

质子在碳化硅中不同深度的非电离能量损失

申帅帅 贺朝会 李永宏

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

Shen Shuai-Shuai He Chao-Hui Li Yong-Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 182401 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181095

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181095>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

65 nm 互补金属氧化物半导体场效应和晶体管总剂量效应及损伤机制

Radiation effect and degradation mechanism in 65 nm CMOS transistor

物理学报.2018, 67(14): 146103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172542>

典型模拟电路低剂量率辐照损伤增强效应的研究与评估

Estimation of low-dose-rate degradation on bipolar linear circuits using different accelerated evaluation methods

物理学报.2018, 67(9): 096101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180027>

ST401 塑料闪烁体的脉冲中子相对光产额评估方法

A method of evaluating the relative light yield of ST401 irradiated by pulsed neutron

物理学报.2017, 66(6): 062401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.062401>

利用超相对论量子分子动力学模型研究交变梯度同步加速器能区 Au+Au 碰撞中的核阻止效应

Study of nuclear stopping in Au+Au collisions at alternating gradient synchrotron energies by the ultra-relativistic quantum molecular dynamic model

物理学报.2013, 62(22): 222402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.222402>

乏燃料贮运用铝基碳化硼复合材料的屏蔽性能计算

Shielding property calculation of B₄C/Al composites for spent fuel transportation and storage

物理学报.2013, 62(22): 222401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.222401>

质子在碳化硅中不同深度的非电离能量损失

申帅帅 贺朝会[†] 李永宏

(西安交通大学核科学与技术学院, 西安 710049)

(2018年6月4日收到; 2018年6月14日收到修改稿)

利用蒙特卡罗方法, 应用 Geant4 程序, 模拟计算了 1—500 MeV 质子在碳化硅材料中的非电离能量损失, 并研究了不同种类的初级反冲原子对非电离能量损失的贡献. 模拟结果表明: 在相同质子辐照下, 碳化硅材料中的非电离能量损失要比硅、镓等半导体材料更小, 说明碳化硅器件的稳定性更好, 抗位移损伤能力更强; 当靶材料足够厚时, 在不同能量质子辐照下, 材料损伤最严重的区域会随着质子入射能量的增加从质子射程末端逐渐前移到材料表面; 不同种类的初级反冲原子对非电离能量损失的贡献表明, 在低能质子辐照下, ^{28}Si 和 ^{12}C 是位移损伤的主要原因, 而随着质子能量的增加, 通过核反应等过程产生的次级离子迅速增多, 并对材料浅层造成严重的位移损伤.

关键词: 碳化硅, Geant4, 非电离能损, 位移损伤

PACS: 24.10.Lx, 61.80.-x

DOI: 10.7498/aps.67.20181095

1 引言

随着半导体技术的发展, 半导体器件在航空航天、宇宙探索和核工业等领域的使用越来越广泛, 这使得辐照环境下半导体器件的性能和可靠性研究成为重点领域^[1]. 碳化硅作为第三代半导体材料的代表^[2], 相比于前两代半导体材料硅、镓和砷化镓等, 具有禁带宽度大、热导率高、电子饱和漂移速率高、击穿场强高、抗辐照能力强等优越性质^[3-6], 这使得碳化硅在电子器件的制备方面具有广泛的应用前景, 而抗辐照电子器件和辐射探测器等产品的研发也备受重视. 此外, 碳化硅优良的热稳定性、抗辐照特性、机械性能和化学稳定性, 使其能够在堆内强中子辐照环境下保持性能稳定, 也成为堆内结构的理想材料^[7].

粒子辐照引起材料内的晶格原子位移, 产生位移损伤效应, 会导致半导体器件性能逐渐丧失甚至失效^[8], 而半导体器件在辐照环境中的位移损伤主要依赖于灵敏体积内沉积的位移能量损失值. 大量实验研究表明, 对于大多数电子器件, 当入射粒子

的类型不同时, 位移损伤引起的半导体器件的性能变化和非电离能量损失(non-ionizing energy loss, NIEL)均呈线性关系, 因此, 位移损伤的计算可以转化为NIEL的计算. 通过计算不同能量的特定粒子在器件材料中的NIEL, 可以评价不同粒子辐照下器件的性能变化情况.

