

金属-半导体比接触电阻的 圆环结构测试法

朱德光 吴鼎芬

(中国科学院上海冶金研究所)

1986年8月4日收到

提 要

本文中提出了一种测量金属-半导体欧姆接触比接触电阻的新方法-圆环结构测试法。导出了适用于半无限大和有一定厚度的半导体材料的比接触电阻表达式。用此方法进行实验测量和计算,所得结果与文献结果符合得很好。

一、引 言

金属-半导体的欧姆接触是半导体器件工艺中不可缺少的一道工序。欧姆接触质量的好坏直接影响半导体器件的性能。比接触电阻 ρ_c 是衡量接触质量的重要指标之一。测量 ρ_c 的方法在文献中有许多报道^[1-8], 其中适于金属与薄层型半导体接触的 ρ_c 的测量方法有线型传输线法^[1]、接触电阻-端电阻计算法^[2]、圆形传输线法^[3]、四点圆形传输线法^[4]和四端测试法^[5]。适于金属与半导体体材料接触的 ρ_c 的测量方法有拟合法^[6]、改进四探针法^[7]和四点结构法^[8]等。本文提出一种测量金属-半导体体材料的 ρ_c 的圆环结构测试法。按此结构制作样品,只要一面光刻制作欧姆接触,工艺简单,且测试也比较方便。

二、理 论 模 型

图1为圆环的测试结构示意图。中心圆与其外三个圆环分别代表四个电极。中心圆的半径为 r_0 , 第二、第三和第四圆环的内外半径分别为 $r_1, r'_1, r_2, r'_2, r_3$ 和 r'_3 。电流流过第一电极即中心圆和第四圆环电极,并用 i_{14} 表示。

对于半无限大的样品,当中心圆电极通过电流 i 时,在距其为 s 的远处产生的浮置电压 V_f 为^[8]

$$V_f = \frac{\rho i}{2\pi r_0} \sin^{-1} \left(\frac{r_0}{s} \right) \quad (1)$$

式中 ρ 为半导体材料的电阻率。由(1)式得当中心圆通电流 i 时,在中心圆电极与第二和第三圆环电极之间产生的电位差分别为 V_{12} 和 V_{13} , 它们可用下两式表示:

$$V_{12} = i \left[R_c + \frac{\rho}{2\pi r_0} \left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{r_0}{r_1} \right) \right) \right], \quad (2)$$

$$V_{13} = i \left[R_c + \frac{\rho}{2\pi r_0} \left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{r_0}{r_2} \right) \right) \right]. \quad (3)$$

上两式中 R_c 为中心圆电极与半导体的接触电阻。

设半导体是均匀的, 则当电流流过半径为 r_0 的圆形接触时, 它在该圆接触的下面产生的等位面是一簇旋转半椭球面^[9]。在过圆直径且垂直于半导体表面的平面上, 它们是以圆心为中心, 圆半径为焦距的共焦椭圆簇。当电流流过宽为 $2a$ 的长金属片接触时, 它在金属片下产生的等位面是一簇共焦半椭圆柱面^[10,11]。椭圆簇的中心为片的中心, 焦距为 a , 轴向沿片长方向。对于圆环接触, 则在过圆直径且垂直于半导体表面的任一平面上, 环片下附近的等位线都是一样的, 且都是以圆环半宽处为中心, 环宽之一半为焦距的共焦半椭圆簇。环片下附近的电位分布情况与长金属片类似, 等位面是以绕圆周方向为轴向的共焦半椭圆柱面, 于是可将圆环看作长金属片处理, 当作平面情况对待。当电流 i 流过第四圆环接触时, 它在环下附近产生的等位面是以 $\pi(r_3 + r'_3)$ 为柱长, 焦距为 $a (= (r'_3 - r_3)/2)$ 的一簇共焦椭圆柱面。利用平面保角变换原理, 可将椭圆平面变到圆面上来。由此得出第四圆环接触通电流 i 时, 在距该环为 s 处产生的浮置电位为(见附录)^[10,11]

$$V'_i = \frac{i\rho}{\pi^2(r_3 + r'_3)} \ln \left(\frac{s}{a} + \sqrt{\left(\frac{s}{a} \right)^2 - 1} \right) + iR'_c, \quad (4)$$

式中 R'_c 为第四圆环与半导体的接触电阻。(4)式中的对数型电位分布是平面势的必然结果, 且随 s 增大 V'_i 的值也是增大的。幸而我们并不要求某一点的电位, 而只是求两点间的电位差。(4)式必须限制在

$$s \leq r_3 + \frac{r'_3 - r_3}{2} \quad \text{且} \quad s \geq \frac{r'_3 - r_3}{2}$$

