

纳米静态随机存储器低能质子单粒子翻转敏感性研究

罗尹虹 张凤祁 王燕萍 王圆明 郭晓强 郭红霞

Single event upsets sensitivity of low energy proton in nanometer static random access memory

Luo Yin-Hong Zhang Feng-Qi Wang Yan-Ping Wang Yuan-Ming Guo Xiao-Qiang Guo Hong-Xia

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 068501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.068501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.068501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

(100)Si 基应变 p 型金属氧化物半导体 [110] 晶向电导率有效质量双椭球模型

Double ellipsoid model for conductivity effective mass along [110] orientation in (100) Si-based strained p-channel metal-oxide-semiconductor

物理学报.2016, 65(1): 018501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.018501>

氮化硅膜致小尺寸金属氧化物半导体晶体管沟道单轴应变物理机理

Physical mechanism of uniaxial strain in nano-scale metal oxide semiconductor transistor caused by sin film

物理学报.2015, 64(23): 238502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.238502>

Si/Ge/Si 异质横向 SPiN 二极管固态等离子体解析模型

Analytic models for solid state plasma of Si/Ge/Si heterogeneous and lateral SPiN diode

物理学报.2015, 64(23): 238501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.238501>

质子与金属布线层核反应对微纳级静态随机存储器单粒子效应的影响分析

Effects of nuclear reactions between protons and metal interconnect overlayers on single event effects of micro/nano scaled static random access memory

物理学报.2015, 64(17): 178501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.178501>

压应变 Ge/(001)Si_{1-x}Ge_x 空穴散射与迁移率模型

Hole scattering and mobility in compressively strained Ge/(001)Si_{1-x}Ge_x

物理学报.2015, 64(3): 038501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.038501>

纳米静态随机存储器低能质子单粒子翻转 敏感性研究*

罗尹虹[†] 张凤祁 王燕萍 王圆明 郭晓强 郭红霞

(强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西北核技术研究所, 西安 710024)

(2015年11月17日收到; 2015年12月22日收到修改稿)

针对 65, 90, 250 nm 三种不同特征尺寸的静态随机存储器基于国内和国外质子加速器试验平台, 获取了从低能到高能完整的质子单粒子翻转截面曲线. 试验结果表明, 对于纳米器件 1 MeV 以下低能质子所引起的单粒子翻转截面比高能质子单粒子翻转饱和截面最高可达 3 个数量级. 采用基于试验数据和器件信息相结合的方法, 构建了较为精确的复合灵敏体积几何结构模型, 在此基础上采用蒙特卡罗方法揭示了低能质子穿过多层金属布线层, 由于能量歧离使展宽能谱处于布拉格峰值的附近, 通过直接电离方式将能量集中沉积在灵敏体积内, 是导致单粒子翻转截面峰值的根本原因. 并针对某一轨道环境预估了低能质子对空间质子单粒子翻转率的贡献.

关键词: 低能质子, 纳米静态随机存储器, 单粒子翻转, 直接电离

PACS: 85.30.De, 21.60.Ka

DOI: 10.7498/aps.65.068501

1 引言

质子是空间辐射环境中造成航天器电子学系统失效的重要来源, 通常认为只有中高能质子与材料发生核反应才能引发单粒子翻转, 因此国外早期相关标准和指南^[1,2]规定试验时质子能量范围为 20—200 MeV. 随着器件特征尺寸的减小和临界电荷的降低, 2007年, Rodbell等^[3]首次发现低能质子直接电离引起 65 nm SOI (silicon on insulator) 工艺锁存器和存储器发生高截面的单粒子翻转, 引起了器件辐射效应研究领域的高度关注. 自此国外相继开展了 90, 65, 45, 32 nm 不同特征尺寸条件的 SOI 工艺、体硅工艺存储器低能质子单粒子效应试验和理论研究^[4-12], 探讨了低能质子引发高截面单粒子翻转的物理机理, 认为直接电离是引起该现象的根本原因; 测试了工作电压和质子入射角度^[3,5,6]对低能质子单粒子翻转截面峰的影响, 并

观测到当特征尺寸到了 45 nm 以下, 低能质子直接电离甚至能够引发单粒子多位翻转^[9,10]; 分析了低能质子单粒子效应对现有质子单粒子效应模拟试验技术和空间翻转率预估方法带来的影响, 采用经验公式^[5,6]和蒙特卡罗仿真的方法^[4]计算了低能质子单粒子效应对空间不同轨道环境下质子单粒子翻转率的贡献; 针对实验中由于采用降能片导致低能质子能谱明显歧离对实验数据准确性带来的影响所引发的争论, 探索了利用高能质子加速器、高能轻离子来评估器件低能质子单粒子翻转敏感性和预估空间低能质子单粒子翻转率的方法^[11,12]. 国内近两年也开始关注低能质子引起的单粒子效应. 原子能科学研究院^[13]报道了基于 65 nm 工艺静态随机存储器 (SRAM) 低能质子单粒子效应的实验结果; 兰州近代物理研究所^[14]针对构建的 45 nm SRAM 模型开展了低能质子单粒子效应相关的理论计算工作. 但结合具体器件工艺, 在试验和理论仿真两方面同时开展深入研究的

* 国家科技重大专项 (批准号: 2014ZX01022-301)、国防科技预研项目 (批准号: 51308040407) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 613224) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: luoyinhong@nint.ac.cn

工作还未见相关报道.

综上所述可知,低能质子引发的纳米器件单粒子翻转已成为评价器件抗单粒子翻转能力不容忽视的重要因素.本文针对65, 90, 250 nm三种不同特征尺寸的SRAM器件,基于国内低能质子加速器和国外中高能质子加速器试验平台,在国内首次获取了纳米器件从低能到高能完整的质子单粒子翻转截面曲线,试验测量了纳米器件低能质子所引起的单粒子翻转截面峰.采用基于试验数据和器件信息相结合的方法,构建了较为精确的复合灵敏体积几何结构模型,在此基础上通过蒙特卡罗仿真揭示了低能质子导致单粒子翻转截面增强的物理机制,分析了能谱展宽的低能质子对单粒子翻转截面峰的影响,并针对某一轨道环境预估了低能质子对空间质子单粒子翻转率的贡献,为建立科学的质子单粒子模拟试验方法和翻转率预估方法打下了坚实基础.

