

连续波电光检测法用于检测超薄层 异质结外延材料均匀性的研究*

苏小元

朱祖华

(苏州大学工学院电子系 苏州 215006)

(浙江大学信息与电子工程系 杭州 310027)

摘要 本文以连续波电光检测法(CWEOP)为基本原理,设计完成了自动电光检测系统,并采用锁相放大技术,对超薄层异质结外延材料进行了电场分布的测试,由此对其均匀性进行了评估。通过实验探讨了超薄层异质结外延材料 2DEG 分布不均匀的电光检测标准、最佳测试条件等,并对影响测量结果的因素进行了分析。本方法的突出优点是能够无损地对超薄层异质结外延材料不均匀的 2DEG 进行定位。

PACC: 0630L, 0760, 7820J, 6855, 7320

1 引言

众所周知,由分子束外延(MBE)和金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术生长的调制掺杂异质结材料已广泛用于制作高速电子器件,如高速电子迁移率晶体管(HEMT)。而异质结生长的好坏直接决定了器件的优劣和器件成品率的高低。因此,对于异质结材料质量的评估具有十分重要的意义。

由于作为光电器件的超薄层异质结材料具有线性电光效应,而光电器件中电场分布问题是一个基本问题,许多材料和器件的特性和现象都和它直接相关,因此基于线性电光效应的连续波电光检测法通过测试超薄层异质结外延材料的电场分布来评估其均匀性是一种有效并且可靠的手段。

采用连续波电光检测法评估超薄层异质结外延材料均匀性,其具体方法为利用连续波激光器作光源,用锁相放大技术测量由电场引起的激光偏振特性的变化,通过对待测样品的空间扫描,测定其中的电场分布。该种方法具有装置简单、测量方便、灵敏度高、分辨率好等特点及不接触、非破坏、无干扰等的优点。

采用该种方法,我们对南京 55 所生长的超薄层异质结外延材料进行了均匀性检测,通过实验定义超薄层异质结外延材料二维电子气(2DEG)分布不均匀的电光测试度量标准,讨论了本方法的最佳测试条件。本课题完成了自动测试系统的设计,改变了以往手动测试的

* 国家自然科学基金资助项目

苏小元 1970 年生,硕士,现在苏州大学工学院电子系工作

朱祖华 1937 年生,教授,博士生副导师,连续波电光检测法的发明人

1996 年 4 月 25 日收到初稿,1996 年 9 月 6 日收到修改稿

状况,提高了测试效率.

2 实验

连续波电光检测技术是基于电光晶体的线性电光效应,即当在一定方向偏振的探测激光通过加了偏置电压的电光晶体时,其偏振状态因快光和慢光之间的相位将发生变化(即晶体光学介电性发生变化).利用一对正交的偏振器和一个四分之一波片可以将这种由于电场引起的探测光相位变化转换为光强度的变化.光强变化为光电探测器所接收,最后由锁相放大器读出相应的电光信号.由3m点群晶体的电光性质可知,当探测激光沿z方向背射进入样品时,仅产生横向电光效应.

对于图1所示样品,探测激光主要是x方向场分量的贡献,所测得的电光信号与其成正比,可表示为:

$$\begin{aligned} V_{E=0}(x, y) &\propto \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \int_0^d E_2(x, y, z) dz \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} V(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \frac{x}{L} V = KV \end{aligned}$$

这里 $\int_0^d E(x, y, z) dz = V(x, y)$ 为表面电位,代表探测激光在出射的(x, y)处样品表面的电位; d 为样品厚度; λ 为激光波长; n_0 为样品的折射率; γ_{41} 为样品的电光系数; L 为对样品施加电压的两电极之间的距离; x 为测量位移; V 为一定频率一定幅值的均匀外加电场.

这样通过探测激光在样品不同部位扫描测得电光信号即反映了样品在该点的表面电位,连续测量其表面电位就可得到样品的表面电位分布曲线.在理想情况下样品的表面电位应呈线性分布.

