

重离子在碳化硅中的输运过程及能量损失

张鸿 郭红霞 潘霄宇 雷志峰 张凤祁 顾朝桥 柳奕天 琚安安 欧阳晓平

Transport process and energy loss of heavy ions in silicon carbide

Zhang Hong Guo Hong-Xia Pan Xiao-Yu Lei Zhi-Feng Zhang Feng-Qi Gu Zhao-Qiao Liu Yi-Tian
Ju An-An Ouyang Xiao-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 162401 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210503

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210503>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

质子在碳化硅中不同深度的非电离能量损失

Non-ionization energy loss of proton in different regions in SiC

物理学报. 2018, 67(18): 182401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181095>

锂辉石/碳化硅复相陶瓷材料的制备与性能

Preparation and properties of spodumene/silicon carbide composite ceramic materials

物理学报. 2020, 69(11): 117701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200232>

质子照相中基于能量损失的密度重建

Density reconstruction based on energy loss in proton radiography

物理学报. 2018, 67(20): 206101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181039>

氮化镓基高电子迁移率晶体管单粒子和总剂量效应的实验研究

Single event effect and total dose effect of GaN high electron mobility transistor using heavy ions and gamma rays

物理学报. 2021, 70(11): 116102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202028>

基于蒙特卡罗方法的4H-SiC(0001)面聚并台阶形貌演化机理

Formation of step bunching on 4H-SiC (0001) surfaces based on kinetic Monte Carlo method

物理学报. 2019, 68(7): 078101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182067>

利用质子能损检测气体靶区有效靶原子密度的实验研究

Experimental investigation on diagnosing effective atomic density in gas-type target by using proton energy loss

物理学报. 2018, 67(4): 044101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172028>

重离子在碳化硅中的输运过程及能量损失*

张鸿¹⁾ 郭红霞^{1)2)†} 潘霄宇²⁾ 雷志峰³⁾ 张凤祁²⁾
顾朝桥¹⁾ 柳奕天¹⁾ 琚安安¹⁾ 欧阳晓平²⁾

1) (湘潭大学材料科学与工程学院, 湘潭 411105)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

3) (工业和信息化部电子第五研究所, 电子元器件可靠性物理及其应用技术国家重点实验室, 广州 510610)

(2021 年 3 月 16 日收到; 2021 年 4 月 17 日收到修改稿)

利用蒙特卡罗方法, 模拟计算了不同线性能量传输 (liner energy transfer, LET) 的重离子在碳化硅中的能量损失, 模拟结果表明: 重离子在碳化硅中单位深度的能量损失受离子能量和入射深度共同影响; 能量损失主要由初级重离子和次级电子产生, 非电离能量损失只占总能量损失的 1% 左右; 随着 LET 的增大, 次级电子的初始角度和能量分布越来越集中; 重离子诱导产生的电荷沉积峰值位置在重离子径迹中心, 在垂直于入射深度方向上呈高斯线性减小分布. 利用铜源进行碳化硅 MOSFET 单粒子烧毁试验, 结合 TCAD 模拟得到不同漏极电压下器件内部电场分布, 在考虑电场作用的蒙特卡罗模拟中发现: 碳化硅 MOSFET 外延层的电场强度越大, 重离子受电场作用在外延层运动的路径越长、沉积能量越多, 次级电子越容易偏向电场方向运动导致局部能量沉积过高.

关键词: 蒙特卡罗方法, 碳化硅, 重离子, 能量损失, 电场**PACS:** 24.10.Lx, 61.80.-x, 61.80.Jh, 61.82.Fk**DOI:** 10.7498/aps.70.20210503

1 引言

随着微电子制造工艺的不断成熟, 硅材料的应用瓶颈日益突出, 特别是在光电子领域和高频、大功率器件方面的应用受到诸多限制. 由于碳化硅具有高击穿电场、高热导率、高电子密度和高电子迁移率等特点, 碳化硅器件在高频、大功率应用领域具有更大的优势^[1-4]. 碳化硅是一种宽禁带半导体材料, 其禁带宽度约为硅材料的三倍左右^[5,6], 这也使其产生电子空穴对所需的能量较高, 因而理论上碳化硅也具有较强的抗辐射性能. 近年来, 碳化硅器件逐渐进入商用领域, 尤其随着电动汽车的发

展, 碳化硅功率模块在电动车动力系统和充电桩中使用较多. 相比于硅基功率器件, 在航空航天电子设备中使用的碳化硅功率器件能明显地减轻电子设备整体重量, 且可以降低开关损耗^[7,8].

空间环境中存在的各种高能粒子, 粒子辐照可能会影响电子设备的正常工作, 严重时甚至会导致电子器件的永久性失效, 影响航天器的可靠性和使用寿命. 粒子辐照一方面会在材料中产生电离能量损失 (ionizing energy loss, IEL), 产生的电子-空穴对在材料中复合、运动, 影响材料的本征特性的同时可能会在碳化硅基器件中引起瞬态脉冲. 粒子在材料中的能量损失特性通常用线性能量传输 (line energy transfer, LET) 进行表征. 另一方面

* 国家自然科学基金 (批准号: 11875229) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guohongxia@nint.ac.cn

粒子辐照在材料中引起的非电离能量损失 (non-ionizing energy loss, NIEL) 会在材料中产生间隙原子-空位缺陷, 缺陷浓度的变化会导致材料的物理、化学特性发生改变^[9,10]. 近年来在实验中发现高能重离子辐照会导致碳化硅器件性能退化, 严重时甚至会导致器件烧毁^[11–14], 且辐照损伤与碳化硅材料有关^[15]. 利用解析计算和模拟仿真对粒子辐照对碳化硅的影响进行研究, 已经取得一些进展. 郭达禧^[16]等利用蒙特卡罗方法模拟了中子在碳化硅中的运输过程与位移损伤. 陈世彬等^[17]运用分子动力学方法模拟了 4H-SiC 材料辐照下的级联碰撞过程, 发现初级碰撞原子的能量与碳化硅中空位缺陷的数量和空间分布线性相关. 申帅帅等^[18]利用 Geant4 软件计算了质子在碳化硅不同深度的 NIEL, 发现碳化硅的抗位移损失能力强于硅, 且随质子能量增大在质子射程前端造成的位移损失更加严重. 空间环境中, 重离子通量较低, 但具有极高的能量. 虽然中子、质子辐照碳化硅发生核反应时可能产生部分重离子, 但产生的都是中低能重离子, 不足以体现更高能量的重离子在碳化硅中的能量损失特性. 现有的研究表明碳化硅器件存在严重的单粒子栅穿 (single event gate rupture, SEGR) 和单粒子烧毁 (single event burnout, SEB) 问题, 且碳化硅 MOSFET 和二极管存在单粒子烧毁阈值电压^[19–23]. 当外加偏置电压大于烧毁阈值电压时, 碳化硅器件的外延层存在强电场, 重离子在碳化硅器件外延层中的运动会受到强电场的影响. 目前碳化硅基器件的重离子辐照机理尚不明确, 探究重离子在碳化硅器件的运输过程和能量损失具有重要意义.