2 试验

2.1 低能质子单粒子效应试验

利用北京大学重离子物理研究所的EN串行加速器开展SRAM低能质子单粒子效应试验,加速器最高质子能量10 MeV,最低能量3 MeV.试验腔内真空度 10^{-3} Pa,温度为室温;在试验中采用降能片以获取能量低于3 MeV的质子.利用TRIM软件计算了3 MeV质子穿过不同厚度铝箔后的平均能量,确定了0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1, 2, 3, 5, 8 MeV不同质子能量所需的铝箔厚度(见表1).

由于质子能量低,射程有限,试验需在真空下开展.为避免在每种质子能量下均需破坏真空更换铝箔,设计加工了专用的试验样品辐照支架,以及由步进电机控制的安放铝箔的圆盘,圆盘上每次可放置6组不同厚度的铝箔,可实现对6种质子能量的获取,极大地减少了打开真空腔体更换铝箔的次数,提高了试验效率.

试验中选用了三种特征工艺尺寸的试验样品.一是65 nm CMOS工艺SRAM器件M328C,该电路是256 K位同步单端口SRAM电路,I/O电压3.3 V,内核电压1.2 V;二是Cypress 90 nm异步SRAM器件CY62126EV30LL,该器件为CY62126系列最小容量器件,额定电压3.0 V,存储容量64 k × 16位共1 Mbit;三是Cypress 250 nm异步SRAM器件CY62126BVLL,存储容量也为1 Mbit.

辐照时,试验样品放入辐照腔内,每次在辐照板上放3片被试器件,考虑到低能质子射程短,样品进行开盖辐照.利用存储器单粒子效应在线测试系统对器件进行数据填充,测试图形5555H,辐照时系统连续回读,记录发生翻转的逻辑地址和数据.

表1 使用不同厚度铝箔获取的平均质子能量及在硅中相应的线性能量转移(LET)值

Table 1. Average proton energies and LET for various Al foil degrader setting.

序号	铝箔厚度/ μm	有效质子能量/MeV	LET值/ $(\text{MeV}\cdot\text{cm}^2)\cdot\text{mg}^{-1}$	在硅中的射程/ μm
1	0	3	0.085	92.05
2	40	2	0.112	47.69
3	67	1	0.176	16.33
4	70	0.8	0.199	11.74
5	72	0.7	0.214	9.67
6	75	0.6	0.232	7.75
7	76	0.5	0.255	5.99
8	77	0.4	0.286	4.41
9	79	0.3	0.329	3.02
10	80	0.2	0.393	1.83

由于低能质子较高的LET值,入射器件时会造成较高的电离能量损失,引起总剂量效应,总剂量TID和离子注量 Φ 以及LET之间的关系可以表示为

$$TID(\text{rad}(\text{Si})) = 1.6 \times 10^{-5} \times \Phi(\text{cm}^{-2}) \times LET(\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}). \quad (1)$$

以质子单粒子试验中典型注量 10^{10} 个/ cm^2 为例,对于1 MeV质子,LET值 $0.176 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$,此时累积总剂量为28 krad(Si)左右.质子试验前,对样品在钴源进行了总剂量摸底试验,250 nm SRAM总剂量辐照108 krad(Si)时出现静态功耗电流增大,90 nm SRAM总剂量辐照210 krad(Si)时出现静态功耗电流增大,65 nm SRAM总剂量辐照400 krad(Si)未见静态功耗电流增大.为避免总剂量效应对SRAM单粒子翻转截面测试结果的影响,试验时按照质子能量从高到低的顺序进行测试,每轮试验完毕,对SRAM进行读写操作,判断是否有总剂量造成的功能错误,当质子累积剂量达到器件静态功耗电流出现增大时的总剂量阈值的80%,则换取新的样品进行试验.

2.2 中高能质子单粒子效应试验

由于国内缺乏中高能质子加速器, 8 MeV 以上质子单粒子效应试验在瑞士保罗谢勒研究所质子辐照装置 (PIF) 上完成. 试验质子能量点选择为 20, 150, 100, 7, 30, 20, 15 MeV 多个能量点, 不同能量对应的有效 LET 值、射程列于表 2. 该装置初始能量 230 MeV 和 74 MeV, 可根据设定的质子能量点自动升降 Cu 降能片; 基于 230 MeV 质子采用降能片衰减到 200, 150, 100 MeV 质子, 基于 74 MeV 质子采用不同厚度降能片衰减到 70, 30, 20, 15 MeV 质子. 试验在空气中进行, 辐照时采用了准直器, 束斑面积 3 cm², 试验样品和低能质子试验相同, 测试系统设置与低能质子试验时相同.

表 2 PIF 装置上不同能量质子对应的有效 LET 值和射程

Table 2. Effective LET and range of different energy proton for PIF facility.

序号	有效质子能量 /MeV	LET 值/ (MeV·cm ²)·mg ⁻¹	在硅中的射程 /mm
1	200	3.637 × 10 ⁻³	138.63
2	150	4.208 × 10 ⁻³	84.55
3	100	5.857 × 10 ⁻³	41.62
4	70	7.641 × 10 ⁻³	22.16
5	30	0.015	4.91
6	20	0.020	2.39
7	15	0.025	1.44

3 质子单粒子效应试验结果

图 1 绘出了 65, 90 和 250 nm 三种不同特征尺寸 SRAM 器件从低能到高能完整的质子单粒子翻转截面曲线. 可以看出, 对于 65 nm SRAM 器件, 质子能量在 1 MeV 以下时出现了单粒子翻转截面峰, 比 1 MeV 以上质子单粒子翻转饱和截面约高 3 个数量级; 对于 90 nm SRAM 器件, 质子能量 0.4 MeV 时出现了单粒子翻转截面峰, 比 1 MeV 质子时高 2 个量级以上, 比 20 MeV 以上质子单粒子翻转饱和截面高 4 倍左右. 而对于 250 nm SRAM 器件, 质子能量 3 MeV 以下没有观测到单粒子翻转效应.

