

# The Improvement of Ohmic Contacts Property in P-Type 4H-SiC LDMOSFET Using Ti(20 nm)/Al(30 nm) Electrodes

Ziwei Pei<sup>1,2</sup>, Chen Chen<sup>1</sup>, Fei Yang<sup>3</sup>, Hengyu Xu<sup>1</sup>, Jing Zhang<sup>2</sup>, Caiping Wan<sup>1,2</sup>, Jinbiao Liu<sup>1</sup>, Junfeng Li<sup>1</sup>, Zhi Jin<sup>1</sup>, Xinyu Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing

<sup>2</sup>North China University of Technology, Beijing

<sup>3</sup>State Grid Smart Grid Research Institute, Beijing

Email: 651191570@qq.com, chenchen@ime.ac.cn, xuhengyu@ime.ac.cn

Received: Dec. 5<sup>th</sup>, 2015; accepted: Dec. 18<sup>th</sup>, 2015; published: Dec. 30<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Silicon Carbide laterally diffused Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor (SiC LDMOSFET) is widely used in high voltage integrated circuits. Until now, one of the obstacles which restrict its further development is its ohmic contact with p-type SiC. Previously, Aluminum is used to form the ohmic contact for p-type SiC. To form the ohmic contact with p-type SiC, Al metal was deposited and then annealed at high temperature subsequently. However, at high temperature, its thermal stability is supposed to be degraded, and will make the device performance getting worse. The research showed that the addition of titanium can decrease the contact resistance and improve the thermal stability. In this paper, a Ti(20 nm)/Al(30 nm) contact was formed by sputtering on p-type 4H-SiC Epitaxial film respectively with doping concentration of  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Then, rapid thermal annealing was performed in argon atmosphere at 1000°C for 2 min to form the ohmic contact. Transmission-line-model (TLM) method was examined to extract the contact resistivity. In case of Ti(20 nm)/Al(30 nm)/p-type SiC, a specific contact resistance of  $5.71 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$  was obtained, nearly one order of magnitude lower than the respected value. This research has a positive effect on the device performance of SiC LDMOSFETs.

## Keywords

4H-SiC, TLM, Ohmic Contact

---

# Ti(20 nm)/Al(30 nm)/P型4H-SiC LDMOSFET 欧姆接触的改善

裴紫微<sup>1,2</sup>, 陈晨<sup>1</sup>, 杨霏<sup>3</sup>, 许恒宇<sup>1</sup>, 张静<sup>2</sup>, 万彩萍<sup>1,2</sup>, 刘金彪<sup>1</sup>, 李俊峰<sup>1</sup>, 金智<sup>1</sup>, 刘新宇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院微电子研究所, 北京

<sup>2</sup>北方工业大学, 北京

<sup>3</sup>国网智能电网研究院, 北京

Email: 651191570@qq.com, chenchen@ime.ac.cn, xuhengyu@ime.ac.cn

收稿日期: 2015年12月5日; 录用日期: 2015年12月18日; 发布日期: 2015年12月30日

## 摘要

碳化硅横向双扩散金属-氧化物-半导体晶体管(Silicon Carbide laterally diffused Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor, SiC LDMOSFET)在高压集成电路中有着越来越广泛的应用前景。目前为止, 依旧存在着限制SiC LDMOSFET器件进一步发展的瓶颈, 欧姆接触便是其中之一。对于p型碳化硅, 金属铝被认为是有利于形成欧姆接触的材料, 但厚度较厚。研究表明, 钛的加入能减小接触电阻, 提高热稳定性。主要研究了一种新组分的钛/铝薄层金属用于p型4H-SiC的欧姆接触。通过溅射台将Ti(20 nm)/Al(30 nm)金属电极先后溅射到掺杂浓度为 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的p型4H-SiC上, 然后在氩气氛围中快速热退火(退火温度为 $1000^\circ\text{C}$ , 时间为2.5 min)形成欧姆接触。用传输线方法测量比接触电阻。最终得到比接触电阻值的优值为 $5.71 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 比预期结果的比接触电阻值降低了一个量级。此结果对Ti/Al基p型SiC LDMOSFET的进一步研究有着积极的意义。

