

质子在氮化镓中产生位移损伤的 Geant4 模拟

何博文, 贺朝会, 申帅帅, 陈袁妙梁

(西安交通大学 核科学与技术学院, 陕西 西安 710049)

摘要:材料受到辐照时产生的位移损伤会导致其微观结构发生变化,从而使其某些使用性能退化,影响其使用效率,减短其使用寿命。利用 Geant4 模拟了质子在氮化镓中的运输过程,计算了 1、10、100、500 MeV 能量质子入射氮化镓材料产生的初级撞出原子的种类、能量信息及离位原子数。获得了 10 MeV 质子产生的位移缺陷分布;计算了 4 种能量质子入射氮化镓材料产生的非电离能量损失 (NIEL);研究了质子产生位移损伤过程的影响要素。研究发现,入射质子能量对其在材料中产生的初级撞出原子的种类、能量、离位原子数等信息有着非常大的影响;单位厚度所沉积 NIEL 随着入射质子能量的增大而减小;10 MeV 质子入射氮化镓所产生的离位原子数随入射深度的增加而增加,但在超出其射程范围以外有一巨大回落;能量并不是影响质子与氮化镓靶材料相互作用的唯一因素。

关键词:质子;氮化镓;位移损伤;Geant4

中图分类号:TL341

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2017)03-0543-06

doi:10.7538/yzk.2017.51.03.0543

Geant4 Simulation of Proton Displacement Damage in GaN

HE Bo-wen, HE Chao-hui, SHEN Shuai-shuai, CHENYUAN Miao-liang

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

Abstract: The efficiency of employment will be influenced and the life span of use will be reduced when the material is irradiated and the displacement damage which will change its microstructure and degenerate its character of service is produced within the material. The transport of proton in GaN was simulated with Geant4. The information of the type and the energy of the primary knock-on atoms (PKA) created in GaN and the number of displacement damage were calculated with protons for energy of 1, 10, 100 and 500 MeV. The distribution of displacement damage of 10 MeV proton was calculated. The non-ionization energy loss (NIEL) was studied and calculated for these four kinds of energy protons irradiating GaN and the factors impacting the production of displacement damage were deliberated. The information of the type and the energy of the PKA created in GaN and the number of displacement damage are influenced heavily by the energy of the irradiating proton. The NIEL deposited per thickness of the material decreases along with the increase of the energy of the irradiating proton. The number of the dislocation atoms increases along with the penetration depth within the projected

range but will fall tremendously and further reduce when it is beyond the projected range with 10 MeV proton irradiating GaN. The energy of the proton is not the only factor which can influence the interaction between the proton and the GaN.

Key words: proton; GaN; displacement damage; Geant4

氮化镓(GaN)作为一种具有较大禁带宽度的半导体,在现代工业科技中被广泛应用于新型电子器件、光电器件的研究与开发。其独特的耐热与耐辐射特性,使它在军事和太空领域应用尤其广泛^[1]。空间中的许多宇宙射线(如质子流等)会与在宇宙环境中运行的卫星电子系统通过核散射与核反应在其组成材料(如氮化镓)内部产生具有较高能量的反冲原子或反冲次级产物,这些反冲原子或反冲产物会在材料内部沉积大量能量^[2-3]。这些能量通常分为两部分,一部分为非电离能量损失(NIEL),即可使材料内部原子产生离位效应,在氮化镓中引入位移缺陷,使材料性能退化;另一部分为电离能量损失,引起材料内部原子进一步电离或激发^[4-6]。位移损伤的计算归结为NIEL与粒子通量的计算,所以器件NIEL的相关性研究已成为位移损伤效应分析的趋势^[6]。质子辐照实验是研究材料质子辐照效应最直接有效的方法。目前国内外已在裂变实验堆及粒子加速器上进行了大量材料的中子、质子辐照实验,也积累了大量的实验数据用以研究粒子辐照对材料的微结构、体积肿胀、力学性能、导热率等的影响。这些实验主要是以不同辐照温度作为入口讨论位移损伤的积累对材料晶体结构的改变^[2]。但将这些数据应用于实际的半导体设计与应用过程很明显是不够的。因为仅辐照实验并不能将粒子与物质相互作用中的每一个细节模拟出来,也不能用于分析产生这些缺陷的原理。其较长的实验周期与高昂的实验成本都对研究产生了较大的阻力。而且对于众多的辐照实验,其产生的数据是否真实、可靠均需要一个标准来进行判定。于是本文采用程序模拟的方式,从另一个角度为实验提供参照的依据与标准。本工作的模拟结果可用于与实验结果相对比,进而分析实验过程中存在的不足之处。