由于针对这三种器件均先期开展过重离子单粒子效应试验, 经威布尔拟合后, 65 nm SRAM 器件单粒子翻转阈值约为 0.30 MeV·cm²/mg, 90 nm SRAM 器件单粒子翻转阈值约为 0.36

MeV·cm²/mg, 而 250 nm SRAM 器件翻转阈值约为 1.2 MeV·cm²/mg. 初步分析其原因在于, 对于大于 100 nm 特征工艺尺寸的器件, 由于其较高的 LET 阈值, 低能质子直接电离不足以引起单粒子翻转, 只能通过较高能量的质子与器件材料发生核反应产生的次级粒子或反冲核引发单粒子效应. 而 65, 90 nm 器件由于其低的 LET 阈值, 导致低能质子直接电离所沉积的能量就能引起单粒子翻转, 由于直接电离反应截面远高于核反应截面, 因此在低能质子段出现了单粒子翻转截面峰. 这将在下一节通过蒙特卡罗仿真对其机理进一步进行深入分析.

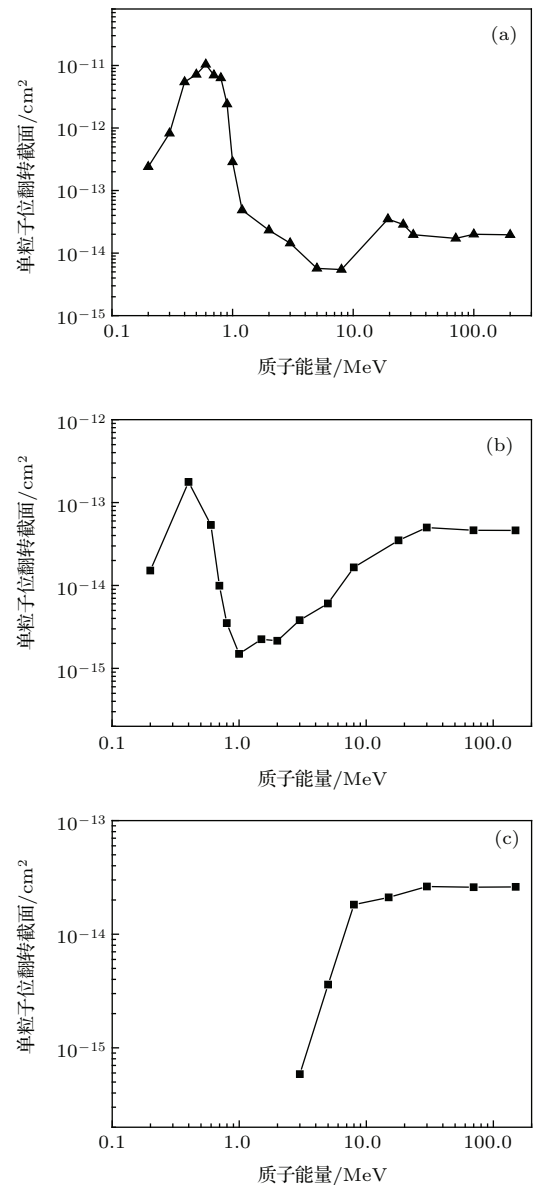


图 1 不同特征尺寸 SRAM 质子单粒子翻转截面曲线 (a) 65 nm SRAM; (b) 90 nm SRAM; (c) 250 nm SRAM
Fig. 1. Proton single event upset cross section versus proton energy on SRAM with different feature sizes: (a) 65 nm SRAM; (b) 90 nm SRAM; (c) 250 nm SRAM.

4 65 nm SRAM低能质子单粒子翻转理论模拟

在质子单粒子效应理论计算方面, 通常采用基于蒙特卡罗的方法, 对入射粒子在器件中的输运进行模拟, 跟踪次级粒子, 计算次级粒子在每个灵敏体积内的能量沉积, 判断沉积能量产生的电荷量是否大于临界电荷, 统计发生翻转的存储单元数目, 针对纳米器件计算过程中应考虑后端互联金属层对底层灵敏体积电荷收集的影响.

本节以65 nm SRAM器件作为研究载体. 在单粒子效应蒙特卡罗仿真中, 器件几何结构模型建立需要用到灵敏体积与临界电荷两个概念. 针对纳米器件灵敏体积几何尺寸和临界电荷大小无法定量的问题, 采用基于试验数据的方法, 结合器件部分工艺信息, 构建了相应的器件灵敏体积模型, 给出了较为精确的灵敏体积几何尺寸, 并通过试验数据的校准, 确定灵敏体积临界电荷值. 计算过程中考虑电磁散射、弹性碰撞、非弹性碰撞、屏蔽库仑散射等物理模型, 基于CRÈME-MC计算低能质子直接电离和核反应所引起的单粒子翻转, 揭示引起低能质子单粒子翻转截面峰值的根本原因.

4.1 存储单元灵敏体积几何结构模型构建

该65 nm SRAM器件存储单元大小约为 $1.22 \mu\text{m} \times 0.526 \mu\text{m}$, NMOS敏感漏区面积约为 $2 \times 10^{-10} \text{cm}^2$, N阱和P阱的阱深约为 $0.45 \mu\text{m}$. 灵敏体积几何模型构建中每个存储单元包含2个灵敏体积SV1, SV2, SV1为NMOS漏区单粒子翻转敏感区域, SV2为PMOS漏区单粒子翻转敏感区域. 考虑离子入射在存储单元不同位置对灵敏节点收集电荷的贡献差异, SV1模型的构建采用复合灵敏体积的方法, 即采用具有不同收集效率的灵敏体积嵌套结构, 共包含4个子灵敏体积. 每个子灵敏体积的几何尺寸和收集效率通过重离子试验数据和高能质子数据进行提取和校准. 为保证单个存储单元模型构建的准确性, 仅采用重离子低LET值所对应的单粒子翻转截面试验数据, 在这些LET时仅发生单位翻转或少量多位翻转. 由于受试验机时的限制, 试验中所采用的最小LET值为 $4.2 \text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 此时已发生少量的多位翻转. 因此通过对试验数据进行威布尔拟合的方法, 补充从LET阈值到 $4.2 \text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的数据点, 见图2.