通过解析计算和数值模拟等方法, 前两代半导体材料, 如硅、锗和砷化镓等, 在不同能量质子辐照下的NIEL已经被研究较多. Chilingarov等^[9], Lazanu等^[10]和吴宜勇等^[11]使用解析方法和实验方法分别计算了砷化镓和硅在多种离子辐照下的NIEL, 发现探测器性能的下降可以归因于NIEL; 朱金辉等^[12]和唐欣欣等^[13]结合软件模拟和解析方法分别对300 eV—1 GeV能量质子在硅中和低能质子在硅、砷化镓中的NIEL进行了计算; 路伟等^[14]和郭达禧等^[15]使用Geant4软件分别对质子在硅中的NIEL和中子在碳化硅中的位移损伤进行了模拟计算; 陈世彬等^[16]运用分子动力学方法模拟了4H-SiC材料辐照下级联碰撞过程, 发现空位缺陷的数量和空间分布与初级碰撞原子的能量

[†] 通信作者. E-mail: hechaohui@mail.xjtu.edu.cn

呈线性相关. 但作为第三代半导体材料代表的碳化硅, 其相关研究相对较少. 数值模拟研究中多使用薄靶近似的方法来进行NIEL的计算, 而对于足够厚的结构材料内不同深度的损伤情况没有直观表现. 因此, 分析质子在碳化硅材料不同深度的NIEL, 对研究碳化硅在质子辐照下不同区域的损伤差异有着重要意义.

2 计算方法与仿真模型

2.1 NIEL的计算

计算粒子辐照对半导体器件造成的位移损伤, 关键是要得到粒子在器件材料中沉积的位移损伤能量. 当入射粒子进入器件材料后, 会与材料中的原子发生相互作用, 包括核弹性、非弹性碰撞和核反应等, 导致原子离位产生初级撞出原子(primary knock-on atoms, PKA)或产生核反应产物. 由于核反应产物也会继续通过与原子核屏蔽库仑散射, 从而与材料中原子发生相互作用, 并传递足够高的能量使材料中原子产生离位, 发生位移损伤, 因此, 初级反冲原子和核反应产物产生的位移损伤的机理一致, 本文计算中将两者统称为初级反冲原子. 初级反冲原子的反冲能 T 分为两部分, 一部分引起电离或激发, 另一部分引起了材料的位移损伤. 位移损伤能量的部分通过Lindhard分离函数进行计算.

1963年, Lindhard等^[17]引入近似输运动力学方程, 使用Thomas-Fermi势计算弹性过程能量损失, 并由此推导出NIEL的值 S_{NIEL} 为

$$S_{\text{NIEL}} = \frac{N_A}{A} \sum_i \sigma_i(E) T_i, \quad (1)$$

式中, σ_i 为 i 原子反应截面, T_i 为第 i 个反冲平均位移能量损失部分(Lindhard分离函数), N_A 为阿伏伽德罗常数, A 为靶原子质量数.

1974年, Robinson和Torrens^[18]修正了Lindhard函数, 修正后的Lindhard分离函数 Q 可以表示为

$$Q(T) = \frac{1}{1 + k_L g(\varepsilon)}, \quad (2)$$

式中,

$$\varepsilon = \frac{T}{30.724 Z Z_L (Z^{\frac{2}{3}} + Z_L^{\frac{2}{3}})^{\frac{1}{2}} (1 + A/A_L)}, \quad (3)$$

$$k_L = \frac{0.794 Z^{\frac{2}{3}} Z_L^{\frac{1}{2}} (A + A_L)^{\frac{3}{2}}}{(Z^{\frac{2}{3}} + Z_L^{\frac{2}{3}})^{\frac{3}{4}} A^{\frac{3}{4}} A_L^{\frac{1}{2}}}, \quad (4)$$

$$g(\varepsilon) = \varepsilon + 0.40244 \varepsilon^{\frac{3}{4}} + 3.4008 \varepsilon^{\frac{1}{6}}. \quad (5)$$

这里, T 为初级反冲原子能量, $Q(T)$ 为位移损伤所占比例, 乘以 T , 就能得到位移损伤能量; Z 和 A 为初级反冲原子的原子序数和质量数, Z_L 和 A_L 则分别为器件材料原子的原子序数和质量数.

以上公式用于计算粒子在单质中的位移损伤能量, 对于碳化硅这样的化合物, 则需将器件材料中各元素的原子序数 Z_L 和质量数 A_L 进行原子密度加权平均, 得到平均原子序数 Z_{average} 和平均质量数 A_{average} :

$$Z_{\text{average}} = \frac{\sum_i n_i Z_{L,i}}{\sum_i n_i}, \quad (6)$$

$$A_{\text{average}} = \frac{\sum_i n_i A_{L,i}}{\sum_i n_i}, \quad (7)$$

式中, n_i 为元素 i 在化合物中的原子密度.

