

# 稳态、瞬态 X 射线辐照引起的互补性金属-氧化物-半导体器件剂量增强效应研究

郭红霞<sup>1,2)</sup> 陈雨生<sup>2)</sup> 张义门<sup>1)</sup> 周 辉<sup>2)</sup> 龚建成<sup>2)</sup> 韩福斌<sup>2)</sup> 关 颖<sup>2)</sup> 吴国荣<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 西安电子科技大学微电子学研究所, 西安 710000)

<sup>2)</sup> 西北核技术研究所, 西安 710024)

(2001 年 5 月 26 日收到, 2001 年 7 月 1 日收到修改稿)

重点开展了稳态、瞬态 X 射线辐照引起的金属-氧化物-半导体 (CMOS) 器件剂量增强效应 (relative dose enhancement effect (RDEF)) 研究. 通过实验给出辐照敏感参数随总剂量的变化关系, 旨在建立 CMOS 器件相同累积剂量时 X 射线辐照和  $\gamma$  射线辐照的总剂量效应损伤等效关系. 在脉冲 X 射线源 dense plasma focus (DPF) 装置上, 采用双层膜结构开展瞬态翻转增强效应研究, 获得了瞬态翻转剂量增强因子. 这些方法为器件抗 X 射线辐照加固技术研究提供了实验技术手段.

关键词: X 射线, 剂量增强因子, 总剂量效应, 剂量率效应

PACC: 0250, 8140

## 1 引 言

近几十年来,  $\gamma$  射线对器件的电离辐照损伤和机理研究, 已从大量的辐照效应实验中得到了许多有价值的结论, 对器件的辐照效应有了定性的了解, 通过提供一些适当的实验, 对空间辐照环境下器件的损伤效应可以作定量的预测, 并建立了器件的评估考核方法. 而在特殊辐照环境下, 人们更关心的是硬 X 射线辐照对器件的损伤效应, 主要是瞬态辐照效应, 这既包括了总剂量效应又包括了剂量率效应<sup>[1,2]</sup>. 由于存在剂量增强 (dose enhancement) 问题, X 射线对器件的损伤比  $\gamma$  射线要严重得多<sup>[3]</sup>. 因此开展稳态、瞬态 X 射线辐照引起的剂量增强效应研究是非常有必要的.

剂量增强效应不仅与射线的能量, 还与器件的结构, 金属封装类型有关. 随着半导体集成电路技术的飞速发展, 为了改善器件性能, 许多 very large scale integration (VLSI) 在芯片制造工艺中引入重金属工艺; 为了提高器件可靠性, 许多集成电路封装盖内层镀一层 Au (如 Kovar 封装结构), 形成了高原子序数 (如 Au, W 等) 与器件灵敏区 (主要成分为  $\text{SiO}_2$  或 Si) 原子序数差异很大的界面. 我们已开展了不同材料的 X 射线剂量增强效应研究<sup>[4,5]</sup>. 高原子序数

材料对低能 X 射线有较大的光电截面, 其光电效应反应截面  $\sigma_{\text{photon}} \propto Z^{4-5}$ , 其中  $Z$  为原子序数. 因此, X 射线在高原子序数材料中将产生大量的二次电子, 部分次级电子进入交界面的半导体灵敏区中, 在灵敏区产生明显的剂量增强效应, 造成在相同的辐照剂量下, X 射线对器件和集成电路的损伤较  $\gamma$  射线要严重得多. 二次电子的平衡可以出现在体材料中, 但是不会出现在离界面距离小于二次电子最大射程的区域. 剂量增强效应在材料的整个电子射程内均存在, 直至远离界面 (大于次级电子的射程), 电子处于平衡状态为止. 通常以剂量增强因子表示剂量增强的程度, 剂量增强定义为物质区域的剂量与平衡剂量值之差别, 剂量增强效应的大小习惯上用剂量增强因子来表示, 即

剂量增强因子 = 实际剂量 / 平衡剂量.