拟合的LET阈值为 $0.3 \text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 因此从0.30到4.2之间选取0.7, 1.2, $4.2 \text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 3个LET数据点所对应的翻转截面构建SV1内部的3个子灵敏体积; 基于高能质子单粒子截面试验数据, 构建SV1外部的1个子灵敏体积和SV2. 经过校准的各子灵敏体积相应的尺寸和收集效率见表3, 校准过程见下一节.

SV1总的收集电荷表示为

$$Q_{\text{collect-1}} = \frac{1 \text{ pC}}{22.5 \text{ MeV}} \times \sum_{i=1}^4 (\alpha_i \times E_i), \quad (2)$$

其中 $Q_{\text{collect-1}}$ 为SV1总的收集电荷; E_i 为每个子灵敏体积所沉积的能量, α_i 为其相应的收集效率.

临界电荷和LET阈值的关系可以用下式进行表示:

$$Q_{\text{critical}}(\text{pC}) = 0.01035 \times LET_{\text{th}} \times D_{\text{SV}}(\mu\text{m}), \quad (3)$$

Q_{critical} 为灵敏体积发生单粒子翻转的临界电荷; LET_{th} 为单粒子翻转重离子LET阈值, D_{SV} 为灵敏体积的深度.

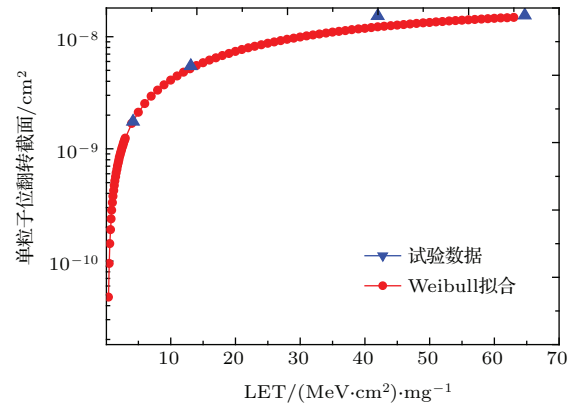


图2 (网刊彩色) Weibull拟合后的重离子单粒子翻转截面曲线

Fig. 2. (color online) Heavy ion single event upset cross section curves using Weibull fitting.

表3 灵敏体积几何模型参数

Table 3. Structural parameters of sensitive volume geometry model.

	X-range/ μm	Y-range/ μm	Z-depth/ μm	收集效率 α
SV1	(0.15, 0.41)	(0.15, 0.232)	0.45	0.70
	(0.15, 0.41)	(0.15, 0.284)	0.45	0.23
	(0.15, 0.41)	(0, 0.526)	0.45	0.07
	(0, 0.41)	(0, 0.526)	0.45	0.02
SV2	(0.534, 0.671)	(0, 0.526)	0.45	0.07

通过对65 nm SRAM重离子试验数据拟合后获取其发生单粒子翻转的LET阈值约为0.3 MeV·cm²/mg, 灵敏体积深度为0.45 μm, 依据(3)和(2)式可知, 此时翻转临界电荷为1.4 fC, 相应的临界能量为0.0315 MeV. 计算中翻转判据设为在SV1, SV2沉积能量之和超过0.0315 MeV即认定发生单粒子翻转.

由于器件多层金属布线对低能质子在硅中的射程具有重要影响, 因此灵敏体积几何结构模型的构建必须考虑顶层的多层金属布线层, 该器件为六层Cu布线, 所构建的几何结构模型示意图见图3.

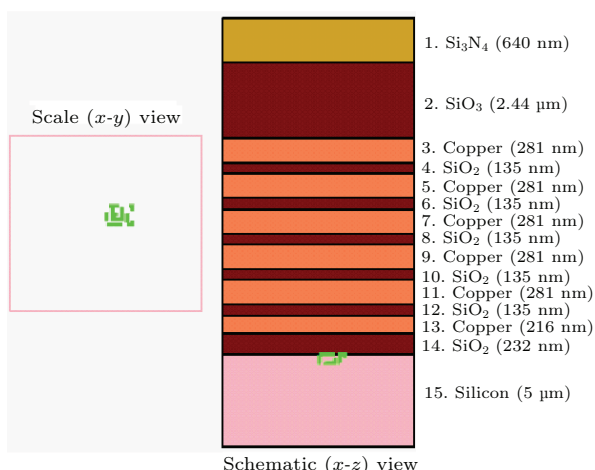


图3 (网刊彩色) 65 nm 存储单元灵敏体积几何结构模型示意图

Fig. 3. (color online) Schematic of sensitive volume geometry model of 65 nm memory cell.

4.2 模型校准

模型校准采用构建灵敏体积时所采用的三种LET值的重离子, 分别为0.7 MeV·cm²/mg 所对应的448 MeV N离子、1.2 MeV·cm²/mg 所对应的800 MeV Ne离子以及4.2 MeV·cm²/mg 所对应的110 MeV F离子. 分别用10⁶个重离子垂直入射到整个器件表面, 入射到灵敏区内的重离子在灵敏区内沉积能量, 得到在灵敏区内的每一个沉积能量所对应的粒子数柱状分布, 即沉积能量谱, 再对沉积能量谱归一化得到每一个沉积能量值对应的截面, 然后对沉积能量对应的截面进行反向积分, 即对大于某一个能量下的截面进行积分, 就得到对于某一沉积能量的单粒子翻转截面, 见图4.

通过迭代不断调整各子灵敏体积的收集效率, 当收集效率为表3中的参数, 沉积能量为0.03 MeV时, 此时计算的单粒子翻转截面与图2中基于试验数据的拟合点符合度最高. 因此判定器件的临界能

量为0.03 MeV, 依据(2)和(3)式, 此时临界电荷为1.3 fC, LET阈值为0.28 MeV·cm²/mg, 在后面的计算中将以此作为存储单元灵敏体积单粒子翻转判据.

