

GaAs、Al_xGa_{1-x}As 外延层少子扩散长度 及霍耳迁移率的无接触测试*

王宗欣^a 褚幼令^b

(复旦大学 ^a 电子工程系 ^b 物理系 上海 200433)

摘要 用微波介质波导法无接触测试了生长在半绝缘衬底上的 GaAs、Al_xGa_{1-x}As 外延层的微波光电导谱和横向磁阻,给出了从微波光电导谱计算少子扩散长度和从横向磁阻计算霍耳迁移率的方法,并且由此算得外延层的少子扩散长度和霍耳迁移率.本方法对被测样品的几何形状和尺寸无特殊要求,测试区域小于 $5 \times 5 \text{mm}^2$,具有无损伤、不污染的优点,并配有微机控制,测试迅速方便.

PACC: 1300, 4210, 4250, 7330Z

1 引言

GaAs, Al_xGa_{1-x}As 外延材料是制作砷化镓微波器件、光电子器件的基础,而外延层材料的一些重要参数如少子扩散长度、霍耳迁移率等是材料质量的表征,测试外延层材料的这些参数无论对于材料研究、器件制作以及材料和器件的质量监控都是极为重要的^[1~3].但是由于外延层的厚度小于 $10 \mu\text{m}$,有的甚至只有 $1 \sim 2 \mu\text{m}$,按常规的有接触法测试这些参数显然并不容易,由于有接触法需要引进测试电极,并需保证接触电极具有较小的欧姆接触电阻后才能进行测试,显然在外延层上做这样的测试是很麻烦的事.此外有接触法还破坏了被测材料,使这些材料被测后不再能用于制作器件.

探索无接触法测试材料的霍耳迁移率已有许多年的历史,许多作者对测试方法和计算方法进行了研究,近期如 Ong, Byung-ki Na 等用微波腔体法测试和计算了 n-Si、ZnO 粉末的霍耳迁移率,但有关外延材料的无接触测试的报道还不多见,而且如用微波腔体法,样品的大小仍须受腔体尺寸的限制.

本工作采用微波介质波导法,设计了相应的探头,可以无接触测试 GaAs, Al_xGa_{1-x}As 外延材料的少子扩散长度、霍耳迁移率等材料参数,测试时外延材料(生长在半绝缘衬底上)尺寸不受限制,放入测试架后可以自由移动,因此可以比较被测外延层上各区域的差异.本文还讨论了相应的计算方法.用本方法测试和计算的结果比较接近常用的有接触法测试的

* 国家自然科学基金资助项目

王宗欣 男,1940年生,教授,从事专业:微波半导体器件和无线电物理

褚幼令 女,1941年生,副教授,从事专业:半导体材料测试

1995年3月24日收到初稿,1995年6月29日收到修改稿

结果.

2 GaAs, Al_xGa_{1-x}As 外延材料的微波光电导谱和少子扩散长度

所测的样品是用 MBE 方法生长在半绝缘 GaAs 衬底上的 GaAs, Al_xGa_{1-x}As 外延层,

外延层的厚度为 3~10μm, 由文献[6]所示的实验装置, 配以微机控制, 将样品放入测试平台后, 单色仪输出的光波长自动地步级变化, 其变化范围可以选择, 例如自 1.0μm 变到 0.6μm, 由于外延层的本征光吸收产生相应于各光波长的光电导并引起微波传输系数的变化(ΔT), 我们可以从锁相放大器的输出得到该材料的微波光电导谱, 如图 1、图 2 所示, 其中图 1 是样品 G2 的

