

Ⅲ—V族化合物半导体欧姆接触研究的进展

孙序文

(山东农业机械化学院物理教研室)

[摘要]本文介绍一种解释欧姆接触的比接触电阻 ρ_c 的新模型。并从理论上分析了利用RF溅射清洗半导体表面可使 ρ_c 降低的机理。

Progress in Development of Ohmic Contacts in Ⅲ - V Group Compound Semiconductors

Sun Xuwen

(Shandon Institute of Mechanization in Agriculture)

Abstract: In this paper, a new theoretical model is introduced which explains the properties of specific contact resistance ρ_c of ohmic contact in Ⅲ - V group compound semiconductors. Particularly, the mechanism of low ρ_c obtained by RF sputter cleaning on semiconductor surface is analyzed theoretically.

具有较低的比接触电阻 ρ_c 的欧姆接触,对光电子器件和电子半导体器件都是非常重要的。近几年来,对Ⅲ—V族化合物半导体欧姆接触的文章虽然报道不多。然而,在解释欧姆接触电阻出现的一些问题,如何进一步降低 ρ_c 的新工艺以及 ρ_c 测量方面仍有很大进展。本文就影响比接触电阻的机理介绍一种新的解释模型,同时对溅射清洗半导体表面可使 ρ_c 降低给予理论上的分析。

一、欧姆接触理论及新模型

为了得到低 ρ_c 的欧姆接触,必须在半导体本体(衬底)表面制备一高简并的半导体薄层,然后再沉积接触金属系统,再经最佳合金处理。按金属—半导体接触理论,此时所形成的肖特基势垒既陡又薄,其电流输运机理以场发射(FE)占主导地位。按Padovani等^[1]给出的FE输运机理的J—V特性,并由 $\rho_c = \left(\frac{\partial j}{\partial V} \right)_{V=0}^{-1}$ 定义式(式中j为电流密度, V为所加

偏压), 可得该情况下的 ρ_c 为:

$$\rho_c = \frac{C_1 k E_{\infty} \sin(\pi C_1 k T)}{\pi A^* T} \exp \frac{\Phi_1}{E_{\infty}} \quad (1)$$

此式对 $E_{\infty} \gg kT$ 成立。式中:

$$E_{\infty} = E_{\infty} \coth \left(\frac{E_{\infty}}{kT} \right) \quad (2)$$

$$E_{\infty} = 18.5 \times 10^{-12} \left(\frac{N_{Dd}}{\epsilon_s \cdot m^*} \right)^{1/2} \quad (3)$$

(1)~(3)中, m^* 为电子的有效质量, ϵ_s 为n-GaAs的介电常数, $A^* = \frac{4\pi m^* q k^2}{h^3}$ 为理查森(Richardson)常数, k 为玻尔兹曼常数, Φ_1 为肖特基势垒高度, h 为普朗克常数, N_{Dd} 为高简并半导体薄层掺杂浓度, $C_1 = \frac{1}{2 E_{\infty}} \ln \frac{4 \Phi_1}{U_F}$, U_F 为费米能级和导带底间的差。

由(1)式可见, 只要增大 N_{Dd} , ρ_c 便会降低。而且 N_{Dd} 与原n-GaAs衬底中载流子浓度 N_D 无关, 只与制作工艺有关。因此, ρ_c 值看起来似乎只与 N_{Dd} 有关, 而与 N_D 无关。然而, 有些文献报道了在进行n-GaAs欧姆接触的研究中, 发现了 ρ_c 与 N_D 的反比关系, 也提出了不同的模型进行分析。Wu Dingfen等人^[2]提出了一种改进的模型来解释 $\rho_c \sim N_D^{-1}$ 的关系。

不仅对解释n-GaAs的 $\rho_c \sim N_D^{-1}$ 关系是成立的, 而且可推广到解释其它类型的半导体材料的

$\rho_c \sim N_D^{-1}$ 关系(或 $\rho_c \sim N_A^{-1}$ 关系)。该模型的基本假设如下: 金属与n-GaAs的接触系统可

