

激光辐照固态 Al 膜制备 p 型重掺杂 4H-SiC

胡莉婷, 季凌飞, 吴燕, 林真源

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 通过激光辐照固态 Al 膜, 制备了一种 p 型重掺杂 4H-SiC, 分析了 Al 膜厚度、激光脉冲个数对掺杂结果的影响, 验证了不同工艺参数对 p 型掺杂层表面电学性能的调控作用。结果表明, 当 Al 膜厚度为 120 nm, 脉冲个数为 50 时, 掺杂试样的最大载流子浓度为 $6.613 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 最小体电阻率为 $17.36 \Omega \cdot \text{cm}$, 掺杂浓度(粒子数浓度)可达 $6.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。4H-SiC 的 Al 掺杂改性机理为: 在紫外激光作用下, Si—C 键断裂, Al 原子替代 Si 原子形成 p 型掺杂层。

关键词 薄膜; 半绝缘 4H-SiC; Al 掺杂; 准分子激光

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0603003

Preparation of p-Type Heavily-Doped 4H-SiC by Laser Irradiation of Solid Al Film

Hu Liting, Ji Lingfei, Wu Yan, Lin Zhenyuan

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The preparation of p-type heavily-doped 4H-SiC is conducted by using the laser irradiation of solid Al film. The effects of the Al film thickness and the laser pulse number on the doping results are analyzed and the control of different process parameters to the electrical properties of p-type doped layers is verified. The results show that the maximum carrier concentration is $6.613 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, the minimum volume resistivity is $17.36 \Omega \cdot \text{cm}$, and the doping concentration (particle number concentration) is $6.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, when the Al film thickness is 120 nm and the pulse number is 50. The Al doping modification mechanism of 4H-SiC can be described as the formation of p-type doped layer as a result of the Si—C bond breaking and the replace of Si by Al under the ultraviolet laser irradiation.

Key words thin films; semi-insulating 4H-SiC; Al doping; excimer laser

OCIS codes 310.6860; 140.2180; 160.6000; 140.3538

1 引言

半绝缘 4H-SiC 为第三代半导体材料, 被广泛应用于电子和能源领域^[1-7]。4H-SiC 利用区域选择性 p 型掺杂改变其固有的电学、光学等性能, 以满足应用需求, p 型重掺杂的 4H-SiC 可用于制备欧姆接触、结型器件等, 具有重要的研究意义^[8-11]。然而, 4H-SiC 的禁带宽度大、键能高, C—Si 键难以被打断, 且 p 型杂质的离化能高, 因此, 4H-SiC 实现粒子

数浓度大于 10^{18} cm^{-3} 的 p 型重掺杂难度较大。离子注入是最常见的掺杂技术之一, 通常需要特殊的气氛环境及高温环境^[12-14], 并且需通过高温退火去除掺杂过程中产生的缺陷及激活掺杂剂, 这增大了晶体缺陷产生的几率。目前, 4H-SiC 实现低温、低成本、重掺杂的制备还存在困难^[15-17], 难以满足高功率 SiC 基器件制造的需要。短波长紫外激光具有光子能量大、参数可控的优点, 被广泛应用于材料的掺杂和改性^[18-19]。此外, SiC 在紫外波段的激光吸收率

收稿日期: 2017-10-31; 收到修改稿日期: 2018-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(51575013, 51275011)

作者简介: 胡莉婷(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事半导体材料激光改性方面的研究。E-mail: huliting612@163.com

导师简介: 季凌飞(1971—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事非金属材料激光制造方面的研究。

E-mail: ncltji@bjut.edu.cn(通信联系人)

大,加上掩模的使用,通过激光辐照可以实现 SiC 的低温局部选择性掺杂^[20-27]。Russell 等^[20]利用 KrF 准分子激光在 4H-SiC 中实现 B 的掺杂浓度(粒子数浓度,下同)约为 10^{18} cm^{-3} 。Tian 等^[21]使用 ArF 准分子激光在 4H-SiC 中实现 Al 的掺杂浓度达到 10^{20} cm^{-3} 。Kray 等^[22]利用 Nd:YAG 激光照射 H_3PO_4 溶液,实现了 Si 的 P 掺杂,提升了激光加工的可行性并扩大了掺杂剂的选择范围。Ikeda 等^[23-26]运用 KrF 准分子激光在 H_3PO_4 溶液、液氮及 AlCl_3 溶液中实现了对 4H-SiC 的 P、N 和 Al 掺杂,但掺杂深度受限。Ikeda 等^[27]采用 KrF 准分子激光照射涂覆 Al 膜的掺杂工艺克服了掺杂深度受限的问题,提高了掺杂浓度,进一步扩大了掺杂剂的选择范围,但是此工艺仅局限于 n 型 4H-SiC 的研究。尽管国内外开展了大量的准分子激光掺杂 SiC 的研究,但主要工作是围绕 n 型 4H-SiC 进行 p 型掺杂及 p 型 4H-SiC 进行 n 型掺杂来制备肖特基二极管等结构器件,关于 4H-SiC 的 p 型重掺杂的研究鲜有报道。4H-SiC 可用于制作大功率器件和微波功率器件,也可作为器件间的隔离,且在 4H-SiC 上制作的金属半导体场效应晶体管表现出良好的射频特性^[28],因此,制备 p 型重掺杂 4H-SiC 具有重要的研究意义。

