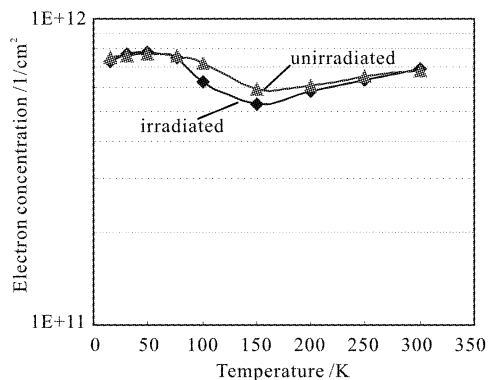


图 4 FEL 光照前后电子浓度与温度的关系

Fig. 4 Electron concentration vs temperature before/during irradiated by FEL

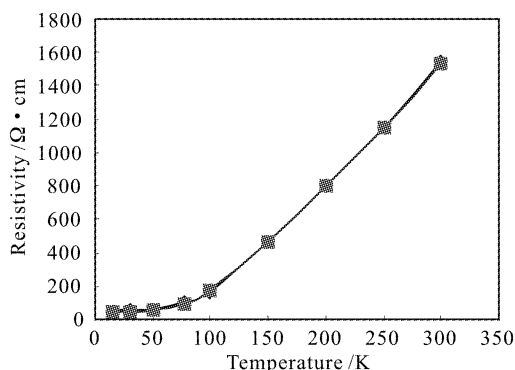


图 5 光照前后电阻率随温度的改变

Fig. 5 Resistivity vs temperature before/during irradiated by FEL

在光照情况下得到的迁移率、电子浓度、电阻率随温度的变化曲线与未光照时的变化曲线形状是相似的。光照使迁移率增大,在低温部分,迁移率增大的现象尤为明显。在大部分温度范围内光照使电子浓度降低。但光照对电阻率的影响不大,因而这两条曲线基本是重合的。

## 4 讨 论

1) 为了确定一个最佳波长,做了变波长 FEL 辐照下的霍尔效应测试。在固定温度为 15 K,与功率密度相对的光的电场强度为 20 kV/cm 的情况下,从 6.93  $\mu\text{m}$  到 9.36  $\mu\text{m}$  改变 FEL 的波长,得到了迁移率、电子浓度和电阻率随波长的变化曲线。

在 8.92  $\mu\text{m}$  处,光照使迁移率、电子浓度和电阻率变化的现象最为显著,因此选择了 8.92  $\mu\text{m}$  作为在线测试时的波长。图 6 为迁移率随波长变化的曲线。

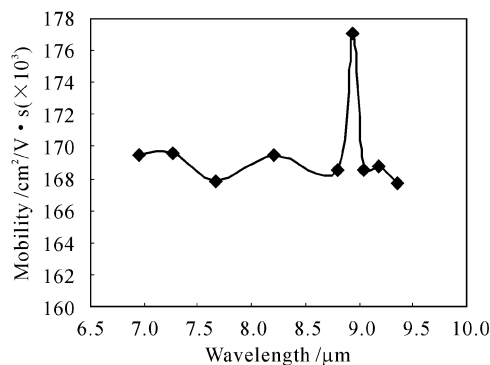


图 6 迁移率随 FEL 波长的变化

Fig. 6 Mobility vs the wavelength of FEL

2) 激光辐照到 4 mm $\times$ 4 mm 大小的样品上,聚焦光斑直径仅为 0.2 mm,并未照到整个样品。但由于激光辐照强度很大,仍然清楚地看到由激光诱导样品产生的电学特性变化。虽然所得的霍尔效应是辐照区域与未辐照区域的平均效果,但其变化趋势仍然反映了辐照效应。

3) 对于图 3 中总迁移率  $\mu$  随温度的变化曲线,非常符合理论分析的规律<sup>[7]</sup>。在大于 150 K 时,光学声子散射使  $\mu$  处于一个不大的值,可用经验公式描述为  $\mu = A/T^2 + B/T^6$ 。由于光学声子在低温下散射作用很小,在小于 150 K 后,  $\mu$  迅速增大,这时  $\mu$  主要受声学声子散射和压电散射,用经验公式分别描述为  $\mu \propto a/k_B T$  和  $\mu \propto 1/(k_B T)^{1/2}$ ,其中  $a$  为阱宽。温度继续降低时声学声子散射和压电散射作用也会减小,  $\mu$  继续增大。由于该量子阱材料使用了调制掺杂,电离杂质与 2DEG 在空间上分离,对 2DEG 的散射作用很小,从而呈现出很高的  $\mu$ 。这些是调制掺杂材料的特点,特别是在低温时,电离杂质散射作用很小,  $\mu$  很大。

由图 3 曲线还可看出,辐照使迁移率升高。这是因为自由电子激光使电子由基态激发至较高的激发态。以两个子带为例,  $m_0^* > m_1^*$ ,即基态子带上电子的有效质量大于第一激发态子带上的有效质量<sup>[8]</sup>,由  $\mu = e\langle\tau\rangle/m^*$  可知  $\mu_0 < \mu_1$ 。

