

文章编号 1004-924X(2024)19-2889-10

## 4H-SiC 界面飞秒激光退火及其电学性能优化

任瑜启<sup>1,3</sup>, 岳云帆<sup>1,3</sup>, 李 盛<sup>1,4</sup>, 柴年垚<sup>1,4</sup>, 陈襄玉<sup>1,3</sup>, 曾终乐<sup>1,4</sup>,  
赵峰毅<sup>2</sup>, 王 欢<sup>1,3</sup>, 王学文<sup>1,2,4\*</sup>

(1. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室

先进材料与器件飞秒光制造中心, 湖北 武汉 430070;

2. 佛山仙湖实验室, 广东 佛山 528000;

3. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070;

4. 武汉理工大学 材料科学与工程国际化示范学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**改善 SiC 与金属界面间的电接触性质有助于推动 SiC 材料在高频高功率器件领域的发展。采用波长为 1 030 nm 近红外飞秒激光退火处理 4H-SiC 表面, 研究了不同激光参数对退火效果的影响。通过扫描电镜、X 射线光电子能谱仪、共聚焦拉曼光谱仪等分析表征手段, 探究了飞秒激光退火样品的表面形貌、元素分布及成键结构的变化。研究发现, 接触界面电学性能的变化来自于激光退火产生的无序石墨结构以及具有 O 空位缺陷的 SiO<sub>x</sub>/Si 结构, 这种结构不仅降低了界面肖特基势垒高度, 提升了界面电导率, 而且改变了 4H-SiC 表面的费米能级, 从而大幅提升了界面电学性能。通过飞秒激光退火, 实现了 SiC 界面肖特基势垒从 1.43 eV 到 0.69 eV 的变化, 载流子浓度从  $5.40 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  变化为  $1.77 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。本研究开发了一种利用超快激光退火优化 SiC 界面电学性能的有效方法。

**关键词:**飞秒激光; 碳化硅; 接触界面; 肖特基势垒

中图分类号: TN248 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243219.2889

## Femtosecond laser annealing of 4H-SiC interfaces and optimization of their electrical performance

REN Yuqi<sup>1,3</sup>, YUE Yunfan<sup>1,3</sup>, LI Sheng<sup>1,4</sup>, CHAI Nianyao<sup>1,4</sup>, CHEN Xiangyu<sup>1,3</sup>,  
ZENG Zhongle<sup>1,4</sup>, ZHAO Fengyi<sup>2</sup>, WANG Huan<sup>1,3</sup>, WANG Xuewen<sup>1,2,4\*</sup>

(1. Center of Femtosecond Laser Manufacturing for Advanced Materials and Devices,  
State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing,  
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Foshan Xianhu Laboratory, Foshan 528000, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology,  
Wuhan 430070, China;

4. International School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology,  
Wuhan 430070, China)

收稿日期: 2024-04-23; 修订日期: 2024-06-22.

基金项目: 海南省科技计划三亚崖州湾科技城联合项目 (No. 2021JJLH0058); 国家重点研发计划资助项目 (No. 2020YFA0715000); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目 (No. 2021B1515120041)

**Abstract:** Enhancing the electrical contact properties between SiC and metal interfaces is crucial for advancing SiC materials in high-frequency and high-power devices. This study utilized a 1030 nm near-infrared femtosecond laser to anneal the 4H-SiC surface, analyzing the effects of various laser annealing parameters. We examined changes in surface morphology, element distribution, and bonding structure of the laser-annealed samples using scanning electron microscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, confocal Raman spectroscopy, and other methods. The study revealed that improvements in electrical properties at the contact interface result from a disordered graphite structure and  $\text{SiO}_x/\text{Si}$  structure with oxygen vacancies created by laser annealing. This structure reduces the interface Schottky barrier height, enhances conductivity, and shifts the Fermi level of the 4H-SiC surface, significantly boosting interface electrical properties. Femtosecond laser annealing reduced the SiC interface Schottky barrier from 1.43 eV to 0.69 eV and increased the carrier concentration from  $5.40 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  to  $1.77 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , presenting a novel method for optimizing SiC interface electrical properties with ultrafast laser annealing.

**Key words:** femtosecond laser; silicon carbide; contact interface; Schottky barrier

## 1 引言

以碳化硅(SiC)为代表第三代半导体材料,与传统半导体硅(Si)材料相比,具有宽带隙(3.26 eV)、高临界电场( $>2 \text{ MV/cm}$ )、高导热系数( $4.9 \text{ W/(cm} \cdot \text{K)}$ )以及高饱和漂移速度( $>2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ )等优势,因此,在高功率、高频领域存在巨大的发展潜力<sup>[1]</sup>。现有研究表明,SiC基器件在高导热、低漏流及高电流耐久性方面显著优于硅基器件<sup>[2]</sup>,以SiC材料制备的MOSFET(金属-氧化物半导体场效应晶体管)器件,在保持高开关频率的同时,还能实现1700 V的高耐压<sup>[3]</sup>。此外,SiC的高饱和电子漂移速率可以在通讯领域极大改善器件性能<sup>[4]</sup>。但由于SiC表面存在大量不饱和悬键,在与金属接触后界面能态会改变,通过费米能级钉扎效应,使肖特基势垒高度独立于金属电极功函数,极大地影响SiC器件的电学特性<sup>[5-6]</sup>。目前,通过表面钝化<sup>[7]</sup>、天然氧化物变化<sup>[8]</sup>或在接触界面<sup>[9]</sup>上去除或插入有机/无机材料等方法,可以改善电流在接触界面的传导特性<sup>[10-11]</sup>。但这些方法存在工艺复杂、成本较高的问题。此外,重掺杂工艺容易在金属/SiC接触界面处发生晶格畸变或缺失,从而影响器件稳定性,降低器件的使用寿命。因此,开发一种新的高效退火方法,在保证掺杂质量的同时,避免非改性区域晶格缺陷的产生,以实现电学性能优化的目标是SiC器件进一步发展的关键。