本文提出了一种通过激光辐照蒸镀在 4H-SiC 表面的固态 Al 膜(简称 Al 膜)以获得浓度和区域可控的 p 型掺杂层的制备方法。该方法通过对 Al 膜厚度、光斑大小、激光能量密度及激光脉冲个数的控制,实现了 4H-SiC 表面 Al 掺杂量及掺杂分布的调控,制备得到的 p 型 Al 掺杂层表面具有高的掺杂浓度及优异的表面均匀性,从而降低了器件制备的成本。同时,结合实验数据对实现 Al 重掺杂的机理进行了分析,以载流子浓度的对比测试为依据,验证了激光辐

照固态蒸镀膜实现宽禁带半绝缘材料重掺杂技术的可行性,制备工艺环境污染小,且具有可扩展性。

2 实验材料与方法

选择尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 330 \text{ nm}$ 的正方形 4H-SiC(0001)单晶作为实验材料,其电阻率大于 $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 。采用高真空电阻蒸发镀膜设备在 4H-SiC 表面蒸镀 Al 膜,厚度 T_{Al} 为 $60 \sim 360 \text{ nm}$,每隔 60 nm 依次增大。

采用 KrF 准分子激光进行 Al 掺杂,外光路使用两个焦距为 600 mm 的凸透镜对光斑进行调整,激光光斑为 $5 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的矩形光斑,激光波长为 248 nm ,脉冲宽度为 25 ns ,脉冲重复频率为 1 Hz ,激光能量密度为 $1.17 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$,脉冲个数为 $1, 5, 10, 50$,在室温环境中垂直辐照到试样表面。

镀有不同厚度 Al 膜的 4H-SiC 在室温环境中进行激光辐照掺杂后,SiC 表面多余的 Al 膜被去除。首先,采用含铬酸、磷酸的水溶液去除掺杂过程生成的 Al_2O_3 ,铬酸和磷酸的质量分数分别为 1.8% 和 5% (下同);然后,用含 10% 高氯酸的氯化铜溶液去除多余的 Al 膜;最后,用丙酮、乙醇及超纯水进行超声清洗以去除可能残留的 Al 膜。采用日本岛津公司的 UV3600 分光光度计测试 4H-SiC 在 248 nm 处的吸收率。采用霍尔效应测试仪测试试样的体电阻率、体载流子浓度和载流子迁移率。其中,四探针测量区域分布在掺杂区域内,每次测试范围为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,进行 10 次测试后取平均值,实验流程如图 1 所示。采用扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)和 X 射线光电子能谱(XPS)对 Al 掺杂前后的试样进行成分分析,采用激光共聚焦显微镜观察 Al 掺杂过程中试样表面的形貌。

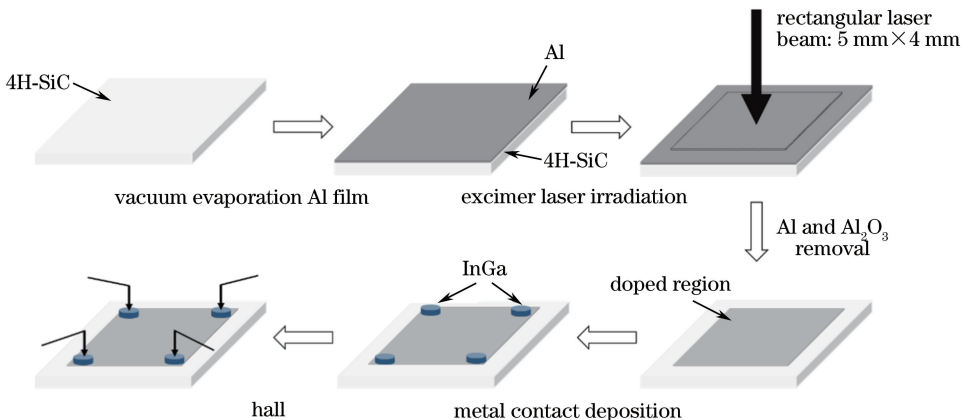


图 1 实验流程示意图

Fig. 1 Schematic of experimental procedure

3 实验结果及讨论

激光辐照 Al 膜之前,4H-SiC 的透射率和反射率曲线如图 2 所示。由于 4H-SiC 的禁带宽度为 3.26 eV,因此,4H-SiC 在紫外光波长小于 400 nm 处的透射率迅速减小,在 248 nm 处的透射率为

