

Al-I($10^2\text{\AA}$)- $n\text{GaAs}$ 势垒二极管中 载流子的输运

周 勉¹⁾ 王渭源

(中国科学院上海冶金研究所)

1983年6月13日收到

提 要

在金属-高掺杂 $n\text{GaAs}$ 之间加入薄氧化层 (约 $10^2\text{\AA}$) 后, 器件的 $I-V$ 特性不再能用经典的金属-半导体接触理论来描述, 而必须计入如下修正: 电子由量子力学中的隧道效应穿过界面层势垒, 由此引进透射系数 P ; 反向偏置时, 有效势垒高度因界面层及界面态的存在而有所改变, 并且随外加电压而变化; 正向偏置时, 界面层的影响可以用理想因子 n 来描述. 经过上述修正后推得的理论 $I-V$, $I-1/T$ 关系式 (表 1) 与实测曲线符合较好. 文中讨论了透射系数与有效势垒高度提高的关系.

一、引 言

在 GaAs 上曾经发现^[1], 金属-半导体接触 Schottky 势垒二极管 (M-S SBD) 的金属-半导体之间存在一定厚度 (约 $30\text{\AA}$) 的界面氧化层 (以下统称为 I), 可以提高有效势垒高度, 降低反向漏电. 将此种 M-I($10^2\text{\AA}$)-S 结构应用于 I_{np} , 使势垒高度从较低的为 0.5 eV 提高到约 0.9 eV , 反向饱和电流减小几个数量级, 制成了耗尽型的 I_{np} MESFET^[2-4]. 在 M-S SB GaAs 太阳能电池中引入薄界面层 ($20\text{\AA}$), 改善了太阳电池的开路电压而使效率达到 17% ^[5]. 尽管实际中应用了 M-I ($10-10^2\text{\AA}$)-S SBD, 但人们对其导电机构和界面层的作用并不很清楚.

本文报道了 Al-I($10^2\text{\AA}$)- $n\text{GaAs}$ SBD 77—400 K 温度范围内的 $I-V$, $I-1/T$ 测量结果, 考察了不同温度下载流子的导电机构, 界面层对载流子输运的影响. 在此基础上提出了 SBD 的电流表达式, 与实验结果相当符合.

二、实验方法

1. 阳极氧化和 Al-I($10^2\text{\AA}$)- $n\text{GaAs}$ SBD 抛光的掺 Si $n\text{GaAs}$ 单晶片, 晶向 $\langle 100 \rangle$, N_d 为 10^{18} cm^{-3} , 经有机试剂超声清洗、化学腐蚀后备用. 样品分为两组: A 组的 I 为

1) 现为上海交通大学应用物理系教师.

GaAs 自体阳极氧化膜; B 组为 Al_2O_3 膜, 是用电子束镀膜仪在 10^{-6} Torr 下蒸发 Al 为 $10^2 \text{ \AA}$, 然后阳极氧化生长成 Al_2O_3 . 阳极氧化溶液为无水的酒石酸乙二醇溶液 (1g/100 ml). 过去, 在阳极氧化水溶液中渗入大量乙二醇可使氧化过程稳定、重复、氧化膜质量提高^[6-8]. 因此我们使用了无水阳极氧化液, 以期进一步提高薄膜质量和稳定氧化过程. 电介液 pH 值可由 NH_4OH 调节, 但发现 pH 值对氧化过程影响不大. 氧化在磁棒搅动溶液、室温和恒电流下进行, 电流密度 $50-200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 槽电压分别用 PZ-8 数字电压表和 X-Y 记录仪监控和记录.

Al 阳极氧化时, 槽电压随时间逐渐增加, 一定时间后电压呈微小的静止甚至稍有下跌, 然后再增加. 经验表明, 电压稍微静止或下降时对应金属 Al 氧化完毕. Bayraktaroglu 等人^[9]也观察到 Al 氧化完毕时电压有一平坦区.

