

低能质子在半导体材料 Si 和 GaAs 中的非电离能损研究*

唐欣欣^{1,2)} 罗文芸^{1)†} 王朝壮^{1,2)} 贺新福^{2,3)} 查元梓¹⁾ 樊 胜³⁾ 黄小龙³⁾ 王传珊¹⁾

1) 上海大学射线应用研究所, 上海 201800)

2) 上海大学理学院, 上海 200444)

3) 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

(2007 年 1 月 24 日收到, 2007 年 6 月 8 日收到修改稿)

非电离能损(NIEL)引起的位移损伤是导致空间辐射环境中新型光电器件失效的主要因素. 由于低能时库仑相互作用占主导地位, 一般采用 Mott-Rutherford 微分散射截面, 但它没考虑核外电子库仑屏蔽的影响. 为此, 本文采用解析法和基于 Monte-Carlo 方法的 SRIM 程序计算了考虑库仑屏蔽效应后低能质子在半导体材料 Si, GaAs 中的 NIEL. SRIM 程序在计算过程中采用薄靶近似法, 并与其他作者的计算数据和实验数据进行了比较. 结果表明: 用 SRIM 程序计算 NIEL 时采用薄靶近似法处理是比较合理的, 同时考虑库仑屏蔽效应后的 NIEL 较没考虑前要小. 当能量为 1 keV 时, Si 材料中 NIEL 的值为 Summers 结果的 30%, GaAs 材料中为 20%, 这在航天设计中有着重要的意义.

关键词: 低能质子, 非电离能损, 硅, 砷化镓

PACC: 8760P, 2540C

1. 引 言

应用于卫星或空间飞行器的电子器件和光电器件在长时间受到空间辐射后, 性能逐渐降低或失灵, 严重时可能导致整个电子学系统瘫痪^[1]. 辐射效应包括总剂量效应、单粒子效应和位移损伤效应. 其中非电离能损(NIEL)引起的位移损伤是导致空间辐射环境中新型光电器件失效的主要因素^[2].

传统的研究只注重不同辐射条件下电离辐射对器件的影响^[3-4], 这主要是 MOS 器件是一种表面器件, 对电离辐射比较敏感, 再加上非电离能损所占的比重很少($< 1\%$)^[5]. 随着新型光电器件(如 LED, CCD 等)的应用, NIEL 研究的重要性也日渐突出. NIEL 是指粒子与材料相互作用时, 造成原子位移所对应的部分能量损失. 在预测位移损伤引起的参数衰变时, 通常只需要考虑损伤过程的第一步, 即入射粒子及其产生的次级粒子在半导体中的非电离能量

沉积就行了. 大量实验证明: 位移损伤引起的半导体器件及光电器件性能的变化在大多数情况下与位移损伤碰撞过程中传递的非电离能量损失的量成正比^[6], 因此, 可以通过计算某一给定能量的粒子在器件材料中 NIEL 的大小, 来推导其他粒子对器件性能的衰变的情况. 从而建立起 NIEL 标尺(Scaling), 这为将物理量转化为工程量提供了极其有用的手段.

为了使器件能在辐射环境下正常工作, 需采取一系列抗辐射加固技术. 对空间质子能谱的屏蔽而言, 轻材料比重材料的屏蔽效果好(例如轻材料选铝, 重材料选钨). 能量小于 10 MeV 的质子不能穿透 0.69 g/cm^2 (等效厚度)屏蔽材料, 无论是铝还是钨^[7]. 但对高能($> 500 \text{ MeV}$)质子, 通过一系列的屏蔽层后能谱“软化”, 将有可能对器件的灵敏区产生重要影响. 文献[8]表明, 低能质子($< 0.1 \text{ MeV}$)对器件的总位移损伤剂量贡献达 30%. 为此, 本文主要考虑低能质子对 Si, GaAs 半导体材料的 NIEL.