Akkerman等^[19,20]计算了初级反冲原子能量低于200 eV后的Lindhard分离函数, 将(5)式修正为(8)式:

$$g(\varepsilon) = 0.742\varepsilon + 1.6812\varepsilon^{\frac{3}{4}} + 0.90565\varepsilon^{\frac{1}{6}}. \quad (8)$$

一般而言, 当初级反冲原子能量大于200 eV时, 使用(5)式计算初级反冲原子的损伤能量, 否则用(8)式.

由上文可知, 粒子在器件材料中的NIEL的计算, 实际上为粒子与材料中原子发生核弹性、非弹性碰撞和核反应等相互作用产生的初级反冲原子的 Q 部分能量的均值.

2.2 模型建立

本文选用碳化硅为靶材料, 通过Geant4程序模拟追踪质子在靶材料中的输运过程, 获得质子入射碳化硅材料后的初级反冲原子的能量、空间位置和种类等信息, 再通过修正后的Lindhard分离函数获得产生位移损伤的能量部分, 进而计算得到NIEL值, 并分析NIEL与入射质子能量的关系、NIEL在材料不同深度的变化规律、以及不同种类的初级反冲原子对NIEL的贡献及影响.

靶材料碳化硅密度为3.21 g/cm³, 材料厚度根据不同计算要求进行设置. 质子束垂直入射靶材料

表面, 入射质子的能量范围为1—500 MeV, 在保证计算精度的前提下, 考虑计算效率, 根据不同计算要求将质子注量设置为 10^6 — 10^8 n/cm².

3 结果与分析

3.1 质子在碳化硅中的NIEL

在NIEL的模拟计算中, 为了保证质子在穿越靶材料的过程中能量衰减得尽可能少, 需要将靶材料厚度设置得尽可能薄; 但是为了获得足够的数数据, 降低统计误差, 靶材料厚度又不能太薄. 综合考虑, 采用薄靶近似的方法建立靶材料模型, 将靶材料厚度设置为每种能量质子相对应射程的10%, 具体靶厚如表1所列.

表1 质子在碳化硅中射程及靶材料厚度

Table 1. Range of proton in SiC and thickness of target material.

质子能量/MeV	射程/mm	靶材料厚度/mm
1	1.07×10^{-2}	1.07×10^{-3}
2	3.16×10^{-2}	3.16×10^{-3}
5	1.46×10^{-1}	1.46×10^{-2}
10	4.83×10^{-1}	4.83×10^{-2}
20	1.64	1.64×10^{-1}
50	8.45	8.45×10^{-1}
100	29.00	2.90
200	96.95	9.70
300	191.66	19.17
500	435.17	43.52

质子辐照碳化硅的NIEL随入射质子能量的变化情况如图1所示, 同时比较了Dale等^[21]和Jun等^[22]通过数值计算方法得到的质子在硅和镓材料中的NIEL, Si-G4代表本人使用Geant4软件模拟得到的质子在硅材料中的NIEL.

由图1可以看出, 使用Geant4软件模拟得到的质子在硅中的NIEL与Dale等^[21]和Jun等^[22]计算得到的值相符. 在1—500 MeV能量范围内, 质子在各种器件材料中的NIEL值均随能量的增大而减小, 说明低能质子辐照在器件引起的位移损伤相对较大. 同时, 通过比较质子在不同材料中的NIEL, 可以看出, 质子在碳化硅中的NIEL明显低于硅和镓中的值, 说明同等质子辐照环境下, 碳化硅材料制造的器件所受到的位移损伤要比其他材

料小得多, 即器件性能更加稳定、抗位移损伤能力更强.

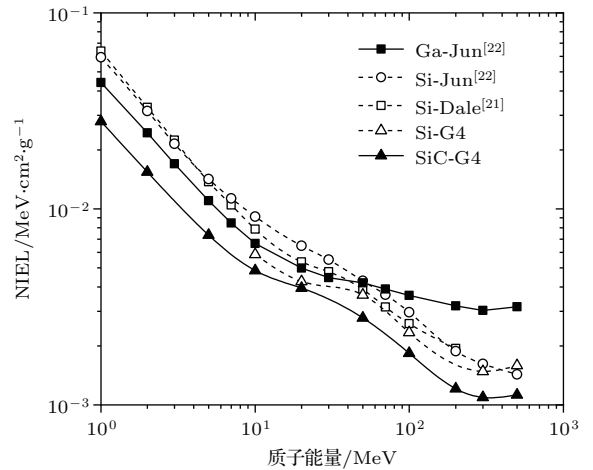


图1 质子在不同材料中的NIEL值

Fig. 1. NIEL of proton in different materials.