针对碳化硅基器件的研究, 可以借鉴在硅基器件中使用的研究方法. Geant4 是由欧洲核子中心主导开发的蒙特卡罗程序包, 可以详细模拟粒子在材料中的运输, 现被广泛应用于空间探测、空间辐射效应等研究领域. 本文首先利用蒙特卡罗方法模拟不同 LET 的重离子在碳化硅中的运输, 对碳化硅中能量损失的时间和空间分布等进行计算, 确定

碳化硅中产生能量损失的粒子类型及电离与非电离能量损失的大小. 然后通过铜源试验和 TCAD 模拟得到不同漏极电压下碳化硅 MOSFET 内部的电场分布, 将电场分布嵌入蒙特卡罗模型, 模拟并分析不同电场对能量损失的产生及分布的影响.

2 重离子在碳化硅中产生损伤的蒙特卡罗模拟

2.1 模型建立

本节以碳化硅为靶材料, 利用 Geant4 软件对入射重离子能量及类型、物理过程、数据抽取等模块进行编程, 模拟重离子在碳化硅中的运输过程. 根据重离子在硅中的能量损失特点, 选取了三组重离子 (不同种类和能量). 碳化硅靶材料的密度设置为 3.2 g/cm^3 . 重离子从靶材表面中心垂直入射, 靶材料的厚度应足够大, 以保证重离子运动最终停止在碳化硅内. 本文选取的入射重离子描述如表 1 所列, 重离子在碳化硅中的射程分别使用 SRIM 软件^[24]和 Geant4 软件计算得到. 从表 1 可以看到, 使用 Geant4 软件的计算结果与 SRIM 的计算结果有较好的一致性, 最大相差 14.1%. 射程的差别主要来自在重离子能量较低时 Geant4 和 SRIM 选用物理模型的差异^[24–28].

本节将碳化硅设置为一个足够大的长方体, 如图 1 所示. 模拟中选取三种 LET 值的重离子, 在同一位置入射三个相同的重离子. 图中蓝色是初级重离子的运动轨迹, 只有在射程末端能量较低无法与碳化硅相互作用产生电子时能观察到. 红色的是次级电子的运动轨迹, 大量的次级电子沿初级重离子径迹产生并在碳化硅中做无规则运动直至能量耗尽. 黑色是反应产生的极少的 γ 射线, 其具有较强的穿透性. 初级重离子在射程前端由于能量较高会沿初始入射方向运动, 随着能量逐渐损失重离子运动轨迹开始偏离直线方向直至能量耗尽停止运动.

表 1 选取的重离子种类、能量及其在材料中的射程
Table 1. Selected heavy ion, energy and range of heavy ions in silicon carbide.

重离子	能量/MeV	SiC中射程/ μm @SRIM	SiC中射程/ μm @Geant4	SiC中LET /($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$)	Si中LET /($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$)
铜 (Cu^+)	212	22.01	21.5	34.08	32.2
溴 (Br^+)	218	19.97	18.5	44.73	42
碘 (I^+)	270	19.21	16.5	69.72	65

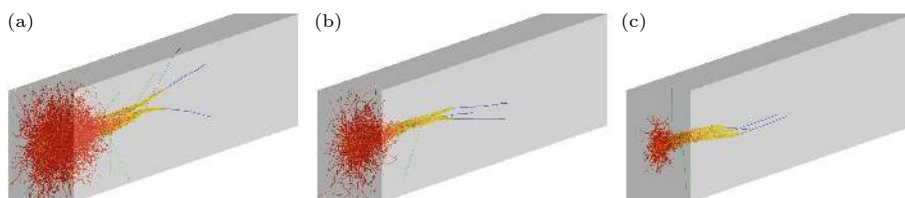


图 1 不同 LET 的重离子入射碳化硅的径迹分布 (a) 34.08 MeV·cm²/mg; (b) 44.73 MeV·cm²/mg; (c) 69.72 MeV·cm²/mg

Fig. 1. Track distribution of heavy ions with different LET incident on silicon carbide: (a) 34.08 MeV·cm²/mg; (b) 44.73 MeV·cm²/mg; (c) 69.72 MeV·cm²/mg.

2.2 重离子致碳化硅损伤分析

仅使用 LET 值衡量粒子或射线在材料中的能量损失特性太过笼统, 初级重离子的能量随着入射深度的增加而减小, 其与材料的相互作用机制及反应截面也会发生变化. 本文统计了单位深度产生的能量损失随入射深度的变化, 如图 2 所示. 重离子的能量和射程决定了其 LET 值的大小. 图 2 中单位深度的能量损失随入射深度的变化接近指数分布, 能量损失峰值随入射离子能量的增大向左偏移. 单位深度的能量损失在重离子射程初期随离子初始能量的增大而增大. 在入射深度大于 14 μm 时, 重离子初始能量越大, 在单位深度的能量损失反而越小. 初级重离子与碳化硅相互作用损失一部分能量, 同时有次级粒子产生, 模拟结果表明次级粒子中产生能量损失的主要是电子. 如图 3 所示, 初级重离子的能量损失随 LET 增大而增大, 而次级电子的能量损失在 LET 变化时基本保持不变, 总能量损失主要由电子和初级重离子产生. 侯东明等 [29] 的研究认为次级电子的能量达到材料的特定损伤阈值时, 材料出现潜径迹损伤. 潜径迹损伤在重离子径迹周围产生, 次级电子能量损失一定程度上反映了材料潜径迹损伤程度.

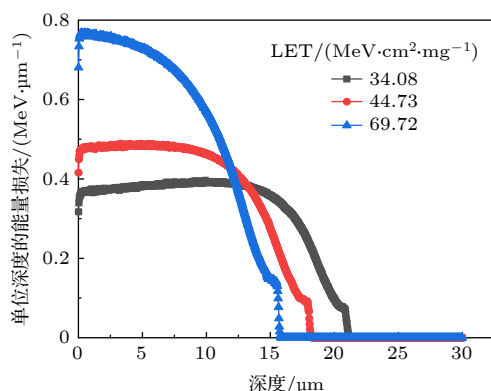


图 2 不同 LET 的重离子产生的能量损失随入射深度的变化

Fig. 2. The energy loss of heavy ions with different LET changes with the depth of incidence.