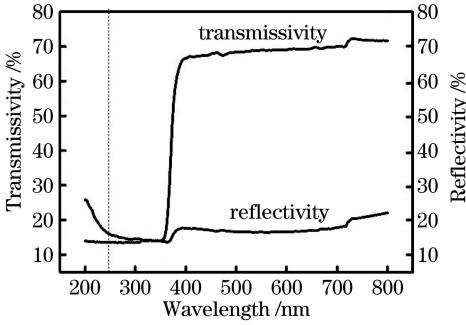


图 2 4H-SiC 的透射率和反射率曲线

Fig. 2 Curves of transmissivity and reflectivity of 4H-SiC

14%,反射率为 16%,吸收率接近 70%。这说明 4H-SiC 可以吸收 248 nm 的准分子激光光子能量而实现 Al 的掺杂。

Al 掺杂前后的试样表面 EDS 测试结果如图 3 所示。可以看到,激光辐照 Al 掺杂的试样表面除了最强峰 Si 峰之外,在 1.5 keV 处出现明显的 Al 特征峰,在 0.5 keV 处出现微弱的 O 特征峰,其中 O 原子来自于空气。因此,激光辐照 4H-SiC 表面的固态 Al 膜可获得有效的 Al 原子掺杂效果。

不同脉冲个数的激光辐照厚度为 240 nm 的 Al 膜后,采用 SEM-EDS 对掺杂区域进行 5 次以上的选区测定试样表面元素含量并取平均值,结果见表 1。可以发现,随着脉冲个数的增大,4H-SiC 表面出现了 Al 和 O 元素的特征峰;O 原子的含量随脉冲个数的变化不大,而 Al 原子的含量随脉冲个数的增大而增大。这说明通过改变激光参数可以对最终掺杂 Al 原子的含量实现调控。

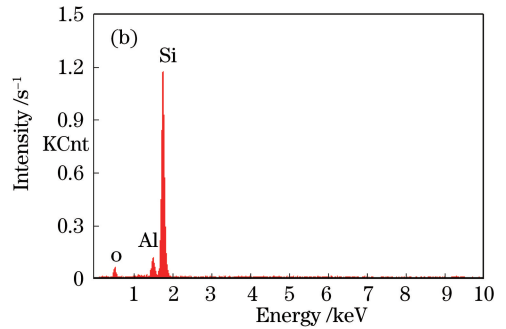
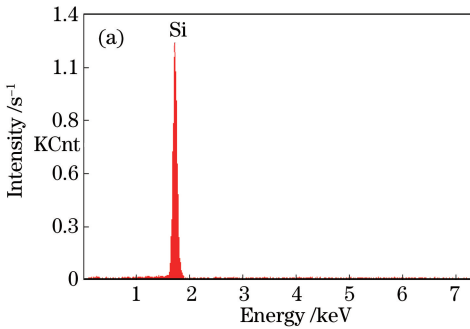


图 3 Al 掺杂前后的试样表面 EDS 图谱。(a)未掺杂的 4H-SiC;(b) Al 膜厚度为 240 nm 的 4H-SiC

Fig. 3 EDS patterns on surface of samples before and after Al doping. (a) Undoped 4H-SiC;

(b) 4H-SiC with a Al film thickness of 240 nm

表 1 激光辐照后 240 nm 厚 Al 膜的 4H-SiC 表面元素的含量

Table 1 Surface element contents of laser irradiated 4H-SiC with a Al film thickness of 240 nm

Number of laser pulses	Atomic fraction /%		
	Si	Al	O
0	100	0	0
1	82.26	1.34	16.40
5	79.41	2.33	18.26
10	80.18	4.40	15.42
50	78.64	4.9	16.46

霍尔效应是研究半导体电学性质最重要的方法之一,通过范德堡法测量霍尔系数可以确定半导体电阻率、载流子浓度、霍尔迁移率和导电类型等半导体电学信息,实验中可以据此判断 Al 膜厚度和激光脉冲个数对掺杂试样最终电学特性的作用效果。

为了避免非欧姆接触直接影响霍尔效应测试结果,首先进行四个探针与电极之间的接触电阻测试,测试示意图及结果如图 4 所示。从图 4(a)可以看到,欧姆接触的制备方法是在 Al 掺杂的 4H-SiC 掺杂区域的四个顶角进行 InGa 合金淀积以形成电极,并将 InGa 合金电极与探针接触。观察图 4(b)、(c)可知,四个探针之间的电阻明显减小, $I-V$ 曲线变成一条经过原点的直线,并且两条直线对应的斜率基本一致,这表明 InGa 合金与经过 Al 掺杂的 4H-SiC 形成了良好的欧姆接触。InGa 合金在常温下为无定型液体,具有液体特有的粘滞性,有助于在不光滑试样表面及探针之间形成欧姆接触,可以进行后续的霍尔测试。

