

n-Al_xGa_{1-x}As/n-GaAs 的特性参数研究 *

沈飚华 朱文章¹ 许淑恋

(厦门大学物理系 厦门 361005)
(1 集美航海学院 厦门 361021)

摘要 本文测了 n-Al_xGa_{1-x}As/n-GaAs 的表面光伏谱, 推导了有关计算公式, 计算了它们的能隙和组分, 得出了它们的重要材料参数。计算结果表明: 理论计算与实验结果是一致的。

PACC: 7220J, 7240, 7340L

1 引言

Al_xGa_{1-x}As 是一种重要光电材料, 它在高频微波、太阳电池^[1]等光电器件方面有重要应用。它的铝(Al)组分 x 对其材料特性有重要影响; 材料的少子扩散长度 L 和掺杂浓度等是它的重要材料参数, 对它们的测量研究, 可为器件的性能提高和材料品质的改善提供重要数据。现在研究测量这些参数的方法大部分是破坏性的, 有的则需昂贵的设备。本文采用非破坏性的、简便的表面光伏谱测量, 由推导的公式, 测定了十六种不同的样品的带隙 E_g 和组分 x , 计算了它们的表面势垒宽度 W 、势垒边界复合速度 S 、多子浓度 n_0 和少子扩散长度 L_p , 测量的 Al 组分 x 与 SEM 的测量结果基本一致。

2 原理

光子能量大于材料禁带宽度的光垂直照射材料表面时, 则会在材料体内产生光生电子和空穴。如果样品的厚度比样品的长宽小很多, 在稳态小讯号下, 可用一维近似描述光生少子的运动, 其少子连续性方程为:

$$\frac{d^2 \Delta P_{1,2}}{dx^2} - \frac{\Delta p_{1,2}}{L_{p1,2}^2} + \frac{1}{D_{p1,2}} \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助课题

沈飚华 男, 1939 年生, 教授, 长期从事半导体物理与器件物理的教学和科研, 现主要从事半导体光电性质方面的教学与科研

朱文章 男, 1962 年生, 副教授, 博士, 主要从事半导体单晶、异质结、超晶格和量子阱光电性质的研究
1994 年 10 月 11 日收到初稿, 1995 年 2 月 19 日收到修改稿

对于通常异质界面材料,其界面的反射可以不考虑,则得:

$$G(x) = \frac{1}{l}(1 - R)\beta I_o l^{-x/l} \quad (2)$$

对于 N 区,如图 1,可以得出边界条件

$$x = W \quad D_{p1} \frac{d\Delta p_1}{dx} = S_1 \Delta p_1 \quad (3)$$

$$x = d_1 \quad D_{p1} \frac{d\Delta p_1}{dx} = -S_2 \Delta p_1 \quad (4)$$

式中 W 和 d_1 分别为 N 区的表面势垒宽度和异质面 N 区的位置;下标 1 和 2 分别表示 N 区和衬底区; S_1 和 S_2 分别为 W 处和 d_1 处的界面复合速度; L_{p1} 和 D_{p1} 为 N 区的空穴扩散长度和扩散系数, l 和 R 分别为 N 区的吸收长度和反射系数; β 是量子产额,可近似取为 1.

由(1)式解得:

$$\begin{aligned} \Delta p = & -\frac{C_0}{\Delta} \left\{ \left[\sinh \frac{d_1 - x}{L_{p1}} + a_2 \cosh \frac{d_1 - x}{L_{p1}} \right] [(1 + b_1) \exp(-W/l) + (1 - b_1) \exp(W/l)] + \left[\sinh \frac{x - W}{L_{p1}} \right. \right. \\ & \left. \left. + a_1 \cosh \frac{x - W}{L_{p1}} \right] [(1 - b_2) \exp(-d_1/l) + (1 + b_2) \exp(d_1/l)] \right\} + c_0 \exp(-x/l) + C_0 \exp(x/l) \end{aligned} \quad (5)$$

$$C_0 = [I_o(1 - R)D_{p1}l]/(1/L_{p1}^2 - 1/l^2) \quad (6)$$

$$\Delta = (1 + a_1 a_2) \sinh \frac{d_1 - W}{L_{p1}} + (a_1 + a_2) \cosh \frac{d_1 - W}{L_{p1}} \quad (7)$$