## 关键词

4H-SiC, 传输线方法, 欧姆接触

## 1. 引言

21世纪是科技飞速发展的世纪, 具体到每一个科技领域诸如交通、军事、能源等基础设施, 均迫切需要能够在高温、高压及高辐射等极端环境下高效率工作的电子器件。然而据目前所研究和了解的情况看, 传统硅器件由于其自身限制, 很难满足这些条件[1]。碳化硅(Silicon Carbide, 简称SiC)材料是第三代宽禁带半导体材料。4H-SiC材料在室温情况下的禁带宽度为3.28 eV, 近似于硅(Si)的三倍, 极大地提高了器件的工作电压。4H-SiC材料的热导率为 $4.5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 同样也是硅(Si)的三倍, 降低了对冷却系统的需求。另外, SiC材料的临界雪崩击穿电场强度是Si材料的10倍以上, 使得SiC MOSFET相比于Si MOSFET导通电阻更小。开关电压更高、温度性能更好, 特别适用于功率开关应用[2]。SiC材料正是在这样的背景下以其优良的物理和电学性能进入了国内外研究者的视野里。

良好的欧姆接触是高压、大功率半导体器件领域应用的关键工艺技术之一。欧姆接触质量的好坏和接触电阻的大小直接影响着半导体器件的开关速度以及半导体器件的功率损耗。如图1所示, SiC LDMOSFET器件结构上的源极和漏极均需要形成良好的p型欧姆接触。和Si材料相比, 由于在SiC材

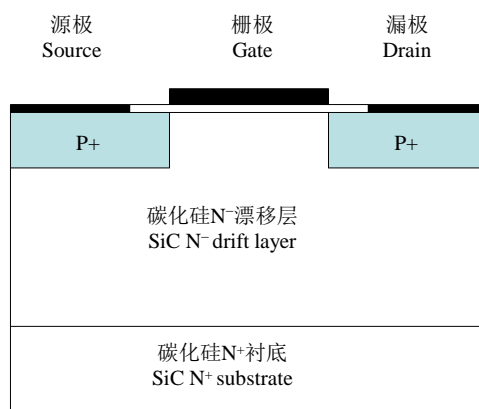


Figure 1. The schematic view of the SiC LDMOSFET  
图 1. SiC LDMOSFET 器件结构示意图

料中 p 型杂质的离化能比 n 型杂质的离化能高，掺杂浓度又难于做到 n 型 SiC 的掺杂水平[3]，因此，p 型 SiC 材料的良好欧姆接触获得难度大，制约了 SiC LDMOSFET 的器件性能。

截至目前，对于 p 型 SiC 的欧姆接触的文献报道主要是选用不同的金属材料在不同的工艺条件下进行合金退火(退火温度和退火气氛等)，比较实验结果[4]。为了达到最优的 p 型 SiC 的欧姆接触，Mysliwiec M 等人使用 Ti(10 nm)/Al(100 nm)/Ti(16 nm)在 p 型 4H-SiC 上的欧姆接触退火条件为 1000℃，2 min，所得比接触电阻优值为  $3.1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$  [5]；Tsukimoto S 将 Ti(50 nm)/Al(190 nm)电极制作在 SiC 上后的退火条件为 1000℃，2 min，所得比接触电阻优值为  $2.0 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$  [3]；Crofton J 采用 Ti(100nm)/Al(300nm)后的欧姆退火温度选择 950℃，1 min，所得比接触电阻的最佳值为  $1.45 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$  [6]；Tamaso H 等人使用 Ti(20 nm)/Al(30 nm)/Si(30 nm)在 p 型 4H-SiC 上的欧姆接触退火条件为 1020℃，2.5 min，最后所得最佳比接触电阻值为  $1.7 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$  [7]。Ti/Al 比率决定着 p 型 SiC 欧姆接触的形成和最佳化的 Al 浓度范围从 70%~80% [3] [8] [9]。许多研究已经报道的 Ti/Al 欧姆接触的 Al 厚度都超过 100 nm [9]-[11]。例如，Tanimoto 等人已经报道[9] Ti(80 nm)/Al(375 nm)有非常低的 p 型比接触电阻率  $\rho_p$ ，已经得到的 p 型 SiC 比接触电阻值范围在  $10^{-3} \sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$  之间[12] [13]。较厚的 Ti/Al 合金会增加工艺的时间和成本。