飞秒激光加工作为一种全新的材料加工手段<sup>[12-13]</sup>,由于其脉冲宽度( $\sim 10^{-15} \text{ s}$ )远低于电子-晶格弛豫时间( $10^{-12} \sim 10^{-10} \text{ s}$ ),能够很大程度上抑制加工过程中的热效应,促进材料产生非热相变,减少缺陷的生成,这种低损伤特性更有利于极端环境下设备的制备<sup>[14]</sup>。目前,飞秒激光超快退火工艺已经被应用于众多半导体材料的超快热处理<sup>[15-17]</sup>。本课题组在前期的工作中,将飞秒激光应用于钙钛矿材料的加工中,发现了超短脉冲下对钙钛矿的非热烧蚀现象,提出了一种基于飞秒激光非热效应的钙钛矿光伏组件无损制造技术<sup>[18]</sup>。同时,还开发了针对 $\text{SnO}_2$ 的非平衡超快退火技术,能够在飞秒脉冲光场作用下实现光电电子的大量激发,驱动氧化锡薄膜实现非热超快结晶与缺陷钝化,从而有效降低能源成本和制造时间<sup>[19]</sup>。

本文研究了1030 nm飞秒激光退火对4H-SiC电接触性能的影响,通过优化加工工艺,成功使肖特基势垒高度下降0.74 eV,电导率提升4个数量级。分析其变化机理发现,激光退火处理后表面载流子浓度的大幅提升与势垒高度的降低共同优化了界面电传输特性,这种变化来自于由退火产生的无序化石墨结构与O元素空位缺陷的 $\text{SiO}_x$ 结构。飞秒激光退火综合了传统退火与沉积二维材料改性的优点,为半导体器件热退火提供了一种新思路。

2 材料与方法

2.1 实验材料

实验采用的 N 型 4H-SiC 晶片来自北京天科合达半导体有限公司,材料的相关参数见表 1。

| 表 1 4H-SiC 材料参数             |                                             |
|-----------------------------|---------------------------------------------|
| Tab. 1 Parameters of 4H-SiC |                                             |
| 参 数                         | 样品标准                                        |
| 样品尺寸/mm                     | 10×10                                       |
| 厚度/ $\mu\text{m}$           | $500\pm 25$                                 |
| 晶片方向                        | On axis: $\langle 0001 \rangle \pm 5^\circ$ |
| 表面粗糙度                       | 双抛 CMP $R_a \leq 0.5\text{ nm}$             |
| 电阻率                         | $0.02\sim 0.1\ \Omega\cdot\text{cm}$        |

2.2 实验仪器及表征设备

实验采用飞秒激光器波长为 1 030 nm,脉冲宽度在 260~2 000 fs,重复频率为 200 kHz,最大输出功率 1.5 W,聚焦光斑半径为 12.5  $\mu\text{m}$ ,通过控制衰减比例可实现单脉冲能量在 0~7.5  $\mu\text{J}$  的

调节,实验设备见表 2。

| 表 2 飞秒激光退火实验设备                                            |                          |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------|
| Tab. 2 Experimental setup for femtosecond laser annealing |                          |
| 仪器/设备名称                                                   | 型号(生产厂家)                 |
| 飞秒激光器                                                     | Pharos(Light Conversion) |
| 场发射扫描电镜附加 X-Max N80 能谱仪                                   | JSM-7500F                |
| 共聚焦拉曼光谱仪                                                  | Alpha300R(WITec)         |
| X 射线光电子能谱仪                                                | AXIS SUPRA               |
| 霍尔效应测试仪                                                   | HMS-7000                 |

3 结果与讨论

3.1 光通量的作用效果与优化

为了探究合适的飞秒激光退火功率,在允许的光通量范围内选择 0.2,0.6,1.0,1.4  $\text{J}/\text{cm}^2$  4 个参数对 4H-SiC 表面进行飞秒激光退火处理,并对退火后样品进行拉曼光谱测试,结果如图 1 所示。

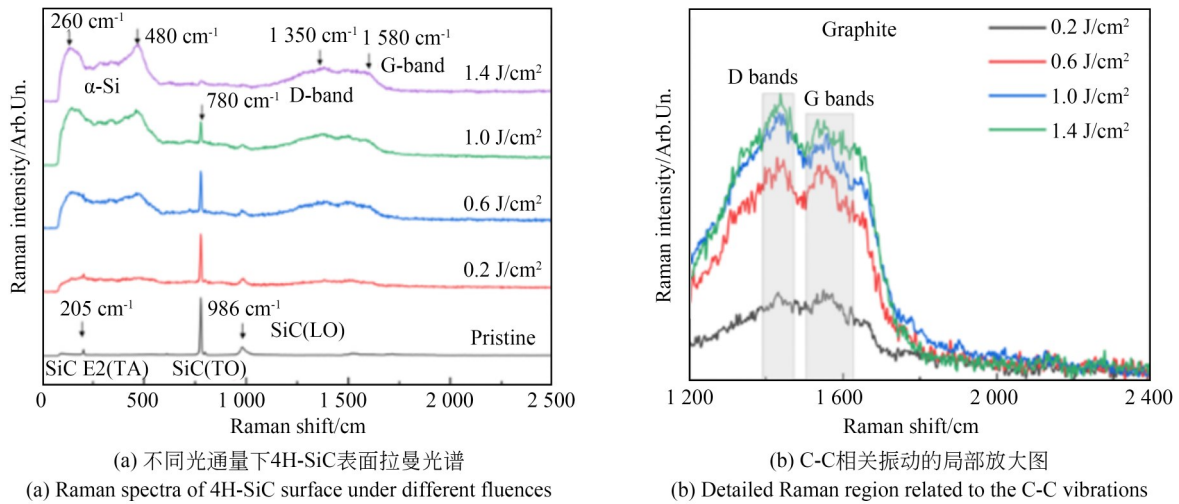


图 1 飞秒激光退火后样品的拉曼光谱  
Fig. 1 Raman spectra of sample with femtosecond laser annealing

如图 1(a)所示,未经飞秒激光退火的原始样品在 205,780,986  $\text{cm}^{-1}$  处存在明显峰位,分别对应本征 4H-SiC 晶体峰的横向声学(TA)声子峰、横向光学(TO)声子峰以及纵向光学(LO)声子