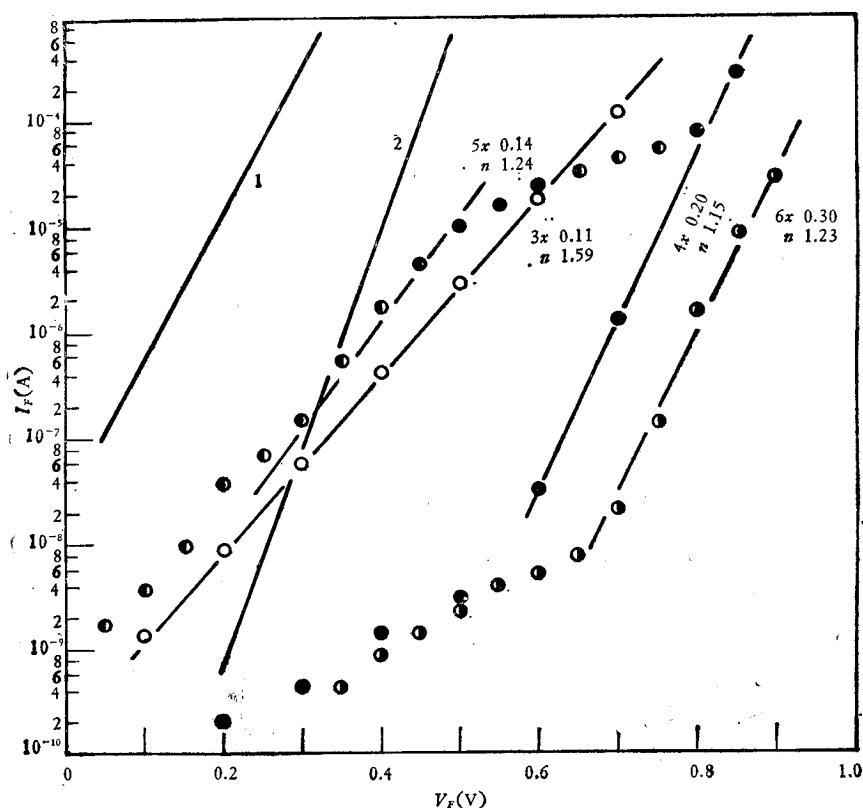


图 1 Al-I-高掺 $n\text{GaAs}$ SBD 正向 $\log I_F-V_F$ 曲线 (I 层 $80 \text{ \AA}$, 金属 Al 面积 $3.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$)

- | | | |
|------|----------------|---|
| 实验结果 | ○ 300 K | } Al-GaAs 自体氧化物- $n\text{GaAs}$, |
| | ● 85 K | |
| | ○ 300 K | } Al- Al_2O_3 - $n\text{GaAs}$; |
| | ● 85 K | |
| 理论计算 | 1 M-S, 300 K | } T-F 机构(表 1 中 J_1) } 没有 I 层, |
| (实线) | 2 M-S, 85 K | |
| | 3 M-I-S, 300 K | } T-F 机构(表 1 中 J_1') } I 为 GaAs 自体氧化物, |
| | 4 M-I-S, 85 K | |
| | 5 M-I-S, 300 K | } T-F 机构(表 1 中 J_1') } I 为 Al_2O_3 , |
| | 6 M-I-S, 85 K | |

阳极氧化后的样品在 H_2 气氛中、 270°C 下退火 30 min. 氧化膜厚度和折射率用椭圆偏振仪测量. 退火使膜厚减少约 10%, 折射率略有上升, 与文献报道一致^[7]. 实际样品膜厚为 $80 \text{ \AA}$ 和 $210 \text{ \AA}$, 折射率 $n_{\text{GaAs oxide}} = 1.9$, $n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 为 $1.7-1.85$.

M-I($10 \text{ \AA}$)-S SBD 的栅金属为 Al, 面积 $S = 3.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$, 背面用熔化的 (约 180°C) Ag-Sn-Cu 合金粘合, 冷却后经脉冲 ($20 \mu\text{F}$, 300 V) 放电数次, 以形成良好的欧姆接触. 测试样品封装在陶瓷管壳内.

2. 测试 测试在无光照、充氩气氛中进行, 温度范围 $77-400 \text{ K}$, 低温用液氮获得, 其它温度则用电阻丝加热来控制. 测温用样品旁铜-康铜热电偶, 其电动势由 PZ-26 数字

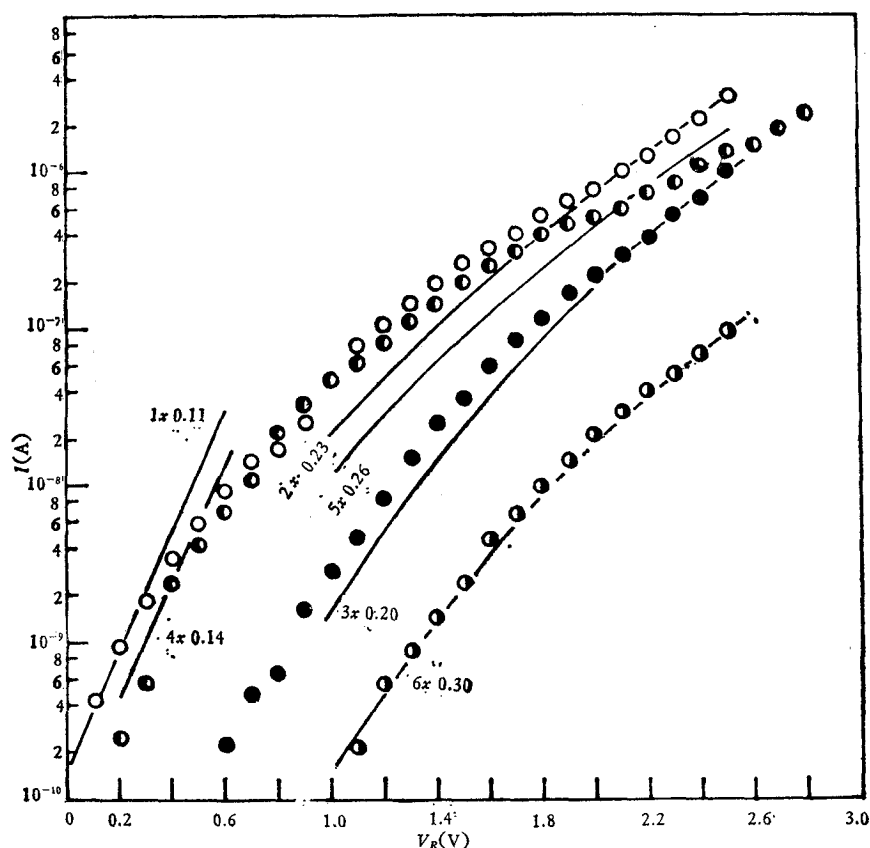


图2 Al-I-高掺 nGaAs SBD 反向 $\log I_R-V_R$ 曲线 (I 层 $80 \text{ \AA}$, 金属 Al 面积 $3.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$)