## 2 互补性金属-氧化物-半导体 4069X 射线稳态辐照剂量增强效应

### 2.1 双层膜结构测量 X 射线相对剂量增强因子

剂量增强效应实际上是高原子序数物质的次级电子进入原子序数较低的器件灵敏区 (Si 或  $\text{SiO}_2$ ) 所引起的损伤增强. 双层膜结构相对测量就是基于模

拟 Kovar/Au 封装结构,采用双层膜(厚度为  $100\mu\text{m}$  Al 膜和厚度为  $18\mu\text{m}$  Au 膜)紧贴贴在开盖的器件前,辐照时颠倒双层膜顺序,如图 1 给出示意图. 本文把 Au 膜紧贴器件称为 Au 内 Al 外,相反把 Al 膜紧贴器件称为 Au 外 Al 内. Au 内 Al 外结构中,内层 Au 紧贴器件灵敏区,当 X 射线辐照时,界面处 Au 中产生的次级电子穿过界面进入 MOS 器件栅氧层引起器件损伤加剧,即产生剂量增强效应;而 Au 外 Al 内结构, X 射线在 Au 中产生的次级电子经  $100\mu\text{m}$  Al 层达到电子平衡,不会对器件灵敏区有贡献,而 Al 的原子序数与 Si 非常接近,剂量增强效应可以忽略. 由于两种顺序辐照使用的是同样厚度的双层膜, X 射线的衰减是一样的,器件辐照损伤的不同仅是由于界面处高原子序数物质产生的次级电子的贡献所致. 比较这两种辐照损伤阈值,可以给出 X 射线引起的器件相对剂量增强因子.

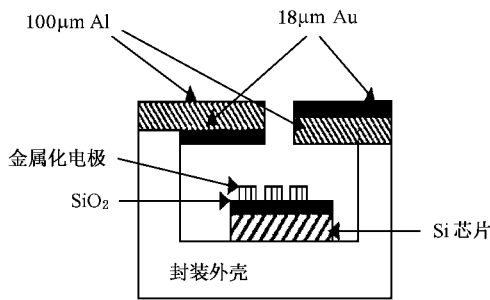


图 1 相对测量法双层膜示意图

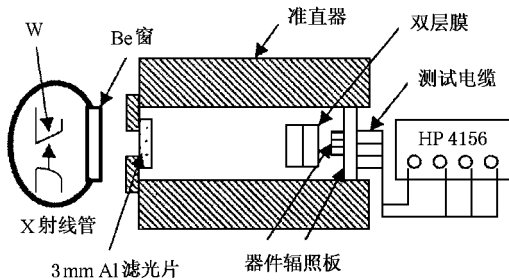


图 2 直流 X 光机器件辐照示意图

本实验研究重点是考察  $N$  沟道阈值电压在线辐照响应特性,目的是比较同种器件在采用双层膜结构时,阈值电压漂移与测量时间的关系,并给出相对剂量增强因子.

样品:实验样品是国产 CC4069,4069 为 CMOS 工艺制作的六反相器电路,辐照源为 Philip 直流 X 射线机,实验时直流高压加  $80\text{kV}$ ,工作电流为

$10\text{mA}$ . 六反向器并联,输入、输出、电源、地和各管脚全部引出置于辐照板上.  $V_{\text{dd}} = 5\text{V}$ ,  $V_{\text{ss}} = 0\text{V}$ ,所有输入端加高电位,即  $N$  沟一直处于导通状态. 图 2 为直流 X 射线机器件辐照示意图. 我们感兴趣的 X 射线能量范围为  $30\text{--}100\text{keV}$ . 实验时在 X 射线源 Be 窗出口准直器前加厚度为  $3\text{mm}$  Al 滤光片,使得小于  $30\text{keV}$  低能成分基本上被滤掉.

图 3 给出器件在 X 射线辐照时双层膜结构的  $N$  沟辐照感生阈值电压漂移随辐照时间的变化关系. 可以看出,阈值电压对辐照的响应曲线呈平滑的响应曲线. 这主要是由于电离辐照中, CMOS 电路阈值电压的漂移主要取决于其  $\text{SiO}_2$  氧化物正电荷和界面态的变化,而累积剂量辐照总是引起 CMOS 电路栅极  $\text{Si/SiO}_2$  界面氧化物正电荷和界面态的增加,因此,阈值电压的辐照响应呈现出相对的稳定性<sup>[6]</sup>. 从图 3 可以得出,在相同阈值电压损伤下(如  $\Delta V_{\text{th}} = 0.7\text{V}$ ),Au 外 Al 内双层膜结构 CC4069 器件可以辐照  $36\text{min}$ ,而 Au 内 Al 外膜只辐照了  $5.8\text{min}$ ,相对损伤增强因子等于  $6.0$ .