本文研究了一个新组分的 Ti/Al 基 p 型欧姆接触，所采用的 Ti/Al 金属厚度仅为 20 nm 和 30 nm。随后，对其欧姆接触特性进行了系统地研究。

## 2. 实验

本实验通过在 n 型 4H-SiC 衬底片上生长 1 μm 厚的 p 型高掺杂的外延，掺入的杂质是 Al，浓度为  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。在化学方法清洗表面后，溅射 AlSi 作为隔离刻蚀的掩膜，刻蚀隔离后淀积金属，金属 Ti 和 Al 均是通过溅射台溅射的。溅射金属后，通过光刻和刻蚀制作 TLM 接触电极，电极示意图如图 2(a)所示。经退火后形成欧姆接触，然后采用传输线方法(transmission-line method, TLM)测试比接触电阻率。退火温度是 1000℃，退火时间是 2.5 min。实验中使用 Ti(20 nm)/Al(30 nm)在 p 型 4H-SiC 上形成的金属电极 TLM 测试结构图形如图 2(b)所示，其长度和宽度均为 200 μm，接触块两两之间的间距从小到大分别为 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 μm。

本研究在总结前人退火温度的前提下，结合现有工艺条件，选择主退火温度和时间分别为 1000℃，2.5 min。图 3 展示的是实验中 RTA 退火的示意图，图 3 中上边的曲线代表退火过程中的温度变化，下边的曲线代表退火过程中的功率变化。由图 3 可知，先进行 500℃，60 s 的预退火，然后以 10℃/sec 的速率升温至 1000℃，在 1000℃保持 150 sec，然后自然降温。

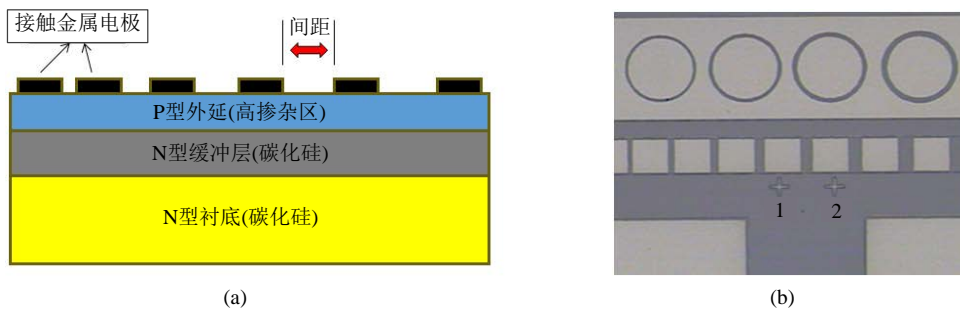


Figure 2. (a) The schematic diagram of TLM test structure; (b) The TLM test patterns  
图 2. (a) TLM 测试结构截面示意图; (b) TLM 测试结构图形

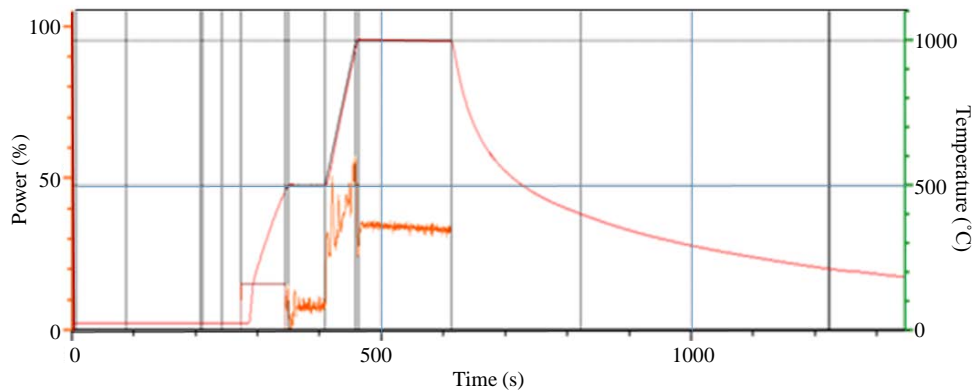


Figure 3. Temperature versus time curve during RTA process  
图 3. RTA 退火工艺中的退火温度 - 时间曲线