* 国家自然科学基金(批准号: 10305021)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: wyluo@shu.edu.cn

2. NIEL 的计算

NIEL 的一般计算表达式为^[9]

$$\text{NIEL}(T_0) = \frac{N_A}{A} \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} T Q(T) \left(\frac{d\sigma}{dT} \right)_{T_0} dT, \quad (1)$$

其中, N_A 为阿伏伽德罗常数; A 为靶原子的质量数;

$\frac{d\sigma}{dT}$ 为粒子给出具有动能 T 的反冲核的微分截面;

$Q(T)$ 为 Lindhard 函数, 意为反冲核动能中贡献给

NIEL 的分数; $T_{\max} = 4T_0 m_1 m_2 (m_1 + m_2)^{-1}$; $T_{\min} = 2E_d$, E_d 为靶原子的位移阈能。

在许多关于质子、 α 粒子引起的 NIEL 的计算中(比较典型的有 Summers 等人^[10]), 常采用 Mott-Rutherford 截面来表示原子位移。对轻离子, 靶原子的核外电荷库仑屏蔽作用只在低能($< 1 \text{ MeV}$)才表现明显, 但是对重离子来说, 无论在高能还是低能情况下, 这种屏蔽势都需要考虑^[11]。基于此, 在前人的基础上, Jun 等人^[12]进一步考虑库仑屏蔽的影响, 得到的 NIEL 结果在低能时较 Summers 等人的小。

在本文中, 采用解析法和基于 Monte-Carlo 方法的 SRIM 程序分别计算低能质子在半导体材料 Si, GaAs 中引起的 NIEL。屏蔽库仑势函数有多种形式, 如 Thomas-Fermi, Bohr, Lenz-Jensen, ZBL 普适势(Ziegler, Biersack, and Littmark Universal potential)等。为了体现考虑库仑屏蔽效应的影响, 解析法中选用基于大量试验结果的 ZBL 普适势, 其微分散射截面为

$$d\sigma = \frac{-\pi a_U^2}{2} \frac{f(t^{1/2})}{t^{3/2}} dt, \quad (2)$$

其中反冲核动能 $t = \epsilon^2 \frac{T}{T_M}$, ϵ 是无量纲 ZBL 折合能

量, $f(t^{1/2})$ 是无量纲的 Thomas-Fermi 函数, a_U 表示 ZBL 普适势的屏蔽长度, T_M 是入射粒子和靶原子碰撞时传递给靶原子的最大能量, 在传给靶原子的能量(T)中有一部分产生位移损伤, 用符号表示为 E_v , 其表达式为

$$E_v(T) = \frac{T}{1 + k_d g(\epsilon_d)}, \quad (3)$$

其中 ϵ_d , k_d 和 $g(\epsilon_d)$ 为无量纲参数, 以上具体过程见文献 [11, 13] 利用以上关系可以得到 NIEL 的表达式:

$$\text{NIEL} = N \int_{T_d}^{T_M} T \frac{d\sigma}{dT} L(T) dT, \quad (4)$$

其中 $L(T) = E_v(T)/T$, N 表示靶材料中单位立方厘米的原子个数。下限 T_d 表示原子的位移阈能, 对 Si 来说通常选 21 eV, 对 GaAs 选 10 eV。

通过以上表达式, 可以用解析的方法来求得 NIEL。除此之外, 还可以利用 Monte-Carlo 方法模拟计算得到 NIEL, 常用的程序有 SRIM^[14], MCNPX^[12] 和 SHIELD^[15, 16] 等。本文采用以低能离子在固体靶中的输运为基础的 SRIM 程序来进行低能质子 NIEL 的模拟计算。

SRIM 程序的输出文件中, IONIZ.TXT 和 VACANCY.TXT 是计算 NIEL 所需要的。这两个文件的输出结果根据射程划分为 100 等份, 每一等份里的总能量损失由相应的入射粒子和反冲原子给出。IONIZ.TXT 给出了电离能损失率, 而 VACANCY.TXT 给出了空穴数, 同时两个文件都是关于空间的函数。通过 VACANCY.TXT 给出的空穴数可以得到相应的 NIEL, 但要得到 NIEL 和入射能量的关系, 需要通过一系列的转换。Messenger 等人先通过 IONIZ.TXT 和 VACANCY.TXT 得到每一等份里的总能量损失, 然后用入射能量逐个减去每段的总能量损失, 将剩余能量近似为每段的入射能量, 即得到了入射粒子与穿透深度关系曲线, 这样 NIEL 和入射粒子能量关系就出来了, 详细过程见文献 [14]。图 1 为用上述 Messenger 的方法计算得到的质子在 Si 中的 NIEL, 并与解析法的结果进行比较。Messenger 的方法比较简单, 一次计算可以得到一段能量范围内的 NIEL, 但是, 由图 1 可以看出, 入射能量为 10 MeV, 1 MeV 和 100 keV 的三条曲线的开始和末尾均与解析法的结果相差很大, 这是因为开始时, 入射质子能量较高, 在开始几等份中与靶材料发生的相互作用少, 得不到具有统计意义的结果, 所以相应 NIEL 的值起伏较大, 随着能量降低, 中间段能量范围内 NIEL 值与解析法符合较好, 但到末尾段, 由于将剩余能近似作为入射能, 离散很大, NIEL 的值更偏离解析法的结果。针对这一现象, 本文在使用 SRIM 计算 NIEL 的过程中, 采用了不同的计算方法, 每次给定入射粒子的能量为单能, 靶厚的选择遵循“薄靶近似规则”^[12, 17], 在计算过程中选择入射粒子连续慢化近似射程(CSDA)的 5% 作为靶厚, 通过多次模拟得到不同入射能量对应的输出文件 VACANCY.TXT, 由此计算得到 NIEL 与入射能量的关系。