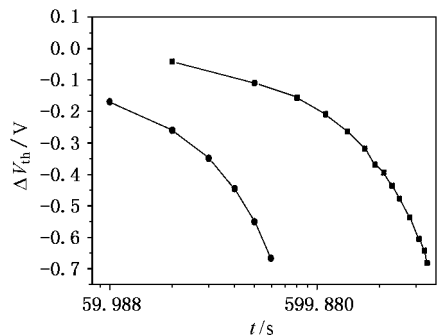


图 3 4069 双层膜结构测量的阈值电压  $\Delta V_{\text{th}}$  随辐照时间  $t$  的变化 X 射线机工作电流为  $10\text{mA}$ ,直流高压加  $80\text{V}$ ; —■—为 406925# Au 外 Al 内双层膜结构; —●—为 406915# Au 内 Al 外双层膜结构

### 2.2 $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ 射线与 X 射线总剂量效应辐照损伤比较

$\gamma$  射线辐照实验在  $^{60}\text{Co}$  源上完成. 因为要建立  $^{60}\text{Co}$  源与 X 射线间的对应关系,因此,排除  $^{60}\text{Co}$  源散射低能散射光子的影响就更有实际意义. 实验中采用 Pb/Al 屏蔽盒,将被辐照器件置于屏蔽盒内,屏蔽盒能够有效地屏蔽  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线所产生的低能散射,而对  $1.17$  和  $1.33\text{MeV}$   $\gamma$  射线的屏蔽可以忽略.

准确的测量低能 X 射线的剂量是非常困难的.

实验时在 X 射线源 Be 窗出口准直器前加厚度为 3mm Al 滤光片,使得小于 30keV 低能成分基本上被滤掉. 利用中国计量科学研究院为我们研制的 T6576 型剂量计,针对 X 射线机 80kV,10mA 状态标定了 X 射线剂量,该剂量计主要用于测量 X 射线能量大于 30keV 的剂量,同时我们用 LiF(镁铜磷)热释光剂量片(TLD)也测量了 X 射线剂量,两者数据符合误差在 10%. 标定的 X 射线剂量率为 0.76 rad(Si)/s.

<sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线利用 Philip 照射量仪进行剂量标定,同时实验中每块辐照板都用热释光剂量片进行剂量测量, $\gamma$  射线剂量用 CaF<sub>2</sub>:Mn TLD 测量. 尽量选用与 X 射线相同的辐照剂量率. $\gamma$  射线辐照剂量率为 2.97 rad(Si)/s. 所用剂量片均在国家二级计量站标定.

实验样品有柯伐盖封装 CC4069 和塑料盖封装 CD4069UBE 两种器件. 图 4 和 5 给出 Kovar 封装和塑料封装器件开盖/不开盖两种情况在直流 X 射线机的实验数据. 可以清楚地看出,Kovar 封装由于内层镀有 Au,剂量增强效应较为严重,带盖的器件甚至低于开盖器件的总剂量损伤阈值. 而塑料封装器件封装材料主要由轻原子序数材料组成,不存在剂量增强效应,对于能量大于 30keV 的 X 射线该封装盖几乎没有衰减作用,带盖器件与开盖器件的总剂量损伤阈值几乎相等.

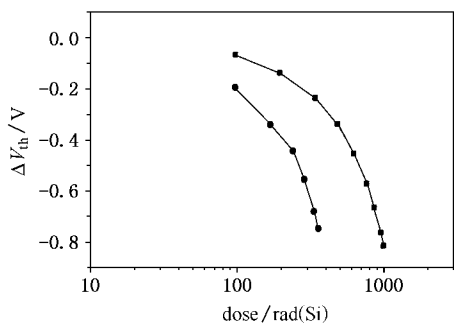


图 4 Kovar 封装器件开盖/不开盖阈值电压  $\Delta V_{th}$  漂移随累积剂量 dose 变化 X 射线:10mA,80kV,3mm Al; —■—4069Kovar 封装 5# 开盖;—●—4069Kovar 封装 24# 不开盖