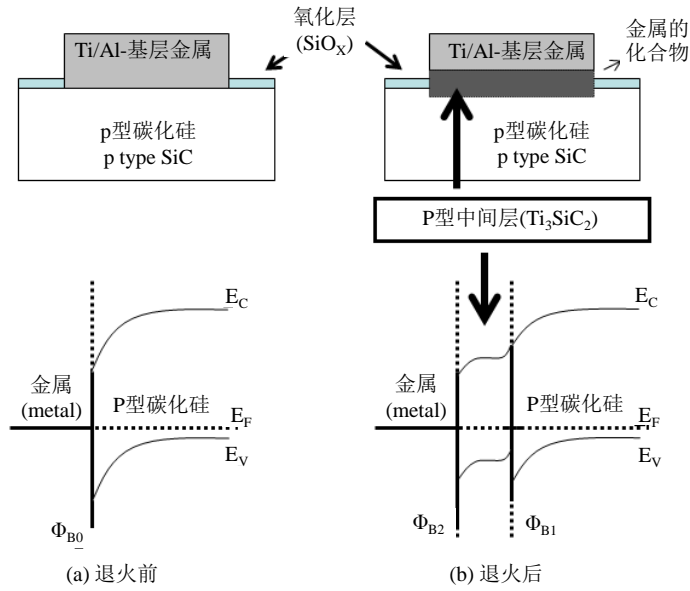
### 3. 结果和讨论

#### 3.1. Ti(20 nm)/Al(30 nm)/p 型 4H-SiC 欧姆接触的机理

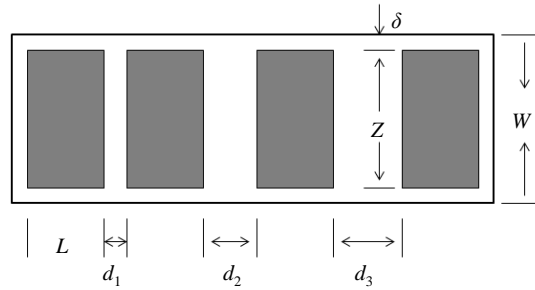
虽然使用 Ti/Al 基金属在 p 型 SiC 上形成欧姆接触的理论提出很多, 然而对于 Ti/Al 基金属通过合适的工艺条件能够在 SiC 上形成欧姆接触的机理目前仍无定论。Ohyanagi 认为接触界面存在的碳元素在降低肖特基势垒方面很可能扮演着重要的角色[14]。然而, Nakatsuka 等人总结说, TiAl 合金中 Al 成分在接触过程中才是占主要地位的[9]。John 和 Capano 使用湿法刻蚀和离子研磨技术, 排除了这些可能性, 然后声称: 欧姆特性的形成是因为在金属半导体接触之间形成了碳化物、 $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  和  $\text{Al}_4\text{C}_3$  [13]。更进一步的研究对接触区揭示了另一种允许电子穿过半导体的新理论, 即在 SiC/ $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  界面上会形成阶梯[15]。Ti/Al 基金属电极与 p 型 4H-SiC 经退火后形成欧姆接触的原因还有很多, 目前较为公认的解释是在快速高温热退火后, 金属半导体之间形成了中间物  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  [3],  $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$  属于窄禁带半导体, 禁带宽度仅为 0.12 eV。这样可以有效的降低势垒高度, 利于载流子的热场发射, 从而形成欧姆接触[16]。退火前后能带变化模型如图 4 所示。

#### 3.2. 传输线方法(Transmission-Line Method, TLM)和模型计算

TLM 测试法是测量比接触电阻的一种常用的方法。TLM 测量的测试装置包含一系列长度和宽度均相等的相同的金属压焊点, 它们做在半导体表面上, 并且间距  $d$  不相等。传输线模型法最早由 Schockley 引入, 后来 Berger 作了进一步改进。按照此模型的测试图形, 如图 5 所示, 在一宽为  $Z$  的长条形半导体上做上一系列长方形欧姆接触, 为避免电流横向在两个宽为  $Z$ 、长为  $L$  的欧姆接触之间, 此长方形半导



**Figure 4.** The energy band gap model of Ti/Al/p type 4H-SiC before and after annealing  
**图 4.** Ti(20 nm)/Al(30 nm)/p 型 4H-SiC 退火前后能带模型