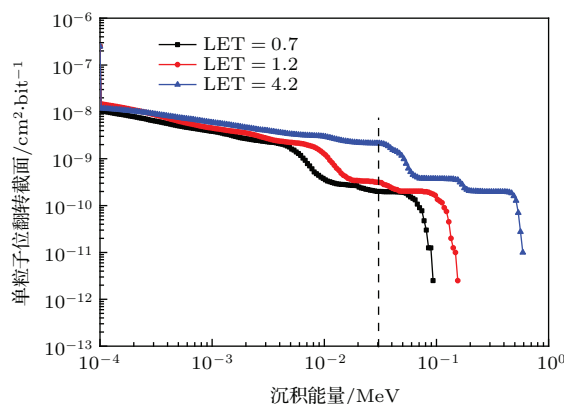


图4 (网刊彩色) 模拟的重离子单粒子翻转截面与沉积能量的关系曲线(虚线为65 nm SRAM 翻转临界能量)

Fig. 4. (color online) Simulated heavy ion single event upset cross section versus deposited energy (dashed line represents single event upset critical energy of 65 nm SRAM).

4.3 质子单粒子翻转计算结果与分析

4.3.1 质子单粒子翻转截面曲线计算

在65 nm SRAM存储单元模型校准的基础上, 分别用10⁶个单能质子垂直入射到器件表面, 统计临界能量0.03 MeV时质子单粒子翻转截面, 计算65 nm SRAM从低能到高能完整的质子单粒子翻转截面曲线, 见图5. 图6给出了针对图5曲线中三个关键的质子能量点0.7, 1, 2 MeV在仅考虑直接电离和直接电离加核反应全过程两种物理模型下计算结果的比较. 可以看出, 在能量为1 MeV及以下时, 单粒子翻转均为低能质子直接电离所引起的; 而能量超过2 MeV的质子, 由于其低的LET值, 直接电离沉积能量不足以达到器件临界能量, 单粒子翻转均来自于质子与原子核发生弹性碰撞和非弹性碰撞产生的反冲核或次级粒子间接电离所引起的. 基于弹性碰撞和非弹性碰撞截面与质子能量的关系^[2], 可知当质子能量大于30 MeV时, 以非弹性碰撞产生的次级粒子引发单粒子翻转为主, 能量位于2 MeV到30 MeV的质子引发的单粒子翻转以弹性碰撞产生的反冲核为主.

下面对图5中计算结果分三段进行解释. 一是能量在1 MeV以下的低能质子段, 此时翻转截面峰值计算结果大于试验结果. 这是由于试验中受试验

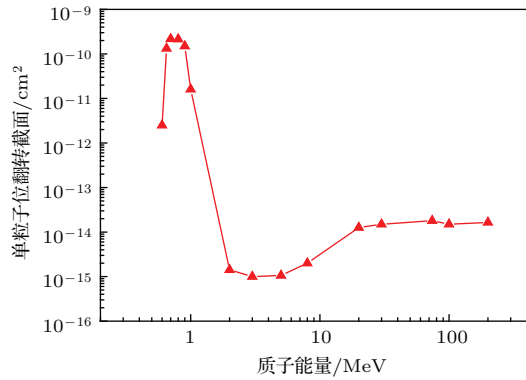


图5 理论计算的 65 nm SRAM 质子单粒子翻转截面
Fig. 5. Simulated proton single event upset cross section versus proton energy.

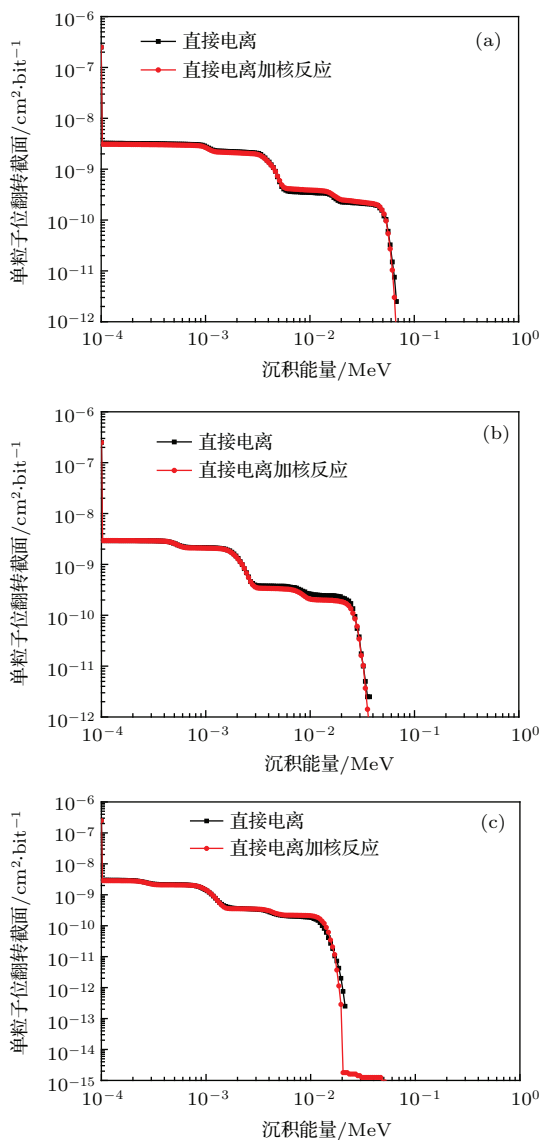


图6 (网刊彩色) 不同能量质子在两种物理模型下计算结果比较 (a) 0.7 MeV 质子; (b) 1 MeV 质子; (c) 2 MeV 质子
Fig. 6. (color online) Comparison of simulated results with two kinds of physics models for different energy proton: (a) 0.7 MeV proton; (b) 1 MeV proton; (c) 2 MeV proton.