图 6 和 7 是 CMOS 4069 Kovar 封装 X 射线、 $\gamma$  射线总剂量辐照损伤比较. 图 6 是器件未加电辐照结果,n 型金属-氧化物-半导体(NMOS)管的阈值电压在负漂一定程度后反向回漂,两种射线辐照下都出现了此现象,但开始出现回漂的总剂量不同,两者相

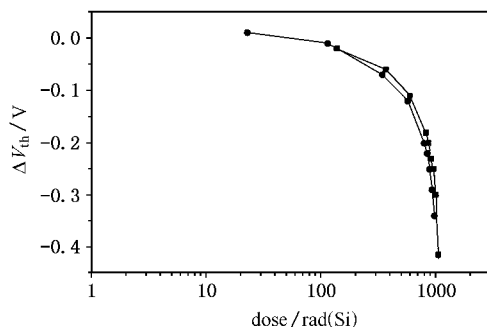


图 5 塑料封装器件开盖/不开盖阈值电压  $\Delta V_{th}$  漂移随累积剂量 dose 变化 X 射线机:10mA,80kV,3mm Al;—■—54HC04 5M202# 塑料开盖;—●—B54HC04 5M201# 塑料不开盖

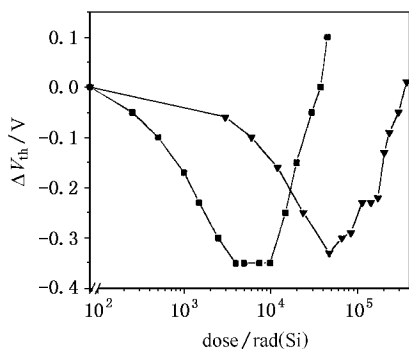


图 6 Kovar 封装 NMOS 的 X 射线(—■—) $\gamma$  射线(—▼—)总剂量辐照损伤比较(器件未加电)

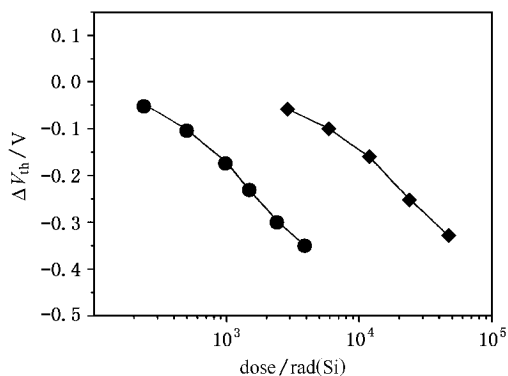


图 7 Kovar 封装 NMOS 的 X 射线(—●—) $\gamma$  射线(—◆—)总剂量辐照损伤比较(器件加电)

差近 5 倍. 在阈值电压漂移量相同的情况下,得到器件 X 射线和  $\gamma$  射线总剂量损伤阈值及剂量增强因子. 图 7 给出加电辐照下实验结果,柯伐盖封装 CC4069 器件的剂量增强系数为 7.8. 同种工艺器件加电辐照比不加电更易损伤,即总剂量损伤阈值更

低. 原因是加电偏置时, 相当一部分电离空穴在电场作用下被扫到  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  界面. 且被界面的缺陷俘获; 不加电偏置时, 栅氧中逃脱复合的空穴的输运是随机的, 到达界面的空穴电荷要比正偏时少得多, 造成损伤要小. 由于 X 射线在界面附近产生剂量增强效应, 在相同的辐照剂量下, X 射线对器件和集成电路造成的损伤要严重得多, 所以, 处于 X 射线辐照场下工作的探测器、半导体器件、集成电路、电子系统和设备, 应当考虑到剂量增强因子的修正, 采取适当的措施来避开或减小这种剂量增强效应<sup>[7,8]</sup>.