峰<sup>[20]</sup>。随着激光通量的增加,在 205~500  $\text{cm}^{-1}$  和 1 200~1 600  $\text{cm}^{-1}$  内分别出现一个明显的宽峰。一般来说,固体材料键角的各向同性分布决定了其谱峰的带宽。与非晶硅相关的拉曼光

谱<sup>[20]</sup>,可以判断在  $260\text{ cm}^{-1}$  和  $480\text{ cm}^{-1}$  附近的峰来自于激光诱导形成的非晶  $\alpha$ -Si 相,峰强来自于 Si-Si 键的振动。而在  $1\,350\text{ cm}^{-1}$  和  $1\,590\text{ cm}^{-1}$  出现的峰分别代表了石墨的 D 带和 G 带。对比发现,当光通量较低 ( $0.2\text{ J/cm}^2$ ) 时,退火样品光谱无明显变化,当达到  $0.6\text{ J/cm}^2$  时上述特征峰明显出现,继续增大激光通量会导致原始的 SiC 峰 ( $780\text{ cm}^{-1}$ ) 强度明显减弱甚至消失,即高激光通量会对样品表面结构产生较大破坏。

图 1(b) 为石墨结构对应谱峰放大图, D 峰代表石墨中 C  $\text{sp}^2$  环的呼吸模式,其出现说明产生了缺陷态石墨结构。而 G 峰代表了石墨中 C-C 伸缩模式,两峰强度与激光通量呈正相关。这种变化来自于 c-SiC 向  $\alpha$ -SiC 转化过程中,随原子迁移增加,亚稳态  $\alpha$ -SiC 进一步分解产生的非晶碳通过  $\text{sp}^3$ - $\text{sp}^2$  有序无序转变成为石墨或石

墨烯<sup>[21]</sup>。

进一步采用 SEM 对样品表面形貌进行分析,随着激光能量的增大,表面形貌逐渐从纹波结构向纳米颗粒过渡。这些纹波来自激光诱导下产生的不稳定结构,即自组织机理<sup>[22]</sup>。飞秒激光通过多光子吸收以及碰撞电离,使得能量转移至晶格,降低晶格稳定性。此外,由于激发电场导致的电离能不对称分布,电子与晶格间的能量转移具有各向异性。当光通量达到  $1\text{ J/cm}^2$  时,表面纹波结构变粗,此时出现了热积累效应;当光通量达到  $1.4\text{ J/cm}^2$  时,表面产生微纳颗粒,其形成来自于退火过程中库伦爆炸产生的电离。这种电离破坏了晶格稳定性,进而在表面重构过程中,使晶格发生了弛豫。由图 2(f) 可知,这些微纳颗粒成球形团簇,并紧密排列。

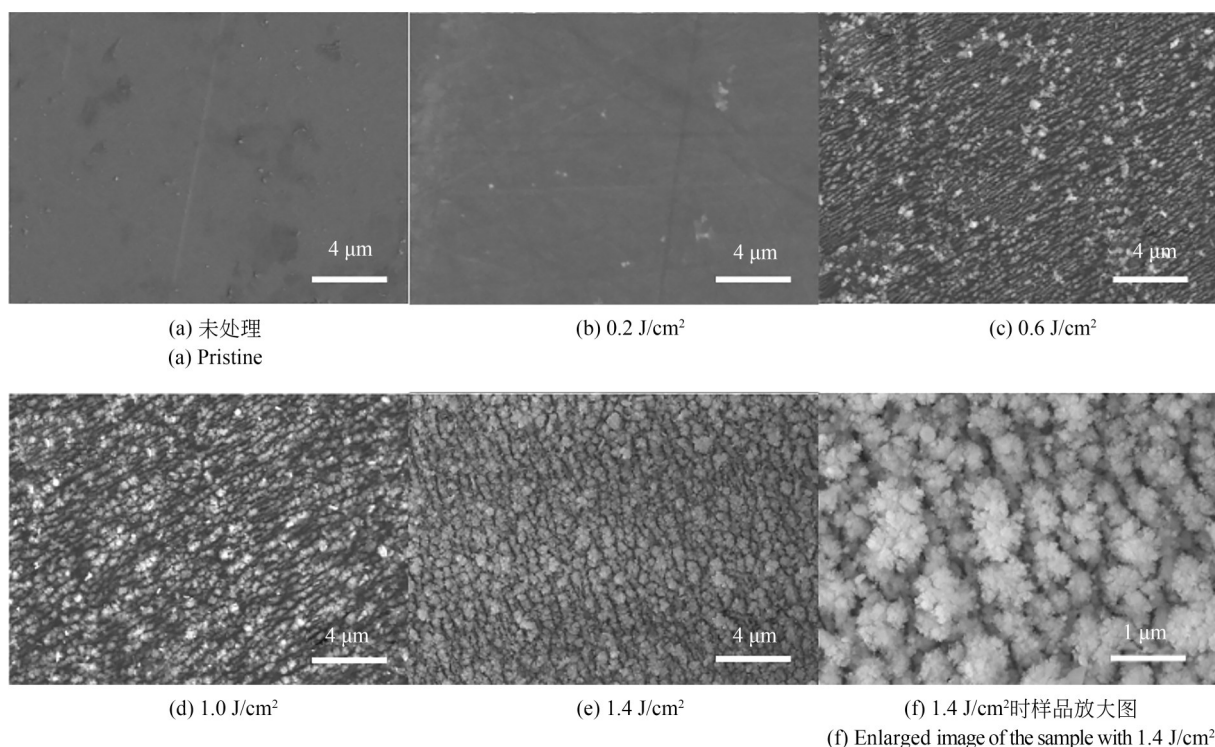


图 2 不同光通量下样品表面的 SEM 图像

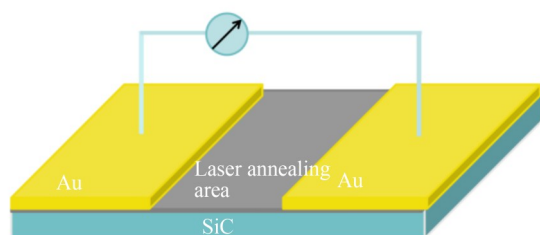
Fig. 2 SEM images of sample surface under different fluences