3.2 材料不同深度的NIEL

上节采用薄靶近似的方法计算了不同能量的质子在碳化硅材料中的NIEL, 但这种计算方法并没有考虑NIEL在足够厚的结构材料中的变化. 在本节的模拟计算中, 将碳化硅靶材料的厚度设置成大于对应能量质子的射程, 以保证质子能量在半导体材料中完全耗尽, 进而分析NIEL在碳化硅材料不同区域的差异.

质子在碳化硅材料不同深度的NIEL, 有两个区域值得关注, 一个是以薄靶近似计算NIEL的前端区域(10%质子射程), 另一个是质子射程末端沉积大量能量的布拉格峰区域. 图2对比了不同能量

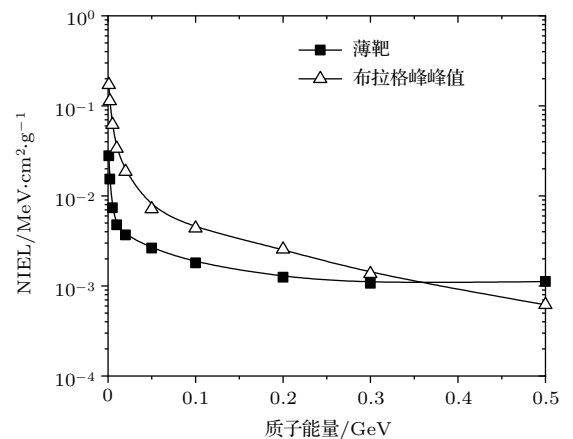


图2 不同深度的NIEL随质子能量的变化

Fig. 2. NIEL vs. proton energy in different depth.

质子入射下, 材料前端区域和布拉格峰区域的 NIEL 的变化规律. 可以看出, 入射质子能量在 1—300 MeV 时, 前端区域的 NIEL 要比布拉格峰区域的值小, 但这种差距随着能量的增大而逐渐缩小, 当质子能量大于 300 MeV 之后, 前端的 NIEL 反而超过了布拉格峰峰值.

碳化硅中辐照损伤最严重的区域会随着入射质子能量的变化而发生改变, 为了分析这种变化的原因, 进一步研究了不同能量质子在碳化硅中的初级反冲原子的种类分布以及不同种类初级反冲原子对总的 NIEL 的贡献.

3.3 不同种类初级反冲原子对 NIEL 的贡献

按照形成原因及数目占比把质子与靶材料相互作用产生的次级粒子分为 ^{28}Si , ^{12}C 和“其他”三类. ^{28}Si 和 ^{12}C 为靶材料碳化硅自身原子被撞击离位产生, “其他”则多由核反应产生. 由表 2 可以看出, ^{28}Si 和 ^{12}C 两种粒子的数目在初级反冲原子中的占比随着入射质子能量的增加而逐渐下降, 由主要产物变为次要产物, “其他”次级产物则逐渐成为主要产物. 入射质子能量在 1—100 MeV 时, ^{12}C 所占比例比 ^{28}Si 高, 但两者占比随着质子能量的增加而逐渐接近, 质子能量大于 100 MeV 后, ^{28}Si 的占比反而超过 ^{12}C .

为了研究不同能量质子辐照下不同种类初

级反冲原子的数目占比变化以及对 NIEL 的贡献, 根据模拟结果, 选取具有代表性的三组质子能量 10, 100 和 500 MeV 进行分析. 模拟结果如图 3—图 5 所示, 其中, 每组图左侧为不同质子能量下初级反冲原子数目占比随入射深度的变化规律图, 右侧为对应的质子能量下不同种类的初级反冲原子对 NIEL 的贡献随入射深度的变化规律图.

10 MeV 能量质子在碳化硅材料中产生的不同种类初级反冲原子的数目占比和不同种类反冲原子对总 NIEL 的贡献, 随入射深度的变化, 根据粒子类型不同而有所差异. 10 MeV 能量质子在碳化

表 2 质子在碳化硅中的初级反冲原子种类分布
Table 2. PKA type distribution of protons in SiC.