条件的限制, 所采用的低能质子并不是单能质子, 而是对 3 MeV 质子采用降能片后能谱展宽的平均能量质子. 当质子能量越低, 能谱展宽越大, 中心峰值的质子能量所占比例也就越小. 能谱中低于中心能量的质子在入射器件表面时, 在穿透多层金属布线层时由于能量损失不能到达灵敏区, 能够通过直接电离进行有效能量沉积的质子数明显减少. 因此低能质子对应的单粒子翻转截面数据严格地说并不是该质子能量点实际的截面数据, 在开展低能质子单粒子效应试验时, 被降能的初始质子应尽可能地低从而保证低能质子能谱尽量集中. 而从空间质子单粒子翻转率预估角度和截面数据精度出发, 计算中采用的是单一能量的质子, 在相同入射注量情况下能够到达灵敏区进行有效能量沉积的质子数远高于试验情况, 因此其翻转截面峰值高于试验结果. 另一方面在计算中能量小于 0.6 MeV 的质子没有发生单粒子翻转, 而试验中能量为 0.2 MeV 时仍有较低截面的翻转, 即计算的单粒子翻转截面峰的宽度小于试验结果, 这同样是由于试验中质子能谱展宽的结果. 由于计算中 0.2 MeV 单能质子射程短, 不能到达灵敏区; 而试验中所采用的 0.2 MeV 质子具有很宽的能谱范围, 具有少量在 0.6 MeV 左右能量的质子, 因此能引起低截面的单粒子翻转, 造成单粒子翻转截面峰的展宽. 二是能量在 2 MeV 到 20 MeV 的质子能量段, 可以看出在该能量段计算结果小于试验结果, 国外文献 [3] 中也报道了相似的情况. 一方面是由于在该能量段单粒子效应截面最低, 统计误差的影响较大; 另一方面由于该能量段以弹性碰撞为主, 在弹性碰撞物理模型上还有待进一步的完善. 三是能量高于 30 MeV 时的中高能质子能量段, 可以看出计算结果和试验结果符合较好, 一方面是由于在灵敏体积几何模型构建中引入了高能质子单粒子翻转截面的试验数据, 同时也反映了计算中非弹性碰撞物理模型的准确性.

4.3.2 低能质子单粒子翻转的物理机制

图 7 给出了利用 SRIM2008 所计算的质子在硅中的线性能量转移随质子能量的变化关系. 可以看出入射质子能量为 55 keV 是布拉格峰的位置, 此时质子在硅中的 LET 值最大为 $0.55 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$. 在布拉格峰的右侧, 随着质子能量的增大, LET 值不断减小, 质子通过直接电离沉积能量的能力在减弱, 发生弹性碰撞和非弹性碰撞的概率将不断增

强. 当入射质子能量处于0.008 MeV到0.4 MeV时, 此时质子在硅中的LET值大于65 nm SRAM存储单元翻转阈值0.28 MeV·cm²/mg, 将能够通过直接电离引发单粒子翻转.

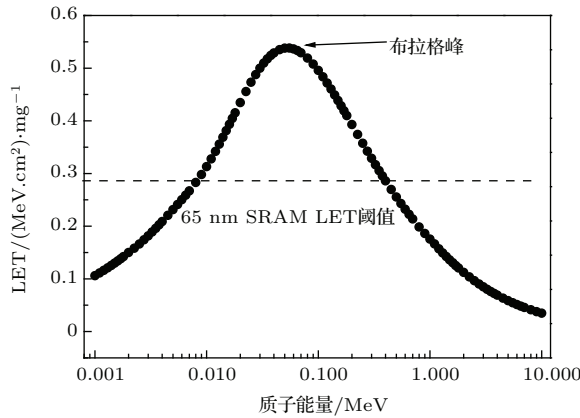


图7 质子在硅中的LET值随质子能量的变化关系
Fig. 7. Proton LET in silicon as a function a proton energy.

图8计算了0.7 MeV质子LET值随穿透深度的变化关系. 横向实线为LET阈值的大小, 竖向虚线为多层金属布线与灵敏区的分界线, 虚线方框为灵敏体积的位置. 根据表1, 0.7 MeV质子本身在硅中的LET值仅为0.214 MeV·cm²/mg, 不能引起单粒子翻转. 但从图8中可以看出, 当0.7 MeV质子穿过多层金属布线层后到达灵敏体积时其LET值却达到0.4 MeV·cm²/mg以上, 足以引起单粒子翻转. 这是由于纳米器件在结构上存在多层金属布线层, 质子束流穿过器件金属布线层和钝化层时, 与材料原子发生碰撞, 这是一个随机的过程, 每个质子与材料原子发生碰撞的次数和能量损失都是不同的, 从而造成到达灵敏区的质子能量发生歧离, 能谱明显变宽. 当展宽后的质子能谱位于布拉格峰值附近, 即有质子能量处于0.008 MeV到0.4 MeV时, 其LET值大于0.28 MeV·cm²/mg就能引发单粒子翻转. 图9给出了0.7 MeV质子穿过多层金属布线层后到达灵敏区的能谱情况, 可以看出, 展宽后的质子能谱主要处于0.1 MeV与0.2 MeV质子之间, 位于图8中质子布拉格峰值的附近, 其LET值均大于0.28 MeV·cm²/mg, 因此能够引起最大截面的单粒子翻转, 形成单粒子翻转截面峰.

当入射质子能量小于0.6 MeV时, 由于在多层金属布线层中能量损失严重, 质子射程不足以到达灵敏区进行有效的能量沉积. 当质子能量为1 MeV时, 经过多层金属布线层后, 相比于图9中

的0.7 MeV质子, 到达灵敏区的质子能谱将向右移动, 仅有极少量的质子位于0.4 MeV以下, 因此单粒子翻转截面相比于0.7 MeV质子降低1个数量级左右.

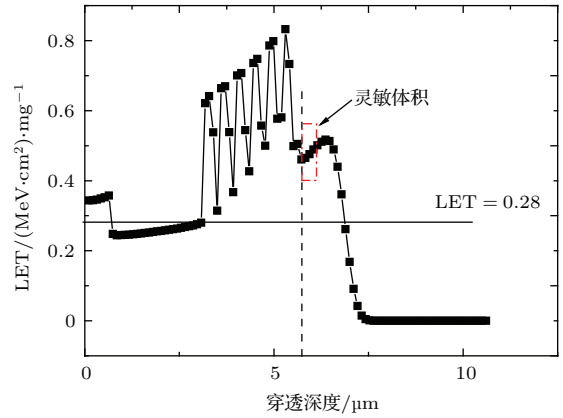


图8 0.7 MeV质子LET值随穿透深度的变化
Fig. 8. 0.7 MeV proton LET as a function of depth into silicon.

