

AlGaAs/GaAs 异质结构外延材料 均匀性的电光测量*

朱祖华 丁纯 丁桂兰 王硕勤

浙江大学信息电子工程系, 杭州 310008

沈浩瀛 彭正夫 王翠莲

机电部南京第55研究所, 南京 210016

(1991年9月28日收到, 1992年5月13日收到修改稿)

本文介绍了连续波电光检测法 (CWEOP—continuous wave electro-optic probing) 应用于 AlGaAs/GaAs 异质结构材料均匀性测量的原理、实验装置和实验结果。扫描电子显微镜电压衬度技术也用于观察测量样片, 比较两者的结果发现有较好的对照。最后, 讨论了实验结果, 并对方法的应用作了展望。

PACC: 7820J, 7340L, 8170C, 4260F

导 言

1978年, Dingle 等人首次采用了调制掺杂技术于分子束外延生长的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 超晶格, 获得了远高于寻常均匀掺杂情况的迁移率^[1]。这主要是由于在不掺杂的 GaAs-掺杂的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结构中, 电子都汇集于异质界面的势阱中, 造成电子和母体离子空间的分隔, 从而使得离化杂质的散射大大减弱之故。汇集于势阱中的电子在垂直于界面方向受限制, 其行为是量子化的。因此, 这些电子构成了一个准二维电子气 (2DEG) 系统。这样的二维电子气系统的性质可以通过在低温下横向磁阻效应的测量加以证实^[2]。

众所周知, 由 MBE 和 MOCVD 技术生长的调制掺杂异质结构材料现已广泛用于制作高速电子器件, 如高电子迁移率晶体管 (HEMT)。而异质结构生长的好坏直接决定了器件性能的优劣和器件成品率的高低。因此, 对于异质结构材料质量的评估具有十分重要的意义。

目前, 常用的外延材料质量评估方法有范德堡霍耳测量法、电化学电容电压法等。前者虽能提供外延材料迁移率和载流子浓度的数据, 但反映的基本上是整个样片面的平均值, 因此难以获得有关均匀性的确切信息。后者虽能提供外延材料纵向(生长方向)载流子浓度的分布情况, 但仅局限于电解液接触的测量区内, 且方法本身是破坏性的。因此, 寻

* 本工作为国家自然科学基金资助项目研究内容之一。

求能够可靠、方便地给出外延材料横向均匀性的测量方法问题,已开始为人们所关注。

有关外延生长异质结构材料横向均匀性的检测,国外的研究工作已见发表的不多。据所知,有1983年发表的利用横向电光效应测量AlGaAs/GaAs异质结中二维电子气电导变化来判定横向均匀性的结果^[3]。还有1988年发表的利用场效应液晶技术直接显示出表面下掩埋的二维电子气中断的结果等^[4]。本文作者于1986年在美国发展了可用于测量GaAs等化合物半导体材料及其器件中稳态场分布的连续波电光检测法^[5],并曾用于半绝缘GaAs表面电位的测量^[6]。1989年,荷兰和西德学者P. Hendriks等人利用作者发展的方法测量了AlGaAs/GaAs异质结构中二维电子气的电位分布,发表了研究通讯^[7]。

本文介绍了作者自己利用连续波电光检测法对国内MBE设备生长的AlGaAs/GaAs异质结构材料横向均匀性测量研究的一些结果,包括与扫描电子显微镜电压衬度测量结果的对比。文中对测量的原理、实验装置作了简洁的描述,并分析讨论了实验结果和展望了方法的应用前景。

测量原理与实验装置

连续波电光检测法的原理基于线性电光效应^[5,8]。简言之,因为GaAs材料是一种很好的电光晶体,在一定的偏置条件下,晶体内存在某一电场分布,当探测激光通过它时,由于场致双折射的作用,其偏振状态将发生变化,变化的大小与电场的强度成正比。如果将这种与场强大小成比例的探测激光的偏振变化测量出来,则即可直接获得有关晶体内电场强度大小的信息。

图1为待测AlGaAs/GaAs异质结构外延样片的示意图。样片正面烧上一些钢球以形成欧姆接触,以便施加电压在样片内形成稳态电场。样片的背面被抛光以避免对检测激光产生散射。抛光后的背面蒸上厚度为100 Å左右的金薄层以形成等位面,这样使它既能作为二维电子气电位测量的比较基准,又能让探测激光低损耗地透过。加偏置的电极之一与样片背面金薄层相连接。