### 3 CMOS4069 X 射线瞬态辐照剂量增强效应

瞬态辐照既有总剂量效应, 又有剂量率效应<sup>[6]</sup>.  $\gamma$  射线、X 射线瞬态脉冲辐照后几毫秒内的器件响应非常重要, 总剂量损伤由于界面态的缓慢建立, 通常假定界面态对瞬态环境下的器件响应只起小的作用, 短时间内的器件响应主要由氧化层中的深层俘获电荷决定, 阈值电压的负漂移在瞬态环境下是非常重要的. 剂量率效应主要研究瞬态光电流引起的翻转和门锁效应<sup>[9,10]</sup>. 我们开展的工作主要是利用等离子体聚焦装置(DPF)脉冲 X 射线装置对 4069CMOS 电路进行了瞬态翻转的剂量增强效应研究.

瞬态辐照源为 DPF 射线源, X 射线脉冲宽度在 100—200ns 范围, X 射线光电子能谱范围为 5—50keV<sup>[11]</sup>, 其中 5—25keV 之间占 70% 以上; 单次脉冲 X 射线总能量在 100J 左右(按点源发射,  $4\pi$  立体角均匀分布考虑), 峰值剂量率为  $10^{11} \text{ rad}(\text{Si})\text{s}^{-1}$ <sup>[12,13]</sup>. 由于 X 射线能谱较软, 每个脉冲实际沉积在器件栅氧层中的剂量不足以引起器件的阈值电压、漏电流、跨导等发生变化, 总剂量效应可以忽略. 剂量率效应通过测量电平翻转持续时间的长短来评估其损伤效应. 采用双层膜结构相对测量法, 由于 X 射线能量较低, 把 Al 膜换成了 Be 膜. 器件是 CMOS4069, 辐照时六反向器并联, 输入、输出、电源、地各管脚全部引出置于电路中.  $V_{\text{dd}} = 10\text{V}$ ,  $V_{\text{ss}} = 0\text{V}$ , 所有输入端加高电位. 实验时在 X 射线源 Be 窗出口准直器前加厚度为  $240\mu\text{m}$  的 Al 膜作为滤光片, 使得小于 10keV 低能成分基本上被滤掉. 通过数字示波器记录器件翻转电平持续时间. 图 8 给出两组实验测试结果. 图 8 中 R1 是 Au 外 Be 内结构测得的翻转持续时间波形, R2 是器件开盖测得的波形, R3 是 Au 内 Be 外结构测得的结果, R4 是同时监测的 X 射线时间谱. 图 8 中横轴为时间,  $2\mu\text{s}/\text{格}$ , 纵轴为电压,  $5\text{V}/\text{格}$ . 由图 8 左图可以看出翻转持续时间  $R3/R1$  之比为 2.07, 图 8 右图  $R3/R1$  为 1.52, 相对剂量增强因子为 1.5—2.1.

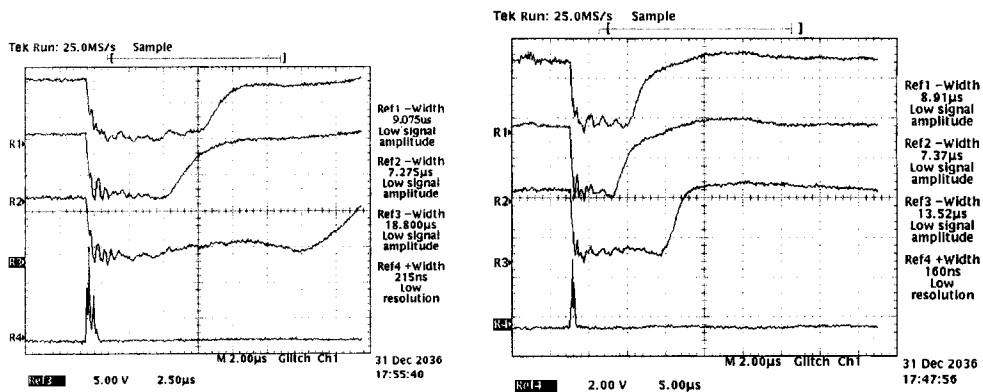


图 8 两组实验瞬态翻转电平持续时间测试波形

## 4 结 语

从以上实验结果得到结论如下: 稳态辐照采用的 X 射线平均能量范围约 40keV, 剂量增强因子在 5.0—8.0 之间. 瞬态辐照 X 射线平均能量约 20keV, 相对剂量增强因子为 1.5—2.1. 对 N 沟器

件, 正偏置时的总剂量损伤阈值大于不加电偏置阈值, 加电偏置的剂量增强因子也大于不加电偏置的增强因子. 本项研究通过实验建立了 CMOS 器件相同累积剂量时 X 射线辐照和  $\gamma$  射线辐照效应的总剂量损伤等效关系; 并且在脉冲 X 射线源 DPF 装置上, 采用双层膜结构开展了瞬态翻转增强效应研究, 获得了瞬态翻转剂量增强因子. 这些方法为器件抗

X 射线辐照加固技术研究提供了实验技术手段.