Geant4能模拟多种能量、多种粒子在具有复杂几何结构、材料构成的器件中的输运过程,同时,用户可对入射粒子及其产生的所有次级

粒子进行跟踪,并对反应的各个阶段进行控制与输出。另外,Geant4支持通过增加自定义模块与函数而增加额外的功能,即支持位移损伤效应的计算^[6-8]。本工作利用Geant4对质子入射氮化镓产生的反应产物进行跟踪,模拟计算不同能量的质子在氮化镓中产生的非电离能量损失与位移损伤及其空间分布。

1 程序设计

1.1 物理模型

质子与物质的相互作用过程主要有弹性散射及一系列非弹性散射过程(非弹性散射、质子俘获效应、核裂变反应)。弹性散射过程即参与反应的元素在反应前后均不发生质的变化,材料的原子被撞出原来的晶格位置,成为初级撞出原子(PKA);而不同的是,去弹过程会产生具有较高能量的反应产物,参与反应的元素会发生质的变化^[9-10]。由于PKA与去弹过程反应产物产生位移损伤的机理一致,本文不再区分二者,统称为PKA,即反冲原子或初级撞出原子^[11]。由上述可知,为准确描述质子在材料中产生位移损伤的过程,必须正确描述质子输运及其产生的PKA的慢化过程。

本文采用质子弹性散射、非弹性散射、俘获、裂变物理模型模拟质子与物质的相互作用,分别利用G4LElastic、G4CascadeInterface、G4hIonisation模型模拟质子与氮化镓反应过程中产生的质子的核弹性散射、核非弹性散射及电离过程,对于除质子以外的反冲原子,利用G4ionIonisation、G4BinaryLightIonReaction模型分别描述其电离与核相互作用过程。

1.2 几何结构

本文模拟1、10、100、500 MeV质子在氮化镓中产生的位移损伤及10 MeV质子在氮化镓中产生位移缺陷的分布。由于入射质子的能量分布区间较大,相对于不同能量的入射质子,若氮化镓靶材料的厚度 h 仅为质子射程的 $1/10\sim 1/100$,长与宽为几何厚度的10倍,反冲

原子产生率较低,故薄靶要足够厚,以使质子发生核作用的概率能抵消随机性误差,生成足够的反冲原子^[6]。通过 SRIM 软件模拟 4 种能量的质子在氮化镓材料中的预期射程,来分别定义每种能量质子入射时的靶材料厚度。SRIM 模拟的不同能量质子入射氮化镓的射程与本工作所选择的射程列于表 1。

表 1 SRIM 模拟的不同能量质子入射氮化镓射程与本工作选择射程

Table 1 Projected range of proton with different energy irradiating GaN simulated by SRIM

能量/MeV	SRIM 模拟射程	程序定义射程
1	8.77 μm	10 μm
10	332.82 μm	400 μm
100	18.61 mm	20 mm
500	273.03 mm	300 mm