取探测激光自背面垂直于样品入射,即沿GaAs晶体的<001>方向(取为z方向)入射(其偏振位于样片表面,与任一解理棱边成45°)穿过样片,探测激光受到样片内电场的调制。在这种情况下,仅仅与光传播方向一致的电场z方向分量对电光效应有所贡献。这是纵向检测模式。

假如样片的厚度为d,对于任意给定的电场E(x,y,z),探测激光穿过该样片后,两感应主轴之间的相位延迟为

$$\Delta\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \int_0^d E_z(x,y,z) dz = K_0 V(x,y). \quad (1)$$

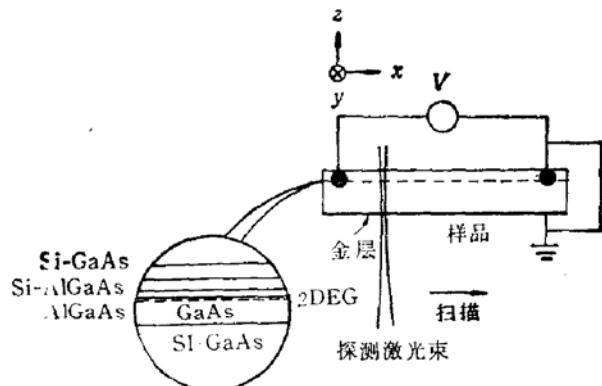


图1 AlGaAs/GaAs异质结构外延样片示意图

式中, $K_0 = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41}$ 为与 GaAs 的材料性质有关的常数, γ_{41} 为电光系数张量元.

$$\int_0^d E_z(x, y, z) dz$$

代表样片正面和背面上具有相同 x, y 坐标处的电位差 $V(x, y)$. $\Delta\Gamma$ 的存在使得出射激光光场合成电矢量的偏振状态发生了变化.

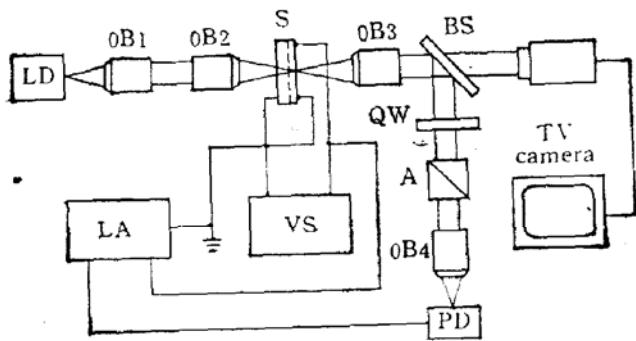


图 2 测量装置示意图

(QW) 和一偏振方向与入射探测激光偏振方向正交的偏振片——检偏器 (A) 后, 由电场强度大小所决定的探测激光偏振的变化就转变为了光强度的变化. 这个变化由光电探测器 (PD) 响应和锁相放大器 (LA) 读出. 该测得的信号即为电光信号 V_{E-0} , 它应与电光相位延迟 $\Delta\Gamma$, 亦即与电位差 $V(x, y)$ 成正比.

$$V_{E-0}(x, y) \propto \int_0^d E_z(x, y, z) dz = V(x, y). \quad (2)$$

如果让探测激光保持沿 z 方向传播, 而沿着 x 和 y 两个方向对样片作二维扫描, 则可以测得样片正表面相对于等电位的背面的电位分布. 由(2)式可知, 这个电位分布以很高的精确度代表了表面下不到 $0.1\mu\text{m}$ 处二维电子气的电位分布.

通过分束片 (BS) 的透射光部分由一电视摄像机 (TV Camera) 所接收, 以便监控测量的位置.

实 验 结 果

我们对机电部南京 55 研究所材料室分子束外延组生长的 AlGaAs/GaAs 调制掺杂异质结构外延材料样片进行了测量研究. 样片的典型结构如图 1 插图所示, 它是在半绝缘砷化镓 (Si-GaAs) 衬底上依次生长 $1\mu\text{m}$ 厚 GaAs 缓冲层, 5nm 厚的未掺杂的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 隔离层, 40nm 厚的掺 $\text{Si Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 层以及 30nm 厚的掺 Si-GaAs 电极接触层所组成. 下面以两个样片为例来说明我们的实验结果.

图 3 为对 No 523 样片按图右上角插图箭头所示方向逐点扫描测量所得的电位分布图. 图 4 为对 No 605 样片作类似测量所得的结果. 在测量时, 样片上相对的一对电极之间加上频率为 1kHz 、大小为 5V 的电压.