### 3.2 扫描间距对电学特性影响

为了保证材料自身特性不受到较大破坏,选择激光通量  $0.6\text{ J/cm}^2$  左右进一步探究其合适的功率范围,并通过改变其他激光工艺参数来研究激光退火对 N 型 4H-SiC 表面电接触性能的影响。

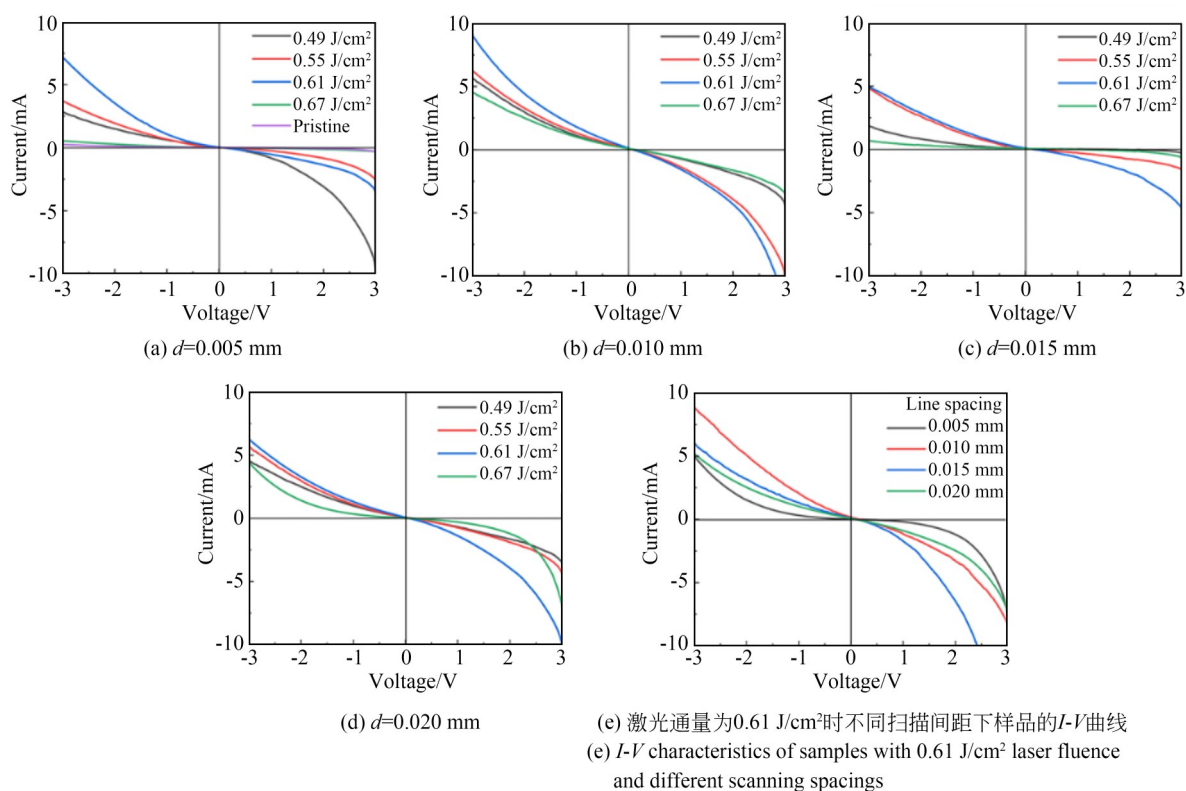
首先探究了不同扫描间距对电接触改性的影响,通过  $I$ - $V$  曲线进行表征,测试示意图如图 3 所示。

在激光退火后的 4H-SiC 表面上蒸镀  $80\text{ nm}$  厚的金电极,研究不同扫描间距下其  $I$ - $V$  曲线的

图 3  $I$ - $V$  曲线测试示意图Fig. 3 Schematic diagram of  $I$ - $V$  curve testing

变化趋势(扫描电压:  $-3 \sim 3$  V, 扫描速度:  $25$  mV/s), 结果如图 4 所示。图 4(a) 展示了未经激光处理, 以及激光扫描间距为  $0.005$  mm 时, 不同激光通量( $0.49, 0.55, 0.61, 0.67$  J/cm $^2$ ) 处理后样品的  $I$ - $V$  曲线。由图可知, 原始样品在 Au/

SiC 界面的肖特基势垒较高, 因此在蒸镀金电极后表现出明显的非线性特征。当采用不同能量激光退火处理后, 样品  $I$ - $V$  曲线斜率表现出先增大后减小的趋势, 在  $0.61$  J/cm $^2$  时  $I$ - $V$  曲线斜率达到最大值。横向对比其他扫描间距  $I$ - $V$  曲线图 4(b)~4(d) 发现, 斜率最大值均出现在  $0.61$  J/cm $^2$  时, 不同扫描间距对  $I$ - $V$  曲线的影响主要体现在扫描电流上。如图 4(b) 所示, 当扫描间距为  $0.01$  mm 时, 扫描电流增大, 而随着间距继续增大, 电流显著降低(图 4(c)、4(d)), 说明扫描间距较大时光斑重叠率降低, 影响了退火效果。图 4(e) 综合对比了不同间距下  $0.61$  J/cm $^2$  样品的  $I$ - $V$  曲线, 发现当扫描间距设置为  $0.01$  mm 时, 改性效果最佳。

图 4 不同激光通量和扫描间距下样品的  $I$ - $V$  曲线Fig. 4  $I$ - $V$  characteristics of sample with different laser fluences and scanning spacings

### 3.3 脉冲数对电学特性的影响

为了实现 4H-SiC 界面改性最优, 进一步探究了有效脉冲数(每平方毫米下的脉冲个数)对  $I$ - $V$  曲线的影响, 激光通量保持与扫描间距实验相同。如图 5 所示, 不同有效脉冲数下样品  $I$ - $V$  曲线斜率同样呈现先增大后减小的变化趋势, 激光的有效

