

中能质子在Si和GaAs中导致的非电离能损研究*

罗文芸^{1,1)} 王朝壮¹ 贺新福^{1,2} 樊胜^{1,2} 黄小龙² 王传珊¹

1 (上海大学射线应用研究所 上海 201800)

2 (中国原子能科学研究院核物理研究所 北京 102413)

摘要 非电离能损(NIEL)引起的位移损伤效应是空间装置失效的原因之一. 运用改进的Monte Carlo程序SHIELD,建立了质子的NIEL计算手段,模拟计算了能量范围在10—400MeV的中能质子在硅和砷化镓中的NIEL的大小和分布.

关键词 质子 非电离能损 硅 砷化镓

1 引言

非电离能损(NIEL, Non-ionizing Energy Loss)是空间辐射研究提出的一个新概念. 在空间剂量学研究中,长期以来估算总电离剂量效应(TID, Total Ionizing Dose)的依据是空间带电粒子的线性能量传递(LET). 近年来,在辐射损伤研究方面,非电离能损传递的研究有了很大的进展,空间装置的失效不仅来源于LET引起的电离效应,而且来源于NIEL引起的位移损伤效应. NIEL概念的提出关联了不同能量范围的不同粒子在材料体中产生的位移损伤,所以NIEL的估算对应用于极端环境下的半导体特别重要.

目前,国内这方面的研究很少见,陈世彬等^[1]在模拟计算上有过涉猎,但能量较低(中子1MeV,质子小于20MeV);国外这方面的研究已经有相当的基础,Akkerman等^[2]用理论方法、Summers等^[3]用解析方法和TRIM程序、Jun等^[4]用MCNPX程序,陆续发表了一系列有关NIEL的研究结果.

在近地空间来自外层空间高能粒子流中,质子占87%, α 粒子占10%,其余3%为重带电粒子、电子、光子和中子等. 本文重点讨论中能质子的NIEL,选用Monte Carlo程序SHIELD^[4],建立了质子的NIEL计算手段,并针对在空间装置中辐射敏感的半导体材料Si和GaAs进行了具体的模拟计算.

2 NIEL计算

质子与物质相互作用产生的NIEL既涉及原子碰撞过程,又涉及核反应过程. 质子能量低于10MeV时,NIEL中库仑相互作用占优势;能量大于30—50MeV时,NIEL主要来自质子与靶原子核的弹性散射和非弹性相互作用. 我们讨论的质子能区在10—400MeV,在这个能区内,质子与靶原子的库仑相互作用对NIEL的贡献很小,在此主要讨论质子与靶原子的核相互作用.

入射质子与靶原子发生的核相互作用包括弹性和非弹性两部分,SHIELD程序在模拟过程中弹性和非弹性的抽样截面采用的是Barashenkov的抽样截面. 如果发生弹性碰撞,计算出初级碰出原子(Primary Knock-out Atom, PKA)获得的反冲能;如果发生非弹性相互作用,则用进入核内级联、预平衡和蒸发模型来计算PKA的能量. 在本工作所关心的能量范围(入射粒子的能量小于400MeV),核内快过程用的是杜布纳级联模型. 模型假定核内快过程可等效于若干个强子-核子碰撞的子过程,所用截面为自由强子-核子碰撞截面. 预平衡发射假定快过程产生的粒子会以质子、中子、复合粒子等形式发射,以使体系达到平衡. 对于已达平衡的剩余核的退激发,包括几个模型:对 $A < 16$ 的核,用的是费米碎裂模型;对于中等质量及重核,若每个核子激发能大于2MeV,则采用统计多

2006-01-24 收稿

* 国家自然科学基金(1035021)资助

1) E-mail: wyluo@staff.shu.edu.cn

多重碎裂模型. 每核子激发能小于 2MeV 时, 则多重碎裂模型可以简化为重核的“蒸发”与裂变机制的竞争. 而产生出来的次级粒子 (包括蒸发出来的中子) 继续在介质中传输, 可能再次与核作用, 或衰变产生光子、正负电子、中微子等. 详细的模型描述见参考文献[5].