实验结果	○ 300 K	} Al-GaAs 自体氧化物- $n\text{GaAs}$,	} I 为 GaAs 自体氧化物,	
	● 85 K			
	○ 300 K	} Al-Al ₂ O ₃ - $n\text{GaAs}$;		
	● 85 K			
理论计算 (实线)	1 MIS, 300 K	T-F 机构(表 1 中 J'_5)		}
	2 MIS, 300 K	F 机构(表 1 中 J'_4)		
	3 MIS, 85 K	F 机构(表 1 中 J'_4)		
	4 MIS, 300 K	F 机构(表 1 中 J'_3)		}
	5 MIS, 300 K	T-F 机构(表 1 中 J'_4)		
	6 MIS, 85 K	F 机构(表 1 中 J'_4)		
			I 为 Al ₂ O ₃	

I 为 Al_2O_3

电压表读出。样品的直流偏置电压和流过样品的电流分别由 PZ-26 数字电压表及 AC 15/1 检流计读出。测试时整个系统良好接地。

三、实验结果

1. 正向电流-电压关系 图 1 表示 A, B 两组样品室温和低温下正向 $\log I_F - V_F$ 关系。图中各不同实验点符号分别对应于不同 I 层和温度, 而实线则为不同 I 层、温度和各种导电机构的理论计算曲线 (下述)。除实线 1 和 2 外, 各理论曲线能相当好地通过实验点。对于不同的 I 层, 只要温度相同, 实验 $\log I_F - V_F$ 曲线有相似的变化趋势 (实线 3 和 5, 实

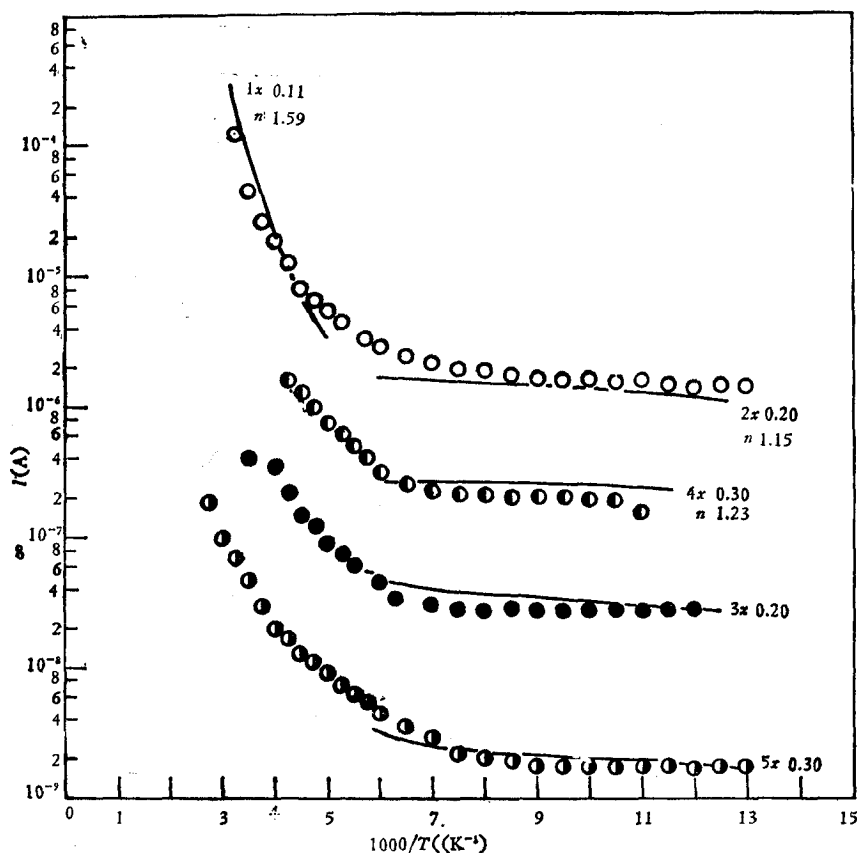


图 3 Al-I-高掺 $n\text{GaAs}$ SBD $\log I - 1/T$ 关系曲线 (I 层 $80\text{\AA}$, 金属 Al 面积 $3.2 \times 10^{-2}\text{cm}^2$)