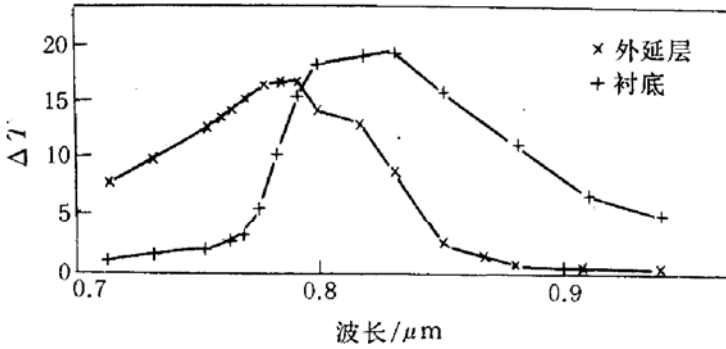


图 1 GaAs 外延层与 GaAs 衬底的微波光电导谱

GaAs 外延层和它的半绝缘衬底的微波光电导谱, 图 2 是样品 A1 的 Al_xGa_{1-x}As 外延层和它的 GaAs 衬底的微波光电导谱, 由图可见, 外延层和衬底的微波光电导谱是不一样的, 这反映了它们的少子扩散长度和表面复合速度的差异. 在图 2 中外延层受光照时的光强为衬底受光照时的光强的三分之一, 但外延层的光电导比衬底大得多, 这表明外延层有高得多的光灵敏度. 可以用文[6]所示的方法

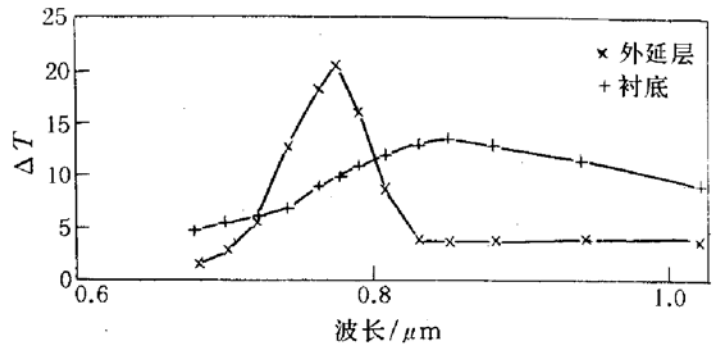


图 2 Al_xGa_{1-x}As 外延层与 GaAs 衬底的微波光电导谱 (外延层的注入光强为衬底注入光强的三分之一)

算出衬底的少子扩散长度 $L_P = 2.5\mu\text{m}$. 而对外延层而言^[1],

$$\Delta T = \frac{AL_P^2}{D_P + SL_P} \left[1 + \frac{SL_P}{D_P(1 + \alpha L_P)} \right] \quad (1)$$

其中 A 为与光波长无关的常数; P_P 为少子扩散长度; S 为外延层的表面复合速度; D_P 为少子扩散长度; α 为对应的光吸收系数.

可以用拟合方法或者直接从微波光电导谱中的峰值位置求出 L_P , 还可以从微波光电导谱中拟合得到 S 、Al_xGa_{1-x}As 外延材料的

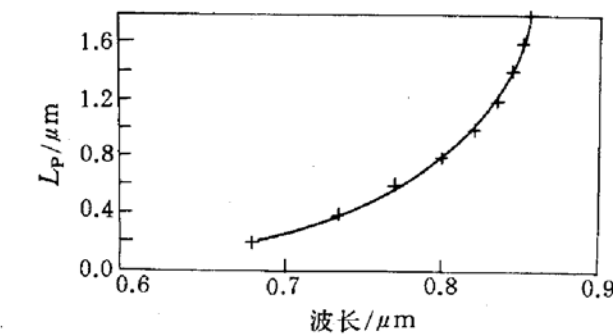


图 3 外延层厚度 $l_1 = 4\mu\text{m}$ 时微波光电导谱中峰值对应的光波长与少子扩散长度 L_P 的关系

组分 x 以及能隙宽度 E_g , 图 3 所示的便是外延层厚度 $l = 4\mu\text{m}$ 时, 微波光电导谱中峰值位置对应的光波长与扩散长度的关系, 从图中可以直接根据峰值位置查得相应的扩散长度. 表 1 是四块 GaAs, Al_xGa_{1-x}As 外延层样品的少子扩散长度, 组分等参数的计算结果.

表 1 由微波光电导谱求得的少子扩散长度 L_p , 带隙宽度 E_g , 组分 x
 G_1, G_2 为 GaAs 外延层样品, A1, A2 为 Al_xGa_{1-x}As 外延层样品. l_1 为外延层厚度.