理论分析表明,2DEG 分布的不均匀性可能引起电光测量电位分布曲线自线性的偏离,2DEG 的中断将会导致电位分布曲线的突变,这反映了外延生长异质结构的不完整.因而通过本方法测得的电位分布曲线反映了外延生长异质结构的完整状况.测得曲线线性度发生变化的位置即为2DEG 分布均匀性发生变化的位置,亦即外延生长异质结构完整状况发生变化的位置,因而本方法能够定位检测超薄层异质结外延材料的均匀性状况.

本课题中测试的样品均为AlGaAs/GaAs,由于其二维电子气(2DEG)的存在,势阱中电子受杂质影响很小,因此迁移率很高,特别是在低温下.因而用其制作的高电子迁移率管(HEMT)有独特的优异性能,适合超高速、毫米波超低噪声应用.这种样品制备的原材料为7N的Ga、As和6N的Al,高纯Si为掺杂剂,衬底为LEC法SI-GaAs(001)单晶片.样片的外形一般为长方形,长、宽都在15mm以内,样品背面蒸了金,样品正面四周焊有钼电极,背面也焊有一个电极,都用于对样片施加偏置信号.

这种HEMT用的AlGaAs/GaAs超薄层异质结外延材料的结构为:

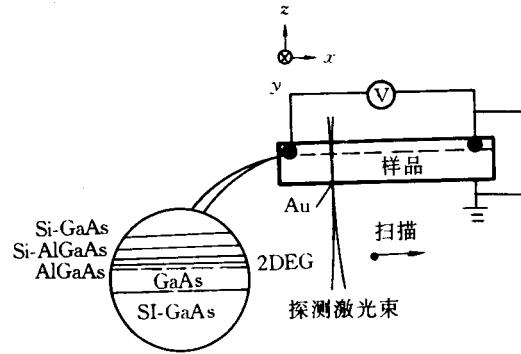


图1 AlGaAs/GaAs异质结外延材料样品示意图

$\text{Si:GaAs } 20\text{nm} \ 2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ /Si-AlGaAs $35\text{nm} \ 2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ /AlGaAs 3nm /Si-Planar Doped $4 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$ /AlGaAs 3nm /GaAs $1\mu\text{m}$ undoped/SI-GaAs substrate. 实验原理框图见图 2.

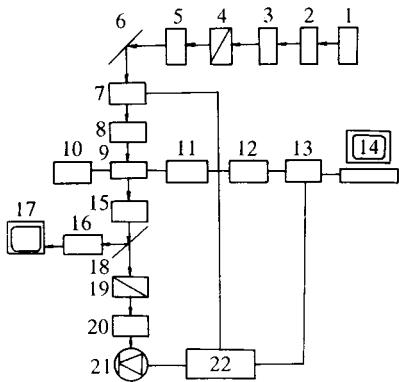


图 2 实验原理框图

1 激光器电源; 2 激光器; 3、8、15、20 聚焦物镜; 4 起偏器; 5 四分之一波片 6 全反镜; 7 斩光器; 9 待测样品; 10 波形发生器; 11 机械接口; 12 电机; 13 接口线; 14 计算机; 16 监视器硅靶; 17 监视器屏幕; 18 半透半反镜; 19 检偏器; 21 光电探测器; 22 锁相放大器.

为 $6\mu\text{m}$, 因此测试的空间分辨率能达到 $6\mu\text{m}$. 在实验中首先测试样品的电光信号, 然后测试在同一纵向位置的斩光信号分布, 测出的一组数据经处理后得到归一电位分布: 归一电位 = (电光信号一本底噪声)/斩光信号. 实验中通过对在光路中插入了斩光器后测得的斩光信号的测试, 并对之与电光信号作相应的处理后得到归一电位, 是为了减少甚至消除噪声, 以提高信号的信噪比, 保证测量的精度. 调节样品架高度, 在不同的纵向位置重复上述实验.