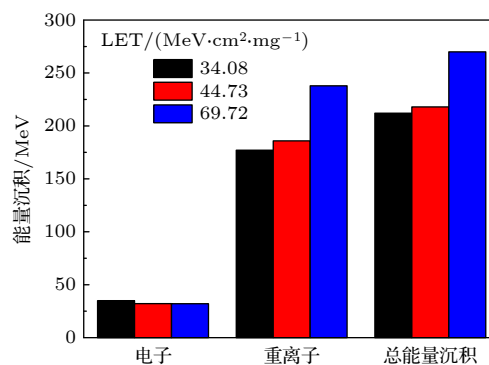


图 3 不同粒子造成的能量沉积随 LET 的变化

Fig. 3. Variation of energy deposition caused by different particles with LET.

图 4 和图 5 分别是不同 LET 下辐照产生的总能量损失和次级电子径迹的二维分布. 能量损失在重离子径迹中心分布最多, 远离径迹中心能量损失逐渐减小. 图 4 中统计的是多个重离子辐照碳化硅的平均能量损失. 由于重离子与碳化硅相互作用具有随机性, 重离子在射程末端可能会以一定角度偏离垂直碳化硅表面方向, 有时重离子也可能在其射程中段就开始大角度偏离垂直方向. 图 4 和图 5 所描述的能量损失和电子径迹有一部分分布在偏离碳化硅中心的区域, 重离子在射程末端能量损失分布也比较发散. 本文入射重离子数量为 10^4 个, 入射方向都一致, 足以得到较为精确的结果. 结合图 4 和图 5, 可以发现在射程末端几乎没有次级电子产生, 这段射程内的能量损失全部来自初级重离子. 次级电子最初产生时的角度和能量大小影响着电子能损的分布, 进一步也影响着碳化硅的损伤程度. 图 6 是不同 LET 下次级电子初始状态的角度-能量分布图, 重离子入射碳化硅的方向规定为 0°. 模拟结果显示, 三种 LET 下次级电子偏离重离子入射方向都不超过 60°, 次级电子的初始能量不超过 8 keV. 随着 LET 的增大, 次级电子的角度和能量分布越来越集中. 材料中次级电子的作用区域越集中则越有可能引起局部区域出现潜径迹损伤.

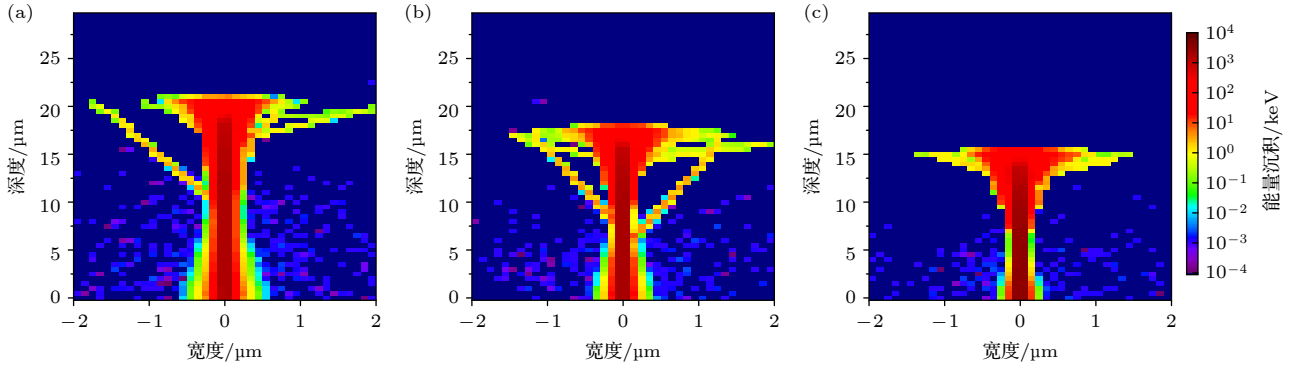


图 4 不同 LET 下总能量损失的空间分布 (a) 34.08 MeV·cm²/mg; (b) 44.73 MeV·cm²/mg; (c) 69.72 MeV·cm²/mg

Fig. 4. Spatial distribution of total energy loss under different LET: (a) 34.08 MeV·cm²/mg; (b) 44.73 MeV·cm²/mg; (c) 69.72 MeV·cm²/mg.

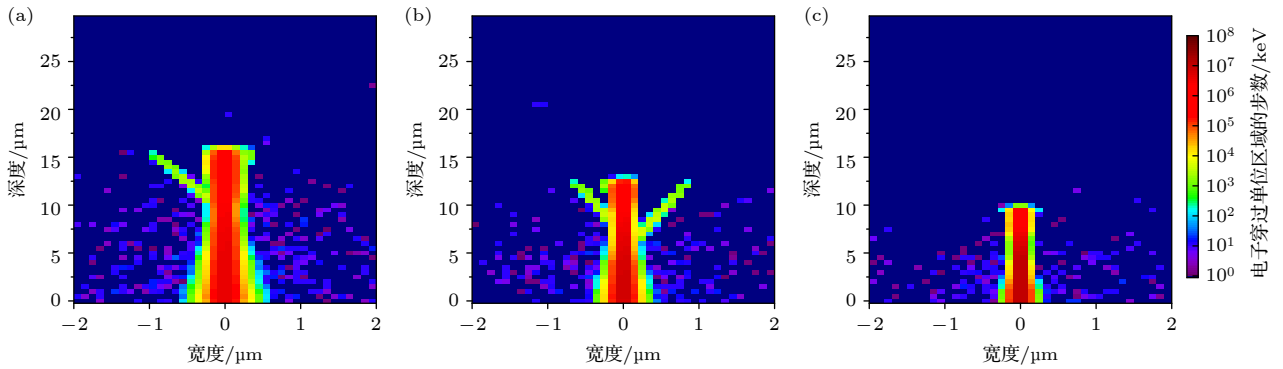


图 5 不同 LET 下次级电子径迹的空间分布: (a) 34.08 MeV·cm²/mg; (b) 44.73 MeV·cm²/mg; (c) 69.72 MeV·cm²/mg

Fig. 5. Spatial distribution of electron tracks under different LET: (a) 34.08 MeV·cm²/mg; (b) 44.73 MeV·cm²/mg; (c) 69.72 MeV·cm²/mg.