**Figure 5.** The TLM test mode  
**图 5.** TLM 测试模型

体需要和环境隔离。这个可以通过做腐蚀台面，或者做 p-n 结在周围做高阻隔离，在 SiC 工艺中，由于 SiC 的材料特性难于进行刻蚀，因此在工艺中常用的就是做 p-n 结做高阻隔离。在光刻工艺允许的条件下，Z 与 W 的值应该尽量接近，即间隙应尽可能小，以降低寄生电阻。

比接触电阻  $\rho_c$  是评价欧姆接触质量的重要参数，是指金属与半导体之间形成的电阻  $R_c$  与金属与半导体接触横截面积  $A$  的乘积。采用 TLM 传输线方法，比接触电阻( $\rho_c$ )可以通过金属半导体接触的 I-V 特性计算得到，即

$$\rho_c = \lim_{v \rightarrow 0} \left( \frac{dI}{AdV} \right)^{-1} \quad (1)$$

式(1)假设金属与半导体接触的面积都参与了导电过程，实际的情况并不是这样。比接触电阻  $\rho_c$  与半导体的掺杂浓度和金属与半导体接触的势垒高度有关，可以表示为

$$\rho_c \propto \exp\left(\frac{\Phi_B}{\sqrt{N}}\right) \quad (2)$$

其中， $N$  代表半导体掺杂浓度， $\Phi_B$  是金属与半导体接触的势垒高度，式(2)给出了比接触电阻  $\rho_c$  与两者的

变化规律，其意义是如果通过实验得到某一掺杂浓度的金属和半导体形成的欧姆接触的比接触电阻  $\rho_c$ ，可以通过式(2)得到其他掺杂浓度  $N$  的比接触电阻  $\rho_c$ 。

然后，通过 TLM 测试模型压焊点上的 I-V 测量，可以获得间隔为  $d$  的不同压焊点上的总接触电阻  $R_T$ ，如下式(3)所示：

$$R_T = 2R_c + (R_{sh}/Z)d \quad (3)$$

将总接触电阻  $R_T$  作为间距  $d$  的函数，可以得到图 6。通过图 6 中的两个截距和斜率，利用式(4)和(5)最终计算出比接触电阻。

$$L_T = \sqrt{\rho_c / R_{sh}} \quad (4)$$

$$\text{Slope} = R_{sh}/Z \quad (5)$$

其中， $R_{sh}$  为材料的已知方块电阻。 $R_c$  是合金化后金属与半导体的接触电阻。 $L_T$  称为传输长度，定义为电压曲线下降到  $1/e$  时的金属块长度； $\text{Slope}$  为所做曲线的斜率；当  $R_T = 0$  时，直线在  $d$  轴上的交点为  $2L_T$ 。而直线的斜率为  $R_{sh}/Z$  [17]。TLM 测试法的关键在于作图。用  $R_{Ti}$  ( $i=1,2,3,\dots$ ) 表示所测各组总的电阻值， $d_i$  ( $i=1,2,3,\dots$ ) 表示金属块各间距， $\rho_c$  表示比接触电阻，具体测试计算步骤如下：

- 1) 测出一组实验数据  $R_{Ti}$ 。
- 2) 将实验数据  $R_{Ti}$  和金属块间距  $d_i$  描点在直角坐标系上，并做直线(如果欧姆接触良好，同时各个间距设置正确的话，所描的点应近似在一条直线上)。
- 3) 计算出直角坐标系上直线的斜率和截距，利用上述公式进行计算，最后求出比接触电阻  $\rho_c$ 。

### 3.3. 基于 TLM 的 I-V 测试和拟合结果

图 7 展示的是在一系列不同间距的 TLM 模型上测试得到的 I-V 曲线。从图 7 中可以看出，电流和电压成线性关系，表明 p 型 4H-SiC 开始表现出良好的欧姆特性。

以临近的 Ti/Al 金属电极所测的接触电阻值作纵轴，以他们之间的间距做横轴，这就是典型的 TLM 测试表征模型。此特征曲线有线性特征，表明 p 型 4H-SiC 上已形成良好的欧姆接触，比接触电阻能够通过对其 I-V 特性曲线的拟合准确地计算出来，如图 8 所示。拟合的结果显示使用厚度比较薄的 Ti(20 nm)/Al(30 nm)合金金属通过常规退火工艺能够在 p 型 4H-SiC 上形成比接触电阻率相对较低的欧姆接触，其比接触电阻率  $\rho_c$  为  $5.71 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。理想情况下，比接触电阻值越小越好，但因实际工艺或技

