

一种 SEU 实验数据的处理方法^{*}

黄建国 韩建伟 林云龙 黄 治

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

路秀琴 张 新 符长波 郭继宇 赵 葵

(中国原子能科学研究院)

摘 要

对 SEU 数据——特别是看似不理想,但却包含了丰富的物理信息的所谓“坏数据”——的处理方法进行了分析讨论,并具体针对 IDT7164 器件的 SEU 数据进行了处理,从中得到了死层厚度、灵敏体积厚度、能量阈值等进行单粒子翻转预测所需要的关键参数,并就如何根据国内加速器的实际情况开展有针对性的单粒子效应模拟试验提出了一些初步想法。

关键词 单粒子翻转—截面—线性能量传输密度—灵敏体积

1 引言

单粒子效应是十分重要的空间环境效应之一,随着卫星上大规模集成电路的使用,其影响也越来越严重,经常造成控制系统出错或损坏,导致卫星系统失控。单粒子效应分为单粒子翻转(SEU)、单粒子闭锁(SEL)等多种情况,其中,单粒子翻转是较为常见而又十分重要的一种单粒子效应。为了对星用器件的单粒子翻转率进行在轨预测,以给出器件单粒子效应敏感度的准确评估或采取相应的抗辐射加固措施,需要在实验室对器件进行单粒子效应模拟试验,测出器件的翻转截面 $\sigma(\text{cm}^2)$ 对于线性能量传输密度 LET($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$) 的关系曲线。模拟通常是在加速器上进行的,即用加速器产生的不同种类、不同能量组合的重离子辐照器件,测出完整的 σ -LET 曲线。

国际上在单粒子效应的加速器模拟试验方面起步较早,发展比较成熟,比如,有专门供单粒子效应模拟试验和测试的加速器以及专用的测试设备,加速器产生的离子种类丰富,能量范围较宽,效应测试设备比较完善等。而国内由于起步较晚,技术力量相对分散,再加上试验条件的限制,给出的 σ -LET 曲线往往并不理想,比如,有时因为器件的死层(器件表面起保护作用的绝缘层)较厚,辐照离子射程较短而达不到器件的灵敏单元无法引起翻转,或即使达到灵敏单元,但因剩余射程和能量较小,测不到饱和翻转截面,在这种情况下,所测的曲线与 Weibull 函数^[1] 偏离较大,往往看成所谓的“坏数据”而弃之不用。但实际上,这些数据中往往包含着丰富的物理信息,若用适当的方法进行处理,可以得到一些十分有价值的物理参数,而这些参数不仅对器件单粒子效应敏感度的在轨预测是必不可少的,而且往往难以通过其他实验手段获得。

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (19975076)

2001-11-21 收到原稿, 2002-05-08 收到修定稿

本文从单离子效应的物理模型出发, 针对近期所做的单粒子翻转测试数据进行分析处理, 从中得到了死层厚度、灵敏层厚度以及能量翻转阈值等关键参数, 并对如何根据国内加速器的实际情况开展有针对性的单粒子模拟试验提出了一些初步想法。

2 实验结果及分析

本文综合分析了近年来的 4 次实验数据, 包括: 2001 年 4 月 HI-13 上的部分实验数据, 1998 年 6 月 BRNBF 上的部分数据以及 1997 年 11 月和 1998 年 10 月 HIRFL 上的部分数据。结果如图 1 所示, 图中给出了 3 种器件 HY62256、HM6264 和 IDT7164 的 σ -LET 曲线。从图中可以看出, 器件 HY62256、HM6264 的 σ -LET 曲线相对较完整, 在高 LET 端接近饱和翻转截面。通常对于死层和灵敏层都较薄的器件, 只要加速器产生的辐照离子有足够的 LET 值范围 (通常为 1—100 MeV·cm²/mg), 这样的曲线相对容易得到; 而对于死层较厚的器件, 只有上述条件是不够的, 离子还必须要有足够的射程, 否则难以到

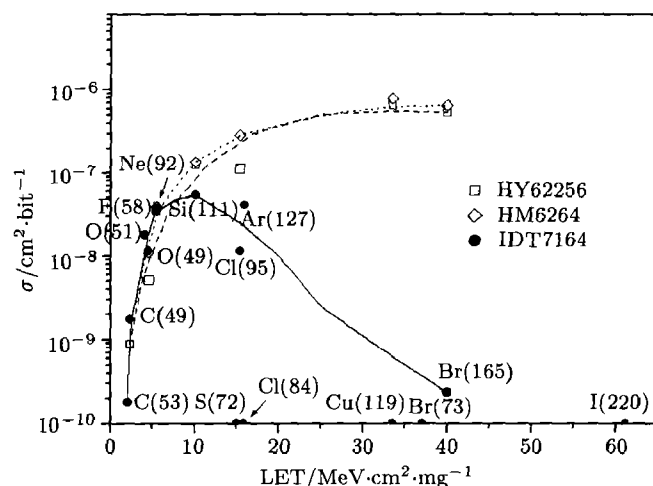


图 1 3 种器件的 SEU 数据 (离子符号后的数据表示入射离子的能量, 单位为 MeV)