$$a_1 = D_{p1}/S_1 L_{p1} \quad a_2 = D_{p1}/S_2 L_{p1}$$

$$b_1 = D_{p1}/S_1 L_{p1} \quad b_2 = D_{p1}/S_2 l$$

当 $x = W$ 得

$$\begin{aligned} (\Delta P)_w = & -\frac{C_0}{\Delta} \left\{ \left[\sinh \frac{d_1 - W}{L_{p1}} + a_2 \cosh \frac{d_1 - W}{L_{p1}} \right] \right. \\ & [(1 + b_1) \exp(-W/l) + (1 - b_1) \exp(W/l)] \\ & \left. + (1 - b_2) \exp(-d_1/l) + (1 + b_2) \exp(d_1/l) \right\} \\ & + C_0 \exp(-W/l) + C_0 \exp(W/l) \end{aligned} \quad (8)$$

由于异质面势垒高度和宽度较小,其光生电压较小,它对总表面光电压贡献很小^[2],所以总光电压可近似为 N 区表面势垒区的光生电压 V_w ^[3]

$$V_w = kT/g \ln(1 + j_w/c) \quad (9)$$

j_w 是通过表面势垒界面 W 处的电流密度,它等表面势垒区的产生电流密度 j_w' 与 W 处的扩散电流密度 j_w'' 之和

$$j_w = j_w' + j_w'' \quad (10)$$

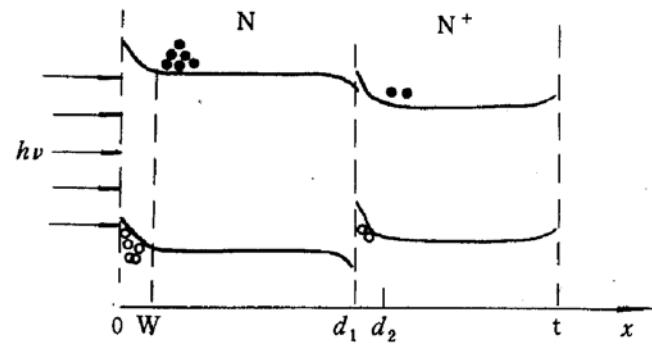


图 1 n-Al_xGa_{1-x}As/n-GaAs 能带简图

$$\begin{aligned}
 j_w' &= g \int_0^W I_0 (1 - R) / l \cdot e^{-x/l} dx = g I_0 (1 - R) (1 - e^{-W/l}) \\
 j_w'' &= g S_1 \Delta p(W) \\
 c &= g n_0 (kT / 2\pi m_e^*)^{1/2} \exp[-g(V_s)_0 / kT]
 \end{aligned} \tag{11}$$

在一定条件下^[4], 对直接跃迁材料 E_g 为

$$E_g = h(Bv_2 - v_1) / (B - 1) \tag{12}$$

$$B = [(V_0/V_2 - 1)v_1]^2 / [(V_0/V_1 - 1)v_2]^2 \tag{13}$$

式中 V_0 是短波时测量的表面光电压最大值; V_1 和 V_2 为光电压值大于刚下降时的值附近的任意两点, 其对应的光波频率分别为 v_1 和 v_2 .

对于间接跃迁材料 E_g' 为^[4]

$$(V_0/V - 1)^{-2} = AL/hv(hv \pm E_p - E_g')^2 \tag{14}$$

由式(13)可直接计算出直接跃迁材料的 E_g ; 由式(14)通过作图, 可以得出间接跃迁材料的 E_g' 和声子能量 E_p .

当 $d_1 \gg, d_1 \gg L_{p1}, l \gg W$ 时, 由(9)可简化得:

$$(V_w)^{-2} = C(Lp_1 + l) \tag{15}$$

由(15)式作图或最小二乘法计算得出少数载流子的扩散长度; 由测量的光伏谱, 通过曲线拟合计算, 可以计算出 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层的 W 、 n_0 和 S_1 及 S_2 .