脉冲数在 200 以下时, 各通量下曲线整体趋势相似, 在电流上有所差异, 如图 5(a)~5(c) 所示。而随着有效脉冲数的提高, 样品正反向电流强度差异逐渐明显。当脉冲数为 400 时(图 5(e)), 曲线出现毛刺, 表明 SiC 与电极材料接触变差, 电流信号不稳定, 且此时曲线不经过原点, 说明表面产生

大量缺陷,器件产生了一定漏电流,影响其稳定性。因此,高脉冲数的激光退火不利于改善界面的电接触性能。在图 5(f)中,将激光通量为 0.61

$\text{J}/\text{cm}^2$  时不同有效脉冲数作用下的样品进行对比分析,得出在有效脉冲数  $N=100$  时,经飞秒激光退火的 4H-SiC 样品肖特基势垒较低。

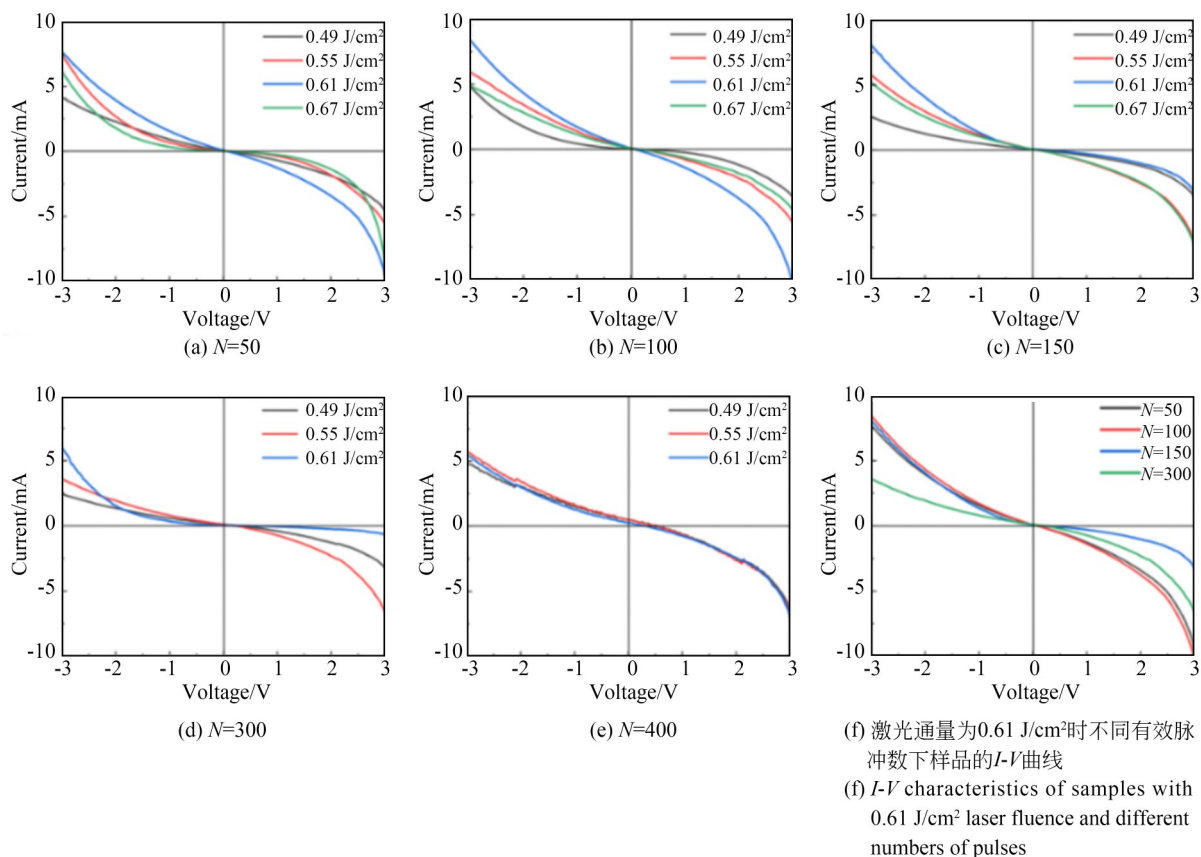


图 5 不同激光通量和有效脉冲数下样品的  $I$ - $V$  曲线

Fig. 5  $I$ - $V$  characteristics of sample with different laser fluences and number of effective pulses

### 3.4 退火前后改性机理

经过前文探究,确定了激光通量  $0.61 \text{ J}/\text{cm}^2$ 、扫描间距为  $0.01 \text{ mm}$ 、脉冲数为 100 的激光加工参数,为了进一步分析电学性能的变化机制,对改性过后的 SiC 表面进行了 EDS 能谱分析。

由 EDS 能谱可知,原始样品表面只存在碳和硅两种元素,经过飞秒激光退火后,氧元素含量显著增加,从  $0.83\%$  上升至  $17.01\%$ 。结合前文拉曼光谱分析,由退火产生的来自  $205\sim 500 \text{ cm}^{-1}$  和  $1\,200\sim 1\,600 \text{ cm}^{-1}$  的非晶态的 Si 和石墨结构与空气中的氧气生成硅氧/碳氧化物是造成表面氧元素含量上升的主要原因。此外,退火处理后,碳与硅的原子百分比含量均有所上升,这表明原始样品的 Si-C 键发生断裂,生成以原子形式存在的非晶硅与石墨结构。这些结构重新沉积

在 SiC 表面,改变了原始表面的元素分布与物理性质。从图 6(b)中氧的 EDS 能谱分布可以看到,激光退火使得氧元素均匀覆盖在 SiC 表面,这有利于器件性能的稳定。

为了分析退火前后样品的成键结构和化学成分对其电接触性能的影响,对样品进行了 XPS 能谱测试,如图 7 所示。图 7(a)对比了激光退火前后样品的 XPS 能谱整体变化情况,结果显示,硅(Si 2p 和 Si 2s)、碳(C 1s)和氧(O 1s)的峰值,氧峰的出现归因于在空气环境中 4H-SiC 的表面氧化。可以看到,经过激光退火处理, SiC 表面 O 1s 峰显著增强, Si 2s, Si 2p 及 C 1s 峰值强度减弱,表面发生氧化反应。对图 7(b)中 C 1s 轨道进行能谱峰位标定,  $280.1 \text{ eV}$  和  $282.2 \text{ eV}$  处分别对应 Si-C 键和 C-C 键。退火