以 InGa 合金作为电极进行的霍尔效应测试结果如图 5 所示。当脉冲个数为 1 和 50 时,激光辐照

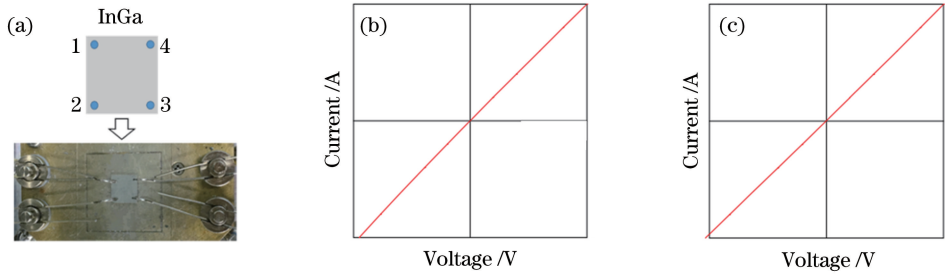


图 4 电阻测试。(a)示意图;(b) 1,2 电极之间的 $I-V$ 曲线;(c) 3,4 电极之间的 $I-V$ 曲线

Fig. 4 Resistance tests. (a) Schematic; (b) $I-V$ curves between electrodes 1 and 2;

(c) $I-V$ curve between electrodes 3 and 4

试样难以获得欧姆接触。当脉冲个数为 1 时,Al 膜具有较高的表面平整度,会反射一部分激光脉冲,吸收的光子数较少,从而减小了 Al 的掺杂浓度,不利于形成欧姆接触;当脉冲个数为 50 时,Al 膜表面粗糙度增大、缺陷增加,表面结构的破坏导致难以形成欧姆接触。脉冲个数为 1 和 50 时 4H-SiC 表面激光掺杂区域的光学图像如图 6(a)、(b)所示。脉冲个数为 1 的试样表面完全没有激光辐照痕迹,而脉冲个数为 50 的试样中有明显的激光辐照区。图 6(c)、(d)所示为激光辐照脉冲个数为 1 和 50 的试样表面粗糙度,并由 $3.862 \mu\text{m}$ 增大到 $8.657 \mu\text{m}$ 。因此,激光辐照导致的表面粗糙度会影响试样测试时的欧姆接触特性。对 Al 膜厚度分别为 60 nm 和 360 nm 的试样进行了同样条件的激光辐照,测试结果均没有获得有效的欧姆接触。当 Al 膜厚度为 60 nm 时,试样的 EDS 测试结果中未发现 Al 的特

征峰,说明掺杂剂过少的 Al 膜在激光辐照后没有形成 Al 的掺杂;当 Al 膜厚度为 360 nm 时,过厚的 Al 膜导致掺杂剂和界面之间的距离增大,光子能量不能被 4H-SiC 表面吸收,也难以形成欧姆接触的 Al 掺杂。

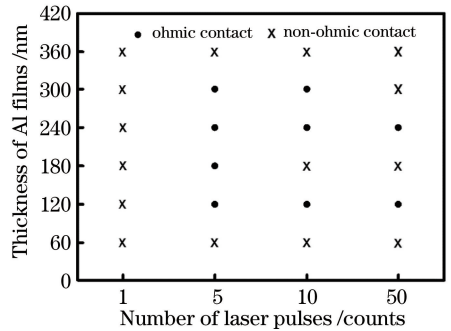


图 5 欧姆接触与 Al 膜厚度和脉冲个数间的关系
Fig. 5 Ohmic contact versus Al film thickness and number of laser pulses

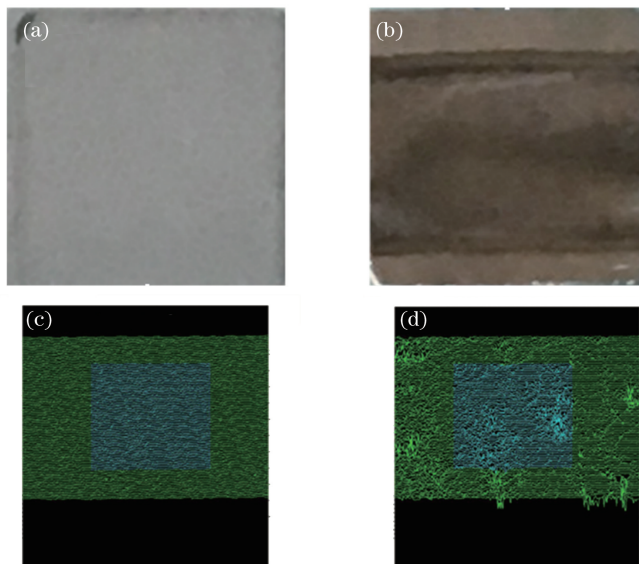


图 6 不同脉冲数下的 4H-SiC 显微照和表面粗糙度。(a) 1,显微照片;(b) 50,显微照片;(c) 1,表面粗糙度;(d) 50,表面粗糙度

Fig. 6 Optical micrographs and surface roughness of 4H-SiC under different numbers of laser pulses.