为了检验实验结果, 我们对已作电光测量的样片又进行了扫描电子显微镜电压衬度测量. 该技术基于二次电子发射的强度强烈依赖于样片表面电位的原理. 高电位区二次

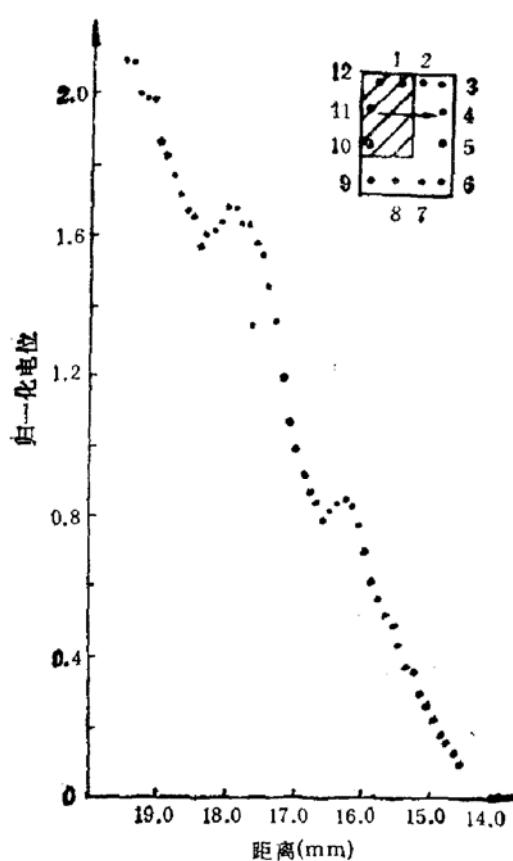


图3 No. 523 样片(2DEG) 电位分布

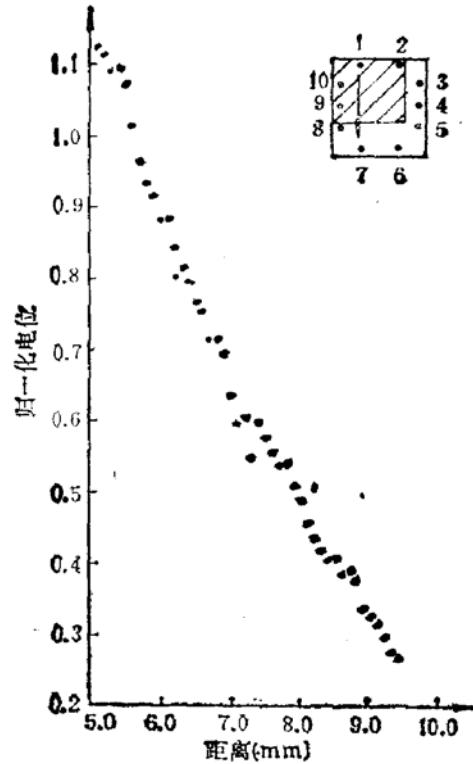


图4 No. 605 样片(2DEG) 电位分布

电子发射强度弱,因此在衬度像中显得较暗;低电位区二次电子发射强度较强而较明亮。由此可以区分表面电位之高低。

图5(见图版I)所示为No. 523样片阴影部分(见图3右上角插图)的扫描电子显微镜电压衬度像相片(见图版I)。在进行观察时,电极11和电极4之间加反向3V直流电压(电极11为零电位)。因为与电光测量时施加电压的方向相反,所以相片中亮区应对应于电光测量所得电位曲线中电位较高的部分。图6(见图版I)所示为No. 605样片在图4右上角插图所示阴影部分的扫描电子显微镜电压衬度像相片(见图版I)。在进行观察时,电极1与电极7之间加正向4V直流电压。

讨 论

下面,对电光测量结果和扫描电子显微镜衬度测量结果进行分析比较和讨论。

首先,由图3可见, No. 523 样片电位分布曲线前3mm左右范围内,其中前1mm左右基本上呈线性下降,接着出现了一个电位突变,然后是较前为陡峭些的电位下降。而图5所示的该样片电光测量区域对应的扫描电镜电压衬度像的情况是:样片左半部衬度像的亮度基本上是均匀的,这与图3电位曲线第一个线性下降段相一致。接着,衬度像中出现了亮度的突变区,它与电位曲线的突变部基本对应。衬度像中右部的一片亮度大致均匀的暗区则与电位曲线中部较前陡峭些的线性下降部分相对应。当不加偏置时样片该区域的扫描电镜电压衬度像示于图7(见图版I)。它亮度均匀变化,无结构,扫描测量区