Fig.1 SEU data for three devices (the digits in brackets are incident ion energies (MeV))

达器件的灵敏体积, 沉积足够的能量, 从而引起翻转。图 1 中器件 IDT7164 就属于这种情况, 在此我们将做仔细的分析。

根据单粒子效应的物理机制^{[2]~[5]}, 单粒子效应是由于离子在器件的灵敏单元中沉积了足够的能量 (电荷) 而引起的。多数单粒子翻转预测模型^{[6]~[8]}都使用了“灵敏体积”的概念, 如图 2 所示, 即将器件的单粒子效应敏感区域看成一个长方体, 如果入射离子在灵敏体积内沉积的能量大于该器件产生单粒子翻转所需要的沉积能量阈值 (临界电荷), 就会

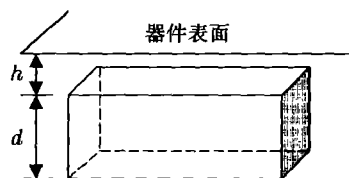


图 2 器件的灵敏体积 (h 、 d 分别为死层和灵敏层厚度)

Fig.2 Schematic of sensitive volume, here h and d are thicknesses for die layer and sensitive layer, respectively

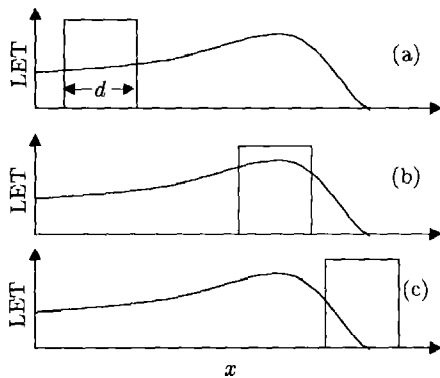


图3 离子在灵敏体积中沉积能量的3种情况
Fig.3 Illustration of three typical cases in which an ion deposits energy in sensitive volume

时 LET 范围越宽, 测得的曲线就越完整. 图1中器件 HY62256、HM6264 的曲线就是这种情况的典型例子. (b) 图中 LET- x 曲线的 Bragg 峰正好处于灵敏体积内, 此时沉积的能量最大, 但与离子 LET 值不成正比. (c) 图中灵敏体积处于 Bragg 峰右侧, 离子在灵敏体积中沉积能量较小. 对于图 (b)、(c) 所示情况, 因沉积能量 $\Delta E = \int_h^{h+d} \text{LET}(x)dx$ 与辐照离子入射时的 LET 值不成正比, 所测出的 σ -LET 曲线将严重偏离 weibull 函数分布形态.

3 数据处理

下面我们根据上述物理图像, 对图1中 IDT7164 的数据进行分析和处理. IDT7164 的 σ -LET 曲线随 LET 值增大而很快下降, 表明 IDT7164 相对于辐照离子有较厚的死层, 当这些高 LET 端的重离子穿透死层到达灵敏层后, 因剩余能量很有限, 因而所沉积的能量很小, 导致的翻转率很低, 如图 3(c) 所示.

图4是辐照离子能量随硅片入射深度的变化, 可以看出, S(72 MeV)、Cl(84 MeV)、Br(73 MeV)、Cu(119 MeV)、I(220 MeV) 5 种离子虽然入射能量和 LET 值较高, 但在硅中的射程均在 $23\mu\text{m}$ 以下, 从图1可以知道, 它们都没有引起 IDT7164 器件的翻转, 说明该器件的死层厚度应该在 $23\mu\text{m}$ 左右. 这些离子或者无法穿透死层, 或者即使穿透死层到达灵

引起翻转. 该模型并不区分不同电荷传输机制, 如漏斗效应、电荷扩散、复合及离子径迹结构等产生的影响.

对于特定的器件, 入射离子在灵敏体积中沉积能量的多少, 不仅取决于入射离子的 LET 值, 同时要看离子的射程以及 LET 随入射深度的分布等. 图3所示为3种典型情况. 在 (a) 图中灵敏体积处于 LET- x 曲线的线性段, 此时离子在灵敏体积中沉积的能量基本上正比于入射离子的 LET 值, 即 $\Delta E \approx d \cdot \text{LET}$. 一般情况下, 用射程足够长的重离子来辐照死层和灵敏层都较薄的器件, 可以满足这种情况, 因此, 在这种条件下用 σ -LET 曲线来描述器件的粒子翻转响应特性基本反映了其物理本质, 此