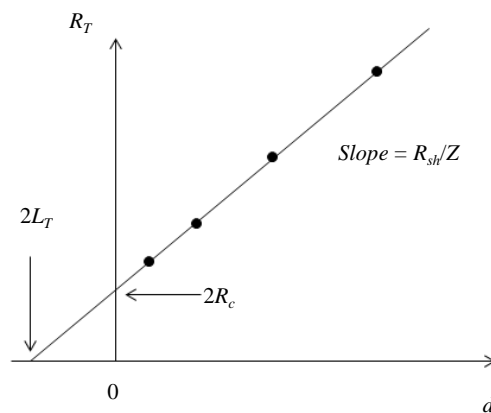


Figure 6. The function chart of total resistance versus the gap width between patterns

图 6. 电阻做间距的函数

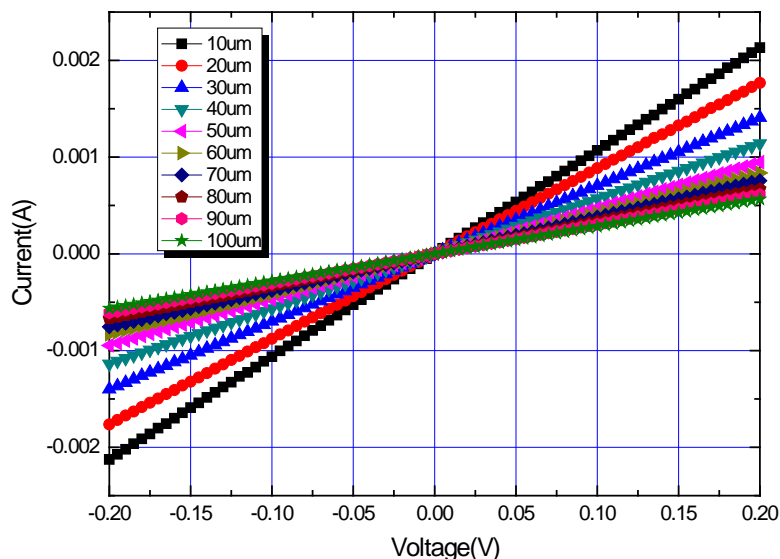


Figure 7. I-V curves in terms of different distances between patterns using the TLM model

图 7. TLM 模型中不同间距的 I-V 特征曲线

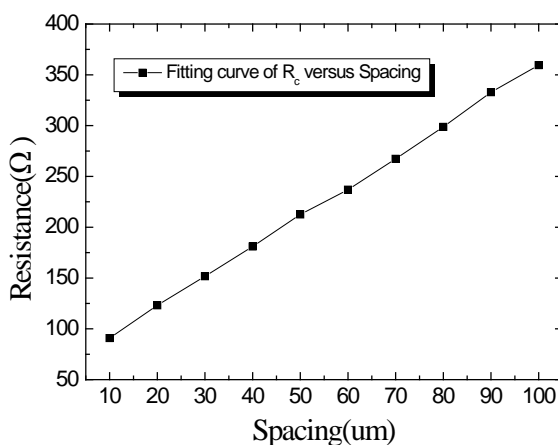


Figure 8. Fitting curve of  $R_s$  versus spacing based on I-V curve

图 8. TLM 测试拟合表征曲线

术条件的限制，本实验预期获得 p 型 4H-SiC LDMOSFET 欧姆接触的比接触电阻值只要在  $10^{-3}$  量级即可接受。而本次实验获得的欧姆接触的比接触电阻率为  $5.71 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，比预期结果的比接触电阻值降低了一个量级。本次实验获得较低的接触电阻率可能是由于采用了掺杂浓度较高的 p 型 SiC 材料 ( $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  量级)，以及选择优化了退火条件，采用了在  $1000^\circ\text{C}$  下退火 2.5 min 得到了较低的欧姆接触电阻率。满足了 p 型 4H-SiC 的 LDMOSFET 器件的电极欧姆接触的要求。