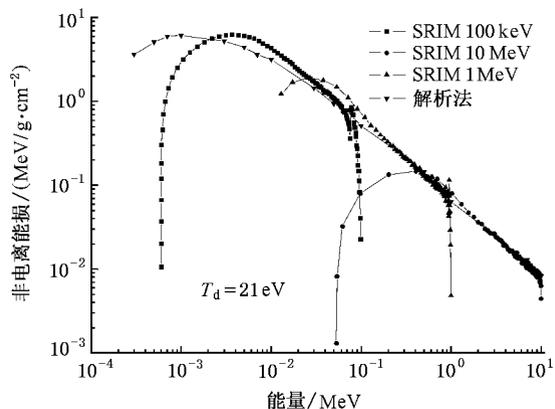


图1 Messenger 计算结果与解析法结果比较

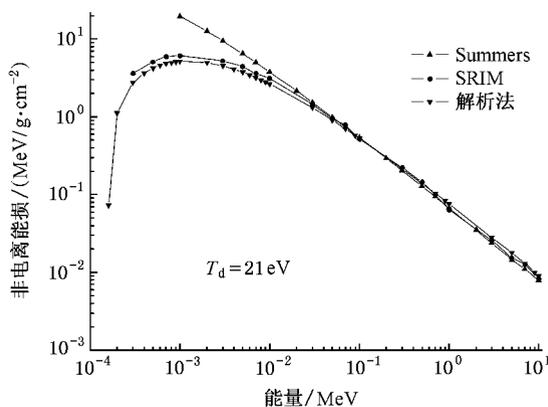


图2 质子在 Si 材料中的 NIEL 和能量的关系

3. 结果与讨论

图2和图3分别表示用解析法和SRIM程序通过本文计算方法得到的质子在半导体材料Si和GaAs中NIEL和能量的关系,并与Summers^[10]和Messenger^[18]的计算结果进行了比较.其中图3中解析法和Messenger最近的计算结果吻合非常好,这说明本文采用的解析方法是可靠的,同时从图2和图3可以看出,在0.1—10 MeV时几条曲线符合很好;随着能量的降低,SRIM程序计算的结果和解析法的结果都低于Summers的早期结果,这是由于Summers的早期结果没有考虑核外电子库仑屏蔽的影响.图2,3说明,考虑库仑屏蔽后,在能量小于100 keV的低能区NIEL的值在Si材料和GaAs材料中都明显变小,当能量为10 keV时,Si材料中NIEL的值为Summers结果的80%,GaAs材料中为70%,当能量为1 keV时,Si材料中NIEL的值为Summers结果的30%,GaAs材料中为20%;GaAs材料中的NIEL值比Si材料中小,这表明低能质子在GaAs材料中引起的位移损伤比在Si材料中引起的小.由图2,3中还可以看出,SRIM程序计算的结果和解析法的结果在Si中比较接近,进一步说明了用SRIM程序计算NIEL时,本文采用的“薄靶近似”处理是比较合理的.在GaAs中SRIM的结果比解析法的结果偏大,可能的原因是化合物的反应截面、配分函数等参数的处理引起的,但整体趋势吻合较好.在入射能为1 keV左右时NIEL的值达到最大,随着能量的增加,NIEL减少非常快,说明低能时质子对NIEL的贡献较大,这与文献[8,18]的观点一致.