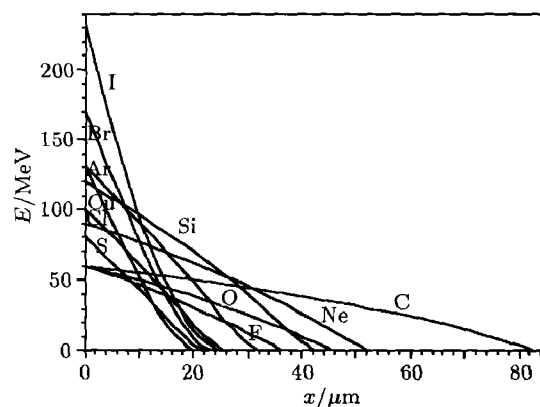


图4 不同离子能量随在硅中入射深度的变化
Fig.4 The energies of various incident ions as a function of their depths in silicon

敏层, 但剩余能量很小, 因而在灵敏层中所沉积的能量小于产生翻转的沉积能量阈值 (临界电荷), 从而不能引起翻转。

假设 IDT7164 器件的死层厚度为 $h(\mu\text{m}) = 21, 22, \dots$; $d(\mu\text{m}) = 1, 2, \dots$ 。对于假定的 (h, d) 值, 可以由 TRIM 程序^[9] 计算出辐照离子在厚度为 d 的灵敏体积内沉积的能量:

$$\Delta E = E(h) - E(h + d). \quad (1)$$

这里, $E(h)$ 是辐照离子能量随在硅中入射深度 h 的变化, 如图 4 所示, 由 TRIM 程序计算得到, 如果离子终止于灵敏体积内部, 则:

$$\Delta E = E(h) - E(r_0). \quad (2)$$

其中, r_0 为离子在硅片中的射程。

前面已经谈到, 灵敏体积中沉积的能量才是引起单粒子翻转的最本质的因素, 因此, 翻转截面随沉积能量的变化曲线才真正反映了单粒子翻转的物理本质, 符合 Weibull 函数分布:

$$\sigma = \sigma_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{E - E_0}{W} \right)^s \right] \right\}. \quad (3)$$

其中, σ_0 为饱和翻转截面, E_0 为产生翻转的沉积能量阈值 (临界电荷), W 、 s 为 Weibull 函数的形状因子。

所以, 假定的死层和灵敏层厚度 (h, d) 值越接近真实值, 所得到的 σ - ΔE 曲线也越接近于 Weibull 函数分布。对前面假定的各种 (h, d) 值的组合 (h, d) 进行上述的数据处理, 求出对应的 ΔE 值并画出 σ - ΔE 曲线, 然后用上述的 Weibull 函数进行拟合, 则拟合误差最小的 (h, d) 应该最接近于器件的实际值。这里拟合误差取如下形式:

$$f_{\text{fit}} = \frac{\sum_{i=1}^n \exp \{ \ln [\text{abs}(\sigma_d / \sigma_w)] \}}{n}, \quad (4)$$

其中, σ_d 为测量值, σ_w 为对应的拟合值, n 为数据点的个数, f_{fit} 表示翻转截面的测量值是 Weibull 函数拟合值的 f_{fit} 或 $1/f_{\text{fit}}$ 倍。

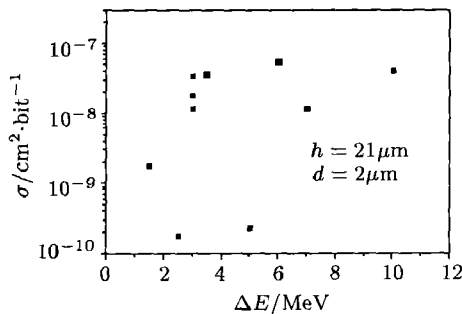


图 5 $h = 21\mu\text{m}$, $d = 2\mu\text{m}$ 时的处理结果
Fig.5 The data processing result with the assumption of $h = 21\mu\text{m}$ and $d = 2\mu\text{m}$

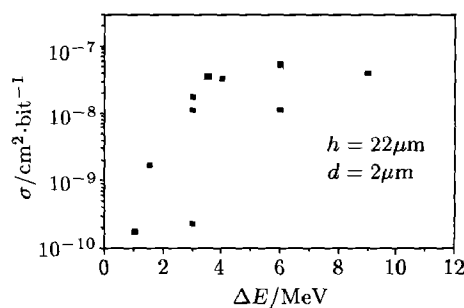


图 6 $h = 22\mu\text{m}$, $d = 2\mu\text{m}$ 时的处理结果
Fig.6 The data processing result with the assumption of $h = 22\mu\text{m}$ and $d = 2\mu\text{m}$