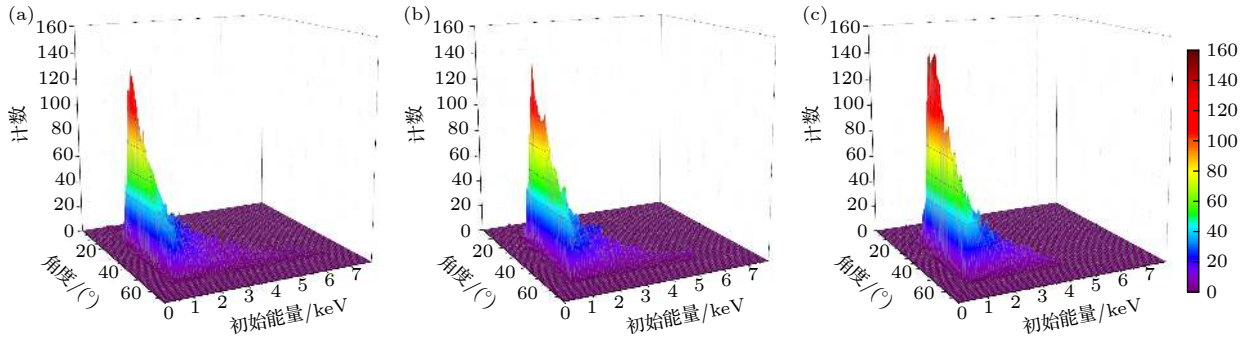


图 6 不同 LET 下次级电子的初始能量及角度分布: (a) 34.08 MeV·cm²/mg; (b) 44.73 MeV·cm²/mg; (c) 69.72 MeV·cm²/mg

Fig. 6. The initial kinetic energy and angle distribution of secondary electron under different LET: (a) 34.08 MeV·cm²/mg; (b) 44.73 MeV·cm²/mg; (c) 69.72 MeV·cm²/mg.

单个重离子在碳化硅中总能量损失随时间的变化如图 7 所示. 随着时间增加, 不同 LET 的重离子在碳化硅中的能量损失呈指数增加, 在约 1.5×10^{-12} s 时间内将自身能量完全损失在碳化硅中. 重离子 LET 的增大, 只是加剧能量损失的速率, 重离子能量完全损失所用的时间基本不变. 确

定材料中电离能量损失的时间和空间分布, 是分析单粒子对器件电学性能影响的基础.

在统计总能量损失随时间的变化时, 也需要对非电离能损进行计算, 图 8 是单个重离子在碳化硅中非电离能量损失随时间的变化. 重离子在碳化硅中的非电离能损相较于图 7 中总能量损失所占的

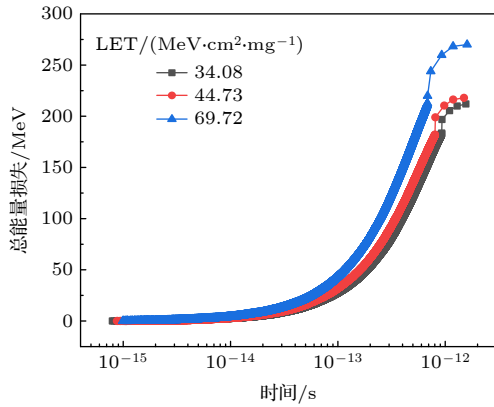


图7 总能量损失在碳化硅中的时间分布随LET的变化

Fig. 7. Time distribution of total energy loss in SiC as a function of LET.

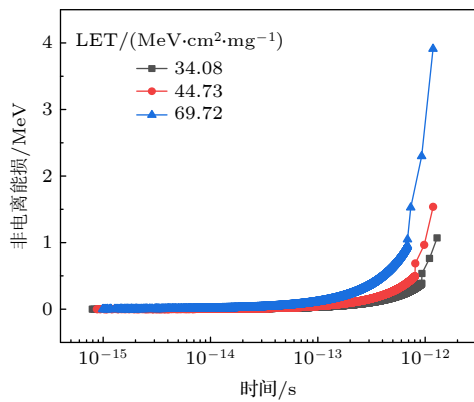


图8 非电离能量损失在碳化硅中的时间分布随LET的变化

Fig. 8. The time distribution of non-ionizing energy loss in SiC varies with LET.

比例极小, 270 MeV 的 I 离子最终在碳化硅中产生的非电离能损只有 3.9 MeV, 约占总能量损失的 1.44%. 值得注意的是, 非电离能损的增加主要集中在时间轴末端, 这也对应着重离子的射程末端. 我们分析在射程末端, 重离子主要是与碳原子和硅原子发生弹性和非弹性碰撞, 产生非电离能量损失. 本文计算了非电离能损随入射深度的分布情况, 如图 9 所示. 不同 LET 下重离子引起的非电离能量损失主要分布在重离子射程的末端, 而且射程末端的非电离能量损失至少比其射程前中段高一个数量级. 已有实验研究表明氮化镓的潜径迹损伤半径只有几纳米^[30]. 碳化硅与氮化镓同为第三代宽禁带半导体材料, 两者的辐照损伤有一定的相似之处. 如图 9 所示入射重离子的 LET 为 34.08 MeV·cm²/mg 时, 单位深度产生的非电离能损在 10000 eV 以上. 一般来说碳原子和硅原子的

位移阈能只有几十电子伏特, 非电离能损的产生对应着间隙原子-空位缺陷的形成. 随着 LET 值的增大, 单位深度产生的非电离能损增大, 碳化硅中产生的间隙原子-空位缺陷增多. 对于碳化硅材料, 会有一部分碳原子和硅原子的位置被撞离原本的位置成为间隙原子, 对应着出现碳空位和硅空位. 通过退火等手段可以让一些间隙原子复位, 但也可能会有部分间隙原子-空位无法复合, 形成永久性缺陷损伤. 当缺陷浓度达到一定程度时, 碳化硅材料的性质会发生改变, 进而影响碳化硅器件的性能.

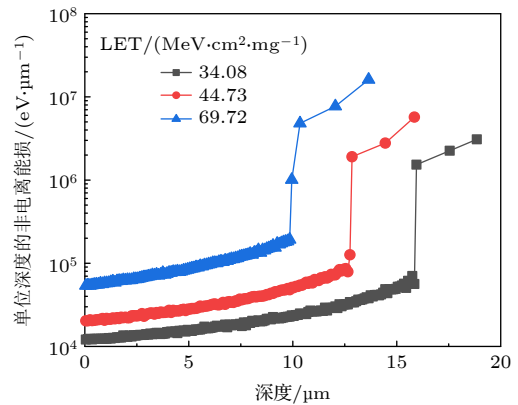


图9 不同LET下碳化硅中的非电离能量损失随深度的变化

Fig. 9. The non-ionizing energy loss in SiC varies with depth under different LET.