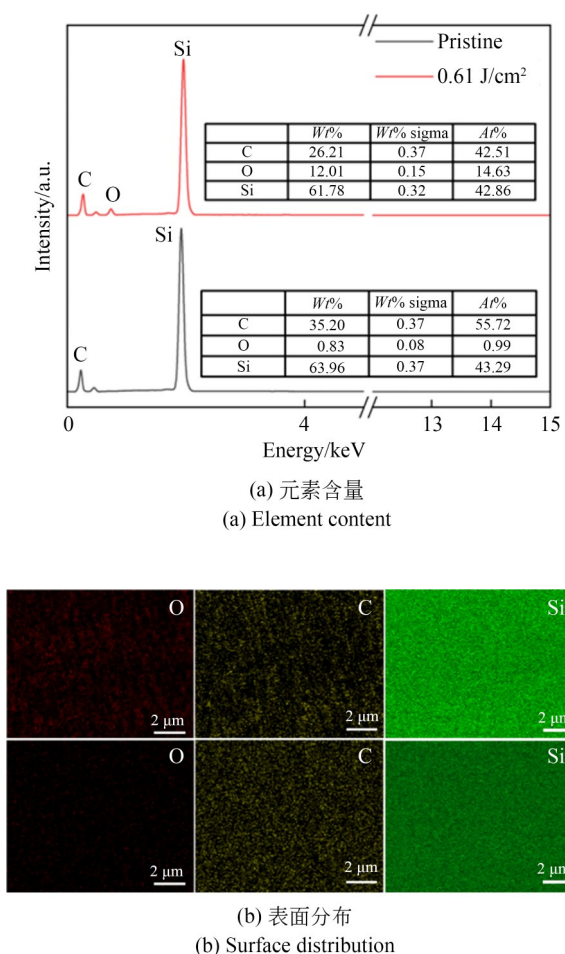


图6 激光退火前后表面EDS能谱分析

Fig. 6 EDS map analysis of 4H-SiC before and after laser annealing

后 Si-C 键对应峰位消失,而在 282.2 eV 处对应 C-C 键峰宽明显增加,说明此时 C 的存在形式发生改变。结合拉曼光谱的分析,产生的物质是石墨。

对 Si 2p 轨道能谱分析,如图 7(c) 可以看到,退火前在 102.4 eV 处对应 Si-C 的特征峰消失,在 100.8 eV 和 103.5 eV 处产生了两个新的峰,分别对应 Si-Si 键与 Si-O 键。其中 Si-O 键来自于光致分解产生的高能 Si 等离子体<sup>[23]</sup>,这些等离子体与空气中的氧气发生反应,而位于 100.8 eV 的 Si-Si 键表明激光退火同时产生非晶 Si。接着对 O 1s 轨道进行了标定分析,见图 7(d)。未经飞秒激光退火处理的样品表面仅存在 Si-O 键,对应于 533.2 eV 处强度相对较弱的特征峰,代表 SiO<sub>2</sub> 的存在,其来源可能为 SiC 表面暴露在大气环境中产生的少量氧化层。在退火处理

后,对应 SiO<sub>2</sub> 的 533.2 eV 特征峰消失,而在 533.8 eV 处产生了对应于 SiO<sub>x</sub>/Si 化合物的特征峰<sup>[24-25]</sup>,说明激光退火诱导产生非化学配比并具有氧空位缺陷的 SiO<sub>x</sub>/Si 化合物。由于激光退火后样品表面不存在 Si-C 键,因此,由退火产生的 Si 元素基本都以非晶或 SiO<sub>x</sub>/Si 化合物存在,此时表面氧元素的含量就会影响 SiO<sub>x</sub>/Si 结构,进而会在 O 含量不足时,在 SiC 表面产生 O 空位缺陷,而这种缺陷则会影响样品表面的电学传输特性。

由此可知,激光退火在 SiC 表面产生的石墨结构和来自 SiO<sub>x</sub>/Si 结构中的 O 空位缺陷是影响肖特基势垒的关键因素。其势垒变化可以通过热电子场发射模型进行表述<sup>[26]</sup>,利用泰勒级数对变量展开,得到肖特基势垒与阈值电压之间的关系如下<sup>[27]</sup>:

$$\phi_B = \frac{V_{th}}{\eta} + \frac{k_B T}{q}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{q}{k_B T} \frac{dV}{d(\ln I)}, \quad (2)$$

其中: $\eta$  为理想因子,其值在半导体器件中常介于 1~2 之间,可由  $\ln(I)$ - $V$  中线性部分斜率推导;为得到较好的拟合效果,取  $\ln(I)$ - $V$  中 0~0.4 V 区域进行拟合,可得理想因子约为 1.18; $V_{th}$  为 4H-SiC 的阈值电压,代表  $I$ - $V$  曲线特性发生改变时的电压,可通过拟合线与曲线交点确定; $T$  是开尔文温度(设置为 300 K), $k_B$  为玻尔兹曼常数, $q$  为电子电荷, $\phi_B$  为肖特基势垒高度。通过对上述最佳退火工艺下样品  $I$ - $V$  曲线进行分析,并代入式(1)和式(2)可得退火处理后肖特基势垒为 0.69 eV,低于原始 4H-SiC 的肖特基势垒 1.43 eV<sup>[27]</sup>。此结果表明,飞秒激光退火可以显著降低 4H-SiC 接触界面的肖特基势垒,其产生的 O 空位缺陷优化了界面传输特性,同时石墨结构改变了接触界面处的禁带宽度,更有利于欧姆接触的形成。