时使用。因当 $s > r_3 + \frac{r'_3 - r_3}{2}$ 时, 由于受到中心圆与第四圆环的间距限制, 径向的椭圆势分布遭到破坏, 前面所作假设不再成立, (4)式不再成立, 必须重新考虑。当 r 很大的, 该环通电流时产生的电位分布与中心圆产生的电位分布趋于相同, 故当中心圆电极与第四圆环电极间通电流时, 无穷远处的电位是互相抵消的。用 V'_{12} 和 V'_{13} 分别表示第四圆环电极通电流 i 时, 在中心圆与第二和第三圆环电极间产生的电位差, 则

$$V'_{12} = \frac{i\rho}{\pi^2(r_3 + r'_3)} \left\{ \ln \left(\frac{r_3 - r_0}{a} + \sqrt{\left(\frac{r_3 - r_0}{a} \right)^2 - 1} \right) - \ln \left(\frac{r_3 - r_1}{a} + \sqrt{\left(\frac{r_3 - r_1}{a} \right)^2 - 1} \right) \right\}, \quad (5)$$

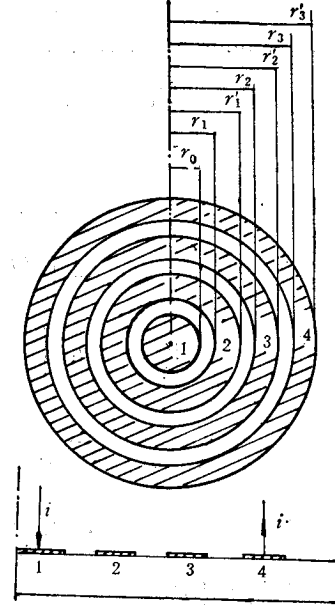


图 1

$$V'_{13} = \frac{i\rho}{\pi^2(r'_3 + r_3)} \left\{ \ln \left(\frac{r_3 - r_0}{a} + \sqrt{\left(\frac{r_3 - r_0}{a} \right)^2 - 1} \right) - \ln \left(\frac{r_3 - r_2}{a} + \sqrt{\left(\frac{r_3 - r_2}{a} \right)^2 - 1} \right) \right\}. \quad (6)$$

由(2),(3),(5)和(6)式,可得当在中心圆与第四圆环电极间通电流时,在中心圆与第二和第三圆环电极之间测得的电位差分别为 V_1 和 V_2 , 它们表示为

$$V_1 = \pm i_{14} \left\{ R_c + \frac{\rho}{2\pi r_0} \left[\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{r_0}{r_1} \right) \right] - \frac{\rho}{\pi^2(r'_3 + r_3)} \left[\ln \left(\frac{r_3 - r_0}{a} + \sqrt{\left(\frac{r_3 - r_0}{a} \right)^2 - 1} \right) - \ln \left(\frac{r_3 - r_1}{a} + \sqrt{\left(\frac{r_3 - r_1}{a} \right)^2 - 1} \right) \right] \right\}, \quad (7)$$

$$V_2 = \pm i_{14} \left\{ R_c + \frac{\rho}{2\pi r_0} \left[\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{r_0}{r_2} \right) \right] - \frac{\rho}{\pi^2(r'_3 + r_3)} \left[\ln \left(\frac{r_3 - r_0}{a} + \sqrt{\left(\frac{r_3 - r_0}{a} \right)^2 - 1} \right) - \ln \left(\frac{r_3 - r_2}{a} + \sqrt{\left(\frac{r_3 - r_2}{a} \right)^2 - 1} \right) \right] \right\}. \quad (8)$$