PKA 的反冲能 T 可分为两部分, 一部分引起电子激发, 另一部分引起位移损伤. 引起位移损伤的部分 T_{dam} [6] 可定义为:

$$T_{\text{dam}} = \frac{T}{1 + k(3.4008\varepsilon^{1/6} + 0.40244\varepsilon^{3/4} + \varepsilon)}, \quad (1)$$

其中 $k = 0.1334Z^{2/3}A^{-1/2}$, $\varepsilon = 0.01014Z^{-7/3}T$; Z 和 A 分别为反冲核的原子序数和质量数. 由此计算损伤截面为:

$$\sigma_{\text{dam}} = \frac{T_{\text{dam}}}{N_v x}, \quad (2)$$

其中 N_v 和 x 分别代表靶材料的原子密度和厚度, 于是对应于此损伤截面的 NIEL 为

$$S_{\text{NIEL}}(E) = \frac{N}{A} \sigma_{\text{dam}}, \quad (3)$$

其中 N 为阿伏伽德罗常数, A 为靶原子的质量数.

我们选用 Si 和 GaAs 作为靶材料, 用 SHIELD 程序模拟跟踪每个初始入射质子 (包括其二次粒子) 产生的 PKA, 应用公式 (1), 计算出 PKA 反冲能中的非电离部分能量, 模拟适量的初始入射质子, 统计得出每个初始入射质子的平均损伤能量 T_{dam} , 代入公式 (2) 和 (3), 计算即得到 NIEL.

在用 SHIELD 程序计算 NIEL 时, 确定计算模型的关键是靶的厚度和形状. 靶厚度的选择遵循“薄靶近似”规则, 靶必须尽量薄, 使在靶内不会发生多次核相互作用, 但靶又必须有一定厚度保证能得出合理的 Monte Carlo 统计结果 [7]. 为确定计算模型 (主要是靶的形状和大小), 首先跟踪入射质子在靶中引起的位移损伤能量 T_{dam} 的分布情况. 选用半径和厚度均为 10cm 的圆柱体作为靶, 靶材料为 Si, 能量为 100MeV 的质子沿中心轴线入射, 将圆柱体沿轴线方向划分为 10 等分 (不考虑径向), 模拟了 100 万个入射质子, 并将模拟结果归一化为单个入射质子的结果. 图 1 给出了在轴线方向上单个质子引起的位移损伤能量的分布. 100MeV 质子在 Si 中的平均射程约为 4.1cm, 由图 1 可看出, 若靶的厚度在质子的射程范围, 位移损伤能量基本上是均匀分布的.

将圆柱体径向和轴向都划分为 10 等分, 模拟得出单个入射质子引起的位移损伤能量在径向的分布如图 2. 可以看出, 位移损伤能量主要集中在中心轴线附近, 第一等分 ($R=0.5\text{cm}$) 与第二等分 ($R=1.0\text{cm}$) 内位

移损伤能量最大值相差近 30 倍; 第一等分 ($R=0.5\text{cm}$) 与第三等分 ($R=1.5\text{cm}$) 内位移损伤能量最大值相差近 2 个数量级; 半径大于 1.5cm 的等分内位移损伤能量可忽略不计, 图 2 中没有给出.

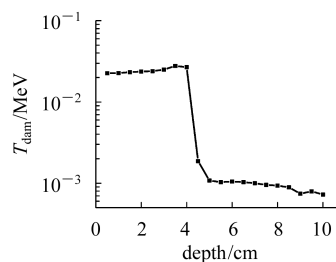


图 1 轴线方向上位移损伤能量的分布

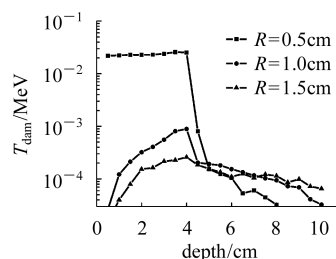


图 2 径向方向上位移损伤能量的分布

根据以上模拟计算结果, 在计算 NIEL 时, 对应于不同能量的质子, 靶厚选取其平均射程的十分之一, 长和宽分别为 1cm 和 2cm, 入射方式选择点源从靶中心平行正入射, 模拟 10 万个入射质子, 并将模拟结果归一化为单个入射质子的结果.