能量损失在垂直于重离子径迹方向的分布一定程度上反映出碳化硅的损伤程度. 根据 LET 值的计算公式

$$\text{LET} = \frac{1}{\sigma} \frac{dE}{dx}, \quad (1)$$

其中, σ 代表靶材的密度, 碳化硅的密度约为 $3.21 \times 10^3 \text{ mg/cm}^3$, 能量损失 E 的单位为 MeV, x 是产生能量损失的深度, 单位为 cm. 计算得到的 LET 单位为 MeV·cm²/mg. 材料电离出一对电子空穴对所需的能量与其禁带宽度有关. 一般来说, 材料电离出一对电子空穴对所需的能量约为其禁带宽度的三到五倍. 硅的禁带宽度约为 1.1 eV, 电离出一对电子空穴对需要 3.6 eV 的能量. 在硅中, 1 pC 的电荷沉积对应的能量损伤约为 96.608 MeV·cm²/mg. 根据硅的禁带宽度和电离能之比, 结合 LET 值的计算公式, 可以得到重离子在碳化硅中产生的电荷沉积.

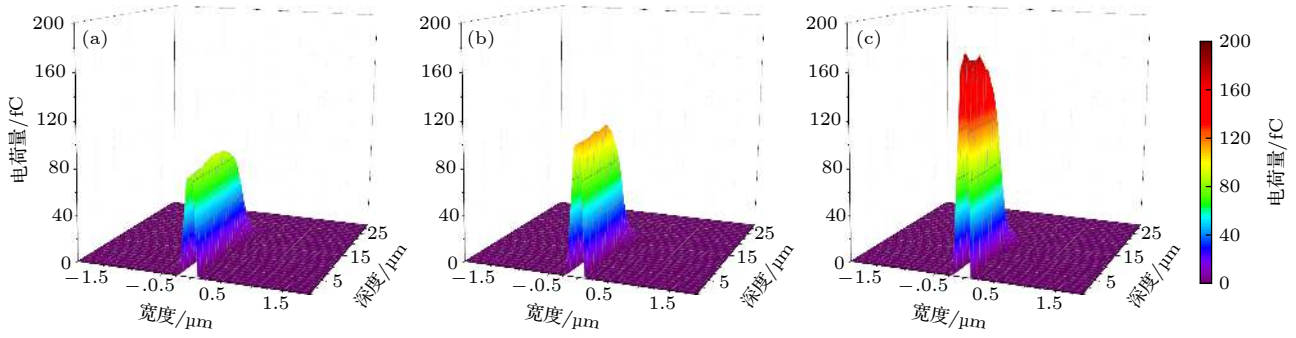


图 10 不同 LET 下电荷沉积在垂直于重离子径迹方向的分布

Fig. 10. Distribution of charge deposition perpendicular to the direction of heavy ion tracks under different LET.

图 10 是电荷沉积在垂直于重离子径迹方向的分布随 LET 的变化. 随 LET 的增加, 重离子径迹中心和垂直于径迹方向的能量损失都逐渐增大. 同一 LET 下, 不同深度处的能量损失在垂直于重离子径迹方向呈高斯线性减小, 能量损失主要集中在到重离子径迹中心距离小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的区域内. 结合图 7 和图 8, 可以发现非电离能量损失在重离子的能量损失中所占的比例很小, 重离子的大部分能量损失对应着电离产生大量的电子空穴对. 潜径迹损伤对材料而言是硬损伤, 而电离能量损失引起的是瞬时高密度电荷聚集.

3 偏置电场对重离子运输过程的影响

3.1 碳化硅器件内部偏置电场分析

当漏极电压为零时, 碳化硅 MOSFET 内部电场也为零, 重离子产生的非电离能损不足以对碳化硅器件产生明显损伤. 当漏极电压达到烧毁阈值电压时, 碳化硅 MOSFET 内部有非零电场存在, 通过试验和器件仿真可以获得非零电场的大小及其在碳化硅 MOSFET 中的分布. 利用铜源对顶部开封后的碳化硅 MOSFET 进行单粒子效应试验, 选用的碳化硅器件额定电压 900 V, 导通电阻 $120 \text{ m}\Omega$. 铜源产生的重离子碎片 LET(Si) 集中在 $41\text{--}43 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 之间. 经探测器测量, 铜源产生的重离子注量率约为 $145 \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. 铜源试验中碳化硅 MOSFET 测试电路如图 11 所示. 图 11 中 V_{DC} 为高压电压, C 是高压电容, R_{protect} 是保护电阻. 数字万用表与碳化硅 MOSFET 串联, 实时监测器件漏端的电流变化. 试验中碳化硅 MOSFET 的栅极电压和源极电压始终为 0 V. 当漏极电压增大至 480 V 时, 碳化硅 MOSFET 发生了单粒子烧

毁. 碳化硅 MOSFET 发生单粒子烧毁的具体表现为瞬时漏电流呈数量级增大以及反向击穿电压小于 1 V, 如图 12(a) 和图 12(b) 所示. 从图 12(a) 可以发现器件烧毁后输出电压几乎全部施加在保护电阻两端, 此时漏电流大小即输出电压与保护电阻的比值. 但保护电阻只能防止电路短路, 无法起到防止器件烧毁的作用. 图 12(b) 是辐照前后器件的击穿电压测量结果, 根据器件手册器件漏电流大于 0.1 mA 即被击穿. 辐照前器件的击穿电压约 1200 V, 辐照后器件的击穿电压已低于 1 V, 基本丧失反向击穿特性.

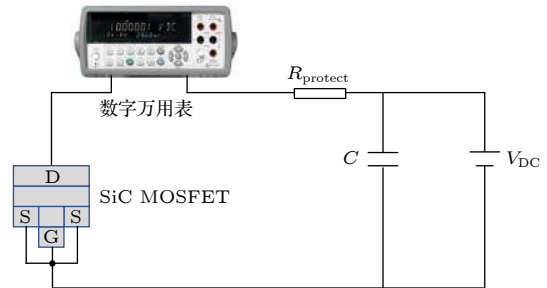


图 11 单粒子效应试验电路图

Fig. 11. Single event effect test circuit diagram.

在器件栅、源、漏三端电压为 0 V 的试验中, 重离子累积注量为 1×10^7 , 试验前后碳化硅 MOSFET 的电学特性没有变化. 当漏极电压增大到 480 V 时, 器件在 70 s 左右便发生烧毁. 利用 TCAD 模拟, 得到了漏极电压为 480 和 1000 V 时碳化硅 MOSFET 的电场分布, 如图 13 所示. 可以看出, 漏极电压的增大, 对器件而言意味着外延层受到的电场增大. 碳化硅器件发生单粒子烧毁, 被认为是瞬时大电流和强电场共同作用下产生过高的功率耗散 [31]. 强电场来自外部施加的漏极电压, 而大电流由粒子运动路径上沉积的电荷在强电场作用下产生.