2 PKA 信息总结

模拟计算的 1、10、100、500 MeV 质子入射氮化镓材料产生的反冲原子信息列于表 2。

从 1 MeV 质子入射靶材料产生的 PKA 元

素种类可看出,质子入射后发生反应的类型基本为弹性散射过程,即反应前后元素种类不发生变化,只发生能量传递,使得 PKA 的种类只有氮和镓两种元素。氮元素在产生的 PKA 中的比例远大于镓元素,且其能量范围也远大于镓元素,这是因为氮原子较轻,易获得足够的能量离开自己原有的晶格位置。

从 10 MeV 质子入射氮化镓所产生的 PKA 元素种类情况来看,PKA 种类较 1 MeV 质子入射时明显更多,增加了氢元素和锗元素,且产生的 PKA 能量也更大,范围也更广。可推测,当 10 MeV 质子入射时,质子与靶材料原子发生了除弹性散射以外的其他非弹性过程,包括俘获或核反应过程。所以,此时反应产生的 PKA 种类也不再只是氮元素或镓元素,而产生了其他元素种类。

100 MeV 质子入射氮化镓产生的 PKA 元素种类更多,如氦元素、碳元素等。表 2 中的其他元素包含铜、氧、镍、锂、铁、硼、铍等,其含量非常低,占比均低于 1%。可见,当质子能量达到 100 MeV 时,虽然反应产生的 PKA 中氮元素与

表 2 不同能量质子入射氮化镓模拟所考虑的 PKA 信息

Table 2 Information of PKA with different energy protons irradiating GaN

质子能量/ MeV	元素	反冲核种类	能量范围	元素 占比/%
1	N	^{14}N	1 400 eV~0.11 MeV	78.3
	Ga	^{69}Ga , ^{71}Ga	6 911~51 105 eV	21.7
10	N	^{14}N , ^{15}N	1 400 eV~1.58 MeV	61.47
	Ga	^{69}Ga , ^{71}Ga	6 891 eV~0.35 MeV	37.84
	H	^1H	1.84~7.74 MeV	0.13
	Ge	^{69}Ge , ^{71}Ge	14 125 eV~0.3 MeV	0.56
100	N	^{12}N , ^{13}N , ^{14}N , ^{15}N	1 399 eV~13.4 MeV	41.9
	Ga	^{63}Ga , ^{64}Ga , ^{65}Ga , ^{66}Ga , ^{67}Ga , ^{68}Ga , ^{68}Ga , ^{70}Ga , ^{71}Ga	642.8 eV~4.4 MeV	26.8
	H	^1H , ^2H , ^3H	17 539 eV~95.5 MeV	19.6
	Ge	^{65}Ge , ^{66}Ge , ^{67}Ge , ^{68}Ge , ^{69}Ge , ^{70}Ge , ^{71}Ge	7 460.8 eV~3.9 MeV	2.5
	He	^3He , ^4He	79 446 eV~33.9 MeV	1.8
	C	^{10}C , ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C	8 008 eV~18.1 MeV	2.3
	Zn	^{61}Zn , ^{62}Zn , ^{63}Zn , ^{64}Zn , ^{65}Zn , ^{66}Zn , ^{67}Zn , ^{68}Zn , ^{69}Zn , ^{70}Zn	2 371.6 eV~5.4 MeV	3.6
其他	Cu, B, O, Ni, Fe, Be, Li	3 123 eV~16.1 MeV	1.3	
500	N	^{10}N , ^{11}N , ^{12}N , ^{13}N , ^{14}N , ^{15}N	1 345 eV~54.2 MeV	5.88
	Ga	^{63}Ga , ^{64}Ga , ^{65}Ga , ^{66}Ga , ^{67}Ga , ^{68}Ga , ^{69}Ga , ^{70}Ga , ^{71}Ga	448.8 eV~26.2 MeV	7.56
	H	^1H , ^2H , ^3H	87 385 eV~495 MeV	61.82
	He	^3He , ^4He , ^5He , ^6He	22 706 eV~75.2 MeV	4.41
	Ni	^{55}Ni , ^{56}Ni , ^{57}Ni , ^{58}Ni , ^{59}Ni , ^{60}Ni , ^{61}Ni , ^{62}Ni , ^{63}Ni , ^{64}Ni , ^{65}Ni , ^{66}Ni , ^{67}Ni , ^{68}Ni	10 382 eV~23.4 MeV	3.6
	Zn	^{60}Zn , ^{61}Zn , ^{62}Zn , ^{63}Zn , ^{64}Zn , ^{65}Zn , ^{66}Zn , ^{67}Zn , ^{68}Zn , ^{69}Zn , ^{70}Zn	328.6 eV~33.8 MeV	6.8
	Cu	^{60}Cu , ^{61}Cu , ^{62}Cu , ^{63}Cu , ^{64}Cu , ^{65}Cu , ^{66}Cu , ^{67}Cu , ^{68}Cu , ^{69}Cu	692.4 eV~29.9 MeV	2.5
	C	^9C , ^{10}C , ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C	601~ 7.4×10^{10} eV	2.79
其他	π^+ , Co, O, B, Ti, Ca, Sc, V 等	2 816 eV~305 MeV	4.64	