能量/MeV	初级反冲原子数目占比/%		
	^{28}Si	^{12}C	其他
1	37.74	58.80	3.45
2	40.86	55.60	3.54
5	43.01	53.24	3.75
10	44.57	51.15	4.28
20	45.21	48.48	6.31
50	41.06	41.52	17.42
100	36.22	36.44	27.34
200	25.11	22.18	52.71
300	13.54	12.82	73.63
500	8.15	6.98	84.86

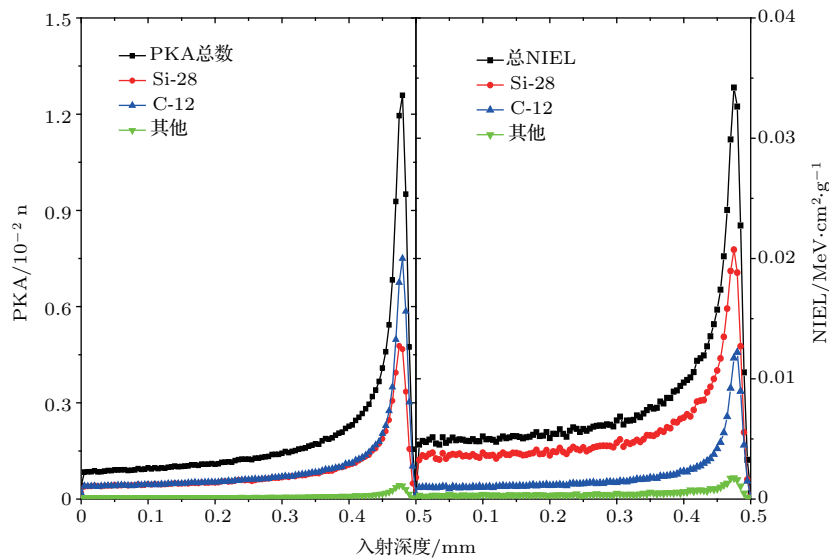


图 3 10 MeV 质子在碳化硅中产生的不同初级反冲原子的数目占比和对 NIEL 的贡献

Fig. 3. PKA type distribution and the contribution to NIEL vs. the incident depth of 10 MeV protons in SiC.

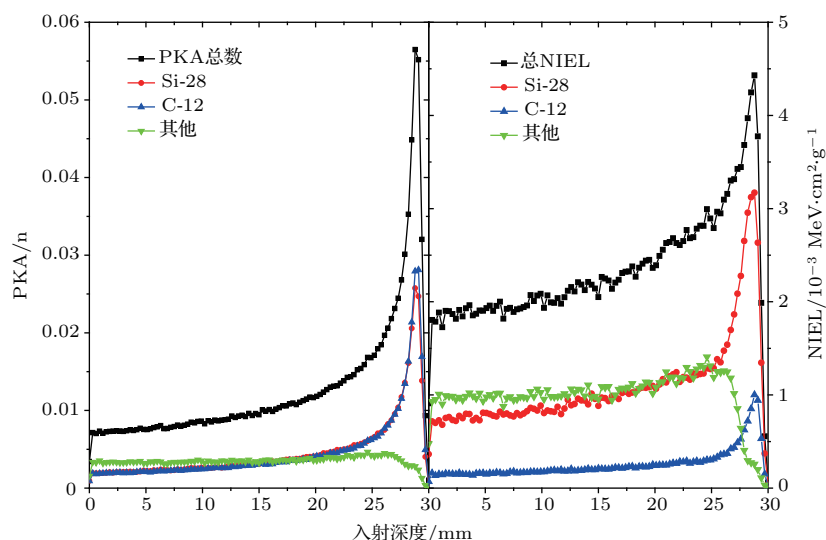


图4 100 MeV 质子在碳化硅中产生的不同初级反冲原子的数目占比和对 NIEL 的贡献

Fig. 4. PKA type distribution and the contribution to NIEL vs. the incident depth of 100 MeV protons in SiC.

硅中产生的初级反冲原子以弹性碰撞离位的靶材料自身原子 ^{28}Si 和 ^{12}C 为主, 而因核反应等其他反应产生的“其他”粒子则少得多. ^{28}Si 和 ^{12}C 的数目占比随入射深度的变化呈现类似布拉格峰式的分布规律, 在材料浅层, 粒子数目占比随入射深度缓慢上升, 而在射程末端急剧上升, 表明在此处有大量初级反冲原子产生. “其他”粒子则由于数目占比较少, 变化规律不明显, 随入射深度的变化不大, 但在射程末端也有相对其他深度较多的粒子产生.