值得注意的是以上计算方法只考虑库仑相互作用

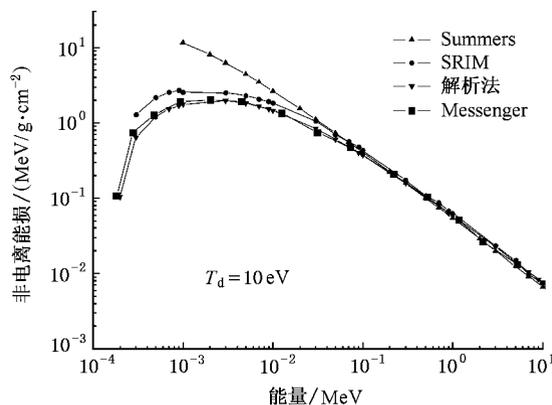


图3 质子在 GaAs 材料中的 NIEL 和能量的关系

用占主导地位的低能情况,没有涉及到相对论和核反应.

4. 计算结果验证

非电离能损在总能量损失中只占一小部分($<1\%$),并且实验测量中无法与电离能损区分开来,但非电离能损对CCDs,LEDs等新型光电器件的参数衰降起着主导作用,通常情况下NIEL值与器件的参数变化成正比.图4是本文的计算结果(质子在GaAs材料中的NIEL)和Anspaugh^[19]等的实验结果(质子对GaAs太阳能电池的相对损伤系数)的比较.图中数据均以10 MeV质子的值为基准进行归一,从图中可以看出在0.3—10 MeV范围内吻合较好,但低能部分实验值远远小于计算值,这是因为在实验过程中采取单能正向入射,低能入射质子因不能到达灵敏区从而无法造成损伤效应.从图4的比较可以看出,对于GaAs材料本文的NIEL计算结果与太

太阳能电池的损伤系数之间存在一定的线性关系,说明本文的计算结果是可靠的;在实际应用中可以根据器件的具体结构进行模拟计算得到 NIEL,通过 NIEL 来预测器件参数的变化情况。

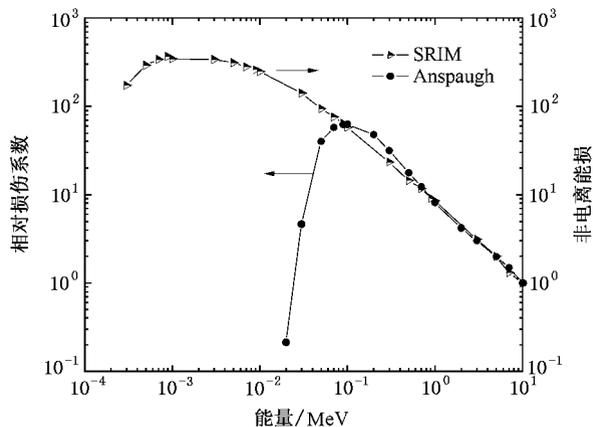


图4 质子在 GaAs 材料中的 NIEL 和质子对 GaAs 太阳能电池相对损伤系数的关系

5. 结 论

通过解析法和 SRIM 程序计算了低能质子在半

导体材料 Si, GaAs 中的非电离能损曲线,在使用 SRIM 程序计算过程中采用薄靶近似法,并与其他作者的相关结果进行比较,结果表明采用薄靶近似法处理是比较合理的,利用 NIEL 值来预测器件的性能的衰降是可行的。

SRIM 是国际上通用的模拟带电粒子在固体中输运过程的 Monte-Carlo 程序,尤其适合于低能粒子。通过本文的计算方法,使利用 SRIM 程序来模拟计算低能离子在材料中导致的非电离能损变得简单而且合理。

使用解析法和 SRIM 程序计算时,都考虑了库仑屏蔽效应,得到的计算结果比 Summers 没有考虑库仑屏蔽效应的结果小,当能量为 1 keV 时, Si 材料中 NIEL 的值为 Summers 结果的 30%, GaAs 材料中为 20%。这在航天设计中有着重要的意义:一方面可以降低对器件的辐射防护要求,可以通过适当使用通常的货架器件代替昂贵的加固器件以减少成本;另一方面可以据此有针对性的对电子学器件进行抗辐射加固。

[1] Wang T Q, Shen Y P, Wang S W, Zhang S F 1999 *Journal of National University of Defense Technology* **21** 36 (in Chinese) [王同权、沈永平、王尚武、张树发 1999 国防科技大学学报 **21** 36]