#### 4. 总结

本文首先简要地介绍了 p 型 SiC 欧姆接触的开发背景、现状以及技术难点，然后描述了本实验过程及成果，并详细介绍了 TLM 测试法的理论及实际操作，验证并确认了使用厚度比较薄的 Ti/Al(20/30 nm) 合金通过常规工艺过程能够在 p 型 4H-SiC 上形成比接触电阻率相对较低的欧姆接触，其比接触电阻率为  $5.71 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈治明, 李守智. 宽禁带半导体电力电子器件及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] 王弋宇. 介质/SiC 界面研究和 MOSFET 器件研制[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [3] Tsukimoto, S., Nitta, K., Sakai, T., Moriyama, M. and Murakami, M. (2004) Correlation between the Electrical Properties and the Interfacial Microstructures of TiAl-Based Ohmic Contacts to p-Type 4H-SiC. *Journal of Electronic Materials*, **33**, 460-466. <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-004-0203-x>
- [4] 刘芳, 张玉明. 碳化硅离子注入及欧姆接触的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [5] Uemoto, T., *et al.* (1995) Reduction of Ohmic Contact Resistance on n-Type 6H-SiC by Heavy Doping. *Japanese Journal of Applied Physics*, **34**, L7-L9. <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.34.L7>
- [6] Crofton, J., Mohney, S.E., Williams, J.R., *et al.* (2002) Finding the Optimum Al-Ti Alloy Composition for Use as an Ohmic Contact to p-Type SiC. *Solid-State Electronics*, **46**, 109-113. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-1101\(01\)00208-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-1101(01)00208-8)
- [7] Tamaso, H., Yamada, S., Kitabayashi, H., *et al.* (2014) Ti/Al/Si Ohmic Contacts for Both n-Type and p-Type 4H-SiC. *Materials Science Forum*, **778**, 669-672. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.669>
- [8] Moscatelli, F., *et al.* (2003) Al/Ti Ohmic Contacts to p-Type Ion-Implanted 6H-SiC. *Semiconductor Science and Technology*, **18**, 460-466. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/18/6/328>
- [9] Nakatsuka, O., Takei, T., Koide, Y. and Murakami, M. (2002) Low Resistance TiAl Ohmic Contacts with Multi-Layered Structure for p-Type 4H-SiC. *Materials Transactions*, **43**, 1684-1688. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.43.1684>
- [10] Tanimoto, S., Kiritani, N., Hoshi, M. and Okushi, H. (2002) Ohmic Contact Structure and Fabrication Process Applicable to Practical SiC Devices. *Materials Science Forum*, **389-393**, 879-884. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.389-393.879>
- [11] Tsukimoto, S., Nitta, K., Tsukimoto, S., Moriyama, M. and Murakami, M. (2004) Ternary TiAlGe Ohmic Contacts for p-Type 4H-SiC. *Journal of Applied Physics*, **95**, 2187. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1643772>
- [12] Crofton, J., Mohney, S.E., Williams, J.R. and Isaacs-Smith, T. (2002) Finding the Optimum Al-Ti Alloy Composition for Use as an Ohmic Contact to p-Type SiC. *Solid State Electronics*, **46**, 109-113. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-1101\(01\)00208-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-1101(01)00208-8)
- [13] Johnson, B.J. and Capano, M.A. (2004) Mechanism of Ohmic Behavior of Al/Ti Contacts to p-Type 4H-SiC after Annealing. *Journal of Applied Physics*, **95**, 5616-5620. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1707215>
- [14] Ohyanagi, T., Onose, Y. and Watanabe, A. (2008) Ti/Ni Bilayer Ohmic Contact on 4H-SiC. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, **26**, 1395-1362. <http://dx.doi.org/10.1116/1.2949116>
- [15] Wang, Z.C., Saito, M., Tsukimoto, S. and Ikuhara, Y. (2012) Terraces at Ohmic Contact in SiC Electronics: Structure and Electronic States. *Journal of Applied Physics*, **111**, Article ID: 113717. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4729074>
- [16] Mysliwiec, M., Sochacki, M., Kisiel, R., Guziewicz, M. and Wzorek, M. (2011) TiAl-Based Ohmic Contacts on p-Type SiC. 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Trzaska Lomnica, 11-15 May 2011, 68-72. <http://dx.doi.org/10.1109/ISSE.2011.6053552>
- [17] Schroder, D.K. (2006) Semiconductor Material and Device Characterization. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.