3 实验结果和计算结果

采用文献[4]的实验装置, 测量了十六种不同的 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n\text{-GaAs}$ 的表面光电压谱, 如图 2. 其跃迁类型分别由(12)~(14)式作图进行判别(如文献[4]); 它们($n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n\text{-GaAs}$ 层)的带隙 E_{g1} 也分别计算出, 如表 1.

由计算得出的 E_g , 根据下列各式^[5]可以计算出各样品的 Al 组分 x , 如表 1.

$$E_{g1}^r(x) = 1.425 + 1.55x + 0.37x^2 \tag{16}$$

$$E_{g1}^z(x) = 1.911 + 0.005x + 0.245x^2 \tag{17}$$

根据所计算的 Al 组分 x , 由文献[6]的组分与吸收系数关系公式, 计算了它们的吸收系数, 并由(15)式计算出它们的少子扩散长度, 如表 1.

由多面体调优结合阻尼线性化法, 对光电压的实验值进行曲线拟合, 计算

出材料参数如表 2.

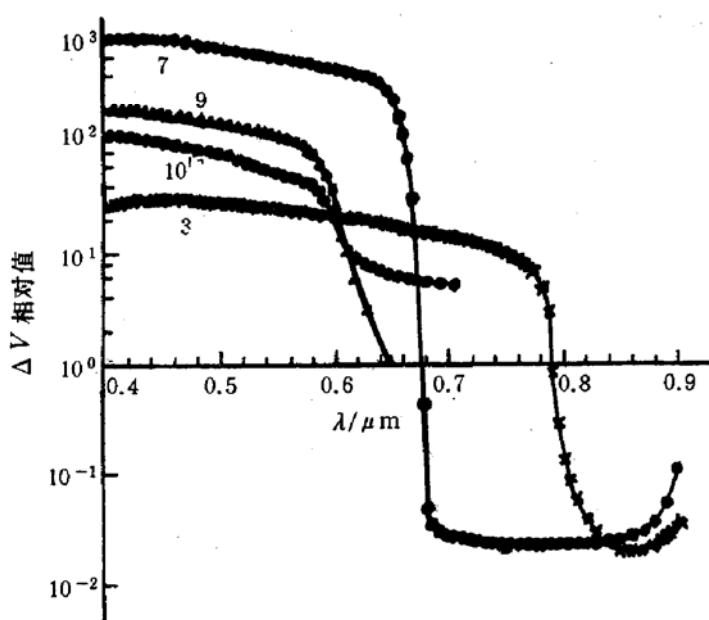


图 2 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n^+\text{-GaAs}$ 和 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n^-\text{-GaAs}$ 的表面光伏谱和光伏谱

表 1 由表面光电计算的 E_g 、 x 、 L_{p1}

样 品	光跃迁 类 型	由表面光伏测量 E_{g1}/eV	由表面光伏测定 Al 组分 x	由 SEM 测定 Al 组分 x	由表面光伏测定 $L_{p1}/\times 10^{-4}\text{cm}$
1	$V \rightarrow \Gamma$	1.54	0.097	0.09	0.909 ± 0.016
2	$V \rightarrow \Gamma$	1.56	0.113	0.13	0.634 ± 0.008
3	$V \rightarrow \Gamma$	1.65	0.186		1.01 ± 0.024
4	$V \rightarrow \Gamma$	1.66	0.192	0.145	1.68 ± 0.070
5	$V \rightarrow \Gamma$	1.70	0.222	0.20	0.219 ± 0.030
6	$V \rightarrow \Gamma$	1.75	0.260	0.22	0.208 ± 0.012
7	$V \rightarrow \Gamma$	1.88	0.354	0.39	0.220 ± 0.007
8	$V \rightarrow \Gamma$	1.96	0.409	0.43	
9	$V \rightarrow \Gamma$	2.06	0.480	0.45	0.194 ± 0.009
10	$V \rightarrow \chi$	2.07	0.795		
11	$V \rightarrow \Gamma$	2.09	0.498	0.50	0.160 ± 0.008
12	$V \rightarrow \Gamma$	2.18	0.555		
13	$V \rightarrow \Gamma$	2.21	0.574		0.318 ± 0.014
14	$V \rightarrow \Gamma$	2.25	0.599	0.56	0.487 ± 0.016
15	$V \rightarrow \Gamma$	2.36	0.664	0.66	0.178 ± 0.005
16	$V \rightarrow \Gamma$	2.38	0.679	0.74	0.293 ± 0.004