	G1	G2	A1	A2
$l_1/\mu\text{m}$	9.61	8.12	3.58	3.58
$L_p/\mu\text{m}$	0.6	0.7	1.5	2.0
E_g/eV			1.48	1.49
x			0.050	0.055

3 GaAs、Al_xGa_{1-x}As 外延层霍耳迁移率的无损检测

早期的研究已经指出^[7]用微波法测量和计算得到的霍耳迁移率和直流法确定的值是同一个数量级,文[8]报道了用微波法测量硅薄片样品的横向磁阻,讨论了与样品晶向有关的霍耳迁移率的计算方法.由于本文中的样品是生长在 GaAs 半绝缘衬底上的 GaAs, Al_xGa_{1-x}As 外延层,当样品置于探头中后,设外延层表面为 xy 平面,外加磁场为 z 方向,即垂直于外延层表面,若介质波导中传输的是 E_{11}^* 模,则外加磁场使样品中的高频电流发生偏转,从而引起通过样品的微波传输系数发生变化(ΔT),由 ΔT 可算出对应的由外加磁场引起的样品电阻率的变化 $\Delta\rho$,当衬底是半绝缘材料时,可近似认为通过样品的微波损耗主要是由外延层所引起的,因此算得的电阻率变化 $\Delta\rho$ 是外延层的电阻率变化,即由 $\Delta\rho$ 算得的横向磁阻是外延层的横向磁阻,并因此可算得外延层的霍耳迁移率和载流子浓度.

3.1 计算方法

设外加磁场为零时,外延层的电阻率为 ρ_0 ,磁感应强度为 B 时,相应的外延层的阻率为 ρ_B ,令 $\Delta\rho = \rho_B - \rho_0$,则

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0 B^2} = \mu_B^2 [(T_M' A' - 1) + (1 - 3T_M' B')(il + jm + kn)^2 - T_M' C'(i^2 l^2 + j^2 m^2 + k^2 n^2)] \quad (2)$$

$$T_M' = \frac{\pi(3r + 3/2)!(r + 3/2)!}{[(2r + 3/2)!]^2} \quad (3)$$

其中 r 为由散射机制决定的散射因子.

$$A' = \frac{(2k + 1)(k^2 + k + 1)}{k(k + 2)^2} \quad (4)$$

$$B' = \frac{2k + 1}{(k + 2)^2} \quad (4)$$

$$C' = \frac{(2k + 1)(k - 1)^2}{k(k + 2)^2} \quad (6)$$

i, j, k 是单位电流密度矢量在立方晶系坐标中的各分量; l, m, n 则是单位磁感应强度矢量的分量; k 是等能面纵轴有效质量与横轴有效质量之比,对于位于 n 型 GaAs 外延层样品能带主谷中的电子, $k=1$,因此(4)~(6)式为 $A'=1, B'=1/3, C'=0.1\mu_B$ 与电子的霍耳迁移率 μ_{Hn} 的关系式为

$$\mu_B = \frac{2k+1}{3}\mu_{Hn} = \mu_{Hn} \quad (7)$$

μ_{Hn} 与电子迁移率的关系为

$$\mu_{Hn} = \gamma_H \mu_n = \frac{\sigma \gamma_H}{en} \quad (8)$$

其中 γ_H 为霍耳因子,它是磁场强度,温度,掺杂浓度和补偿度的函数,由文[9],当环境温度 $T=300\text{K}$ 时, $\gamma_H=1.15$.

所以对于晶向为[111],[100]或[110]的 GaAs 样品(2)式可写为:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0 B^2} = [T_M' A' - 1] \mu_{Hn}^2 \quad (9)$$

代入(8)式则为:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0 B^2} = [T_M' A' - 1] \gamma_H^2 \mu_n^2 \quad (10)$$

其中对于声学形变势散射, $r=-1/2, T_M'=4.0$,

$$\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_0}} = 1.73 \gamma_H \mu_n B \quad (11)$$

而对于光学形变势散射, $r=1/2, T_M'=3.41$,

$$\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_0}} = 1.55 \gamma_H \mu_n B \quad (12)$$

更精确的计算,还应考虑上述计算公式中的一些参数与磁感应强度的关系.