(a) 1, micrograph; (b) 50, micrograph; (c) 1, roughness; (d) 50, roughness

利用霍尔效应测试 240 nm 附近不同厚度的 Al 膜经过不同脉冲个数激光辐照后试样的体电阻率和体载流子浓度的变化,结果如图 7 所示。可以看出,当 Al 膜厚度不变时,试样的体电阻率随着脉冲个数的增加而减小;体载流子浓度随着脉冲个数的增

加而增大。当脉冲个数增加时,Al 膜表面发生熔融,有助于 Al 原子向 4H-SiC 基体的扩散,在多脉冲的累积作用下,材料内部的热积累同样有助于 Al 原子的纵向扩散,杂质总量随脉冲个数的增加而增加,使得体载流子浓度逐渐增大,体电阻率逐渐减小。

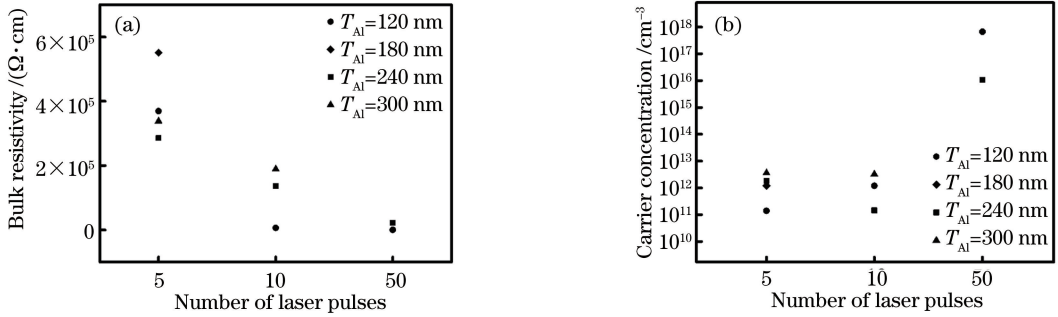


图 7 电阻率和载流子浓度与脉冲个数间的关系。(a)体电阻率;(b)体载流子浓度

Fig. 7 Resistivity and carrier concentration versus number of laser pulses. (a) Bulk resistivity; (b) bulk carrier concentration

在激光参数不变的情况下,当 Al 膜厚度为 60 nm 和 360 nm 时,通过改变激光脉冲个数无法获得有效的调控掺杂结果。根据实验数据统计,确定最优 Al 膜厚度为 120 nm 和 240 nm。其中,Al 膜厚度为 240 nm,脉冲个数为 10 的掺杂试样的载流子迁移率为 $124 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,与文献[29-31]报道的结果基本一致,因此,可推断出该试样的掺杂浓度为 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。实验测得该试样的载流子浓度为 $1.453 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 。电活化率^[32]计算公式

$$R = N_A / C_x, \quad (1)$$

式中 R 为电活化率, N_A 为受主浓度, C_x 为 Al 原子掺杂浓度。由(1)式可知,试样的电活化率小于等于 1%,因此,实际掺杂浓度远高于测得的载流子浓度。由(1)式可得,当 Al 膜厚度为 120 nm,脉冲个数为 50 时,试样的霍尔测试结果如图 8 所示。可以看出,试样的体电阻率最低为 $17.36 \Omega \cdot \text{cm}$;体载流子浓度最高为 $6.613 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$;表面掺杂浓度最大可达 $6.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。

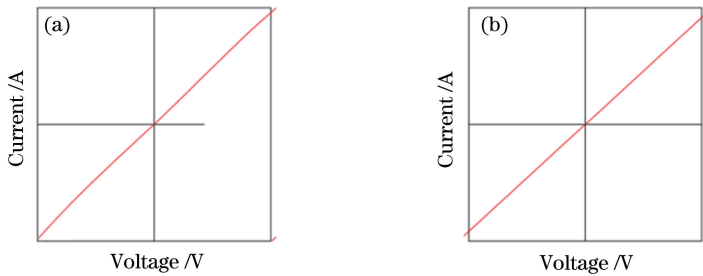


图 8 当 Al 膜厚度为 120 nm 时,脉冲个数为 50 的激光辐照下的 4H-SiC 霍尔测试结果。

(a) 1,2 电极之间的 I-V 曲线;(b) 3,4 电极之间的 I-V 曲线

Fig. 8 Hall test results of laser irradiated 4H-SiC when Al film thickness is 120 nm and number of laser pulses is 50.