镓元素依然占据主导地位,但可发现相对于能量较低质子入射时,其相对含量有了明显的降低,可推测当入射质子的能量越来越高时,非弹性散射过程发生的概率逐渐增加,非弹性散射过程会逐步取代弹性散射过程。

500 MeV 质子入射氮化镓产生的 PKA 中又产生了一些新元素,如 O、B、Ca、Sc、V 等元素。可推测,能量达到 500 MeV 的质子与氮化镓内部原子发生了许多非常复杂的反应,弹性散射部分不再是反应的主体,所以反应产物种类也非常复杂。可见,当质子能量达 500 MeV 时,PKA 中的氮元素与镓元素在总 PKA 中的占比相对于能量小的质子入射时产生的 PKA 中氮元素与镓元素所占的比例小很多,仅有 13% 左右,证明入射质子能量非常高时,质子与靶材料原子发生非弹性散射及核反应的概率会大幅提高,弹性散射过程被取代。

3 位移损伤与 NIEL 计算

3.1 位移损伤计算

程序模拟计算出 PKA 的信息后,可通过 Norgett-Robinson-Torrens(NRT)模型^[11]模拟计算其产生的离位原子数 N_d :

$$N_d = 0.8 \frac{E_{\text{dam}}(T)}{2E_d} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{dam}}(T)$ 为能量为 T 的反冲原子在材料中贡献于非电离能量损失的部分,即非电离能量损失; E_d 为材料的离位阈值,对氮化镓进行 NRT 计算时,以 26.5 eV 作为其平均离位阈值。

利用 Robinson 修正的 Lindhard 分离函数^[12-17]可近似表达为:

$$E_{\text{dam}}(T) = \frac{T}{1 + k_d g(\epsilon_d)} \quad (2)$$

$$k_d = \frac{0.793 Z_1^{2/3} Z_2^{1/2} (A_1 + A_2)^{3/2}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/4} A_1^{3/2} A_2^{1/2}} \quad (3)$$

$$\epsilon_d = \frac{T}{30.724 Z_1 Z_2 \sqrt{Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}} (1 + A_1/A_2)} \quad (4)$$

$$g(\epsilon_d) = \epsilon_d + 0.402 44 \epsilon_d^{3/4} + 3.400 8 \epsilon_d^{1/6} \quad (5)$$

式中, Z_1 、 Z_2 及 A_1 、 A_2 分别为 PKA 与靶原子的原子序数及质量数。式(2)~(5)中所涉及的原子序数与质量数针对计算 PKA 在单质中所产生的损伤能。对于氮化镓化合物,可将化合