[2] Zhang Q X, Han J W, Shi L Q, Zhang Z L, Huang Z L 2005 *Chin. J. Space Sci.* **25** 132 (in Chinese) [张庆祥、韩建伟、师立勤、张振龙、黄治理 2005 空间科学学报 **25** 132]

[3] Zhang T Q, Liu C Y, Liu J L, Wang J P, Huang Z, Xu N J, He B P, Peng H L, Yao Y J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2434 (in Chinese) [张廷庆、刘传洋、刘家璐、王剑屏、黄智、徐娜军、何宝平、彭宏论、姚育娟 2001 物理学报 **50** 2434]

[4] Zhang G Q, Guo Q, Erkin, Lu W, Ren D Y 2004 *Chin. Phys.* **13** 948

[5] He B P, Chen W, Wang G Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3546 (in Chinese) [何宝平、陈伟、王桂珍 2006 物理学报 **55** 3546]

[6] Universitat Z K, Abteilung N 2002 *ESA-GSP Work Package 1 Study Report Prediction Displacement Damage Effects in Electronic Components by Method of Simulation* 15157/01/NL/PA

[7] Wang C Z, Luo W Y, Zha Y Z, Wang C S 2007 *Radiate a Protection* **2** 81 (in Chinese) [王朝壮、罗文芸、查元梓、王传珊 2007 辐射防护 **2** 81]

[8] Messenger S R, Xapos M A, Burke E A, Walters R J, Summers G P 1997 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **44** 2169

[9] Akkerman A, Barak J, Chadwick M B, Levinson J, Murat M, Lifshitz Y 2001 *Radiation Physics and Chemistry* **62** 301

[10] Summers G P, Burke E A, Shapiro P, Messenger S R, Walters R J 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 1372

[11] Messenger S R, Burke E A, Xapos M A, Summers G P 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1919

[12] Jun I, Xapos M A, Messenger S R, Burke E A, Walters R J, Summers G P 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1924

[13] Ziegler J F, Biersack J P, Littmark U 1985 *The Stopping and Range of Ions in Solids* (New York: Pergamon Press) p55

[14] Messenger S R, Burke E A, Summers G P, Xapos M A, Walters R J, Jackson E M, Weaver B D 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1595

[15] Dementyev A V, Sobolevsky N M 1999 *Radiation Measurements* **30** 553

[16] Luo W Y, Wang C Z, He X F, Fan S, Huang X L, Wang C S 2006 *HEP&NP* **30** 1088 (in Chinese) [罗文芸、王朝壮、贺新福、樊胜、黄小龙、王传珊 2006 高能物理与核物理 **30** 1088]

[17] Jun I, Xapos M A, Burke E A 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3207

[18] Messenger S R, Burke E A, Walters R J, Warner J H, Summers G P, Morton T L 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3371

Non-ionizing energy loss of low energy proton in semiconductor materials Si and GaAs^{*}

Tang Xin-Xin^{1,2)} Luo Wen-Yun^{1,†} Wang Chao-Zhuang^{1,2)} He Xin-Fu^{2,3)} Zha Yuan-Zi¹⁾
Fan Sheng³⁾ Huang Xiao-Long³⁾ Wang Chuan-Shan¹⁾

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

2 *College of Sciences , Shanghai University , Shanghai 200444 , China*)

3 *China Institute of Atomic Energy , Beijing 102413 , China*)

(Received 24 January 2007 ; revised manuscript received 8 June 2007)

Abstract

The displacement damage due to non-ionizing energy loss (NIEL) is the main reason of device-malfunction in spatial radiation environments. In the low energy range where the Coulombic interaction dominates , Mott-Rutherford differential cross section is usually used in its treatment. However , electrostatic screening of nuclear charges of interacting particles is not accounted for. The NIEL induced by low energy proton in Si and GaAs have been calculated using analytical method and Monte-Carlo code (SRIM). Thin-target approximation was used when calculating NIEL by SRIM code and the result compared with that of other authors ' . The results show that thin-target approximation is reasonable and NIEL scaling is feasible. The NIEL values become lower after taking into account the screening effect. The results by SRIM code are 30% and 20% of Summers 's results for Si and GaAs at 1 keV , respectively. The result is very important for spacecraft design.

Keywords : low energy proton , NIEL , Si , GaAs

PACC : 8760P , 2540C

^{*} Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10305021).

[†] Corresponding author. E-mail : wyluo@shu.edu.cn