10 MeV 质子产生的不同种类的初级反冲原子对总 NIEL 的贡献与初级反冲原子的类型息息相关. ^{28}Si 和 ^{12}C 导致的 NIEL 呈明显的布拉格峰分布规律, 且对 NIEL 的贡献占主要部分, 虽然 ^{28}Si 的数目占比小于 ^{12}C , 但 ^{28}Si 对 NIEL 的贡献却超过 ^{12}C , 即单个 ^{28}Si 初级反冲原子造成的 NIEL 要大于 ^{12}C . “其他”种类的初级反冲原子由于数目占比较少, 对 NIEL 的贡献也相对较少, 随入射深度的变化不明显.

由图 4 可以看出, 当质子能量达到 100 MeV 时, 不同种类初级反冲原子的数目占比随入射深度的变化产生了较大变化. ^{28}Si 和 ^{12}C 的数目占比已经基本相等, 且随入射深度的变化规律不变, 即类似布拉格峰的分布规律. “其他”种类的初级反冲原子数目占比大幅提升, 在材料浅层甚至超过了 ^{28}Si 和 ^{12}C , 但“其他”种类的初级反冲原子的数目占比随入射深度的变化依然不明显, 只是在射程末端出现

了下降. 相对应的不同种类反冲原子对总 NIEL 的贡献有了较大改变, “其他”种类的初级反冲原子对总 NIEL 的贡献在材料浅层已经超过 ^{28}Si 和 ^{12}C 的贡献, 但其对总 NIEL 的贡献随入射深度的变化仍不明显, 在射程末端同样出现了下降. “其他”种类的初级反冲原子数目占比的大幅提高, 相对布拉格峰抬升了材料浅层的总的初级反冲原子数目占比和总的 NIEL.

由图 5 可以看出, 当入射质子能量达到 500 MeV 时, “其他”种类的初级反冲原子已经成为质子在碳化硅中产生的初级反冲原子的主要部分. “其他”种类的初级反冲原子的数目随入射深度迅速下降, 这是由于其主要由核反应产生, 当质子能量达到 500 MeV 时, 高能质子在碳化硅材料中发生大量核反应, 并产生次级产物, 导致其数目迅速增多. 质子在碳化硅材料中的能量随入射深度增大而逐渐降低, 导致核反应减少, 进而引起核反应产物的迅速减少. “其他”种类的初级反冲原子的数目随入射深度的变化规律也反映到对总 NIEL 的贡献上, 其造成的 NIEL 也是随入射深度增加而迅速下降. ^{28}Si 和 ^{12}C 的数目占比和对总 NIEL 的贡献随入射深度的变化仍然保持不变, 即在浅层随入射深度缓慢上升而在射程末端出现布拉格峰, 只是无论粒子数目占比还是对总 NIEL 的贡献已经远低于“其他”种类的初级反冲原子.

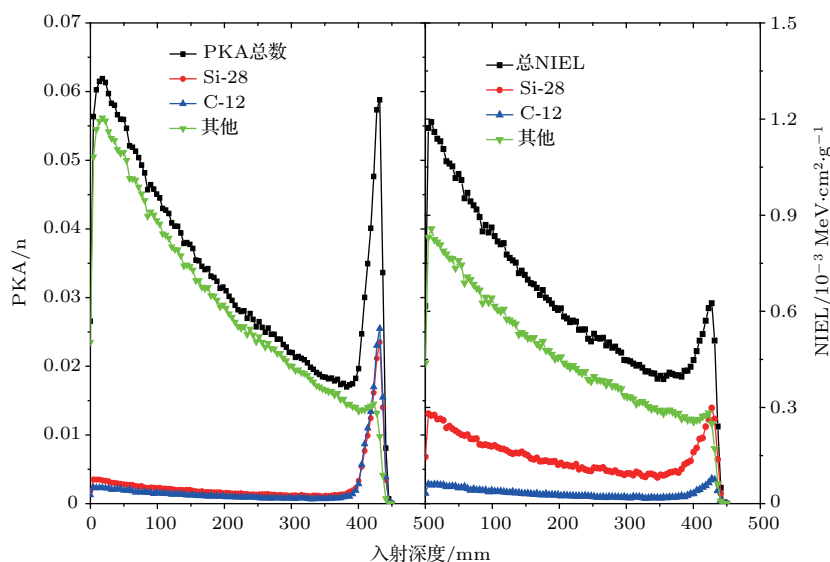


图5 500 MeV 质子在碳化硅中产生的不同初级反冲原子的数目占比和对 NIEL 的贡献

Fig. 5. PKA type distribution and the contribution to NIEL vs. the incident depth of 500 MeV protons in SiC.