3 计算结果与讨论

3.1 质子在 Si 中的 NIEL

图 3 给出了能量为 10—400MeV 的质子在硅中的 NIEL. 由图可知, 在我们所讨论的能量范围内, 质子与硅原子的非弹性核相互作用产生的 NIEL 占主要部分, 且远远大于弹性散射所占的比例. 随着入射粒子能量的增大, 弹性散射产生的 NIEL 越来越小, 但当能量大于 110MeV 时, 弹性散射产生的 NIEL 又有上升的趋势, 这是因为质子入射能量越高, 其与硅原子发生

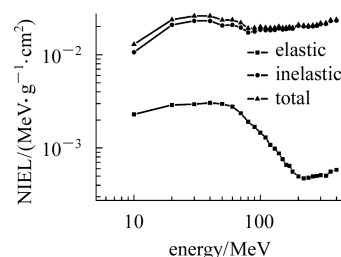


图 3 质子在 Si 中的 NIEL

核反应的几率越大,核反应产生的碎片也会与硅原子发生弹性散射,从而使弹性散射引起的NIEL总量有所增加.并且在所讨论的能区内,质子引起的总的NIEL也有增加的趋势.

3.2 质子在GaAs中的NIEL

图4给出了质子在GaAs中引起的NIEL,并与在Si的NIEL进行比较,其总体趋势基本一致.由图可知,

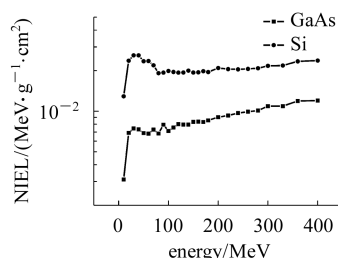


图4 质子在GaAs和Si中的NIEL

在所讨论的能区内质子在GaAs中引起的NIEL比在Si中的小,那么质子在GaAs材料制备的电子器件中引起的位移损伤也较小,这样就尽可能的降低了电子器件的单粒子效应,说明使用GaAs作为在特定轨道

上运行的航天器或者卫星中半导体器件的制作材料可以有效地减少NIEL对电子器件的损害,从而提高航天器或者卫星的抗辐射能力.

4 结论

运用基于Monte Carlo方法的SHIELD程序,经过改进,从反冲核动能出发,计算出位移损伤能量,从而建立了质子的NIEL计算手段.从上述计算结果可知,能量范围在10—400MeV的中能质子在硅和砷化镓材料中引起的NIEL,非弹性核相互作用占主要部分;中能质子在砷化镓材料中引起的NIEL比在硅材料中的要小.

中能质子的NIEL计算手段的建立,为在空间辐射环境中航天器的辐射屏蔽及半导体器件综合辐射效应的研究提供了工具.

感谢俄罗斯科学院核物理研究所N.M. Sobolevsky教授有益的讨论和提供Ga等核素的核数据.

参考文献(References)

- 1 CHEN Shi-Bin, ZHANG Yi-Men, CHEN Yu-Sheng et al. HEP & NP, 2001, **25**(4): 365—370(in Chinese)
(陈世彬, 张义门, 陈雨生等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(4): 365—370)
- 2 Akkerman A, Barak J, Chadwick M B et al. Radiation Physics and Chemistry, 2001, **62**: 301—310
- 3 Summers G P, Burke E A, Shapiro P et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1993, **40**: 1372—1379
- 4 Jun I, Xapsos M A, Messenger S R et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2003, **50**: 1924—1928
- 5 Dementyev A V, Sobolevsky N M. Radiation Measurements, 1999, **30**: 553—557
- 6 Ziegler J F, Biersack J P, Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. New York: Pergamon Press, 1985
- 7 Jun I et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2004, **51**: 3207—3210

Non-ionizing Energy Loss of Middle Energy Proton in Si and GaAs*

LUO Wen-Yun^{1,1)} WANG Chao-Zhuang¹ HE Xin-Fu^{1,2} FAN Sheng^{1,2}

HUANG Xiao-Long² WANG Chuan-Shan¹

1 (Shanghai Applied Radiation Institute, Shanghai University, Shanghai 201800, China)

2 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract The displacement damage effects due to Non-ionizing Energy Loss (NIEL) is one reason of device-malfunction in Space. The NIEL induced by proton with energies from 10MeV to 400MeV in Si and GaAs have been calculated using updated Monte-Carlo code SHIELD.

Key words proton, NIEL, Si, GaAs

Received 24 January 2006

* Supported by National Natural Science Foundation of China (1035021)

1) E-mail: wyluo@staff.shu.edu.cn