- | | | |
|----------|---------------------------------|--|
| 实验结果 | ○ 正向, $V_F 0.7\text{V}$ | } Al-GaAs 自体氧化物- $n\text{GaAs}$, |
| | ● 反向, $V_R - 1.5\text{V}$ | |
| | ○ 正向, $V_F 0.75\text{V}$ | } Al- Al_2O_3 - $n\text{GaAs}$; |
| | ● 反向, $V_R - 1.5\text{V}$ | |
| MIS 理论计算 | 1 正向, T-F 机构, $V_F 0.7\text{V}$ | } I 层为 GaAs 自体氧化物, |
| (实线) | 2 正向, F 机构, $V_F 0.7\text{V}$ | |
| | 3 反向, F 机构, $V_R - 1.5\text{V}$ | |
| | 4 正向, F 机构, $V_F 0.75\text{V}$ | } I 层为 Al_2O_3 , |
| | 5 反向, F 机构, $V_R - 1.5\text{V}$ | |

线 4 和 6)。温度不同,实验曲线的斜率明显不同。在 $\text{Al-Al}_2\text{O}_3\text{-nGaAs}$ SBD 中,也曾测定了约 150 K 和 I 层为 $210 \text{ \AA}$ 的 $\log I_F\text{-}V_F$ 关系,因变化比较特殊和难以理论计算,暂未在图 1 中列出(对 $210 \text{ \AA}$ 的 MIS 器件,已不能用 M-I-S SBD 描述)。

2. 反向电流-电压关系 A, B 两组样品室温和低温下反向 $\log I_R\text{-}V_R$ 实验结果示于图 2。可见,不同 I 材料、不同温度下的各曲线,都有相似的变化趋势。85 K 的实验点能相当好地用理论曲线 3 和 6 (下述)来拟合,但 300 K 的实验点则必须用二段理论曲线即 1 和 2,以及 4 和 5 来描述。图 2 中也未列出 $\text{Al-Al}_2\text{O}_3\text{-nGaAs}$ 约 150 K 和 $210 \text{ \AA}$ 的 $\log I_R\text{-}V_R$ 结果。

3. 电流-温度关系 在一定的正、反向偏置下,实验的(以各种符号点分别表示 A, B 两组样品和不同偏置电压)和理论的(下述)电流随温度的变化以 $\log I\text{-}1/T$ 关系示于图 3。任一条曲线在实验的温度范围内大致可分为两个区域:室温附近到 150 K ($1000/T$ 为 3—7) 电流随温度降低很快减小;温度低于 150 K 以后 ($1000/T > 8$), 电流基本上不随温度变化。

四、讨 论

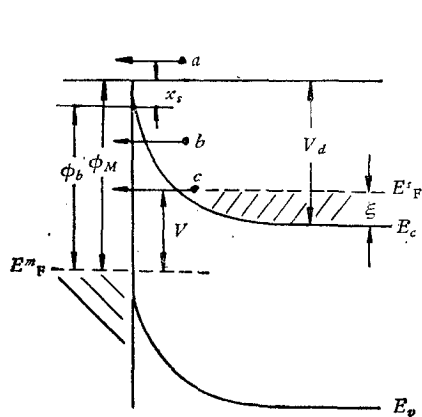
1. 对于金属-重掺杂半导体 M-S SBD, 载流子(以电子为例)主要可以三种机构输运(图 4)^[10]: 费密能级处的电子隧道穿过势垒,或弱场发射;电子被激发到较高能态然后隧道穿过势垒,弱热电子场发射;电子有足够的能量越过势垒,称谓热电子发射。在不同温度、偏置电压(影响电子能量、势垒高度和宽度)范围内,电子可能以其中的一种或两种机构输运,对此 Padovani^[11] 作过详细分析,导出了各种机构 $J\text{-}V$ 表达式及其适用范围。根据他们的结果,对 $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ SBD, 各种具体表达式及其适用范围列于表 1 (表中其它各栏将在以下说明)。除以上各种机构外,文献中曾提到还应考虑反向偏置时耗尽区中的产生电流 J_g , 正向偏置时的复合电流 J_r , 以及 sB 的少子(空穴)注入电流 J_h 。对于高掺杂半导体, J_g 可以忽略;其次,一般情况下 J_h 只占总电流的 10^{-4} ^[10], 也可不予考虑;最后,在我们条件下, J_r 也可忽略不计(下述)。我们用表 1 中 J_1 和 J_2 式计算了 M-S SBD $\log I_F\text{-}V_F$ 曲线,结果示于图 1 中实线 1 和 2, 可见计算值比实验点高几个数量级。同样,用 J_3 和 J_4 计算的 I_R 比实验值也高几个数量级(结果未在图 2 中画出)。这一严重偏离的原因在于 Padovani 理论所考虑的是理想 M-S SBD, 即假定 M-S 间不存在界面层。然而,氧化物等界面层的存在会对载流子输运产生影响,导致理论 $I\text{-}V$ 曲线的偏离^[10]。在本文的 MIS SBD 中,界面氧化层约为 $10^2 \text{ \AA}$, 故应对表 1 各式进行修正。