分为三个区域, 其能带图如图1所示。图中, 1为半导体本体(衬底)区(载流子浓度 N_D); 2为高简并层与半导体本体接触区(载流子浓度平均为 N_{Dd}); 3为金属与高简并层形成的势垒区。整个接触系统, 有两个结存在, 一个是欧姆结, 一个是 n^+/n 结。显然, 电子由金属向半导体的运动受两个势垒的影响: 一是肖特基势垒 Φ_1 , 一是 n^+/n 结势垒 Φ_2 。于是, 总的比接触电阻 ρ_c 应该为:

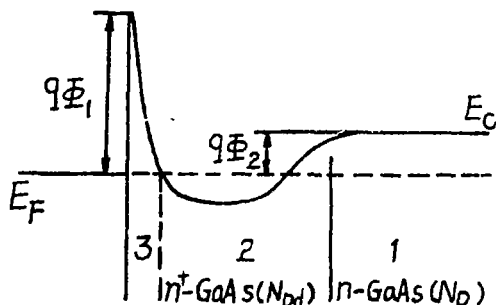


图1 金属—GaAs欧姆接触能带图

$$\rho_c = \rho_{c1} + \rho_{c2} \quad (4)$$

ρ_{c1} 、 ρ_{c2} 分别为由 Φ_1 和 Φ_2 所引起的比接触电阻。式(4)中的 ρ_{c1} 与(1)式中的 ρ_c 相同, 它与 N_D 无关。所以, 为解释 $\rho_c \sim N_D^{-1}$ 关系, 关键在于求得 ρ_{c2} 对 ρ_c 的影响。现已知 ρ_{c2} 是由 n^+/n 结势垒引起, 对 n^+/n 结, Johnson等人^[3]利用耗尽层近似(此耗尽层宽度仅限于几个德拜长度 L_D)指出, 在外加偏压下, 电子通过 n^+/n 结的输运电流密度在注入比 $\gamma \approx 1$ 的情况下, 可写为:

$$J = \mu_n k T \frac{d(\Delta n)}{dx} \quad \text{结区} \quad (5)$$

将上式的 x 对德拜长度 L_D 归一化, 可得归一化电流密度

$$J \simeq \mu_n k T \frac{\Delta n}{L_D} \quad (6)$$

式中, μ_n 为电子迁移率, Δn 为外加偏压 V 时 n 侧电子浓度增量。

Δn 可类似于 pn 结进行计算。由于图1中2区为高简并区, 为分析简单起见, 可假设该区域中位于费米能级 E_F 上的电子浓度正比于 N_{Dd} , 或写为 $K_B N_{Dd}$ (K_B 为一比例系数)。利用波尔兹曼分布近似, 则得结区 n 侧的电子浓度

$$n = K_B N_{Dd} \exp(-q\Phi_2/kT) = K_B \frac{N_{Dd} \cdot N_D}{N_C} \quad (7)$$

$$\text{及 } \Delta n = K_B N_{Dd} \exp[-q(\Phi_2 - V)] = K_B \frac{N_{Dd} \cdot N_D}{N_C} \exp(qV/kT) \quad (8)$$

式中, N_C 为导带有效状态密度。

将(8)式代入(6)式则得

$$J \simeq \mu_n k T \frac{K_B \cdot N_{Dd} \cdot N_D}{L_D N_C} \exp(qV/kT) \quad (9)$$

再由比接触电阻定义式 $\rho_{c2} \equiv \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1}_{V=0}$, 则可得归一化的 ρ_{c2} 为

$$\rho_{c2} \simeq L_D N_C / q \mu_n \cdot K_B \cdot N_{Dd} \cdot N_D \quad (10)$$

在此特别需要指出, 尽管用(10)式所得的结果是粗糙的, 但从式中可以看出 ρ_{c2} 与 N_D 的反比关系。这就表明, n^+/n 结的存在, 确定可引起总比接触电阻 ρ_c 与 N_D 成反比的关系。

利用(10)式, 可以解释下列事实:

①当半导体本体为简并的(也就是说 $N_D > N_C$), 公式(10)便不再成立, 因为此时的势垒 Φ_2 消失。 $\rho_{c2} \ll \rho_{c1}$, 总的比接触电阻 ρ_c 可由 ρ_{c1} 近似地决定, 与式(1)情况相同。②因为 N_{Dd} 的大小仅仅由制作工艺的要求所决定, 而与 N_D 毫无关系。当 $N_D < N_C$ 时, 势垒 Φ_2 出现并随着 N_D 的减小而增高。如果 N_{Dd} 仍足够高(这是制作欧姆接触所必需的), 电流的场发射输运机理对“欧姆结”仍占主导地位, $\rho_{c2} \gg \rho_{c1}$, ρ_c 便由 ρ_{c2} 决定, 由(10)式可知 $\rho_{c2} \propto N_D^{-1}$ 。以上两种情况, 可以说明轻掺杂半导体本体上制作欧姆接触时 $\rho_c \sim N_D^{-1}$ 的关系。

仿照以上讨论方式, 该模型同样可对 p -GaAs及其它类型的半导体材料的比接触电阻作理论上的解释。

二、溅射清洗半导体表面影响 ρ_c 机理的理论分析

欧姆接触质量的好坏, ρ_c 值的高低, 制作工艺起着十分重要的作用。因此欧姆接触的研究, 主要是探索各种新的制作工艺(衬底的制备、清洗、金属的沉积、合金等)。一般说来, 制作欧姆接触需要两个最基本的步骤, 一是半导体表面的清洗, 二是接触金属的沉积。

而首要的问题是半导体表面的清洗。在一般工艺中,多数是采用湿蚀法,这种方法的不足之处就是将湿蚀后的半导体底片放入真空室中沉积金属之前,它便暴露在周围气氛环境之中,不能很好地控制表面的污染。A·Callegari等人^[4]报道了利用射频(RF)溅射清洗半导体表面,不但具有很高的重复性,而且带来了良好的电学、热学性能。他们对n-GaAs的AuGeNi系统进行了研究。特别指出,恰当地利用RF溅射清洗GaAs表面,然后再沉积AuGeNi,可得到很低的接触电阻 $\overline{R_c} \approx 0.1 \Omega \cdot \text{mm}$;即便将此接触在400℃温度下退火近57小时,其接触电阻亦只升至 $\overline{R_c} \leq 0.6 \Omega \cdot \text{mm}$,仍能满足某些器件要求的范围。由此可见,该系统的欧姆接触其电学和热学性能是稳定的。

下面,从理论上对RF溅射清洗半导体表面可使 ρ_c 降低的机理加以分析。由于溅射清洗过程中,等离子体振荡能量较大,这就会对半导体表面造成一定的损伤。按E·H·Rhoderick^[5]的观点,将在近半导体表面处形成一些晶体缺陷,这些缺陷可以起到一些有效复合中心的作用。假若它们的密度足够高,有使耗尽区中的复合电流成为主要的电流传导机构,便会使接触电阻明显的降低,有利于欧姆接触的形成。为说明此问题和分析方便起见,我们仍以n型半导体材料为例,并用“陷阱”模型加以讨论。假设由于溅射致成的表面损伤会引起半导体表面及深处存在一陷阱密度分布,并假设此“类施主陷阱”密度的指数分布为^[6]:

$$N_t = N_{ts} \cdot \exp(-x/L) \quad (11)$$

式中, N_{ts} 为半导体表面处的陷阱密度, x 为距此表面的距离, L 为一“特性长度”参数。陷阱密度及陷阱电荷密度分布、金属—半导体接触势垒和陷阱能级示于图2。图中, E_t 为陷阱能级, V_t 为与表面陷阱能级有关的电势,其它符号为通用符号。

由图2可见,在 $x < x_1$ 时陷阱能级位于费米能级 E_F 之上,所以陷阱是荷电的,而施主密度 N_D 至 $x = W$ 处也是未补偿的(耗尽层近似)。于是,可用泊松(Poisson)方程求解^[8]:

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{q}{\varepsilon_s} \left[N_D + N_{ts} e^{-x/L} \right] \quad x \leq x_1 \quad (12)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{q}{\varepsilon_s} N_D \quad x_1 \leq x \leq W \quad (13)$$

再利用边界条件

$$\begin{cases} x = W, & \varepsilon_{x \rightarrow W} = 0 \\ x = x_1, & \varepsilon_{0 \rightarrow x_1} = \varepsilon_{x_1 \rightarrow W} \end{cases}$$

$$\text{及 } \begin{cases} x = 0, & \varphi_{0 \rightarrow x_1} = \varphi_{b_0} \\ x = x_1, & \varphi_{0 \rightarrow x_1} = \varphi_{x_1 \rightarrow W} \end{cases}$$