3 实验结果及其分析

3.1 异质结外延材料 2DEG 分布不均匀度量标准

测试样品为 AlGaAs/GaAs 异质结材料外延片样品, 其测试条件为: 施加幅度 $V=5\text{V}$, 频率 $f_v=1\text{kHz}$ 的方波信号; 斩光器外孔参考输入频率为 $f_{LC}=520\text{Hz}$. 扫描方向自右向左, 与施加偏置电压方向平行. 扫描范围: 第 1 扫描线从样品位置 $(4\text{mm}, 2\text{mm}) \sim (14\text{mm}, 2\text{mm})$, 调节架高度读数为 6mm ; 第 2 扫描线从 $(4, 4) \sim (14, 4)$, 调节架高度读数为 8mm .

从图 3(a)中可以看出在第 1 根扫描线的 $(4+)0.2 \sim 5.4\text{mm}$ 之间电光测量电位分布曲线有突变, 因为 2DEG 的中断会导致电位分布曲线的突变, 所以该图可以定位该外延生长异质结的不完整区域在 $(4.2\text{mm}, 2\text{mm}) \sim (9.4\text{mm}, 2\text{mm})$; 但从曲线可以看出, 该区域的其余部分仍有极好的线性度, 电场分布均匀变化. 第 2 扫描线(图 3(b))前半段的线性情况较理想, 前 6mm 线性度较好, 后 4mm 的曲线斜率变小, 反映了该区域 2DEG 分布有变化.

实验中首先须对激光进行准直, 1. $3\mu\text{m}$ InGaAsP 激光器工作电流为 50mA , 其激光远场模式呈单横模, 满足高斯分布, 经 10 倍准直透镜准直后形成直径 4mm 左右的平行激光束, 要求准直光束在 1m 以上的工作距离内保持光斑直径不变. 实验中监视系统所用的弱光摄像机采用硅靶作为摄像管, 与其连接的监视器采用视频频率扫描信号. 所用 12 倍透镜既是被测样品的准直物镜, 又同 4 倍透镜一起构成成像复合系统, 使被测样品在硅靶上形成实像, 以便监视. 调通光路并调节好起偏器、检偏器的偏振方向以及四分之一波片的光轴位置后, 通过监视器确定被测样品的扫描位置, 即可开始自动测试.

启动自动测试程序, 由于电机每走一步, 样品架的拖板走 $2.5\mu\text{m}$ 而一个待测样品的区域往往在 $5 \sim 10\text{mm}$ 之间, 这样如果电机走一步测一点则需要测数千个点, 而由于锁相放大器读数的稳定常常需要 10 秒左右, 这样样品每扫描一次将用数个小时, 因此在程序中设计电机每走几十步测一次, 由于入射到样品上的光探针直径

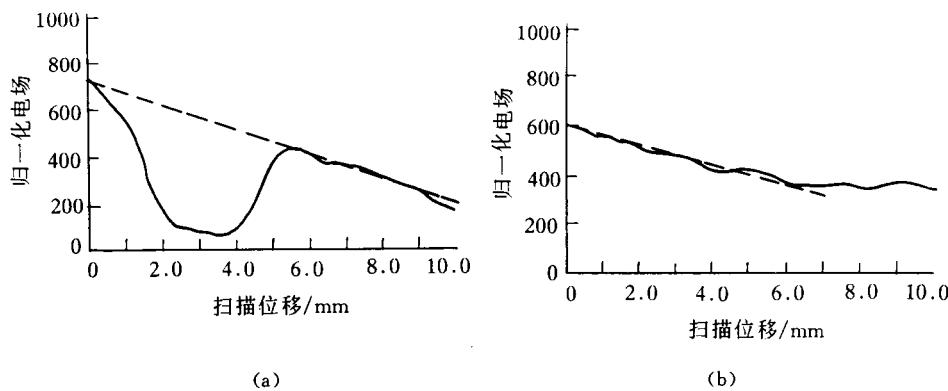


图 3 与扫描方向平行加偏置电压时测得的电场分布曲线

当所加交流信号方向与扫描方向垂直时(除所加电压方向外其它测试条件不变),从理论上说如果 2DEG 分布是均匀的,则该扫描方向的电场分布是等电势的,实验结果,对应于平行偏置下电场分布有突变的区域垂直偏置下电场分布并不呈良好的等电势(见图 4(a)),而在平行偏置时电场有较好的线性分布的区域(扫描线 2)在垂直偏置时电场分布呈较好的等势分布(见图 4(b)).