如果电流由中心圆流进,由第四圆环流出,则上两式中前面应取正号;若电流由第四圆环流进,由中心圆环流出,上两式前面应取负号。

根据(7)和(8)式即得在中心圆与第四圆环电极间通电流时,在中心圆与第二和第三圆环间测得的总电阻,分别用 R_1 和 R_2 表示,即

$$R_1 = R_c + \rho C_1, \quad (9)$$

$$R_2 = R_c + \rho C_2, \quad (10)$$

式中

$$C_1 = \frac{1}{2\pi r_0} \left[\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{r_0}{r_1} \right) \right] - \frac{1}{\pi^2(r'_3 + r_3)} \cdot \left[\ln \left(\frac{r_3 - r_0}{a} + \sqrt{\left(\frac{r_3 - r_0}{a} \right)^2 - 1} \right) - \ln \left(\frac{r_3 - r_1}{a} + \sqrt{\left(\frac{r_3 - r_1}{a} \right)^2 - 1} \right) \right], \quad (11)$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi r_0} \left[\frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \left(\frac{r_0}{r_2} \right) \right] - \frac{1}{\pi^2(r'_3 + r_3)} \cdot \left[\ln \left(\frac{r_3 - r_0}{a} + \sqrt{\left(\frac{r_3 - r_0}{a} \right)^2 - 1} \right) - \ln \left(\frac{r_3 - r_2}{a} + \sqrt{\left(\frac{r_3 - r_2}{a} \right)^2 - 1} \right) \right]. \quad (12)$$

实验测出 R_1 和 R_2 , 根据(9)–(12)式可求得 R_c 和 ρ . 其中 ρ 也可以通过别的实验方法求得, 这时 R_c 应取(9)和(10)两式结果的平均. ρ_c 值可由下式求得:

$$\rho_c = \pi r_0^2 R_c. \quad (13)$$

文献[8]指出, 如果半导体材料不是半无限大, 而是有一定的厚度, 则应考虑下一界面的影响, 即应对(9)–(13)各式进行修正.

如图2所示, 样品厚度为 t , 底面为绝缘面, 它的影响是使得电流1和4在下一界面的另一侧产生两个等距离的映像1'和4'. 但样品的上界面也是绝缘面, 因此1'和4'又在另一侧造成映像1''和4''. 这样, 两界面互为映像面, 从而在上下两侧产生无穷多个映像, 图2中只示意地画出少数几组映像. 考虑到这些映像的影响, (9)和(10)两式变为

$$R'_1 = R_c + \rho C'_1, \quad (14)$$

$$R'_2 = R_c + \rho C'_2, \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} C'_1 = C_1 + \frac{1}{\pi r_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sin^{-1} \left(\frac{r_0}{2nt} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{r_0}{\sqrt{(r_1 - r_0)^2 + (2nt)^2}} \right) \right] \\ - \frac{2}{\pi^2 (r'_1 + r_3)} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{(r_3 - r_0)^2 + (2nt)^2}}{a} + \sqrt{\frac{(r_3 - r_0)^2 + (2nt)^2}{a^2} - 1} \right) \right. \\ \left. - \ln \left(\frac{\sqrt{(r_3 - r_1)^2 + (2nt)^2}}{a} + \sqrt{\frac{(r_3 - 1)^2 + (2nt)^2}{a^2} - 1} \right) \right], \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} C'_2 = C_2 + \frac{1}{\pi r_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sin^{-1} \left(\frac{r_0}{2nt} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{r_0}{\sqrt{(r_2 - r_0)^2 + (2nt)^2}} \right) \right] \\ - \frac{2}{\pi^2 (r'_2 + r_3)} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{(r_3 - r_0)^2 + (2nt)^2}}{a} + \sqrt{\frac{(r_3 - r_0)^2 + (2nt)^2}{a^2} - 1} \right) \right. \\ \left. - \ln \left(\frac{\sqrt{(r_3 - r_2)^2 + (2nt)^2}}{a} + \sqrt{\frac{(r_3 - r_2)^2 + (2nt)^2}{a^2} - 1} \right) \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

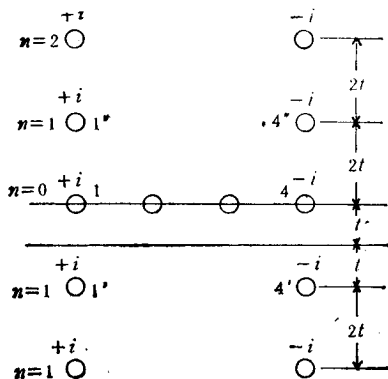


图2 两绝缘界面相互影响造成的电流映像

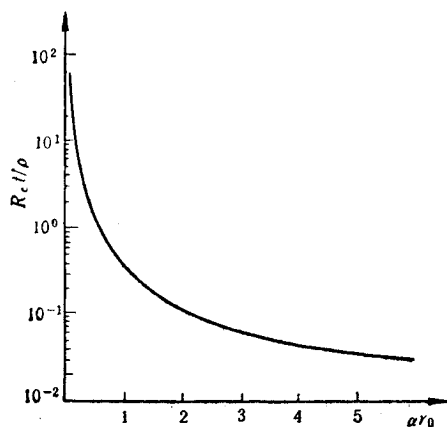


图3 接触电阻与半导体材料方块电阻之比 $R_c t / \rho$ 与 αr_0 的关系

R_1' 和 R_2' 分别是当半导体有一定厚度时, 在中心圆和第四圆环电极间通电流 i_1 时, 在中心圆与第二和第三圆环电极间测得的电阻值。根据(14)–(17)式便可求得 R_c 和 ρ 。如果 ρ 值由其它实验方法测出, R_c 值应取(14)和(15)两式结果的平均值。