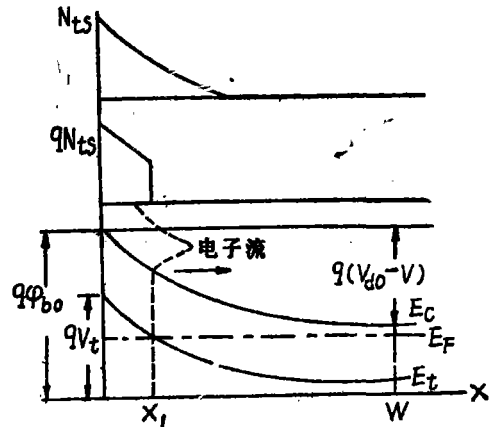


图2 陷阱密度、电荷和电势分布

解方程(12)、(13)可得:

$$\varphi_{0 \rightarrow x_1} = \varphi_{b_0} - \frac{q}{\epsilon_s} \left[N_D \left(W x_1 - \frac{x_1^2}{2} \right) + L^2 N_{t_1} \left(1 - e^{-x_1/L} - \frac{x_1}{L} e^{-x_1/L} \right) \right] \quad (14)$$

$$\varphi_{x_1 \rightarrow W} = \varphi_{b_0} - \frac{q}{\epsilon_s} \left\{ N_D \left(W x_1 - \frac{x_1^2}{2} \right) + L^2 N_{t_1} \left[1 - \left(1 + \frac{x_1}{L} \right) e^{-x_1/L} \right] \right\} \quad (15)$$

由(14)、(15)两式可见,由于陷阱捕获载流子所产生的电荷对势垒施加一修正,此两式便是修正后的电势分布。再参见图2,又可得关系式:

$$V_t - V = \frac{q}{\epsilon_s} \left\{ N_D \left(W x_1 - \frac{x_1^2}{2} \right) + L^2 N_{t_1} \left[1 - \left(1 + \frac{x_1}{L} \right) e^{-x_1/L} \right] \right\} \quad (16)$$

$$V_{d_0} - V = \frac{q}{\epsilon_s} \left\{ N_D \frac{W^2}{2} + L^2 N_{t_1} \left[1 - \left(1 + \frac{x_1}{L} \right) e^{-x_1/L} \right] \right\} \quad (17)$$

由(16)、(17)两式可得

$$V_{d_0} - V_t = \frac{q N_D}{\epsilon_s} \left[\frac{W^2}{2} - \left(W x_1 - \frac{x_1^2}{2} \right) \right] \quad (18)$$

由上式给出势垒宽度为:

$$W = x_1 + \sqrt{\frac{2 \epsilon_s}{q N_D} (V_{d_0} - V_t)} \quad (19)$$

由(14)、(15)、(19)诸式可以看出,假若 $N_{t_1} \gg N_D$,只要电子的费米能级位于 V_t 之下,在接近表面处的电位梯度将会提高,这将导致势垒变窄,并形成显著的隧道效应。因为电子的隧道效应增加了电子流,于是可使比接触电阻 ρ_c 值降低,有利于获得良好的欧姆接触。

总之,用欧姆结和 n^+/n 结模型解释欧姆接触的有关理论是可行的。同时,对用“陷阱”模型分析RF溅射清洗半导体表面降低 ρ_c 的结果也是令人满意的。

参 考 文 献

- [1] F.A.Padovani and R.Stratton,
Solid-state Electron. 1966, Vol. 9, pp.695
- [2] Wu Dingfen, Wang Dening and Klaus Heime, ibid. 1986, Vol.29, No.5
pp.489—494
- [8] W.C.Johnson et al, IEEE Trans. Electron Dev.ED—18, 1971, pp.965
- [4] A.Callegari, et al,
Solid-st. Electron. 1986, Vol.29, No.5 pp.523—527
- [5] E.H.Rhoderick, “Metal-Semiconductor Contacts”, Oxford
University press, 1978, pp.179
- [6] Francis H Mullns et al,
Solid-st. Electron. 1976, Vol.19, pp.489—492

(本刊收稿日期1986年11月19日)