综上所述, 入射质子能量较低时, 质子在碳化硅中的位移损伤主要由 ^{28}Si 和 ^{12}C 造成, 且由 ^{28}Si 造成的损伤明显高于 ^{12}C ; 而质子能量增高后, 虽然 NIEL 的布拉格峰仍然由 ^{28}Si 和 ^{12}C 造成, 但相对于布拉格峰, 迅速抬高的前端平坦区则是由于核反应等产生的“其他”次级离子所造成. 二者结合, 导致随着质子能量的增大, 材料损伤最严重的区域从质子射程末端前移到材料表面.

4 结 论

本文通过 Geant4 软件, 采用薄靶近似的方法模拟计算了碳化硅材料中 NIEL 与质子能量的关系, 探究了在靶材料足够厚的情况下, NIEL 随材料深度的变化情况, 并根据不同种类的初级反冲原子数目占比分析了这种变化形成的原因.

质子在碳化硅材料中的 NIEL 模拟计算结果表明, 在相同辐照环境下, 碳化硅材料中的位移损伤相比硅、镓等材料更小, 证明碳化硅器件具有更好的稳定性以及更高的抗位移损伤能力.

通过分析碳化硅材料不同深度的 NIEL 值, 得到了不同能量质子辐照下, 材料损伤最严重的区域, 模拟结果表明, 材料中损伤最严重的区域与入射质子能量相关, 低能质子辐照下, 位移损伤最严重的区域出现在质子射程末端, 但随着质子能量的增加, 这一区域会逐渐前移直到材料表面.

初级反冲原子的数目占比和对 NIEL 的贡献随

入射深度的变化规律, 揭示了损伤区域随质子能量变化的原因. 模拟结果表明: 入射能量较低时, 质子辐照碳化硅中产生的 ^{28}Si 和 ^{12}C 是位移损伤的主要影响因素; 随着质子能量的增加, ^{28}Si 和 ^{12}C 仍是射程末端布拉格峰形成的主要成因, 但通过核反应等过程产生的次级离子数目占比增加, 其造成的位移损伤占总损伤的比例在材料浅层区域增大, 导致材料表面成为位移损伤最严重的区域.

参考文献

- [1] Liu X F, Chen Y 2015 *Adv. Mater. Ind.* **10** 12 (in Chinese) [刘兴昉, 陈宇 2015 新材料产业 **10** 12]
- [2] Hao J Q, Gao W, Zhao L B, Cao J S, Lü X, Ruan J 2016 *Adv. Mater. Ind.* **11** 6 (in Chinese) [郝建群, 高伟, 赵璐冰, 曹峻松, 吕欣, 阮军 2016 新材料产业 **11** 6]
- [3] Zhang H H, Zhang C H, Li B S, Zhou L H, Yang Y T, Fu Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3302 (in Chinese) [张洪华, 张崇宏, 李炳生, 周丽宏, 杨义涛, 付云翀 2009 物理学报 **58** 3302]
- [4] Kimoto T 2015 *Jpn J. Appl. Phys.* **54** 040103
- [5] Lebedev A A, Chelnokov V E 1999 *Semiconductor* **33** 999
- [6] Zhang Y J, Yin Z P, Su Y, Wang D J 2018 *Chin. Phys. B* **27** 047103
- [7] Li M, Zhou X, Yang H, Du S, Huang Q 2018 *Scr. Mater.* **143** 149
- [8] Tang D, He C X, Zang H, Li Y H, Xiong C, Zhang J X, Zhang P, Tan P K 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 084209 (in Chinese) [唐杜, 贺朝会, 臧航, 李永宏, 熊岑, 张晋新, 张鹏, 谭鹏康 2016 物理学报 **65** 084209]