有关 $B=0$ 及各种磁感应强度时样品外延层中的电导率可由以下方法算得,设外延层与衬底的电导率分别为 σ_1, σ_2 ,介电常数分别为 ϵ_1, ϵ_2 ,厚度分别为 l_1, l_2 (见图4),介质波导的宽为 a 、高为 b ,则微波透过样品的传输系数 T 可表示为

$$T = t_1 t_2 t_3 e^{-\gamma_1 l_1} e^{-\gamma_2 l_2} \left(\frac{1}{1 - R_1 R_2 t_2 t_4 e^{-2\gamma_1 l_1} e^{-2\gamma_2 l_2}} + \frac{R_1 R_2 e^{-2\gamma_1 l_1}}{1 - R_1 R_2 e^{-2\gamma_1 l_1}} - \frac{R_2 R_3 e^{-2\gamma_2 l_2}}{1 + R_2 R_3 e^{-2\gamma_2 l_2}} \right) \quad (13)$$

$$\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1, \gamma_2 = \alpha_2 + j\beta_2$$

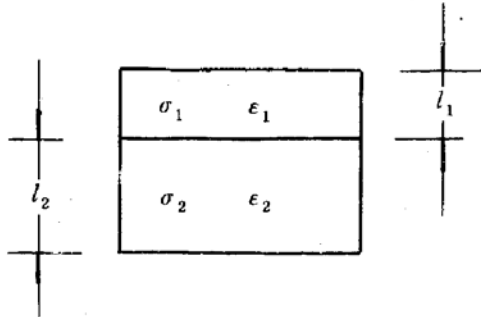


图4 样品示意图

$$\alpha_1 = \sqrt{\omega\mu_0(\sqrt{\omega^2\epsilon_1^2 + \sigma_1^2} - \omega\epsilon_1)}/2$$

$$\beta_1 = \sqrt{\omega\mu_0(\sqrt{\omega^2\epsilon_1^2 + \sigma_1^2} + \omega\epsilon_1)}/2$$

$$\alpha_2 = \sqrt{\omega\mu_0(\sqrt{\omega^2\epsilon_2^2 + \sigma_2^2} - \omega\epsilon_2)}/2$$

$$\beta_2 = \sqrt{\omega\mu_0(\sqrt{\omega^2\epsilon_2^2 + \sigma_2^2} + \omega\epsilon_2)}/2$$

$$t_1 = \frac{2\gamma_d}{\gamma_1 + \gamma_d}, t_2 = \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}, t_3 = \frac{2\gamma_2}{\gamma_2 + \gamma_d}, t_4 = \frac{2\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}$$

$$R_1 = \frac{\gamma_1 - \gamma_d}{\gamma_1 + \gamma_d}, R_2 = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}, R_3 = \frac{\gamma_2 - \gamma_d}{\gamma_2 + \gamma_d}$$

其中 $\omega=2\pi f$, f 为微波频率; μ_0 为 GaAs 材料的磁导率; $\gamma_\alpha = jk_z$, k_z 为 E_{11}^y 模在介质波导中

沿 z 方向传输常数. 所以由(13)式可以根据测得的传输系数 T 及其变化算得外延层电导率的相对变化.

3.2 霍耳迁移率的测量和计算结果

表 2,3 是一组 GaAs 外延层(表中 G1、G2 样品)、Al_xGa_{1-x}As 外延层(表中 A1、A2 样品)的 μ_{Hn} 值的测量和计算结果, 如取 $\gamma_{\text{H}}=1.15$, 则可算得电子漂移迁移率 μ_n, σ_{10} 是磁感应强度为 0 时测得的外延层电导率, 由 $\mu_{\text{Hn}}, \sigma_{10}$ 可算得外延层的载流子浓度 n (见(8)式), 表中 μ_n' 及 n' 则是由 Van de Pawn 方法测得的载流子迁移率和浓度. 由于介质波导及探头中的不连续性, 实际传输的除 E_{11}^y 模以外, 还可能存在一些高次模, 因此给本方法的计算结果带来误差; 但最主要的是两种独立的测试方法和算法, 其结果不可能完全一致, 例如 Upadhyayula 等人^[10] 在 Gunn 效应型结构上进行磁阻测量所确定的外延层平均载流子浓度与霍耳效应测量得到的平均载流子浓度相比, 两者可相差一个数量级. 但通过大量的测试和比较, 无接触法的测试结果是可以与有接触法通用的.