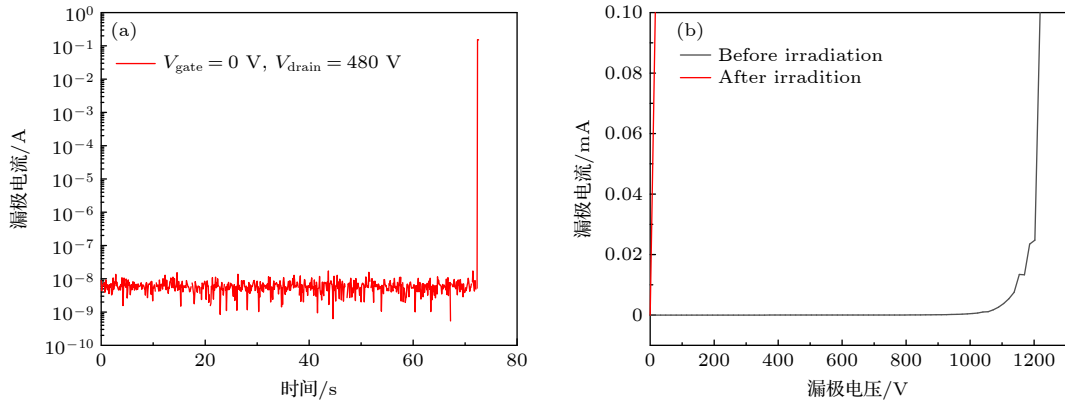


图 12 碳化硅 MOSFET 单粒子烧毁特征 (a) 烧毁时瞬态漏电流剧增; (b) 击穿特性丧失

Fig. 12. SEB characteristics of silicon carbide MOSFET: (a) Transient leakage current increases sharply when burned out; (b) loss of breakdown characteristics.

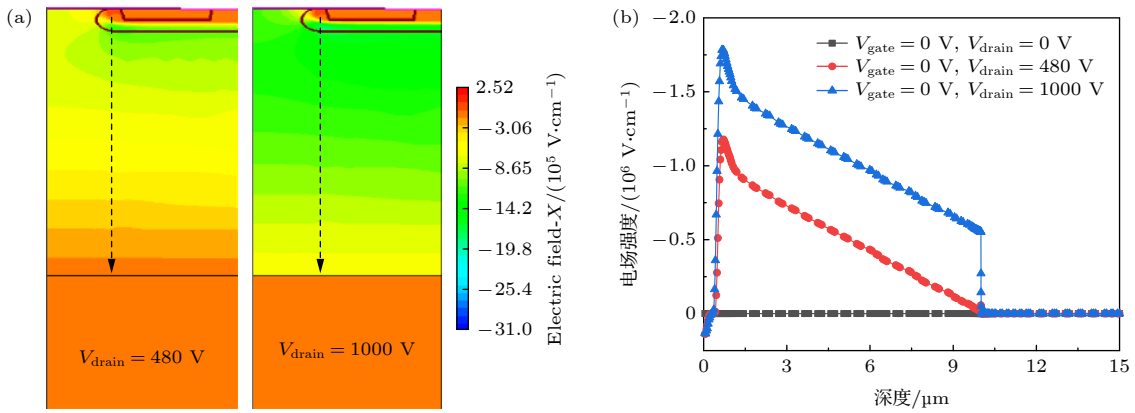


图 13 不同漏极偏压下碳化硅 MOSFET 内部的电场分布 (a) 二维分布; (b) 一维分布

Fig. 13. The electric field distribution inside the silicon carbide MOSFET under different drain bias voltages: (a) Two-dimensional distribution; (b) one-dimensional distribution.

3.2 偏置电场对重离子在碳化硅中能量沉积产生及分布的影响

强电场会影响电荷的运动,但其是否会影响电荷的产生尚不清楚.重离子在碳化硅中的运输伴随着大量次级电子的产生及运动.重离子的初始能量较高,但其能量会随射程的增大显著下降,同时图 6 表明次级电子的初始能量较低.电场对重离子运输过程的影响不容忽视.对碳化硅 MOSFET 进行切片分析,得到器件单胞上方金属层的厚度,如图 14(a) 所示.图 14(b) 是根据器件切片分析结果构建的 Geant4 仿真模型,其中外延层和衬底的厚度分别设置为 10 和 5 μm .同时结合 TCAD 得到的外延层中的电场分布,在外延层中施加一个沿器件深度方向的电场.模拟中施加的电场大小为外延层中电场的平均值,漏极偏置电压为 480 V 时外延层中沿深度方向电场平均值为 $-2.85 \times 10^5 \text{ V/m}$,

漏极偏置电压为 1000 V 时外延层中沿深度方向电场平均值为 $-6.21 \times 10^5 \text{ V/m}$.

图 15 是不同偏置电压下碳化硅 MOSFET 外延层中能量沉积的二维分布.由于受到沿深度方向的负电场作用,电场强度越大重离子的运动越有可能往电场方向偏移,越多的能量沉积在外延层中.而带负电的电子初始运动方向由图 6 可知与深度方向的夹角较小,且电子能量偏低,容易受到电场影响而改变运动方向.当大量电子运动方向趋于一致时更容易引起局部区域能量沉积过高,进一步促进过大的瞬态电流产生.同时强电场更容易让重离子最终停留在外延层中,射程末端大量的非电离能损对应着外延层碳化硅材料严重的潜径迹损伤,这可能对器件的单粒子烧毁敏感性造成影响.

对于碳化硅器件而言,碳化硅材料是其主要组成部分,当器件处于高压偏置时碳化硅材料中会有

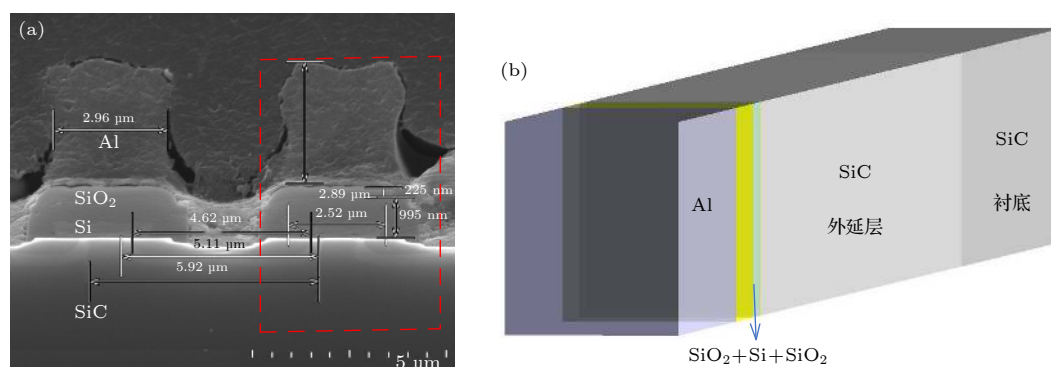


图 14 碳化硅 MOSFET 内部结构示意图 (a) 切片分析结果; (b) Geant4 仿真模型

Fig. 14. Schematic diagram of the internal structure of silicon carbide MOSFET: (a) Slice analysis results; (b) Geant4 simulation model.