由于半导体是有一定厚度的, 电流被限制在这一厚度的薄层内向外辐射, 这时 ρ_c 值应按下述方法求得。Fang 等人^[12]指出, 在这情形的接触电阻 R_c 应用下式表示:

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi\alpha r_0 t} \frac{I_0(\alpha r_0)}{I_1(\alpha r_0)}, \quad (18)$$

式中 $I_0(\alpha r_0)$ 和 $I_1(\alpha r_0)$ 分别为变形零阶和一阶贝塞耳函数。 α 的表达式为

$$\alpha = \sqrt{\rho/\rho_c t}. \quad (19)$$

(18)式又可改写为

$$R_c t / \rho = \frac{1}{2\pi\alpha r_0} \frac{I_0(\alpha r_0)}{I_1(\alpha r_0)}.$$

因此可按此公式计算出 $R_c t / \rho$ 与 αr_0 的关系曲线(见图3)。这样, 由(14)–(17)式求得 R_c 和 ρ (或实验测出 ρ , R_c 取(14)和(15)两式的平均), 从而得到 $R_c t / \rho$, 由图3即可得到 αr_0 。因 r_0 已知, 由(19)式可求得 ρ_c 。

三、实验和结果

实验样品采用(100)晶向的 n 型 GaAs 材料, 掺杂浓度为 $1.3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 用 AuGeNi 作欧姆接触金属, 用常规的硅平面工艺制作测试图形, 用本所研制的智能化欧姆接触测试仪进行测量, 仪器的测量精度优于 2%, 用(14)–(19)式计算出 ρ_c 值。测试图形分为两组, 一组 $r_0 = (10 - 25) \mu\text{m}$, $r_1 = 130 \mu\text{m}$, $r_1' = 140 \mu\text{m}$, $r_2 = 180 \mu\text{m}$, $r_2' = 190 \mu\text{m}$, $r_3 = 230 \mu\text{m}$, $r_3' = 240 \mu\text{m}$, 环宽均为 $10 \mu\text{m}$ 。另一组中心圆半径 r_0 从 50 到 $80 \mu\text{m}$, 第四圆环的内外半径分别为 $220 \mu\text{m}$ 和 $250 \mu\text{m}$, 第二和第三圆环尺寸略有变化, 但环宽均为 $30 \mu\text{m}$ 。同时还用同一工艺同时制备改进四探针法和四点结构法的欧姆接触测试图形以便比较。几种方法的实验结果列于表1中。表1中, 改进四探针法计算公式中 ρ 值为实测值^[7], 而在另外两种方法中, ρ 值可以作为变数计算出来, 也可用实测值。从表1中看出, ρ 作为变数计算出的值与实测值有偏差, 因而算出的 ρ_c 值也有所不同, 不过两者相差并不大。表1中 0.0155 的电阻率值是用范德堡法测得的, 其他值则是以 ρ 作为变数时, 在同一圆点半径下多次测量的平均值。实验中发现, 当 r_0 在 10 至 $25 \mu\text{m}$ 之间变化时, 把 ρ 作为变数处理计算出的值均超过 $0.03 \Omega \cdot \text{cm}$, 从而求得的 R_c 值为负, 这是不可能的。而当 $r_0 \geq 50 \mu\text{m}$ 时, 按本文方法计算的电阻率值与用其他实验方法测得的值基本一致, 这表明适当大的圆点半径的测试结构较为准确。从表1可看到, 圆点半径 r_0 在 50 至 $80 \mu\text{m}$ 之间变化时, 如以 $r_0 = 60 \mu\text{m}$ 为例, 本文方法与其它方法特别是四点结构法的结果符合得很好, 其差别在一般的允许偏差范围之内。