$2 \cdot 10^2 \text{ \AA}$ 界面层的影响可以从两方面考虑。一方面,由于界面层的存在,电子必须隧道穿过界面层提供的势垒而输运,因此同一给定电压下电流将减少,其程度用界面层透射系数 P 表示。根据 Card 和 Rhoderick^[12], Ashok 等人^[13] 导出 GaAs 氧化膜体系 $P = \exp(-0.26x^{1/2}\delta)$, 其中 x 为界面层势垒高度(eV), δ 为界面层厚度($\text{\AA}$)。鉴于 $10\text{--}10^2 \text{ \AA}$ 超薄氧化膜不能用约 $10^3 \text{ \AA}$ 厚膜那样来定义其能带,另外这种薄膜中很可能有许多显微针孔,因此 x 和 P 值难以理论计算而只能由实验数据拟合得到。表 1 中 M-I ($10^2 \text{ \AA}$)-S SBD 正、反向各 $J\text{-}V$ 表式 $J_1\text{--}J_4$ 中都已作了这一项的修正。

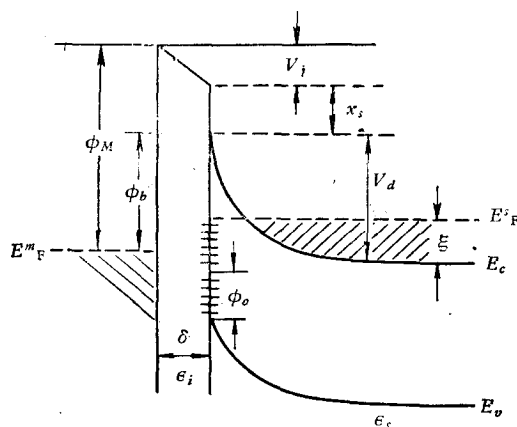
表 1 不同温度及偏压下 M-S, M-I(10³ Å)-S SBD 电流表达式*

应用范围 $N_d = 10^{18}/\text{cm}^3$	机 构	理想 M-S SBD (图 4) ^[10,11]	M-I(10 ³ Å)-S SBD 表式 (图 5)
正向小偏置 300 K	T-F	$J_1 = \frac{A^*(\pi E_{00})^{1/2}(\phi_b - V + \xi)^{1/2}}{kT \cosh\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)} \cdot \exp\left[\frac{\xi}{kT} - \frac{\phi_b + \xi}{E_0}\right] \exp\left(\frac{V}{E_0}\right)$	$J'_1 = P \frac{A^*(\pi E_{00})^{1/2}(\phi_{b0} - \frac{V}{n} + \xi)^{1/2}}{kT \cosh\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)} \cdot \exp\left[\frac{\xi}{kT} - \frac{\phi_{b0} + \xi}{E_0}\right] \exp\left(\frac{V}{nE_0}\right)$
正向 85 K	F	$J_2 = \frac{A^*\pi}{c kT \sin(\pi c kT)} \exp(-b),$ $b = \frac{\phi_b - V}{E_{00}},$ $c = \frac{1}{2 E_{00}} \ln\left[\frac{4(\phi_b - V)}{\xi}\right]$	$J'_2 = P \frac{A^*\pi}{c' kT \sin(c' \pi kT)} \exp(-b'),$ $b' = \frac{\phi_{b0} - V/n}{E_{00}},$ $c' = \frac{1}{2 E_{00}} \ln\left[\frac{4(\phi_{b0} - V/n)}{\xi}\right]$
反向 300 K ($V_R \ll 1V$)	T-F	$J_3 = \frac{A^*(\pi E_{00})^{1/2}}{kT} \left[-V + \frac{\phi_b}{\cosh^2\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)} \right]^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{\phi_b}{E_0}\right) \cdot \exp\left[-\frac{V}{E_{00}} \left(\frac{E_{00}}{kT}\right) - \tanh\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)\right]$	$J'_3 = P \frac{A^*(\pi E_{00})^{1/2}}{kT} \left[-V + \frac{\phi_b}{\cosh^2\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)} \right]^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{\phi_b}{E_0}\right) \exp\left[-\frac{V}{E_{00}} \left(\frac{E_{00}}{kT}\right) - \tanh\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)\right]$
反向 300 K ($V_R > 1V$), 反向 85 K	F	$J_4 = \frac{A^*\pi}{f kT \sin(\pi f kT)} \exp(-d),$ $d = \frac{1}{E_{00}} \left[\phi_b^{1/2}(\phi_b - V)^{1/2} + V \ln \frac{(\phi_b - V)^{1/2} + \phi_b^{1/2}}{(-V)^{1/2}} \right],$ $f = \frac{1}{E_{00}} \ln \left[\frac{(\phi_b - V)^{1/2} + \phi_b^{1/2}}{(-V)^{1/2}} \right]$	$J'_4 = P \frac{A^*\pi}{f' kT \sin(\pi f' kT)} \exp(-d'),$ $d' = \frac{1}{E_{00}} \left[\phi_b'^{1/2}(\phi_b' - V)^{1/2} + V \ln \frac{(\phi_b' - V)^{1/2} + \phi_b'^{1/2}}{(-V)^{1/2}} \right],$ $f' = \frac{1}{E_{00}} \ln \left[\frac{(\phi_b' - V)^{1/2} + \phi_b'^{1/2}}{(-V)^{1/2}} \right]$

* ϕ_b M-S SBD 势垒高度; ϕ_{b0} M-I(10³ Å)-S SBD 零偏压的势垒高度; $E_{00} = \frac{\hbar}{2} \left(\frac{N_d}{m^* e} \right)^{1/2}$; $E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right)$; $P = \exp[-0.26X^{1/2}\delta]$; 其他符号参见图 5.