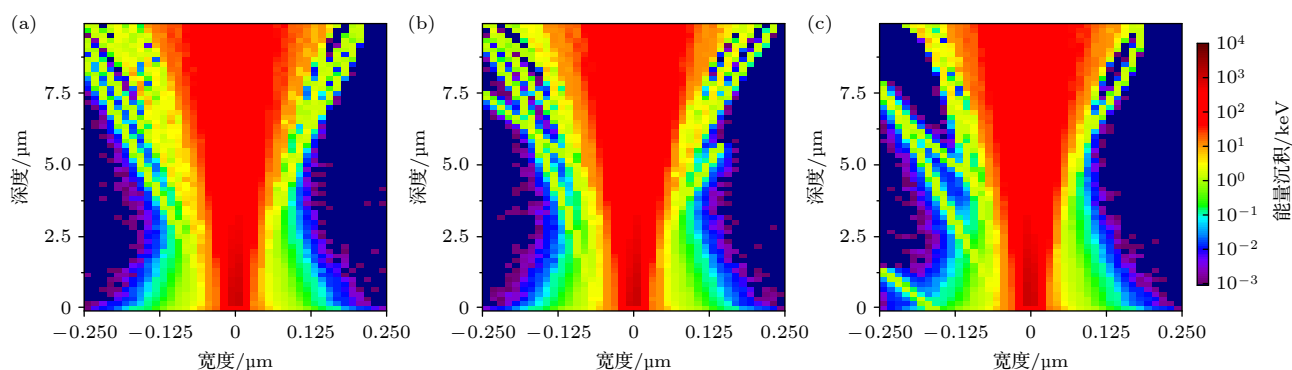
图 15 不同漏极偏置电压下碳化硅 MOSFET 外延层的能量沉积分布 (a) $V_{\text{Drain}} = 0$ V; (b) $V_{\text{Drain}} = 480$ V; (c) $V_{\text{Drain}} = 1000$ V

Fig. 15. Energy deposition distribution of epitaxial layer of silicon carbide MOSFET under different drain bias voltage: (a) $V_{\text{Drain}} = 0$ V; (b) $V_{\text{Drain}} = 480$ V; (c) $V_{\text{Drain}} = 1000$ V.

强电场存在. 重离子诱导产生的大量电子空穴对在强电场作用下形成大电流, 当局部区域由于大电流、大电压同时存在而产生过多热量时, 碳化硅器件会发生烧毁. 器件材料所受到的潜径迹损伤一方面可能在材料中产生电离通道, 另一方面可能影响材料的热传导性能, 从而影响器件的单粒子烧毁敏感性. 综上所述, 碳化硅器件乃至氮化镓器件单粒子烧毁的出现, 是入射粒子诱导产生的非电离能量损失和电离能量损失共同作用的结果, 而器件的偏置电压同时影响着重离子在器件内的电荷沉积和电荷运动.

4 结 论

利用 Geant4 软件开展了 LET 值分别为 34.08, 44.73, 69.72 MeV·cm²/mg 的铜离子、溴离子和碘离子在碳化硅中的运输模拟. 结果表明重离子的 LET 和深度位置对单位深度的能量损失都有

影响, 单位深度的能量损失总体呈指数形式变化. 能量损失随重离子在碳化硅中的运动时间增多而呈指数形式增加. 非电离能损主要分布在重离子射程末端且随重离子 LET 的增大而增多, LET 为 69.72 MeV·cm²/mg 时产生的非电离能损为 4.9 MeV, 约占总能量损失的 1.44%. 在垂直于重离子径迹方向上, 电荷沉积以重离子径迹中心为峰值呈高斯线性减小.

在铜源试验中确定了碳化硅 MOSFET 的烧毁阈值电压约为 480 V, 结合 TCAD 模拟得到漏极偏置电压为 480 和 1000 V 时, 外延层中沿深度方向电场平均值分别为 -2.85×10^5 和 -6.21×10^5 V/m. 利用 Geant4 构建碳化硅 MOSFET 器件模型, 在外延层中引入不同漏极偏置电压对应的电场, 发现电场强度越大重离子越有可能偏向电场方向运动, 在器件外延层中形成更多、更集中的能量沉积. 本文研究结果可用于碳化硅功率器件辐照机理分析及抗辐照加固设计方面.