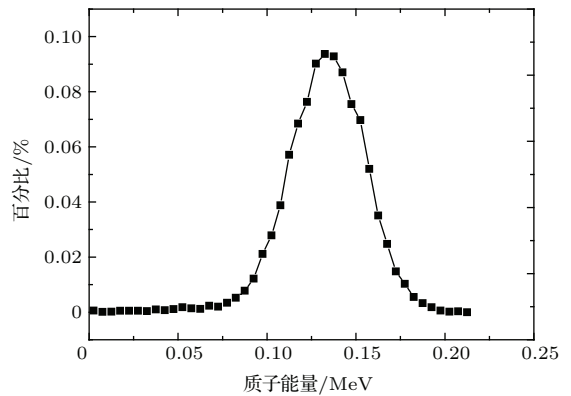


图9 0.7 MeV质子穿过多层金属布线层后的能谱展宽情况
Fig. 9. Proton energy spread distribution at the sensitive volume after 0.7 MeV proton penetrating through multiple metallization and passivation layers.

5 质子单粒子翻转率预估

传统的质子单粒子翻转预估通常采用对实验数据进行Bendel双参数拟合, 获取单粒子翻转截面与质子能量的关系, 然后与某一轨道环境下的质子空间能谱积分获取在轨翻转率. 这种方法对于纳米尺度以上的器件具有很好的适用性, 但随着纳米器件表现出明显的低能质子直接电离单粒子翻转, 该方法已经不再适用. 这里基于第四部分构建的灵敏体积模型采用CRÈME-MC对65 nm SRAM器件在地球同步(GEO)轨道最劣情况下质子引起的单粒子翻转率进行计算, 清楚认识低能质子直接电离对空间质子单粒子翻转率的贡献.

图 10 给出了 GEO 轨道最劣情况下穿过 100 mil 的 Al 屏蔽后质子的微分能谱. 图 11 给出了在该环境下采用仅考虑直接电离和直接电离加核反应全过程两种物理模型所计算的质子单粒子翻转率情况. 和单粒子翻转截面计算相似, 这里依然绘出了单粒子翻转率与沉积能量的关系. 可以看出在临界能量 0.03 MeV 时, 质子空间单粒子翻转率为 1.2×10^{-3} 次/天·位, 而直接电离造成的质子单粒子翻转率为 0.85×10^{-3} 次转/天·位, 这表明在该轨道环境下 65 nm SRAM 空间质子单粒子翻转率主要来自于低能质子直接电离的贡献.

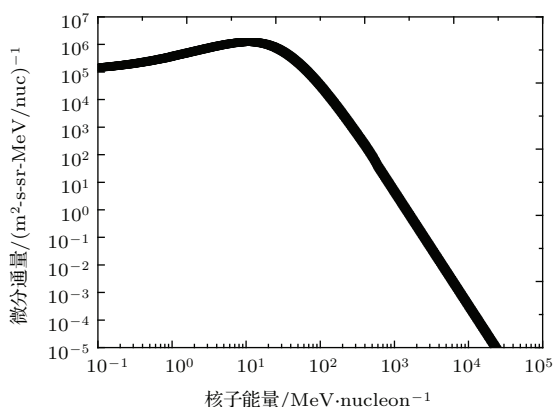


图 10 GEO 轨道最劣情况下穿过 100 mil 的 Al 屏蔽后的质子微分能谱

Fig. 10. Differential proton flux for GEO orbit, worst day with 100 mil Al shielding.

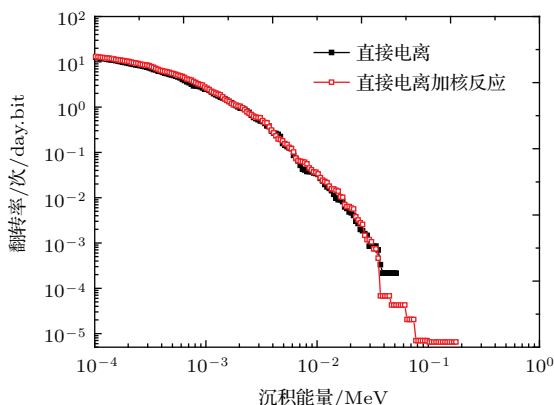


图 11 (网刊彩色) 两种物理模型下空间质子单粒子翻转率计算结果比较

Fig. 11. (color online) Comparison of simulation results of proton single event upset rate with two kinds of physics models.

6 小 结

基于国内北大重离子加速器和国外保罗谢勒研究所的质子辐照装置, 针对 65, 90, 250 nm 三种

不同特征尺寸的 SRAM 器件获取了从低能到高能完整的质子单粒子翻转截面曲线, 试验测量了纳米器件低能质子所引起的单粒子翻转截面峰. 采用基于试验数据和器件信息相结合的方法, 构建了较为精确的复合灵敏体积几何结构模型, 提高了模拟仿真的精度. 在模型构建的基础上, 采用蒙特卡罗方法揭示了低能质子经过多层金属布线层后, 由于能量歧离使展宽能谱处于布拉格峰值的附近, 通过直接电离方式将能量集中沉积在灵敏体积内, 是导致单粒子翻转截面峰值的根本原因. 当质子能量过高或过低均不能通过直接电离进行有效的能量沉积.

由于质子低的 LET 值, 针对 65 nm SRAM, 90 nm 的 SRAM 试验中均未测量到低能质子直接电离引发的多位翻转, 通常的 EDAC 加定时刷新的加固技术依然是有效的.

随着 45, 22 nm 器件工艺的进一步发展, 器件单粒子翻转临界电荷将进一步减小, 低能质子直接电离所引发的单粒子翻转将成为器件单粒子效应研究和考核评估中必须高度关注的. 但由于质子最大 LET 值仅为 $0.55 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 这表明只要对纳米器件采用有效的加固措施, 使其单粒子翻转 LET 阈值高于 $0.55 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 就能消除低能质子单粒子翻转的影响.