从表1中看出, ρ_c 值随 r_0 的增加时, 总的趋势是增加的, 这种增加在 r_0 从 $25 \mu\text{m}$ 增到 $80 \mu\text{m}$ 时尤为明显。Fang 等人曾对这种现象作过分析^[12], 认为这是接触边缘电流的聚集效应所引起的。他们用同样面积, 但周长不同的接触来测定接触电阻, 接触周边长

表 1 圆环结构测试法与文献[7,8]报道方法的结果比较

方 法	圆点半径 $r_0(\mu\text{m})$	电阻率 $\rho(\Omega \cdot \text{cm})$	比接触电阻 $\rho_c(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
圆环结构测试法	10	0.0155	2.7×10^{-6}
	15	0.0155	2.63×10^{-6}
	20	0.0155	2.7×10^{-6}
	25	0.0155	5.3×10^{-6}
	50	0.0155 0.011	6.1×10^{-6} 1.5×10^{-5}
	60	0.0155 0.015	9×10^{-6} 9.7×10^{-6}
	70	0.0155 0.0146	1×10^{-5} 1.2×10^{-5}
	80	0.0155 0.016	1.6×10^{-5} 1.26×10^{-5}
改进四探针测试法	50—70 60	0.0155 0.0155	$(4.1-5.8) \times 10^{-5}$ 5.1×10^{-5}
四点结构测试法	60	0.0085 0.0155	4×10^{-5} 8×10^{-6}

(或者接触周边长与面积之比大)的接触电阻明显地低。这是因为电流沿接触边缘的聚集使得边缘电场强度大于接触面内的场强,从而边缘处电子的场发射强,这有利于界面接触电阻的降低,即也利于比接触电阻的降低。对于较小的接触,其接触周边长与面积之比较大,电流的聚集效应较强,接触下的平均场发射较强,所以相应的比接触电阻低。本文方法也有类似的结果。如圆点半径从 $20\mu\text{m}$ 增加到 $80\mu\text{m}$ 时增加了三倍, ρ_c 值也增加了约三倍。这说明 ρ_c 值随 r_0 的增大而增大是由于电流边缘聚集效应引起的。

四、结 论

1. 提出用圆环结构测试法测定欧姆接触的比接触电阻,导出了适用于半无限大和有一定厚度的材料的比接触电阻的计算公式,测定结果与文献报道的改进四探针法和四点结构测试法测定的结果符合得很好。

2. 比接触电阻值随接触点半径增加而增加,这是由于电流的边缘聚集效应引起的。

3. 所提出的方法不仅适用于 GaAs, 应也适用于其他化合物半导体或元素半导体。

作者谨对胡素英和倪企民同志在工作中的帮助表示感谢。

附 录

当电流 i 通过宽为 $2a$ 的长金属片流入半导体时,它在金属片下产生的电位分布是以片宽中线为轴线,片半宽 a 为焦距的共焦椭圆柱面簇.沿金属片的任一横截面看,半导体内的等位线均是一样且都为半椭圆,于是求片下电位分布的三维问题就可化为平面情况处理.设椭圆势分布的面为 ζ 平面,在此平面内的欧姆定律形式为

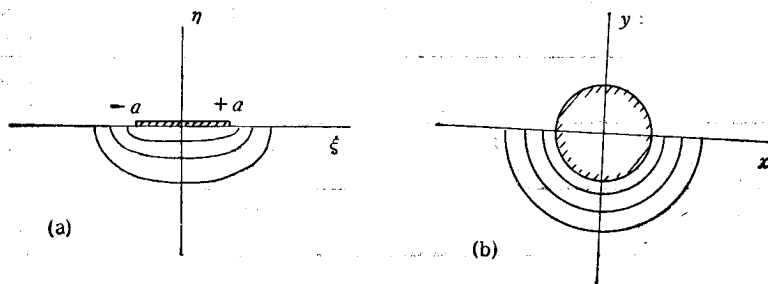
$$J = -\sigma \nabla_{\zeta} V, \quad (\text{A} \cdot 1)$$