参考文献

- [1] Elasser A, Chow T P 2002 *Proc. IEEE* **90** 969
- [2] Johnson C M, Wright N G, Uren M J, Hilton K P, Rahimo M, Hinchley D A, Knights A P, Morrison D J, Horsfall A B, Ortolland S, O'Neill A G 2001 *IEE Proc.: Circuits Devices Syst.* **148** 101
- [3] Cooper, Jr J A 1997 *Phys. Status Solidi A* **162** 305
- [4] Zhou Y H, Zhang Y M, Zhang Y M, Meng X Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **11** 3710 (in Chinese) [周拥华, 张义门, 张玉明, 孟祥志 2004 物理学报 **11** 3710]
- [5] Qin X F, Liang Y, Wang F X, Li S, Fu G, Ji Y J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 066101 (in Chinese) [秦希峰, 梁毅, 王凤翔, 李双, 付刚, 季艳菊 2011 物理学报 **60** 066101]
- [6] Zhang X 2013 *Ph. D. Dissertation* (Nashville: Vanderbilt University)
- [7] Bai Y X, Liu J Q, Li X, Cao Y J, Zhang J G, Zhong Y 2011 *Aerospace Standardization* **03** 10 (in Chinese) [白玉新, 刘俊琴, 李雪, 曹英健, 张建国, 仲悦 2011 航天标准化 **03** 10]
- [8] Zhou L, Zhang Y M, Zhang Y M, Han C, Man Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2737 (in Chinese) [张林, 张义门, 张玉明, 韩超, 马永吉 2009 物理学报 **58** 2737]
- [9] Messenger S R, Burke E A, Summers G P, Xapsos M A, Walters R J, Jackson E M, Weaver B D 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1595
- [10] Messenger S R, Burke E A, Xapsos M A, Summers G P, Walters R J, Jun I 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1919
- [11] Mizuta E, Kuboyama S, Abe H, Iwata Y, Tamura T 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 1924
- [12] Witulski A F, Arslanbekov R, Raman A, Schrimpf R D, Sternberg A L, Galloway K F, Javanainen A, Grider D, Lichtenwalner D J, Hull B 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 256
- [13] Javanainen A, Galloway K F, Nicklaw C, Bosser A L, Cavois V F, Lauenstein J M, Pintacuda F, Reed R A, Schrimpf R D, Weller R A, Virtanen A 2016 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 415
- [14] Javanainen A, Turowski M, Galloway K F, Nicklaw C, Cavois V F, Bosser A, Lauenstein J M, Muschitiello M, Pintacuda F, Reed R A, Schrimpf R D, Weller R A, Virtanen A 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 2031
- [15] Yu Q K, Cao S, Zhang H W, Mei B, Sun Y, Wang H, Li X L, Lv H, Li P W, Tang M 2019 *Atom. Energ. Sci. Technol.* **53** 2114 (in Chinese) [于庆奎, 曹爽, 张洪伟, 梅博, 孙毅, 王贺, 李晓亮, 吕贺, 李鹏伟, 唐民 2019 原子能科学技术 **53** 2114]
- [16] Guo D X, He C H, Zang H, Xi J Q, Ma L, Yang T, Zhang P 2013 *Atom. Energ. Sci. Technol.* **47** 1222 (in Chinese) [郭达禧, 贺朝会, 臧航, 席建琦, 马梨, 杨涛, 张鹏 2013 原子能科学技术 **47** 1222]
- [17] Chen S B, Zhang Y M, Chen Y S, Huang L X, Zhang Y M 2001 *High Energ. Phys. Nucl.* **25** 365 (in Chinese) [陈世彬, 张义门, 陈雨生, 黄流兴, 张玉明 2001 高能物理与核物理 **25** 365]
- [18] Shen S S, He C H, Li Y H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 182401 (in Chinese) [申帅帅, 贺朝会, 李永宏 2018 物理学报 **67** 182401]
- [19] Kuboyama S, Kamezawa C, Ikeda N, Hirao T, Ohyama H 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3343
- [20] Kuboyama S, Kamezawa C, Satoh Y, Hirao T, Ohyama H 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2379
- [21] Casey M C, Lauenstein J M, Topper A D, Wilcox E P, Kim H, Phan A M, LaBel K A 2012 *The 3rd Annual NEPP Electronic Technology Workshop*, Greenbelt, Maryland, USA, June 11–13, 2012 p561
- [22] Lauenstein J M, Casey M C, LaBel K A, Topper A D, Wilcox E P, Kim H, Phan A M 2014 *The 5th Annual NEPP Electronic Technology Workshop*, Greenbelt, Maryland, USA, June 17–19, 2014 p561
- [23] Abbate C, Busatto G, Cova P, Delmonte N, Giuliani F, Iannuzzo F, Sanseverino A, Velardi F 2014 *Microelectron. Reliab.* **54** 2200
- [24] Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **268** 1818
- [25] Evseev I G, Schelin H R, Paschuk S A, Milhoretto E, Setti J A P, Yevseyeva O, Assis J T, Hornaza J M, Díaz K S, Lopes R T 2010 *Appl. Radiat. Isot.* **68** 948
- [26] Guide for physics Lists, Collaboration G <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsListGuide/html/index.html/> [2021-4-15]
- [27] Physics reference manual, Collaboration G <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/html/index.html/> [2021-4-15]
- [28] Berger M J, Inokuti M, Andersen H H, Bichsel H, Powers D, Seltzer S M, Thwaites D, Watt D E 1993 *J. Int. Commission Radiat. Units Meas.* **25** 49
- [29] Hou D M, Liu J, Sun Y M, Yao H J, Duan J L, Yin J M, Mo D, Zhang L, Chen Y F 2008 *Atom. Energ. Sci. Technol.* **07** 622 (in Chinese) [侯东明, 刘杰, 孙友梅, 姚会军, 段敬来, 尹经敏, 莫丹, 张苓, 陈艳峰 2008 原子能科学技术 **07** 622]
- [30] Hu P P, Liu J, Zhang S X, Maaz K, Zeng J, Zhai P F, Xu L J, Cao Y R, Duan J L, Li Z Z, Sun M Y, Ma X H 2018 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **430** 59
- [31] Ball D R, Galloway K F, Johnson R A, Alles M L, Sternberg A L, Sierawski B D, Witulski A F, Reed R A, Schrimpf R D, Hutson J M, Javanainen A, Lauenstein J M 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **67** 22

Transport process and energy loss of heavy ions in silicon carbide^{*}

Zhang Hong¹⁾ Guo Hong-Xia^{1)2)†} Pan Xiao-Yu²⁾ Lei Zhi-Feng³⁾
 Zhang Feng-Qi²⁾ Gu Zhao-Qiao¹⁾ Liu Yi-Tian¹⁾
 Ju An-An¹⁾ Ouyang Xiao-Ping²⁾

1) (*School of Material Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

2) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

3) (*State Key Laboratory of Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component, CEPREI, Guangzhou 510610 China*)

(Received 16 March 2021; revised manuscript received 17 April 2021)

Abstract

Using the Monte Carlo method, the energy losses in silicon carbide of heavy ions with different linear energy transfers (LETs) are simulated and calculated. The simulation results show that the energy loss per unit depth of heavy ions in silicon carbide is affected by both the ion energy and the incident depth. Primary heavy ions and secondary electrons mainly cause energy loss, and the non-ionization energy loss only accounts for about 1% of the total energy loss. With the increase of LET, the initial angle and energy distribution of the secondary electrons become more and more concentrated. The peak position of the generated charge deposition is in the center of the heavy-ion track, and the distribution is linearly decreasing in Gaussian form in the direction perpendicular to the incident depth. In the californium source experiment of SiC MOSFET, when the drain voltage is 480 V, the device has a single event burnout, and the breakdown voltage of SiC MOSFET is less than 1 V after burnout has occurred. With the experimental results, we carry out the TCAD simulation of SiC MOSFET and obtain the electric field distribution inside the device under different drain voltages. The electric field parameters are used in the Monte Carlo simulation of SiC MOSFET with considering the metal layer. It is found in the Monte Carlo simulation that the greater the electric field of the epitaxial layer, the longer the path of heavy ions moving on the epitaxial layer is and the more the deposited energy, and that the secondary electrons are more likely to move in the direction of the electric field as the electric field increases, resulting in excessive energy deposition in local areas.

Keywords: Monte Carlo method, silicon carbide, heavy ion, energy loss, electric field

PACS: 24.10.Lx, 61.80.-x, 61.80.Jh, 61.82.Fk

DOI: 10.7498/aps.70.20210503

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11875229).

[†] Corresponding author. E-mail: guohongxia@nint.ac.cn