(a) I-V curves between electrodes 1 and 2; (b) I-V curves between electrodes 1 and 2

Al 掺杂前后 4H-SiC 表面的 XPS 图如图 9 所示。可以看出,Si、C 和 Al 原子最外层轨道分别为 Si 2p、C 1s 和 Al 2p,对应的成键结合能范围分别为 97~108 eV,280~291 eV 和 70~80 eV。因此,经过激光辐照 Al 掺杂的试样在 70~79.9 eV 范围内有明显的 Al 峰,且 Si 峰强度相比于未掺杂的 4H-SiC 明显减弱。

对掺杂过程中 4H-SiC 表面在 Si 2p、C 1s 和 Al 2p 轨道的 XPS 图进行曲线拟合,得到的相应峰位如图 10 所示。如图 10(a)所示,Si 2p 轨道的结合能谱显示未掺杂的 4H-SiC 表面存在 Si—C 键和 Si—O 键,Si—O 键的形成是因为晶体生长过程中对 O_2 的吸附。当激光辐照脉冲个数为 5 时,Si—C 键所对应的峰消失,说明 4H-SiC 表面的 Si—C 键

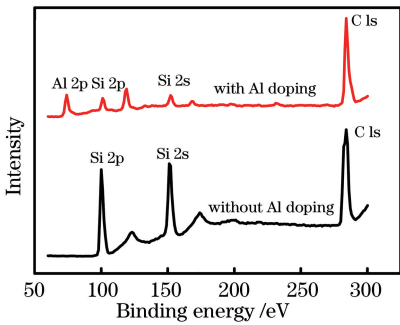


图 9 Al 掺杂前后 4H-SiC 表面的 XPS 图

Fig. 9 XPS spectra on surface of 4H-SiC before and after Al doping

在激光辐照过程中发生断裂,此时试样中 Si 2p 轨道结合能谱中只存在一个峰,对应 Si—O 键,且 Si—O 键的含量明显增加。当激光辐照脉冲个数为 10 时,试样中 Si 2p 轨道结合能谱中存在两个峰,分别对应 Si—O 键和 Si—Si 键。因此,随脉冲个数的增加, Si—C 键消失并产生了 Si—Si 键。如图 10(b)

所示,未掺杂的 4H-SiC 表面存在四种化学键,分别为 C—Si、C—C、—CH₂—O—和—C(O)O—,其中 C—C 键及 C 和 O 之间的化学键合来源于试样清洗过程对丙酮、乙醇等杂质的吸附。激光辐照 5 个脉冲后,C—Si 键所对应的峰均消失,此时 4H-SiC 表面的 C—Si 键在准分子激光作用下发生断键;而 C—C 的信号明显变强,说明 SiC 分解后虽然有一部分氧进入空气中,但表面仍然存在单质 C。如图 10(c)所示,未掺杂的 4H-SiC 表面不存在 Al 化学键,而激光辐照 5 和 10 个脉冲后的试样中 Al 2p 轨道结合能谱中存在 Al—C—O 键和 Al—O 键, Al—C—O 键的形成是由于准分子激光在空气中对 Al 膜辐照导致 SiC 光致分解和氧化反应, Si—C 键发生断键, Al 原子替代 Si 位。 Al—O 键的存在主要是因为试样的 Al 掺杂在空气中进行,易发生氧化而生成多种价态的氧化物,这与前面 SEM-EDS 的分析结果相符。