参考文献

- [1] Space Component Coordination Group 1995 *ESA/SCC Basic Specification* No.25100
- [2] Buchner S, Marshall P, Kniffin S, Label K 2002 *Proton Test Guideline Development* (Washington: NASA/Goddard Space Flight Center) p24
- [3] Rodbell K P, Heidel D F, Tang H K, Gordon M S, Oldiges P, Murray C E 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2474
- [4] Sierawski B D, Pellish J A, Reed R A, Schimpf R D, Warren K M, Weller R A, Mendenhall M H, Black J D, Tipton A D, Xapsos M A, Baumann R C, Deng X, Campola M J, Friendlich M R, Kim H S, Phan A M, Seidleck C M 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3085
- [5] Heidel D F, Marshall P W, LaBel K A, Schwank J R, Rodbell K P, Hakey M C, Berg M D, Dodd P E, Friendlich M R, Phan A D, Seidleck C M, Shaneyfelt M R, Xapsos M A 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3394
- [6] Cannon E H, Cabanas-Holmen M, Wert J, Amort T, Brees R, Koehn J, Meaker B, Normand E 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 3493
- [7] Seifert N, Gill B, Pellish J A, Marshall P W, LaBel K A 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2711

- [8] Weulersse C, Miller F, Alexandrescu D, Schaefer E, Gaillard R 2011 *The Conference on Radiation Effects on Components and Systems* Sevilla Spain, September 19–23 2011 p291
- [9] Heidel D F, Marshall P W, Pellish J A, Rodbell K P, LaBel K A, Schwank J R, Rauch S E, Hakey M C, Berg M D, Castaneda C M, Dodd P E, Friendlich M R, Phan A D, Seidleck C M, Shaneyfelt M R, Xapsos M A 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3499
- [10] Pellish J A, Marshall P W, Rodbell Kenneth P, Gordon Michael S, LaBel K A, Schwank J R, Dodds N A, Castaneda C M, Berg M D, Kim H S, Phan A M, Seidleck C M 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 2896
- [11] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Ferlet-Cavrois V, Dodd P E, Blackmore E W, Pellish J A, Rodbell K P, Heidel D F, Marshall P W, LaBel K A, Gouker P M, Tam N, Wong R, Wen S J, Reed R A, Dalton S M, Swanson S E 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 1197
- [12] Dodds N A, Schwank J R, Shaneyfelt M R, Dodd P E, Doyle B L, Trinczek M, Blackmore E W, Rodbell K P, Gordon M S, Reed R A, Pellish J A, LaBel K A, Marshall P W, Swanson S E, Vizkelethy G, van Deusen S, Sexton F W, Martinez M J 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 2904
- [13] He A L, Guo G, Chen L, Shen D J, Ren Y, Liu J C, Zhang Z C, Cai L, Shi S T, Wang H, Fan H, Gao L J, Kong F Q 2014 *Atomic Energy Science and Technology* **48** 2364 (in Chinese) [何安林, 郭刚, 陈力, 沈东军, 任义, 刘建成, 张志超, 蔡莉, 史淑廷, 王惠, 范辉, 高丽娟, 孔福全 2014 原子能科学技术 **48** 2364]
- [14] Geng C, Xi K, Liu T Q, Liu J 2014 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **57** 1902

Single event upsets sensitivity of low energy proton in nanometer static random access memory*

Luo Yin-Hong[†] Zhang Feng-Qi Wang Yan-Ping Wang Yuan-Ming
Guo Xiao-Qiang Guo Hong-Xia

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology,
Xi'an 710024, China)

(Received 17 November 2015; revised manuscript received 22 December 2015)

Abstract

Low-energy protons are able to generate enough energy through direct ionization to cause a high single event upset cross section as the feature size of semiconductor devices shrinks. It poses a large challenge on the present proton single event modeling test technique and the space upset rate prediction method. Experimental study of proton single event effect in three different feature sizes of static random access memory (SRAM) (i.e. 65 nm, 90 nm, and 250 nm) is carried out based on domestic low-energy proton accelerators and also the foreign middle-high proton accelerators. Complete cross section curves of proton single event upset from low energy to high energy are acquired. Test results show that single event upset cross section below 1 MeV proton is up to three orders of magnitude higher than the saturation cross section of high-energy proton in nanometer SRAM. However, single event upset is not observed for protons below 3 MeV in 250 nm SRAM, and no single event multiple-cell upsets occur for protons below 1 MeV in 90 nm and 65 nm SRAM. The accurate geometrical structure model of composite sensitive volume is constructed through the combination of test data with device information, and calibrated further by single event test data of low-LET heavy ion and high-energy proton. Simulation results based on the model and Monte-Carlo calculation can reveal the root cause of low-proton single event upset cross section peak. Proton single event upsets are only caused through direct ionization of protons below 1 MeV. When low-energy protons pass through the multiple metallization and passivation layers of the device, the energy spectrum is broadened near the Bragg peak of the proton direct ionization, and the energy is deposited concentratedly into the sensitive volume through direct ionization. When the proton energy is too high or too low, the energy can not be deposited effectively into the sensitive volume through direct ionization. The energy spectrum straggling of low-energy protons due to the use of degrader has a large influence on the height and width of the single event upset cross section peak. Moreover, the contribution of low protons to the space proton single event upset rate is predicted for GEO orbit environment in the worst day environment. It shows that the direct ionization from low energy dominates the proton single event upset rate in the space in 65 nm SRAM. With the development of device technology, the critical charge of single event upset will be further reduced; and to the single event upset from low proton direct ionization more attention must be paid in the study and evaluation of single event effect.

Keywords: low energy proton, nanometer static random access memory, single event upsets, direct ionization

PACS: 85.30.De, 21.60.Ka

DOI: [10.7498/aps.65.068501](https://doi.org/10.7498/aps.65.068501)

* Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2014ZX01022-301), the Chinese Defence Advance Research Program of Science and Technology (Grant No. 51308040407), and the National Basic Research Program of China (Grant No. 613224).

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