图 4 Schottky 势垒的输运过程(正向偏置)^[10]

a 为热电子发射;
b 为热电子场发射;
c 为场发射

图 5 MIS SBD 能带图(正向偏置)^[14]

ϕ_M 为金属功函数;
 ϕ_b^0 为金属-半导体势垒高度;
 ξ 为半导体费密能级到导带底距离;
 χ_s 为半导体亲和势;
 V_d 为半导体扩散势;
 V_i 为界面层电势降;
 ϵ_s 为半导体介电常数;
 ϵ_i 为界面层介电常数;
 δ 为界面层厚度;
 ϕ_0 为表面中性能级

另一方面,无界面层时,理想 M-S 势垒高度 ϕ_b (图 4) 仅决定于 ϕ_m 与 χ_s 之差,而与半导体内的电场无关;有界面层时 (图 5)^[14], 界面层中电势降受外电场影响,从而使实际势垒 ϕ_b' 成为外加电压 V 的函数,可表示为^[10]

$$\phi_b' = \phi_b^0 - \alpha \left[\frac{2qN_d}{\epsilon_s} \left(V_d - \frac{kT}{q} \right) \right]^{1/2} - \left\{ \frac{q^3 N_d}{8\pi^2 \epsilon_s^3} \left(V_d - \frac{kT}{q} \right) \right\}^{1/4}, \quad (1)$$

其中

$$V_d = \phi_b - V - \xi, \quad (2)$$

$$\phi_b^0 = \gamma(\phi_m - \chi_s) + (1 - \gamma)(E_g - \phi_0), \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + q\delta D_s}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\delta \epsilon_s}{\epsilon_i + q\delta D_s}. \quad (5)$$

(1) 式中右端第一项 ϕ_b^0 是平带势垒高度,其中 D_s 为界面态密度, ϕ_0 是界面态中性能级,其它符号已在图 5 中标出. 第二项是因界面层受电势变化的修正项,第三项是镜像力势垒降低修正项. 对于无界面层, $\delta = 0$, 同时不考虑镜像力势垒降低,则 $\phi_b' = \phi_b^0 = \phi_b$. 据此,在反向偏置的 M-I(10² Å)-S SBD 中,用 ϕ_b' 代替了 ϕ_b (见表 1 中 J_3' 和 J_4').

在考虑正向偏置下第二方面影响时,文献上传统的办法是在热电子发射表达式:

$$J = AT^2 \exp \left(-\frac{\phi_{b0}}{kT} \right) \exp \left(\frac{V}{kT} \right) \quad (6)$$

的第二个指数项中引进理想因子“ n ”,即将 $J \propto \exp \left(\frac{V}{kT} \right)$ 修正为 $J \propto \exp \left(\frac{V}{nkT} \right)$. 假设这种修正也可用到热电子场发射和场发射机构,则得表 1 中 J_1' 和 J_2' . 其中,忽略了镜像力减低效应. n 值依下式与界面层性质联系^[10,12]:

$$n = 1 + \frac{\left(\frac{\delta}{e_i}\right) \left(\frac{e_s}{W} + qD_{sb}\right)}{1 + \left(\frac{\delta}{e_i}\right) qD_{sa}}, \quad (7)$$

式中 D_{sa} , D_{sb} 分别为与金属、半导体平衡的界面态。这样的考虑实质上是将界面层效应归入指数因子 n , 而认为势垒高度 ϕ_b^0 是常数。

3. 为了验证表 1 中 J_1 — J_4 各表式的准确程度, 代入常数值和实验参数的数值 (表 2) 及合理选取的数值, 据此画出了图 1 至 3 各条理论曲线。表 2 中, A^{**} 为金属 Al 的 Richardson 常数, 选取时参考了某些金属的 $A^{**[15]}$; 实验测得氧化膜折射率 $n \approx 2$, 由 $\epsilon \approx n^2 = 4$, 故取 $\epsilon_s = \epsilon\epsilon_0 = 0.35 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{cm}^{-1}$; 取 $\phi_b = 0.8 \text{eV}(300)^{[14]}$, 并认为可用到 85 K, 而 ϕ_b^0 则由 (1) 式计算得到 (令 $V = 0$), D_i 取 $4 \times 10^{13} \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$, 虽然比 1979 年前的文献数据高 (Adams^[16], 0.5×10^{13} ; Ashok 等人^[13], 0.8 — $1.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$), 但与近年来多数作者数据相近 (Yamasaki 和 Sugano^[17], 1 — 3×10^{13} ; Streever 等人^[18], 0.5 — 5×10^{13} ; Morante 等人^[19], $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$)。此外, 由实验数据的拟合, 并且考虑到一定温度下正、反向偏置时有相同的 χ (或 P) 值, 得到了 χ 及 n 值 (见图 1 到 3, 将在以下作进一步讨论)。