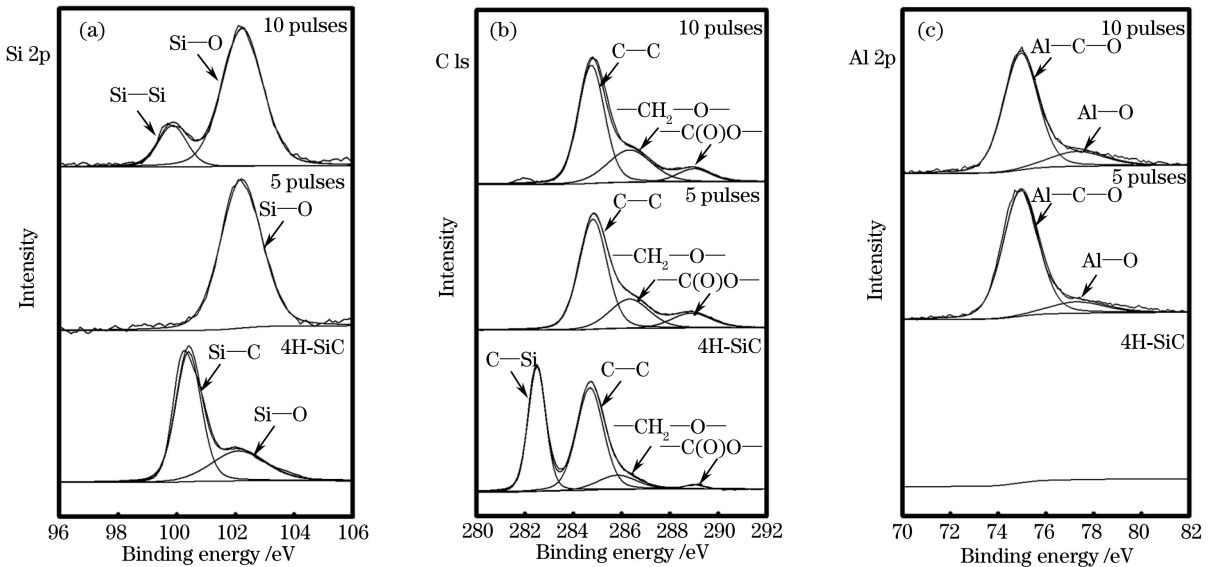


图 10 Al 掺杂前后 4H-SiC 表面 XPS 图。(a) Si 2p 轨道;(b) C 1s 轨道;(c) Al 2p 轨道

Fig. 10 XPS spectra on surface of 4H-SiC before and after Al doping. (a) Si 2p orbit; (b) C 1s orbit; (c) Al 2p orbit

由上述分析可知,当能量密度为 $1.17 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的准分子激光作用于 4H-SiC 表面时, Si—C 键所对应的峰均不再存在。KrF 准分子激光的光子能量接近 5 eV, 大于 Si—C 化学键的结合能^[33], 当激光辐照的能量密度足够大时, 材料表面累计的吸收能量超过键能和化学键断裂所需要的振动能等, 4H-SiC 表面的 Si—C 键在准分子激光辐照过程中发生断键。随着脉冲个数的增加, Al—C—O 键、Si—Si 键和 C—C 键含量逐渐增大, Al 原子占据 Si 位, 同时也伴随氧化反应的发生。由于 Al 原子半径比 Si 原子

的大, Al 原子占据 Si 位比占据 C 位所需能量小, Al³⁺ 取代 Si⁴⁺ 形成了一个空穴, 因此, 最终以替位式掺杂方式实现了 Al 对 4H-SiC 的 p 型导电改性效果。