对 0.61 J/cm<sup>2</sup> 下退火样品进行了霍尔效应测试,结果如表 3 所示。在 300 K 的温度下,经过激光退火的样品表面电导率从  $1.71 \times 10^{-4}$  S/m 提升到  $0.56 \times 10^1$  S/m,提升 4 个数量级。载流子浓度从  $5.40 \times 10^{13}$  cm<sup>-3</sup> 提高至  $1.77 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>,显著改善了其电学性能。

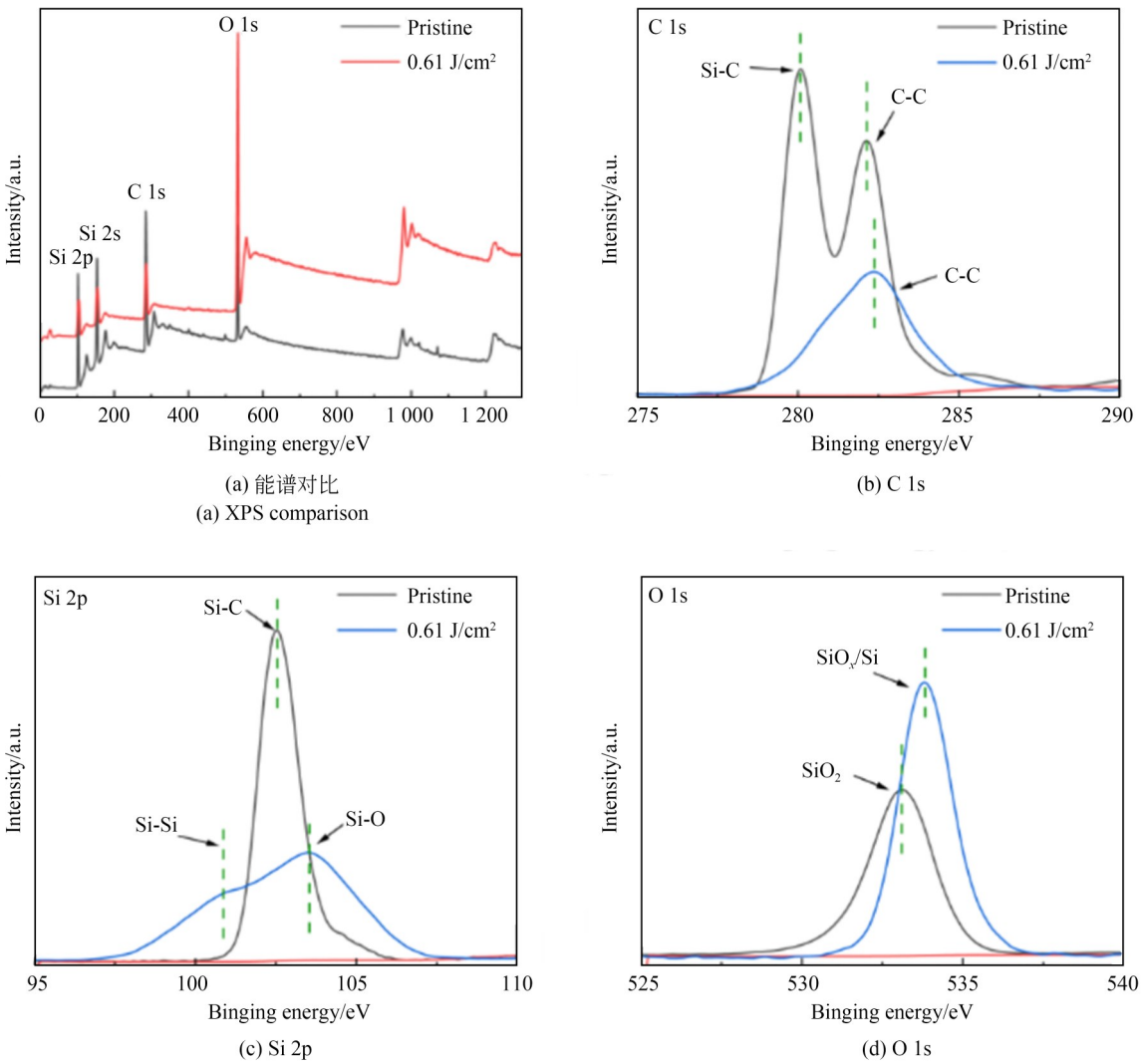


图7 激光退火前后4H-SiC的XPS能谱

Fig. 7 XPS spectra of 4H-SiC samples before and after annealing treatment

表3 退火前后4H-SiC霍尔测试

Tab. 3 Hall testing of 4H-SiC before and after annealing

| 参 数                                                       | 退火前                  | 退火后                  |
|-----------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 温度/K                                                      | 300                  | 300                  |
| 电导率/( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )                      | $1.71\times 10^{-4}$ | $0.56\times 10^1$    |
| 迁移率/( $\text{cm}\cdot(\text{V}^{-1}\cdot\text{S}^{-1})$ ) | 1.97                 | 1.99                 |
| 载流子浓度( $1/\text{cm}^{-3}$ )                               | $5.40\times 10^{13}$ | $1.77\times 10^{18}$ |
| 霍尔系数/( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{C}^{-1}$ )               | $-1.15\times 10^5$   | -3.52                |

4 结 论

本文利用波长为 1 030 nm 的近红外飞秒激

光实现了 4H-SiC 接触界面肖特基势垒的有效调控,通过控制工艺确定激光通量为  $0.61\text{ J}/\text{cm}^2$ 、扫描间距为  $0.01\text{ mm}$ 、脉冲数为 100 的加工参数,实现了肖特基势垒从  $1.43\text{ eV}$  到  $0.69\text{ eV}$  的变化,载流子浓度从  $5.40\times 10^{13}\text{ cm}^{-3}$  增加至  $1.77\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ ,且电导率实现 4 个数量级的提升。结合相应表征技术分析 4H-SiC 表面形貌、元素分布以及电子结合能的变化,结果表明,由激光退火产生的 O 空位缺陷显著提高了载流子浓度,无序化石墨结构改变了材料的禁带宽度,载流子更容易越过势垒,从而表现为电学性能的提升。本研究为飞秒激光退火改善金属/半导体接触界面性质提供了参考。