理论计算结果表明: 1) 无论室温或低温下, 正向或反向 $\log I$ - V 曲线都与实测结果

表 2 图 1—3 中理论计算所取的数值

常 数 值*	实 验 参 数 的 数 值
$A^* = 120T^2 \text{A} \cdot \text{cm}$	$T = 300, 85 \text{K}$
$A^{**} = 40T^2 \text{A} \cdot \text{cm}$	$N_d = 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
$m^* = 0.637 \times 10^{-31} \text{kg}$	$\delta = 80 \text{\AA}$
$\epsilon_s = 1 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{cm}^{-1}$	$S = 3.2 \times 10^{-5} \text{cm}^2$
$\epsilon_i = 0.35 \times 10^{-12} \text{F} \cdot \text{cm}^{-1}$	$\phi_{b0} = 0.74 \text{V}(300 \text{K}), 0.78 \text{V}(85 \text{K})$
$\phi_b = 0.8 \text{V}(300\text{—}85 \text{K})$	

* A^{**} 为金属 Al 的有效 Richardson 常数^[15]

相当符合 (图 1 和图 2), 其中室温下反向 $\log I_R$ - V_R 曲线, 因涉及到不同偏置下输运机构不同, 故用二段理论曲线拟合。2) $V_F = 0.7 \text{V}$ (或 0.75V) 时, 无论室温或低温下 $\log I_F$ - $1/T$ 理论曲线也都与实测结果相当符合 (图 3), 其中曲线 4 的上端参考图 1 曲线 5 在 V_F 0.75V 时 I_F 已饱和, 故未在图中画出。3) 由图 3, $V_R = -1.5 \text{V}$ 时, 低温下 $\log I_R$ - $1/T$ 与实测结果相当符合, 室温下 I_R 需同时考虑 T - F 及 F 机构的贡献 (参看图 2), 因无定量估计方法暂未作计算。至此, 肯定了表 1 中各式及其应用范围的准确性: 对于 Al-I ($10^3 \text{\AA}$)-GaAs (高掺杂) 势垒二极管, 77 K 时正、反向导电机构都是场发射, 300 K 时正向及反向小偏压是热电子场发射, 而反向大偏压时则为场发射。但是所有的表式, 都必须进行修正 (已如上述) 才能符合实测结果。

顺便指出, 上述计算中忽略了复合电流 $J_r \left(= P \frac{qn_i W}{2\tau_r} \left[\exp \frac{qV}{2kT} - 1 \right] \right)$, 因为 $n_i =$

1.1 × 10⁷cm⁻³, 即使当 $\tau_r \approx 10^{-11}$ s, 算得的 I_r 仅 10⁻¹²A, 远小于实测的 I_F .

4. 图 1—3 中, 我们由拟合实验曲线得到 χ 为 0.11—0.14 (T - F 机构) 和 0.2—0.3 (F 机构). Ashok 等人^[13] 在 60 Å 厚的 GaAs 氧化膜中得到 $\chi = 0.08$ eV, 他认为这个数值偏小并提出可能是由于存在陷阱帮助的隧道过程.

本文用透射系数 P 来修正引进薄氧化层后 M-GaAs 二极管电流的下降, 文献中也提到用势垒高度增加来解释. 仔细考虑, 这两者应当是有联系的. Morgan 和 Frey^[20] 曾针对热电子发射讨论过势垒增高与隧道模型的联系. 对于 T - F 和 F 机构, 如果把 P 作为势垒高度增加 $\Delta\phi_b$ 来考虑, 由表 1 可分别得到

$$\Delta\phi_{b,T-F} = 0.26\chi^{1/2}\delta E_0, \quad (8)$$

$$\Delta\phi_{b,F} = 0.26\chi^{1/2}\delta E_{00}. \quad (9)$$

而 T - F 和 F 机构的 χ 值分别为 0.12 和 0.25 (平均值), 结合 $E_0 = 0.0314$ eV (300 K), $E_{00} = 0.021$ eV (300—85 K), 对于 60 Å 的氧化层, 得到 $\Delta\phi_{b,T-F} = 0.17$ eV 及 $\Delta\phi_{b,F} = 0.16$ eV, 此值与 Ashok 等人^[13] 的实验结果 $\Delta\phi_b = 0.11$ eV (360—77 K) 相当接近. 已知, I_{np} 电子有效质量为 $m^* = 0.71 \times 10^{-31}$ kg^[21], 相应的透射系数可表示为 $P = \exp(-0.28\chi^{1/2}\delta)$, 类似于 (8) 和 (9) 式, 热电子发射 (T 机构) 势垒高度增加可表示为

$$\Delta\phi_{b,T} = 0.28\chi^{1/2}\delta kT. \quad (10)$$

假定 I_{np} 自身氧化膜 χ 数值取与 GaAs 相同, 为 0.12 或 0.25 eV, 利用 (10) 式得到 300 K 下 $\Delta\phi_{b,T} = 0.025$ 或 0.036 eV/10 Å, 与 Wada 等人^[22] 40—80 Å 时 $\Delta\phi_b$ 的结果 0.032 eV/10 Å 也相当接近.