表 2 不同磁场强度时外延层霍耳迁移率测量结果

$B/10^{-4}\text{T}$	G1, $\mu_{\text{Hn}}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	G2, $\mu_{\text{Hn}}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	A1, $\mu_{\text{Hn}}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	A2, $\mu_{\text{Hn}}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
3250	3054	6207	3138	5080
4600	2650	5843	2855	4395
5800	2601	5713	2860	4100
6850	2552	5457	2773	3673
7800	2468	5343	2709	3600
8450	2445	5274	2619	3554
8800	2348	5373	2729	3412

表 3 外延层的电子迁移率和电子浓度

	G1	G2	A1	A2
$l_1/\mu\text{m}$	9.61	8.12	3.58	3.58
$\sigma_{10}/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$	0.486	2.65	0.394	0.194
$\mu_n/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	2044	4842	2410	3248
$\mu_n'/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	2186	3534		
n/cm^{-3}	1.43×10^{15}	3.42×10^{15}	1.02×10^{15}	3.73×10^{14}
n'/cm^{-3}	1.6×10^{14}	9.95×10^{14}	1.1×10^{16}	

4 结论

本文所提及的方法可以无接触测试生长在半绝缘衬底上的 GaAs, Al_xGa_{1-x}As 等外延材料的少子扩散长度和横向磁阻, 通过计算可以得到外延材料的载流子迁移率和载流子浓度, 并且霍耳迁移率的计算结果基本上与常规的 Van de Pawn 方法测量结果相近, 因此作为一种新的无损检测方法, 对于材料研究、器件质量监控是较为有用的.

致谢 作者感谢上海冶金所李爱珍研究员,陆飞副研究员为本工作提供了测试样品.

参 考 文 献

- [1] Zong-xin Wang and You-ling Chu, Solid-State Electronics, 1993, **36**:669.
- [2] G. Brunthaler, G. Stoger and A. Aumayr, Appl. Phys. Lett., 1993, **64**:1635.
- [3] Shingo Katsumoto, Fumio Komori, Naokatsu Sano and Shun-ichi Kabayashi, Solid State Communications, 1989, **71**:441.
- [4] N. P. Ong, Wolfgang Bauhofer and Ce-jun Wei, Rev. Sci. Instrum, 1981, **52**:1367.
- [5] Byung-ki Na, M. Albert Vannice and Arden B. Walters, Physical Review B, 1992, **46**(12):267.
- [6] 褚幼令,王宗欣,刘瑞林,左文德,半导体学报,1990, **11**:751.
- [7] H. E. M. Barlow and S. Kataoka, Proc. IEEE, 1958, **105B**:53.
- [8] 褚幼令,王宗欣,许珏,固体电子学研究与进展,1992, **12**:141.
- [9] J. S. Blakemore, J. Appl. Phys., 1982 **53**:R123.
- [10] L. C. Upadhyayula, R. E. Enstrom, C. J. Nuese, J. F. Wilhelm and J. R. Appert, IEEE Trans. Electron Devices, 1976, **ED-23**:1348.

Contactless Measurement of Minority Carrier Diffusion Length and Hall Mobility of GaAs and Al_xGa_{1-x}As Epitaxial Layer

Wang Zongxin^a and Chu Youling^b

(^a Electronic Engineering Department and ^b Physics Department
Fudan University, Shanghai 200433)

Received 24 March 1995, revised manuscript received 29 June 1995

Abstract The microwave photoconductivity spectrum and magnetic resistance of GaAs and Al_xGa_{1-x}As epitaxial layer have been measured contactlessly by microwave dielectric waveguide method. A method for calculating the minority carrier diffusion length and Hall mobility of GaAs and Al_xGa_{1-x}As epitaxial layer is also presented. The measuring area is less than 5×5 mm² and the shape and size of the testing wafer is not specialized. So, the sample is not polluted and destructed during this test. Using a microcomputer to control this apparatus, the measuring process is more fast and convenient.

PACC: 1300, 4210, 4250, 7320Z