从实验可得,连续波电光检测法评估超薄层异质结外延材料 2DEG 分布均匀性的度量标准为:当外加电场施加的方向与逐点扫描测试的方向平行时,材料表面的电场分布呈均匀的线性,在电场分布曲线的线性度发生变化的位置即为材料 2DEG 分布均匀性发生变化的位置;当外加电场施加的方向与逐点扫描测试的方向相垂直时,材料表面的电场分布呈较好的等电势分布.

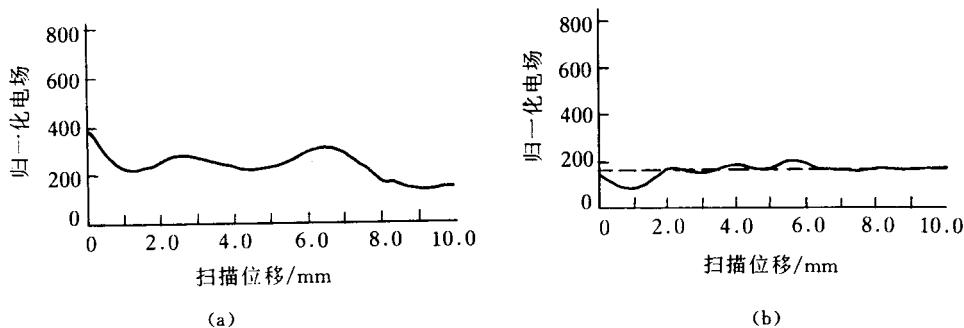


图 4 与扫描方向垂直加偏置电压时测得的电场分布曲线

3.2 关于电光检测最佳条件选择的讨论

实验中对超薄层异质结外延材料均匀性评估常用 5~10V 的偏置交流电压,由于实验时测量的电光信号是微弱信号,当待测样品两端所加电压过小时,由测试系统检测到的电光信号值更小,因为电光信号与偏置电压成正比,这样 μ V 数量级的电光信号很可能淹没在噪声中,给测试工作带来不便;由于 5~10V 是 TTL 晶体管常用的工作电压,给待测样品施加高于 10V 的偏置电压,势必要引入更多的服务电路,这些电路的引入将同时给系统引入噪声;另外,由于用超薄层异质结外延材料制作的高速电子迁移率器件(HEMT)也大多工作在这个电压范围内.因此,用 5~10V 的偏置电压更适合材料的真实工作性能.

实验中常用的偏置频率是 $1\sim 5\text{kHz}$,超过 5kHz 的频率将对锁相放大器提出更高的要求,而低于 1kHz 的频率更接近于 50Hz 的供电频率或其低位倍频,将给系统带来供电电源的噪声;斩光器的频率常常选在 $100\text{Hz}\sim 1\text{kHz}$ 之间,这是因为一方面为了尽量避免引入噪声,另一方面也因为斩光器本身频率有极限。

电极的排布一般不会影响总的测试结果,但测试时对需加偏置电压的电极的选择的好坏对测试仍有一定的影响。因为超薄层异质结外延材料在加偏置后的电场分布实际上是加偏置后电极间的电力线分布情况,所以当待测样品有多对电极时选择中间位置的电极施加偏置比选择位于边缘的电极间加电压有更好的电场分布情况。在测试中,沿着加有偏置电压的电极之间的方向所得的曲线也有着更好的线性度。