理想因子 n 系用来描述实际 SB 中各种非理想因素. 金属-半导体之间加入薄氧化膜后, n 因子必然要增大. 对于 GaAs MIS SB 结构, Laflère 等人^[23] 给出 $\delta = 20$ Å, n 为 1.12—1.24, 文献 [13] 则报道 $\delta = 60$ Å, n 为 1.1—2. 我们的结果为 $\delta = 80$ Å, n 为 1.15—1.59. 由 (7) 式, 因为 D_{sa} 和 D_{sb} 数量级较大, 故有

$$\frac{e_s}{W} < qD_{sb} \text{ 和 } \left(\frac{\delta}{e_i}\right) qD_{sa} > 1,$$

于是可得

$$n \approx 1 + \frac{D_{sb}}{D_{sa}}. \quad (11)$$

如取 D_{sb}/D_{sa} 为 0.1—0.6, 则可得 n 为 1.1—1.6.

我们由实验数据拟合得出的 n 值, 与文献中有些讨论不同, 即 n 值并不随温度下降至低温时急剧增加. 但是文献中拟合 n 值是由同一表达式 (例如 T - F 或 T 机构) 得出的. 事实上, 当温度降至低温, 电流输运机构已经改变, 不应再用同一表达式拟合. 至于在 F 机构的正偏置下能否应用理想因子来描述, 尚待进一步研究.

参 考 文 献

- [1] B. R. Pruniaux, A. C. Adams, *Appl. Phys. Lett.*, **43**, (1972), 1980.
- [2] O. Wada, A. Majersfeld, *Electron. Lett.*, **14**, (1978), 125.
- [3] K. Kamimura, *J. Appl. Phys.*, **51**, (1980), 4905.

- [4] H. Morkoc *et al.*, *IEEE Trans.*, **ED-28**, (1981), 1.
- [5] R. J. Stirn *et al.*, *Tech. Dig. Intern. Electron Dev. Meeting. IEEE.*, (1977), p. 48.
- [6] H. Hasegawa, *J. Electrochem. Soc.*, **123**, (1976), 713.
- [7] R. A. Logan *et al.*, *J. Electrochem. Soc.*, **120**, (1973), 1385.
- [8] H. Hasegawa, *Electron. Lett.*, **11**, (1975), 53.
- [9] B. Bayraktaroglu *et al.*, *Electron. Lett.*, **14**, (1978), 19.
- [10] E. H. Rhoderick, *Metal-Semiconductor Contacts*, Clarendon Press, (1978), Chapter 2—3.
- [11] F. A. Padovani, *Semiconductors and Semimetals 7 A*, Academic Press, (1971), Chapter 2.
- [12] H. C. Card, E. H. Rhoderick, *J. Phys. D. Appl.*, **4**, (1971), 1589.
- [13] S. Ashok, *et al.*, *Solid-St. Electron.*, **22**, (1979), 621.
- [14] S. M. Sze, *Phys. Semiconductor Devices*, John Wiley and Sons, 2nd Edition, (1981), Chapter 8.
- [15] C. Herring, M. H. Nichols, *Rev. Mod. Phys.*, **21**, (1949), 185.
- [16] A. C. Adams, *J. Electrochem. Soc.*, **120**, (1976), 408.
- [17] K. Yamasaki, T. Sugano, *Appl. Phys. Lett.*, **35**, (1979), 932.
- [18] R. L. Streever *et al.*, *Solid-St. Electron.*, **23**, (1980), 863.
- [19] J. R. Morante *et al.*, *Solid-St. Electron.*, **26**, (1983), 537.
- [20] D. V. Morgan, J. Frey, *Phys. Stat. Sol.*, (a), **51**, (1979), K29.
- [21] J. M. Chamberlain *et al.*, *J. Phys. C*, **4**, (1971), L38.
- [22] O. Wada *et al.*, *Solid-St. Electron.*, **25**, (1982), 381.
- [23] W. H. Laflère *et al.*, *Solid-St. Electron.*, **25**, (1982), 389.

CARRIER TRANSPORT IN METAL-THIN INSULATOR n GaAs BARRIER DIODES

ZHOU MIAN* WANG WEI-YUAN

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

ABSTRACT

The current-voltage (I - V) characteristics of heavily doped n -GaAs metal-thin insulator ($10^2 \text{ \AA}$)-semiconductor barrier diodes can not be described by classical theory of metal-semiconductor contacts. It is necessary to modify the theory by assuming: (1) the electrons pass through the barrier of interface layer by tunnelling, resulting in transmission coefficient P ; (2) at reverse bias, the effective barrier height alters due to the presence of interface layer and states and changes with variation of voltage; (3) at forward bias, the effects of interface layer are embodied in ideality factor n . The I - V and I - $1/T$ expressions (table 1) derived from the modified theory are in good agreement with experimental results. The relationship between transmission coefficient and effective barrier height increasing is also discussed.

* Present address: Department of Applied Physics, Shanghai Jiao-Tong University.