## 参考文献:

- [1] KIMOTO T, COOPER J A. *Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications*[M]. John Wiley & Sons, 2014.
- [2] PUSHPAKARAN B N, SUBBURAJ A S, BAYNE S B, *et al.* Impact of silicon carbide semiconductor technology in Photovoltaic Energy System [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 971-989.
- [3] MILLAN J, GODIGNON P, PERPINA X, *et al.* A survey of wide bandgap power semiconductor devices [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(5): 2155-2163.
- [4] SULLIVAN J S. High power operation of a nitrogen doped, vanadium compensated, 6H-SiC extrinsic photoconductive switch[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(17): 172106.
- [5] ITOH A, MATSUNAMI H. Single crystal growth of SiC and electronic devices[J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 1997, 22(2): 111-197.
- [6] TUNG R T. The physics and chemistry of the Schottky barrier height [J]. *Applied Physics Reviews*, 2014, 1(1): 011304.
- [7] FANG Y, WU X Z, YANG J Y, *et al.* Ultrafast bulk carrier recombination transients in n-type and semi-insulating 4H-SiC crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(20): 201904.
- [8] LAARIEDH F, LAZAR M, CREMILLIEU P, *et al.* The role of nickel and titanium in the formation of ohmic contacts on p-type 4H-SiC [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2013, 28(4): 045007.
- [9] LIU B B, QIN F W, WANG D J. Enhanced TiC/SiC Ohmic contacts by ECR hydrogen plasma pretreatment and low-temperature post-annealing [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 355: 59-63.
- [10] LEE D, KIM C, LEE H, *et al.* Improving the barrier height uniformity of 4H-SiC Schottky barrier diodes by nitric oxide post-oxidation annealing [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2014, 35(8): 868-870.
- [11] KRACICA M, MAYES E L H, TRAN H N, *et al.* Rectifying electrical contacts to n-type 6H-SiC formed from energetically deposited carbon [J]. *Carbon*, 2016, 102: 141-144.
- [12] CHAI N Y, YUE Y F, CHEN X Y, *et al.* Isotropic sintering shrinkage of 3D glass-ceramic nanolatitudes: backbone preforming and mechanical enhancement [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2024, 6(2): 025003.
- [13] QIAO J Q, CHAI N Y, FENG Y Z, *et al.* Two-step surface treatment of femtosecond laser irradiation and ionic liquid to enhance thermoelectric properties of PEDOT: PSS films[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 642: 158569.
- [14] OBATA K, CABALLERO-LUCAS F, KAWABATA S, *et al.* GHz bursts in MHz burst (BiBurst) enabling high-speed femtosecond laser ablation of silicon due to prevention of air ionization [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2023, 5(2): 025002.
- [15] CABALLERO-LUCAS F, OBATA K, SUGIOKA K. Enhanced ablation efficiency for silicon by femtosecond laser microprocessing with GHz bursts in MHz bursts (BiBurst) [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2022, 4(1): 015103.
- [16] WANG M H, ZHAO K H, WU J Y, *et al.* Femtosecond laser fabrication of nanograting-based distributed fiber sensors for extreme environmental applications [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021, 3(2): 025401.
- [17] ZHANG Y X, WU D, ZHANG Y C, *et al.* Femtosecond laser direct writing of functional stimulus-responsive structures and applications [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2023, 5(4): 042012.
- [18] ZHAO J J, CHAI N Y, CHEN X Y, *et al.* Non-thermal laser ablation of high-efficiency semitransparent and aesthetic perovskite solar cells [J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(5): 987-993.
- [19] CHAI N Y, CHEN X Y, ZENG Z L, *et al.* Photoexcitation-induced passivation of SnO<sub>2</sub> thin film for efficient perovskite solar cells[J]. *National Science Review*, 2023, 10(11): nwad245.
- [20] YAMAGUCHI M, UENO S, KUMAI R, *et al.* Raman spectroscopic study of femtosecond laser-induced phase transformation associated with ripple formation on single-crystal SiC [J]. *Applied Physics A*, 2010, 99(1): 23-27.
- [21] HAVEL M, BARON D, COLOMBAN P.

- ‘Smart’ Raman/Rayleigh imaging of nanosized SiC materials using the spatial correlation model [J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(20): 6183-6190.
- [22] JIA T Q, ZHAO F L, HUANG M, *et al.* Alignment of nanoparticles formed on the surface of 6H-SiC crystals irradiated by two collinear femtosecond laser beams [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(11).
- [23] LIN Z Y, JI L F, WU Y, *et al.* Laser-induced interfacial state changes enable tuning of the Schottky-barrier height in SiC [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 469: 68-75.
- [24] MOCHIZUKI K, KOSUGI R, YONEZAWA Y, *et al.* Selection of ion species suited for channeled implantation to be used in multi-epitaxial growth for SiC superjunction devices[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(5): 050905.
- [25] WELLMANN P J. Review of SiC crystal growth technology [J]. *Semiconductor Science Technology*, 2018, 33(10): 103001.
- [26] GIANNAZZO F, ROCCA FORTE F, RAINERI V, *et al.* Transport localization in heterogeneous Schottky barriers of quantum-defined metal films [J]. *Europhysics Letters (EPL)*, 2006, 74(4): 686-692.
- [27] ITOH A, KIMOTO T, MATSUNAMI H. Excellent reverse blocking characteristics of high-voltage 4H-SiC Schottky rectifiers with boron-implanted edge termination[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1996, 17(3): 139-141.

#### 作者简介:



任瑜启(1997—),男,河南平顶山人,硕士研究生,2020年于华北水利水电大学获得学士学位,主要从事半导体飞秒激光退火技术方面的研究。E-mail:317527@whut.edu.cn

#### 通讯作者:



王学文(1990—),男,江西吉安人,博士,教授,博士生导师,澳大利亚斯文本科技大学博士后,武汉理工大学15551青年拔尖人才、湖北省百人计划入选者,武汉理工大学先进材料与器件飞秒光制造中心副主任,佛山仙湖实验室能源材料激光制备技术实验室负责人,主要从事先进材料飞秒激光制备理论与技术的研究。E-mail:xw-wang@whut.edu.cn