- [ 1 ] W. L. Chadsey , RADC-TR-76-159 , ADAC26248
- [ 2 ] L. Z. Lai *et al.* , Radiation Hardening Electronics-Radiation Effects and Hardening Techniques( National Defense Industry Press , Beijing ,1998 [ in Chinese ] 赖祖武 抗辐射电子学-辐射效应及加固原理( 国防工业出版社 , 北京 , 1998 )].
- [ 3 ] D. M. Long , D. G. Millward , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-29** ( 1982 ) , 1980.
- [ 4 ] H. X. Guo *et al.* , *Acta Phys. Sin.* , **50**( 2001 ) , 1545( in Chinese [ 郭红霞等 物理学报 , **50**( 2001 ) , 1545 ].
- [ 5 ] J. R. Turinetti , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-44**( 1998 ) , 2065.
- [ 6 ] T. P. Ma , " Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits " , printed in the United States of America( 1989 ).
- [ 7 ] D. E. Beutler , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-34**( 1987 ) , 1544.
- [ 8 ] J. R. Solin , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-47**( 2000 ) , 2447.
- [ 9 ] D. E. Beutler , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-37**( 1990 ) , 1541.
- [ 10 ] T. Liu *et al.* , *Acta Phys. Sin.* , **47**( 1998 ) , 54( in Chinese [ 刘涛等 , 物理学报 , **47**( 1998 ) , 54 ].
- [ 11 ] H. X. Guo *et al.* , *Nucl. Techn.* , **23**( 2000 ) , 22( in Chinese [ 郭红霞等 , 核技术 , **23**( 2000 ) , 22 ].
- [ 12 ] J. C. Garth , *IEEE Trans. Nuc. Sci.* , **NS-33**( 1986 ) , 1266.
- [ 13 ] J. X. Cheng *et al.* , *Acta Phys. Sin.* , **49**( 2000 ) , 287( in Chinese [ 成金秀等 , 物理学报 , **49**( 2000 ) , 287 ].

## STUDY OF RELATIVE DOSE-ENHANCEMENT EFFECTS ON CMOS DEVICE IRRADIATED BY STEADY-STATE AND TRANSIENT PULSED X-RAYS

GUO HONG XIA<sup>1,2)</sup> CHEN YU-SHENG<sup>2)</sup> ZHANG YI-MEN<sup>1)</sup> ZHOU HUI<sup>2)</sup>  
GONG JIAN-CHENG<sup>2)</sup> HAN FU-BIN<sup>2)</sup> GUAN YING<sup>2)</sup> WU GUO-RONG<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Institute of Microelectronics , Xidian University , Xi ' an 710000 , China )*

<sup>2)</sup> *Northwest Institute of Nuclear Technology , Xi ' an 710024 , China )*

( Received 26 May 2001 ; revised manuscript received 1 July 2001 )

### ABSTRACT

The results are presented with emphasis on the relative dose-enhancement factor for complementary metal-oxide semiconductor( CMOS ) devices irradiated by steady-state and transient pulsed X-rays. With the help of experimental study , sensitive parameter threshold voltage as a function of irradiation dose was obtained. So the equivalent relation of total dose damage is established by comparing the response of devices irradiated by <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -rays and X-rays. By employing the X-ray transient pulsed sources , the research of X-rays transient upset enhancement effects is carried out using bi-laminate structure. Upset enhancement factor of X-rays are measured. These methods are provided for X-ray radiation hardening technology an effective evaluation method.

**Keywords :** X-rays , dose enhancement factor , effects of total dose , effects of dose rate

**PACC :** 0250 , 8140