4 结 论

采用激光辐照掺杂的方法, 以 KrF 准分子激光辐照蒸镀不同厚度 Al 膜的 4H-SiC, 获得了 Al 掺杂量及分布可控的 p 型掺杂层, 并得到以下结论。

1) 当 Al 膜厚度不变时, 随着激光脉冲个数的增

加,掺杂试样的体电阻率减小,体载流子浓度增大。

2) 当脉冲个数不变,且 Al 膜厚度为 120 nm 和 240 nm 时,可以获得较好的掺杂结果。

3) 采用激光辐照掺杂的方法可进行 4H-SiC 区域 Al 掺杂,并具有良好的工艺可控性。

参 考 文 献

- [1] Wei R S, Song S, Yang K, *et al.* Thermal conductivity of 4H-SiC single crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(5): 053503.
- [2] Mammadov S, Ristein J, Koch R J, *et al.* Polarization doping of graphene on silicon carbide[J]. *2D Materials*, 2014, 1(3): 035003.
- [3] Wang P F, Ruan Y F, Hou B B, *et al.* Optical properties of neutron-irradiated semi-insulating SiC single crystals [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41(3): 353-358.
王鹏飞, 阮永丰, 侯贝贝, 等. 中子辐照半绝缘 SiC 单晶的光学性质 [J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(3): 353-358.
- [4] Widmann M, Lee S Y, Rendler T, *et al.* Coherent control of single spins in silicon carbide at room temperature [J]. *Nature Materials*, 2014, 14(2): 164-168.
- [5] Suproniuk M, Kamiński P, Kozłowski R, *et al.* Effect of deep-level defects on transient photoconductivity of semi-insulating 4H-SiC[J]. *Acta Physica Polonica A*, 2014, 125(4): 1042-1048.
- [6] Ekinci H, Kuryatkov V V, Mauch D L, *et al.* Effect of BCl_3 in chlorine-based plasma on etching 4H-SiC for photoconductive semiconductor switch applications [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2014, 32(5): 051205.
- [7] Iwamoto N, Azarov A, Ohshima T, *et al.* High temperature annealing effects on deep-level defects in a high purity semi-insulating 4H-SiC substrate [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(4): 045705.
- [8] Issa F, Vervisch V, Ottaviani L, *et al.* Radiation silicon carbide detectors based on ion implantation of boron[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2014, 61(4): 2105-2111.
- [9] Kiefer F, Peibst R, Ohrdes T, *et al.* Emitter recombination current densities of boron emitters with silver/aluminum pastes [C]. 40th Photovoltaic Specialist Conference, 2014: 2808-2812.
- [10] Shiramomo T, Gao B, Mercier F, *et al.* Study of the effect of doped impurities on polytype stability during PVT growth of SiC using 2D nucleation theory [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2014, 385: 95-99.
- [11] Nautiyal P, Gupta A, Seal S, *et al.* Reactive wetting and filling of boron nitride nanotubes by molten aluminum during equilibrium solidification [J]. *Acta Materialia*, 2017, 126: 124-131.
- [12] Nipoti R, Scaburri R, Hallén A, *et al.* Conventional thermal annealing for a more efficient p-type doping of Al^+ implanted 4H-SiC [J]. *Journal of Materials Research*, 2013, 28(1): 17-22.
- [13] Ming X B, Lu F, Liu H P, *et al.* Characterization of optical waveguide in ZnO crystal formed by MeV helium ion implantation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(2): 453-457.
明宪兵, 卢霏, 刘汉平, 等. MeV He^+ 离子注入氧化锌晶体光波导特性研究 [J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 453-457.
- [14] Ryu K, Upadhyaya A, Upadhyaya V, *et al.* High efficiency large area n-type front junction silicon solar cells with boron emitter formed by screen printing technology [J]. *Progress in Photovoltaics*, 2015, 23(1): 119-123.
- [15] Laube M, Schmid F, Pensl G, *et al.* Electrical activation of high concentrations of N^+ and P^+ ions implanted into 4H-SiC [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(1): 549-554.
- [16] Schmid F, Laube M, Pensl G, *et al.* Electrical activation of implanted phosphorus ions in [0001]- and [11-20]-oriented 4H-SiC [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(11): 9182-9186.
- [17] Handy E M, Rao M V, Holland O W, *et al.* Al, B, and Ga ion-implantation doping of SiC [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, 29(11): 1340-1345.
- [18] Luo Y, Wu X B, Zhou Y, *et al.* Interaction between excimer laser and SiC ceramic [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 121403.
罗艳, 吴晓斌, 周翔, 等. 准分子激光与 SiC 陶瓷的相互作用研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 121403.
- [19] Li Y G, Cai J D, Huang Y, *et al.* Fabrication of piezoelectric ceramic microstructure based on excimer laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091403.
李以贵, 蔡金东, 黄远, 等. 基于准分子激光器的压电陶瓷微结构加工 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091403.
- [20] Russell S D, Ramirez A D. *In situ* boron incorporation and activation in silicon carbide using excimer laser recrystallization [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(22): 3368-3370.
- [21] Tian Z, Salama I A, Quick N R, *et al.* Effects of different laser sources and doping methods used to dope silicon carbide [J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(9): 2835-2844.

- [22] Kray D, Aleman M, Fell A, *et al.* Laser-doped silicon solar cells by laser chemical processing (LCP) exceeding 20% efficiency [C]. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2008: 1-3.
- [23] Ikeda A, Nishi K, Ikenoue H, *et al.* Phosphorus doping of 4H-SiC by liquid immersion excimer laser irradiation [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(5): 052104.
- [24] Nishi K, Ikeda A, Ikenoue H, *et al.* Phosphorus doping into 4H-SiC by irradiation of excimer laser in phosphoric solution[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2013, 52(6): 06GF02.
- [25] Marui D, Ikeda A, Nishi K, *et al.* Aluminum doping of 4H-SiC by irradiation of excimer laser in aluminum chloride solution [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(6): 06JF03.
- [26] Ikeda A, Marui D, Ikenoue H, *et al.* Nitrogen doping of 4H-SiC by KrF excimer laser irradiation in liquid nitrogen[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(4): 04DP02.
- [27] Ikeda A, Sumina R, Ikenoue H, *et al.* Al doping of 4H-SiC by laser irradiation to coated Al film and its application to junction barrier Schottky diode[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2016, 55(4): 04ER07.
- [28] Yang L N, Zhang Y M, Yu C L. A compact model describing the effect of p-buffer layer on the I - V characteristics of 4H-SiC power MESFETs[J]. Solid-State Electronics, 2005, 49(4): 517-523.
- [29] Matsuura H, Komeda M, Kagamihara S, *et al.* Dependence of acceptor levels and hole mobility on acceptor density and temperature in Al-doped p-type 4H-SiC epilayers [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96(5): 2708-2715.
- [30] Pernot J, Contreras S, Camassel J. Electrical transport properties of aluminum-implanted 4H-SiC[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(2): 023706.
- [31] Martinez A, Lindefelt U, Hjelm M, *et al.* Monte Carlo study of hole mobility in Al-doped 4H-SiC[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(3): 1359-1364.
- [32] Šimonka V, Hössinger A, Weinbub J, *et al.* Modeling of electrical activation ratios of phosphorus and nitrogen doped silicon carbide[C]. International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, 2017: 125-128.
- [33] Lee C S, Lee K R, Eun K Y, *et al.* Structure and properties of Si incorporated tetrahedral amorphous carbon films prepared by hybrid filtered vacuum arc process[J]. Diamond and Related Materials, 2002, 11(2): 198-203.