表面未见划痕或别的明显损伤。

其次,再看一下 No 605 样片的情况。图 4 所示的该样片的电位分布曲线,在所测量的约 4.5mm 的范围内基本上呈线性下降,而对应的扫描电镜电压衬度像在测量区域内亮度基本上均匀变化而无突变区域,这由图 6 清楚可见。因此,与电光测量的结果有很好的对应。对于这两个样片其他区域以及对别的样片所进行的电光扫描测量及电压衬度像观察,得到的结果基本相同。

对所示例的两样片用范德堡法进行霍耳测量所得的结果为:

No 523 样片 电子浓度 $2.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ (RT), $1.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ (77K)

迁移率 $1.02 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ (RT), $9.17 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ (77K)

No 605 样片 电子浓度 $2.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ (RT), $1.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ (77K)

迁移率 $3.36 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ (RT), $5.25 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ (77K)

由所列数据可见,电光测量电位曲线线性好、无突变,扫描电镜电压衬度测量像亮度均匀变化、无结构的 No 605 样片,其迁移率明显高于电位曲线有突变。电压衬度像亮度不均匀、有结构的 No 523 样片。对别的样片进行的霍耳测量也得到了同样的结果。

以上电光测量和扫描电镜电压衬度像观察的比较,以及和电子迁移率测量的比较表明,我们的实验结果所反映出样片材料的不均匀现象应该主要是表面下 2DEG 的效应,因为扫描电镜电压衬度测量只能说明表面附近的情况,而电子迁移率则主要是 2DEG 的贡献。2DEG 分布的不均匀可能引起电光测量电位分布曲线自线性的偏离。2DEG 的中断反映了外延生长异质结构的不完整^[4,7],这样导致电位分布的突变。有关不均匀性或非完整性形成的原因和机理,有待结合 MBE 工艺进行深入的探讨。此外,电子迁移率测量的结果还表明,局部的 2DEG 分布的不均匀,异质结构的非完整,在表示平均效果的霍耳测量数据中有一定程度的反映,但是,它不能说明这些不均匀和非完整的数量及其在样片中的位置。而我们的电光检测法很有希望成为确定这些不均匀性和非完整性的一种有效方法。这对于异质结外延材料质量的改进,高速电子迁移率器件性能的保证和成品率的提高,具有十分重要的现实意义。

由于我们所研究的外延材料结构复杂,为了进一步更精确地分析和判断各种因素,例如衬底状况等对测量结果影响的大小,有关的实验正在进行之中。

结 论

用连续波电光检测法 (CWEOP) 对 MBE 技术生长的 AlGaAs/GaAs 异质结构外延材料进行了横向均匀性的测量研究。所得的电位分布曲线反映了 2DEG 分布的均匀性,在很大程度上也反映了外延异质结构的完整性。

连续波电光检测法是一种无接触、非破坏、无干扰的光学测量方法。它具有优于 μV 级的测量灵敏度, μm 量级的空间分辨率,且设备简单、测量操作方便。这对于 MBE 或 MOCVD 技术生长的 AlGaAs/GaAs 及其他 III-V 族化合物异质结构质量的鉴定无疑是一种有力的手段。若有条件用扫描电镜电压衬度像观察配合,将使检测更具直观性。可以预计:本方法将获得广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] R. Dingle, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **33**, 665 (1973).
- [2] H. L. Störmer, et al., *Solid State Communications*, **29**, 705 (1979).
- [3] P. F. Fontein, et al., *J. Appl. Phys.*, **64**, 3085 (1988).
- [4] P. Hendriks, et al., *Semicond. Sci. Technol.*, **3**, 521 (1988).
- [5] Z. H. Zhu, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 432 (1986).
- [6] Y. H. Lo, Z. H. Zhu, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1125 (1987).
- [7] P. Hendriks, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1763 (1989).
- [8] 朱祖华,《信息光电子学基础》,浙江大学出版社,1990年。

Electro-Optic Measurements of Homogeneity of AlGaAs/GaAs Heterostructure Epitaxial Materials

Zhu Zuhua, Ding Chun, Ding Guilan, Wang Shuoqin

Department of Information and Electronics Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310008

Shen Haoying, Peng Zhengfu and Wang Cuilian

Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016

(Received 28 September 1991; revised manuscript received 13 May 1992)

Abstract

The continuous wave electro-optic probing (CWEOP) method was applied to the measurements of the homogeneity of AlGaAs/GaAs heterostructure epitaxial materials. The principle, experimental apparatus and results of the method are given. The SEM voltage contrast technique was used to observe the epitaxial wafer measured. It is found that the results of electro-optic measurement have been confirmed by the SEM voltage contrast technique. At last, the experimental results are discussed and the prospect of application of the electro-optic method is given.

PACC: 7820J, 7340L, 8170C, 4206F