物中各元素的质量数 $A_{2,i}$ 、电荷数 $Z_{2,i}$ 进行原子密度加权平均得到平均质量数 $A_{2,\text{average}}$ 与平均电荷数 $Z_{2,\text{average}}$ ^[11],于是有:

$$A_{2,\text{average}} = \frac{\sum_i n_i A_{2,i}}{\sum_i n_i} \quad (6)$$

$$Z_{2,\text{average}} = \frac{\sum_i n_i Z_{2,i}}{\sum_i n_i} \quad (7)$$

式中, n_i 为元素 i 在化合物中的原子密度。将计算得到的 $A_{2,\text{average}}$ 、 $Z_{2,\text{average}}$ 代替式(3)、(4)中的 A_2 、 Z_2 便可得到 PKA 在化合物中产生的非电离能量损失。

3.2 NIEL 计算

非电离能量损失不同于电离或激发能,它主要贡献于材料的位移损伤。由于本工作针对不同能量质子入射氮化镓材料所采取的靶厚不尽相同,所以采取 $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ 作为 NIEL 的单位来分析不同能量质子入射靶材料产生的 NIEL 值的变化情况^[6]。

$$\text{NIEL} = \frac{N_A}{A} \sum_i \sigma_i(E) E_{\text{dam}}(T) \quad (8)$$

式中: σ_i 为反冲原子 i 的反应截面; N_A 为阿伏加德罗常数; A 为靶原子质量数。进一步推导得:

$$\text{NIEL} = E_{\text{dam}}(T)/\rho h \quad (9)$$

即将 $E_{\text{dam}}(T)$ 除以每次模拟的靶材料的密度与厚度的乘积,来分析不同能量质子入射所产生的 NIEL 值的能力的大小^[6]。这里取氮化镓材料的密度 $\rho = 6.1 \text{ g/cm}^3$ 。模拟所产生的离位原子数与 NIEL 值的计算结果列于表 3,随能量的变化趋势如图 1 所示。

由表 3 可知,入射质子产生的平均离位原子数随质子能量的增大而增加,这是因为 $E_{\text{dam}}(T)$ 随入射质子能量呈现单调增加的趋势。而 NIEL 值并未随质子能量而增加,相反,NIEL 值随入射质子能量的增加而逐渐减小。出现此现象的原因主要是:1) 针对每种能量的入射质子所设计的靶材料厚度不尽相同,从表 3 可见, $E_{\text{dam}}(T)$ 的增长速率并不及模拟中靶材料厚度的增长速率,而靶材料厚度的设计又是根据该种能量质子射程而设计的。可见,随入射质子能量的增加,其射程增长的速率较其沉积 NIEL 的能力要快。2) 能量越高的质子入射时,虽然在整体的靶材料中,能量越高的质子所沉积的非电离能损越多,但是它们在单位厚度中所沉积非电离能量的能力呈现下降趋势。此原因可能是随

表 3 Geant4 模拟相关参数及离位原子数与 NIEL 值计算结果

Table 3 Parameters of Geant4 simulation and results of displacement damage and NIEL

入射能量/MeV	靶厚 h /mm	入射质子数	$E_{\text{dam}}(T)$ /MeV	NIEL/(MeV · cm ² · g ⁻¹)	N_d
1	0.01	10 ⁵	12	196.7	1.80 × 10 ⁵
10	0.4	10 ⁵	108	44.2	1.60 × 10 ⁶
100	20	10 ⁵	2 885	23.6	4.36 × 10 ⁷
500	300	10 ⁵	22 937	12.5	3.46 × 10 ⁸