- [9] Chilingarov A, Meyer J S, Sloan T 1997 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **395** 35
- [10] Lazanu S, Lazanu I, Biggeri U, Borchi E, Bruzzi M 1997 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **394** 232
- [11] Wu Y Y, Yue L, Hu J M, Lan M J, Xiao J D, Yang D Z, He S Y, Zhang Z W, Wang X C, Qian Y, Chen M B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 098110 (in Chinese) [吴宜勇, 岳龙, 胡建民, 蓝慕杰, 肖景东, 杨德庄, 何世禹, 张忠卫, 王训春, 钱勇, 陈鸣波 2011 物理学报 **60** 098110]
- [12] Zu J H, Wei Y, Xie H G, Niu S L, Huang L X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 066102 (in Chinese) [朱金辉, 韦源, 谢红刚, 牛胜利, 黄流兴 2014 物理学报 **63** 066102]
- [13] Tang X X, Luo W Y, Wang C Z, He X F, Zha Y Z, Fan S, Huang X L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1266 (in Chinese) [唐欣欣, 罗文芸, 王朝壮, 贺新福, 查元梓, 樊胜, 黄小龙 2008 物理学报 **57** 1266]
- [14] Lu W, Wang T Q, Wang X G, Liu X L 2011 *Nucl. Technol.* **34** 529 (in Chinese) [路伟, 王同权, 王兴功, 刘雪林 2011 核技术 **34** 529]
- [15] 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]
- [16] 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]
- [17] Lindhard J, Nielsen V, Scharff M, Thomsen P V 1963 *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.* **33** 706
- [18] Robinson M T, Torrens I M 1974 *Phys. Rev. B* **9** 5008
- [19] Akkerman A, Barak J 2007 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **260** 529
- [20] Akkerman A, Barak J, Chadwick M B, Levinson J, Murat M, Lifshitz Y 2011 *Radiat. Phys. Chem.* **62** 301
- [21] Dale C J, Chen L, McNulty P J, Marshall P W, Burke E A 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 1974
- [22] Jun I, Xapsos M A, Messenger S R, Burke E A, Walters R J, Summers G P, Jordan T 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1924

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

Shen Shuai-Shuai He Chao-Hui[†] Li Yong-Hong

(School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 4 June 2018; revised manuscript received 14 June 2018)

Abstract

Silicon carbide (SiC), as a representative of the third-generation semiconductor materials, is widely used in some fields which may suffer strong radiation such as in the cases of military affairs, aerospace and reactor. SiC possesses the superior radiation-resistance characteristic. However, SiC under the proton irradiation generate a lot of defects, resulting in degradation of device performance and even complete loss of its function. Therefore, the study on the irradiation damage to SiC under proton irradiation possesses important significance. A large number of studies have shown that for most of electronic devices and different types of incident particles, the degradation of device performance caused by displacement damage is linearly dependent on non-ionizing energy loss (NIEL), so the displacement damage can be evaluated by NIEL. In this work, the Monte Carlo software Geant4 is used to simulate the relationship between NIEL and proton energy, and the variation of NIEL with the depth of the material and the contribution of different types of primary recoil atoms to the total NIEL are also studied. The NIEL simulation results show that the NIEL in SiC material is less than that in Si and Ga semiconductor material under the same proton irradiation, proving that the stability and the radiation-resistance of SiC are stronger. The simulation results of NIEL at different depths show that the most serious damage regions of the material under different energy protons are diverse. Under the irradiation of low energy proton, the most serious region of the displacement damage occurs at the end of the proton range. With the increase of proton energy, the worst damage region of material will gradually move from the end of the proton range to the surface of SiC material. According to the contribution of different types of primary recoil atoms to the total NIEL, when the energy of the incident proton is low, the displacement damage of the proton in the SiC is mainly caused by ^{28}Si and ^{12}C , and the damage caused by ^{28}Si is obviously higher than that by ^{12}C . As the energy of proton increases, the ^{28}Si and ^{12}C are still the main causes of Bragg peak of the NIEL at the end of the proton range, but the number of ions generated by nuclear reactions increases accordingly, and the displacement damage caused by these ions increases in the shallow area of SiC, leading the surface of the material to be the worst damaged region. The combination of the two factors caused the most serious damage region moves from the end of the proton range to the surface of the material with the increase of proton energy. The results of this study are useful for the application of SiC devices to irradiation environment.

Keywords: SiC, Geant4, non-ionizing energy loss, displacement damage

PACS: 24.10.Lx, 61.80.-x

DOI: [10.7498/aps.67.20181095](https://doi.org/10.7498/aps.67.20181095)

[†] Corresponding author. E-mail: hechaohui@mail.xjtu.edu.cn