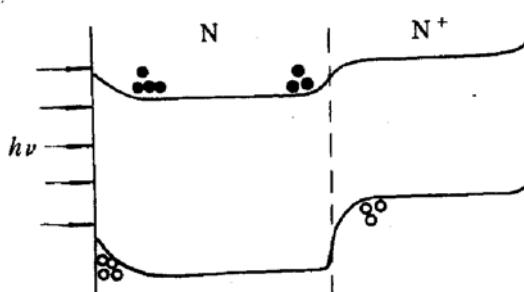
表 2 由曲线拟合计算的材料参数

样 品	参 数	$S_1/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$S_2/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$W/\times 10^{-5}\text{cm}$	$n_0/\times 10^{18}\text{cm}^{-2}$
7		6.42×10^4	3.88×10^5	3.04	3.42
9		6.70×10^4	4.05×10^5	3.19	3.19

4 讨论

1) 表 1 表明, 由表面光电压测量确定的 Al 组分 x 与用 SEM 测量的结果基本一致, 说明我们提出的原理是正确的, 测量结果是准确的。

2) 从图 2 的光伏谱可以看出, 衬底为 n^+ 型时(其能带简图如图 1), 当光子能量小于 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的禁带宽度 E_{g1}' 而大于 $n^+\text{-GaAs}$ 的禁带宽度 E_{g2}' , 光激发只发生在 $n^+\text{-GaAs}$ 层, 光生载流子在界面的积累而产生的光电压, 它与 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n\text{-GaAs}$ 的表面光电压同号, 因此光电压不变号, 如图 2 的曲线 9 和 10。如果衬底层的 GaAs 是 n^- 层, 其能带简图如图 3, 当光子能量 $h\nu < E_{g1}'$ 和 $h\nu > E_{g2}'$ 时, 光激发也只发生

图 3 n-Al_xGa_{1-x}As/n⁻GaAs 的能带简图

在 n^- 层, 光生载流子在界面两边的积累而产生的光电压, 与 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n\text{-GaAs}$ 的表面光电压符号相反, 因此在光电压谱的长波段出现反号, 如图 2 的曲线 3、7, 但其光电压比 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的表面光电压小近二个数量级, 说明在推导公式中, 忽略界面光电压对总光电压的贡献是合理的.

3)由表 2 可以看出, 非破坏性测量表面光电压谱, 不但可以判定 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的光跃迁类型和确定其带隙宽度、Al 组分, 而且可以计算出其材料的重要参数, 因此可为研究 $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料性质提供一种有效的方法.

4)由计算的 S_2 可为分析研究异质面状况提供信息.

参 考 文 献

- [1] J. M. Woodall and H. J. Hovel, Appl. Phys. Lett., 1972, **21**(8):379~381.
- [2] 沈飚华, 厦门大学学报(自然科学版), 1985, **24**(2):189~196.
- [3] 沈飚华, 固体电子学研究与进展, 1985, **5**(4):273~281.
- [4] 沈飚华, 电子学报, 1989, **17**(3):1~6.
- [5] Sadao Adachi, J. Appl. Phys., 1985, **58**(3):R1~29.
- [6] 张志林, 吴乐奇, 等, 发光与显示, 1982, 第 1 期:54~67.

Study of Characteristic Parameters for $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n\text{-GaAs}$

Shen Yihua, Zhu Wengzhang¹ and Xu shunlan

(Xiamen University, Xiamen 361005)

(1 Jimei Navigation Institute, Physics Section, Xiamen 361021)

Received 11 October 1994, revised manuscript received 19 February 1995

Abstract The surface photovoltage spectra are measured for $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/n\text{-GaAs}$. The calculated formulas are deduced. The energy gaps, components x of Al and important material parameters are calculated. The calculated results show that the theoretical values agree with the experimental values basically.

PACC: 7220J, 7240, 7340L