着质子能量的增加,其运动速度也增加而导致其 NIEL 沉积能力下降。

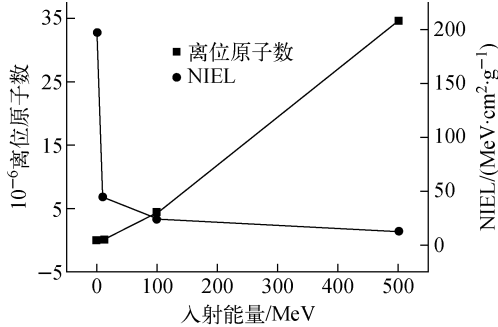


图 1 质子入射产生的离位原子数和 NIEL 值与其能量的关系

Fig. 1 NIEL and number of displacement damage vs energy of proton

4 位移缺陷的分布

空间中存在的质子能量范围非常广,约为 1~1 000 MeV,但其期望值较接近 10 MeV。所以,本模拟采用 10 MeV 质子束来轰击氮化镓靶材料。将厚度为 0.4 mm 的氮化镓靶沿厚度方向平均分成 20 份,采用在其表面处沿厚度方向入射 10⁵ 个 10 MeV 质子,分析质子产生的位移缺陷数目(离位原子数)随入射深度分布的关系。

图 2 为 10 MeV 质子入射氮化镓靶材料产生的位移缺陷随质子入射深度的分布,但做了以下假设与近似:1) 假设质子入射后在某一深度产生了 PKA,那么该 PKA 在其一生中所产生的所有离位原子数均近似认为产生在此深度中;2) 将 0.4 mm 的靶厚均等分为 20 份,即 0~20 μm、20~40 μm、...,每份中产生的所有离位原子数均等效近似为全部发生在区间中小的那个位置。

从图 2 可看出,质子入射氮化镓靶材料时,在靶的 320 μm 前,虽然会有一些例外,但是离位原子数总体是随着入射深度的增加而增加,

而在靶的后 80 μm 处,离位原子数随着入射深度的增加而减小。对比前面 SRIM 模拟的 10 MeV 质子入射氮化镓可知,10 MeV 入射氮化镓的期望射程大致在 330 μm 处,这就解释了上述现象出现的原因,即在 320 μm 以前是大部分质子能入射到的深度,也是发生反应即大部分 PKA 产生的深度。根据前面所描述的近似理论,不难得出大部分离位原子数会产生在 320 μm 前,而在 320 μm 后的位置,离位原子数的值会出现一个巨大的回落,这是因为这些位置鲜有反应发生并产生 PKA。

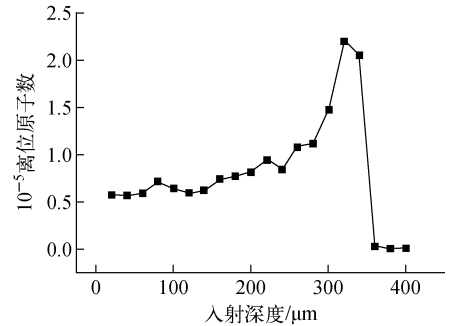


图 2 10 MeV 质子产生的位移缺陷随深度的分布
Fig. 2 Displacement damage by 10 MeV proton vs depth

5 结论

1) 不同能量质子入射氮化镓靶材料所发生的反应不尽相同,产生的 PKA 种类也有所差异。能量越高的质子入射靶材料所发生的反应类别会更加多元与复杂,同时会产生种类更加丰富的 PKA。

2) 质子产生的位移缺陷虽然并不会随质子能量的增大而单调增加,但是与反应截面及其 PKA 的产生密切相关。

3) 不同能量入射质子在靶材料中沉积非电离能量的能力不同,能量越大的质子入射时,在整个靶中其非电离能量 $E_{\text{dam}}(T)$ 沉积得会越多。

但随着入射质子能量的增大,其非电离能损的沉积能力并没有其射程增长得快,随着入射质子能量的增加,单位厚度沉积的非电离能损减小。

4) 10 MeV 质子入射氮化镓靶材料时,在其射程范围内随着质子入射深度的增加,离位原子数增加;当超过质子射程时,离位原子数的产生会有一巨大的回落并进一步随入射深度的增加而小幅度减小。

参考文献:

- [1] 童寒轩,胡慧明,郑方庆,等. 氮化镓的合成制备及前景分析[J]. 辽宁化工,2011,40(11):1 201-1 206. TONG Hanxuan, HU Huiming, ZHENG Fangqing, et al. Synthesis and preparation and prospect analysis of GaN[J]. Liaoning Chemical Industry, 2011, 40(11): 1 201-1 206(in Chinese).
- [2] 郭达禧. 碳化硅的不同辐照源的缺陷初态与离位级联的产生及演化的研究[D]. 西安:西安交通大学核科学与技术学院,2015.
- [3] 张明兰,杨瑞霞,李卓昕,等. GaN 厚膜中的质子辐照诱生缺陷研究[J]. 物理学报,2013,62(11): 425-428. ZHANG Minglan, YANG Ruixia, LI Zhuoxin, et al. Study on proton irradiation induced defects in GaN thick film[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(11): 425-428(in Chinese).
- [4] SNEAD L L, ZINKLE S J, WHITE D P. Thermal conductivity degradation of ceramic materials due to low temperature, low dose neutron irradiation [J]. J Nucl Mater, 2005, 340(2-3): 187-202.
- [5] KIM H Y, LO C F, LIU L, et al. Proton-irradiated InAlN/GaN high electron mobility transistors at 5, 10, and 15 MeV energies[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(1): 012107.
- [6] 路伟,王同权,王兴功,等. 基于 Geant4 模拟质子在半导体 Si 材料中的 NIEL 值[J]. 核技术, 2011,34(7):529-531. LU Wei, WANG Tongquan, WANG Xinggong, et al. Simulation of proton NIEL in silicon by using Geant4[J]. Nuclear Techniques, 2011, 34 (7): 529-531(in Chinese).
- [7] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. Geant4: A simulation toolkit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2003, 506(3): 250-303.
- [8] ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, et al. Geant4 developments and applications[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2006, 53(1): 270-278.
- [9] PRICE R J. Neutron irradiation-induced voids in beta-silicon carbide[J]. J Nucl Mater, 1973, 48 (1): 47-57.
- [10] YANO T, ISEKI T. High-resolution electron-microscopy of neutron-irradiation-induced dislocations in SiC [J]. Philosophical Magazine A, 1990, 62(4): 421-430.
- [11] 郭达禧,贺朝会,臧航,等. Geant4 模拟中子在碳化硅中产生的位移损伤[J]. 原子能科学技术, 2013,47(7):1 223-1 228. GUO Daxi, HE Chaohui, ZANG Hang, et al. Geant4 simulation of neutron displacement damage in SiC[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(7): 1 223-1 228(in Chinese).
- [12] 林辉,谢聪,张拥军,等. Geant4 不同物理模型对放疗质子束模拟的影响[J]. 原子能科学技术, 2015,49(7):1 290-1 297. LIN Hui, XIE Cong, ZHANG Yongjun, et al. Effect of different Geant4 physical models on simulation of radiotherapy proton beam[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(7): 1 290-1 297(in Chinese).
- [13] ROBINSON M T, TORRENS I M. Computer simulation of atomic displacement cascades in solids in the binary collision approximation[J]. Physical Review B, 1974, 9(12): 5 008-5 024.
- [14] DETLEF F, FRANK G. Handbook of spallation research: Theory, experiments and applications [M]. Berlin: Wiley-VCH, 2009: 220-224.
- [15] AKKERMAN A, BARAK J. Partitioning to elastic and inelastic processes of the energy deposited by low energy ions in silicon detectors [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2007, 260(2): 529-536.
- [16] GAO F, WEBER W J. Atomic-scale simulation of 50 keV Si displacement cascades in beta-SiC [J]. Physical Review B, 2001, 63(5): 054101.
- [17] 王园明,郭晓强,罗尹虹,等. 质子和中子在硅中位移损伤等效性计算[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(7):1 803-1 806. WANG Yuanming, GUO Xiaoqiang, LUO Yin-hong, et al. Calculation of equivalence of proton and neutron displacement damage in silicon[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25 (7): 1 803-1 806(in Chinese).