3.3 影响测量结果因素的分析

3.3.1 注入载流子对折射率的影响

当注入载流子后,载流子在各个部位分布不均将引起折射率的变化。由于对于 Al-GaAs/GaAs 样片的自由载流子等离子体色散效应和能带填充效应等引起的折射率变化最大约为($0.03\sim 0.06$)量级,由计算载流子引起的电光信号为 5%,因此,在我们的测量中,载流子效应的影响是次要的,决定测量结果的主要是电场引起的双折射效应对探测激光产生的调制作用。

3.3.2 样品各层之间组分不同的影响

样品含 Al 量的不同,引起折射率和电光系数的差别,相差约为 5.7%,所以我们在测试中忽略其对测试结果的影响,认为这些参数相同。另外我们还假设材料在宏观上是均匀的,没有影响折射率和电光系数的宏观缺陷存在。

4 结论

超薄层异质结外延材料作为高速电子迁移率晶体管(HEMT)材料是现代科技发展的需求,同时对这种器件生成质量的检测方法的要求也越来越高,连续波电光检测法(CWEOP)正是适合这种需求的无损伤、高精度的新颖有力的检测手段。连续波电光检测法的原理基于线性电光效应。所谓线性电光效应是指电介质(如超薄层异质结外延材料)中,其折射率的变化与外加电场的振幅成正比关系;CWEOP 正是通过对介质表面的电场分布实现对超薄层异质结外延材料均匀性进行评估的。作者用自己设计的自动电光检测系统及锁相放大技术对超薄层异质结外延材料进行了电场分布的测试,并对其均匀性进行了评估。通过实验得出了连续波电光检测法评估超薄层异质结外延材料 2DEG 分布均匀性的度量标准为:当外加电场施加的方向与逐点扫描测试的方向平行时,材料表面的电场分布呈均匀的线性,在电场分布曲线的线性度发生变化的位置即为材料 2DEG 分布均匀性发生变化的位置;当外加电场施加的方向与逐点扫描测试的方向相垂直时,材料表面的电场分布呈较好的等电势分布。本文还讨论了连续波电光检测法的最佳测试条件,对影响测量结果的因素作了分析。本方法的一个突出的优点是能够定位超薄层异质结外延材料 2DEG 不均匀性所在的位置,而自动测试系统的使用使本方法更好地发挥它的长处。

参 考 文 献

- [1] D. A. B. Miller, "Optoelectronic Applications of Quantum Wells", Optics & Photonics News, Feb., 1990, 7~15.
- [2] Z. H. Zhu *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1986, **49**(8): 432~434.
- [3] Y. H. Lo, Z. H. Zhu *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1987, **50**(17): 1125~1127.
- [4] Z. H. Zhu, Y. H. Lo, M. C. Wu *et al.*, Electrochemical Social, 1989, **136**(10): 3115~3123.
- [5] 朱祖华,王硕勤,等,半导体学报,1992, **13**(7): 417~423.
- [6] 朱祖华,信息光电子学基础,杭州:浙江大学出版社,1990年7月,第七章,395~406.

Research on Growth Uniformity of Ultrathin Heterojunction Epitaxial Wafer Materials Using CW Electro-optic Probing Technique

Su Xiaoyuan

(Electronic Engineering Department, Suzhou University, Suzhou 215006)

Zhu Zuhua

(Information & Electronic Engineering Department, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Received 25 April 1996, revised manuscript received 6 September 1996

Abstract As one of the High Electronic Mobility Transister materials, ultrathin heterojunction epitaxial wafer is in plenty of use. The CW electro-optic probing (CWEOP) technique used to evaluate the quality of material growth, is very favorite for scientific researchers because of its non-damage, high-resoluation and other superior qualities. With the self-made automatic opto-electronic probing system and lock-in amplifier technique, the auther has detected the electronic distribution of some ultrathin heterojunction materials and investigated the characteristics of the materials. The results of experiments indicate that the distribution of electric field of the material is related to that of it's two-dimensional electron gas (2DEG), this detection system can locate the non-linar 2DEG distribution zone of the materials. It shows that the CWEOP is a reliable method for investigation of characteristics of ultrathin heterojunction wafer materials.

PACC: 0630L, 0760, 7820J, 6855, 7320