ζ 表示 ζ 平面,如附录图中 (a) 所示. σ 为半导体的电导率.带电金属片的任一横截面可看作是焦点为 $-a$ 和 a , 半长轴为 a , 半短轴为零的椭圆.作儒可夫斯基变换

$$\zeta = \frac{a}{2} \left(z + \frac{1}{z} \right), \quad (\text{A} \cdot 2)$$

则带电金属片变成 z 平面上半径为 1 的长圆柱. (A·1) 式相应变为

$$J = -\sigma \nabla_z V, \quad (\text{A} \cdot 3)$$



附录图 1

Z 表示 Z 平面,如附录图 1(b) 所示.这时等位面为同轴圆柱面.对于圆环,设环的内外半径分别为 r_3 和 r'_3 ,当电流 i 从圆环金属片流入半导体时,它产生的等位面在金属片附近是以环片宽的中点为中心,环半宽

$$a \left(= \frac{r'_3 - r_3}{2} \right)$$

为焦距,轴线为环的平均周线的共焦椭圆柱面,柱长为 $\pi(r_3 + r'_3)$.沿过圆直径且垂直于半导体表面的任一平面看,环下附近半导体内的等位线都是一样的,且都为半椭圆,这和长金属片情况类似,可作同样处理,于是求环金属片下半导体内的电位分布问题可作平面近似处理.经过(A·2)式变换后,(A·3)式仍然成立.在 Z 平面,电力线仅是径向辐射的,(A·3)式可化为标量形式.此时电流密度为 $J = i/\pi^2(r_3 + r'_3)Z$, 所以有

$$-\sigma \frac{dV}{dZ} = \frac{i}{\pi^2(r_3 + r'_3)Z}. \quad (\text{A} \cdot 4)$$

积分(A·4)式即得距轴为 $|z|$ 处的浮置电流为

$$V = \frac{i\rho}{\pi^2(r_3 + r'_3)} \ln|Z| + C, \quad (\text{A} \cdot 5)$$

C 为常数.再变回到 ζ 平面即得圆环金属片下的电位分布.在本文情况下,只需求半导体表面上一点的电位,即只需求 ζ 平面实轴上的电位分布,这时 $|z|$ 的表达式就非常简单.利用(A·2)式,并令 $\zeta = \xi$, 得

$$|Z| = \frac{\xi}{a} \pm \sqrt{\left(\frac{\xi}{a}\right)^2 - 1}. \quad (\text{A} \cdot 6)$$

由于只求柱外的电位分布,上式中应取正号.于是(A·5)式变为

$$V = \frac{i\rho}{\pi^2(r_3 + r'_3)} \ln \left(\frac{\xi}{a} + \sqrt{\left(\frac{\xi}{a}\right)^2 - 1} \right) + C.$$

但当 $\xi = a$ 时, V 应等于 iR_c' (R_c' 为金属圆环与半导体的接触电阻), 则上式可写为

$$V = \frac{i\rho}{\pi^2(r_s + r_a)} \ln \left(\frac{\xi}{a} + \sqrt{\left(\frac{\xi}{a}\right)^2 - 1} \right) + iR_c'. \quad (\text{A} \cdot 7)$$

这就是金属圆环电极通电流 i 时附近半导体表面上的电位分布.

参 考 文 献

- [1] H. H. Berger, *J. Electrochem. Soc.*, **119**(1972), 507.
- [2] G. K. Reeves and H. B. Harrison, *IEEE Elect. Dev. Lett.*, **EDL-3**(1982), 11.
- [3] G. K. Reeves, *Solid-State Electronics*, **23**(1980), 487.
- [4] 陈存礼, 半导体学报, **4**(1983), 191.
- [5] S. J. Proctor and L. W. Linholm, *IEEE Elect. Dev. Lett.*, **EDL-3**(1982), 294.
- [6] R. H. Cox and H. Strack, *Solid-State Electronics*, **10**(1967), 1213.
- [7] E. Kuphal, *Solid-state Electronics*, **24**(1981), 69.
- [8] 陈存礼, 物理学报, **33**(1984), 1314.
- [9] R. Holm, *Electric Contacts Handbook*. Springer-Verlag, Berlin. (1958).
- [10] 梁昆淼, 数学物理方法, 人民教育出版社, (1979), 第 17 章.
- [11] 斯颂乐、徐世良、高永椿、张官南和张立志, 数学物理方法, 天津科学技术出版社 (1982), 第 17 章.
- [12] Y. K. Fang, C. Y. Chang and Y. K. Su, *Solid-State Electronics*, **22**(1979), 933.

A METHOD TO DETERMINE THE SPECIFIC CONTACT RESISTANCE OF METAL-SEMICONDUCTOR CONTACT —CIRCULAR RING STRUCTURE METHOD

ZHU DE-GUANG WU DING-FEN

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

ABSTRACT

In this paper, a method to determine the specific contact resistance of metal-semiconductor contact—circular ring structure method is presented. The equations for specific contact resistance which are used to both the definite thick and semiinfinite samples were derived. Some measurements and calculations have been carried out, the results are in good agreement with those of methods published in the literature.