根据两种载流子导电的模型,总迁移率为

$$\mu = (\mu_0 \times n_0 + \mu_1 \times n_1) / (n_0 + n_1)$$

即迁移率较高的子带参与导电能使系统的迁移率增

大。可见 FEL 辐照使电子激发到激发态后将使迁移率增大。

4) 电子浓度随温度变化曲线较为复杂,对于其中  $n$  随温度升高而降低的现象,还需在今后作细致的研究。

一般而言,光照会使导带的电子浓度增大,但实验结果却是光照使电子浓度降低。W. Xu 通过理论计算<sup>[3]</sup>得出了一个方势阱在 FEL 辐照下电子浓度减小的结论:当 FEL 辐照时,将使处于基态的 2DEG 电子状态密度下降,使费米能级上升,第二个子能带也会有电子占据,基态子能带占据电子浓度降低,而总电子浓度下降。而且辐照越强,电子浓度下降越显著。从图 3 可看到,在大部分温度范围内,实验结果与理论推导结论是一致的。虽然理论计算的是一个方势阱,而实验对象是一个 V 形势阱,但理论计算的结论也可以适用于我们的结构。在 40 K 左右,FEL 辐照下的电子浓度反而更大,是由于激光辐照促进了施主杂质电离。在温度大于 77 K,杂质已完全电离后,文献[3]所述的机制就起主导作用,即光辐照又使电子浓度降低。

5) 对比图 3~5 中曲线来分析由温度变化带来的迁移率  $\mu$ , 电子浓度  $n$ , 电阻率  $\rho$  的变化可以看出,温度由 15 K 变到 300 K 时, $\mu, \rho$  具有 2~3 个数量级的变化,而  $n$  的值始终处于一个数量级,由于  $\rho = 1/n\mu e$ ,这就使得  $\rho$  的变化主要取决于  $\mu$  的变化。按照反比例关系,当  $\mu$  很大时, $\rho$  很小,而且变化幅度很小,当  $\mu$  较小时,不大的变化就使  $\rho$  变化很大。光照只能使  $\rho$  的值略微减小,因而光照前后电阻率曲线基本是重合的。尽管在低温时光照能带来  $\mu$  的显著变化,但此时  $\rho$  很小,不能从图中看出这种变化。

## 5 结 论

1) FEL 光照能使电子跃迁至较高子能带,从而使迁移率增大。这也许能给生产电子器件时带来一个新的思路,如让 HEMT 工作在一定波长的红外光辐照下,有望使器件的运行速度更快。即使当红外光辐照强度不大的时候,只要增大被辐照的面积,

这种迁移率增大的现象仍会是显著的。

2) FEL 辐照使电子浓度降低的现象与理论计算结果一致<sup>[3]</sup>,在一个不同结构的材料上用实验的方法论证了文献[3]的理论结果。

3) 光照对电阻率的影响不大,电阻率主要随温度改变。在 15~300 K 温度范围内,电阻率随温度升高而增大。低温时电阻率很小。

致谢 本工作得到了中国科学院半导体研究所曾一平同志及中国科学院高能物理所 BFEL 实验室吴钢、王鸣凯、杨学平、范耀辉等同志给予的热情帮助,在此表示衷心的感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Huang Wanxia, Lin Libin, Zeng Yiping *et al.*. Effects of optic character of GaAs/AlGaAs multiple quantum well with proton irradiation [J]. *Chinese J. Semiconductors* (半导体学报), 1999, **20**(11):957~962 (in Chinese)
- 2 Lin Libin, Li Youmei, Cheng Weidong *et al.*. Electron irradiation effects of the materials of HEMT [J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)* (四川大学学报(自然科学版)), 1995, **32**(1):39~43 (in Chinese)
- 3 W. Xu. Self-consistent electronic subband structure in terahertz-driven two-dimensional electron gases [J]. *Europhysics Letters*, 1997, **40**(4):411~416
- 4 T. J. Green, W. Xu. Population inversion in an optically pumped single quantum well [J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **88**(6):3166~3169
- 5 A. G. Markelz, N. G. Asmar, B. Brar *et al.*. Interband impact ionization by terahertz illumination of InAs heterostructures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(26):3975~3977
- 6 P. S. S. Guimaraes, Brian J. Keay, Jann P. Kaminski *et al.*. Photon-mediated sequential resonant tunneling in intense terahertz electric fields [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(24):3792~3795
- 7 Xia Jianbai, Zhu Bangfen. Semiconductor Superlattice Physics [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1995. 452 (in Chinese)
- 8 Wei Yayi, Shen Jinxi, Zheng Guozhen *et al.*. Study of SDH oscillations of 2-D electron gas in Sib-doped  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  heterojunction [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1994, **43**(2):282~288 (in Chinese)