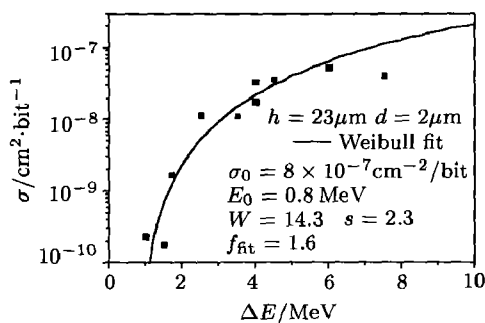


图7 $h = 23\mu\text{m}$, $d = 2\mu\text{m}$ 时的处理结果
Fig.7 The data processing result with the assumption of $h = 23\mu\text{m}$ and $d = 2\mu\text{m}$

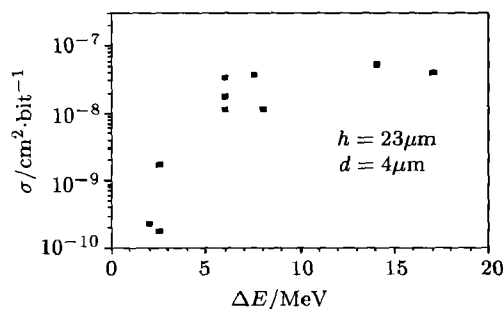


图8 $h = 23\mu\text{m}$, $d = 4\mu\text{m}$ 时的处理结果
Fig.8 The data processing result with the assumption of $h = 23\mu\text{m}$ and $d = 4\mu\text{m}$

图5—9分别给出 (h, d) 值为 $(21, 2)$ 、 $(22, 2)$ 、 $(23, 2)$ 、 $(23, 4)$ 、 $(23, 6)$ 情况下的处理结果, 是比较典型的情况, 大量的其他组合下的结果这里没有给出. 显而易见, $h = 23\mu\text{m}$, $d = 2\mu\text{m}$ 是最符合 Weibull 函数分布的结果, 拟合参数为: $\sigma_0 = 8 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$, $E_0 = 0.8 \text{ MeV}$, $W = 14.3$, $s = 2.3$; 拟合误差为: $f_{\text{fit}} = 1.6$, 在一系列处理结果中, 该拟合误差是最小的. 因此认为, 对 IDT7164 器件, 其死层厚度 $h = 23\mu\text{m}$, 灵敏体积厚度 $d = 2\mu\text{m}$, 沉积能量阈值 $E_0 = 0.8 \text{ MeV}$ (得到近似的 LET 阈值为: $L_0 = E_0/d = 1.72 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$), 饱和截面 $\sigma_0 = 8 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$. 与文献 [10] 中 IDT7164 的 SEU 数据: $L_0 = 4 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$, $\sigma_0 = 12.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 符合得较好.

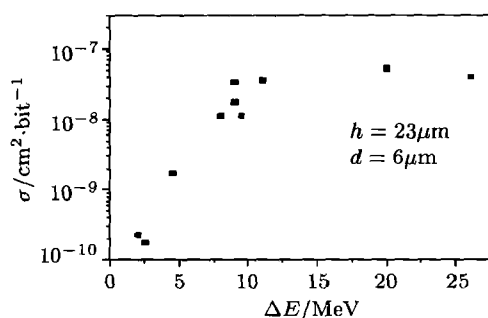


图9 $h = 23\mu\text{m}$, $d = 6\mu\text{m}$ 时的处理结果
Fig.9 The data processing result with the assumption of $h = 23\mu\text{m}$ and $d = 6\mu\text{m}$

实验数据处理结果的误差来源除实验本身的误差外, 还有如下几个方面: (1) 不同时间、不同地点、不同加速器及测试设备所产生的误差; (2) 有限的点带来的拟合误差; (3) 用这种方法估算灵敏体积的死层厚度、灵敏层厚度等参数, 是建立在 RPP (Rectangular Parallel Piped) 模型基础上的, 即前面所提到的, 将灵敏体积假设为一个长方体, 这种长方体模型本身就是抽象出来的概念, 是一个统计平均值, 实际的灵敏体积形状也许和长方体有很大偏差, 因此, 测量的数据点越多, 处理结果就越接近统计平均值; (4) IDT7164 的 SEU 数据中缺少接近或达到饱和截面的点, 这对数据处理结果的精确性影响相对较大.

4 讨论

根据单粒子翻转的物理机制 [2]—[5], 导致翻转的直接变量是离子在灵敏体积内沉积的能量 (电荷), 通常情况下之所以用离子的线性能量传输密度 LET 作为自变量, 原因是: 首先, 入射离子的 LET 值可以通过实验直接测量, 而离子在器件灵敏体积内沉积的能量则无法直接进行测量; 其次, 对于大多数器件, 死层和灵敏层都较薄, 器件的灵敏体积处

于离子 LET- x 曲线的线性段, 此时离子 LET 值正比于在灵敏体积中沉积的能量. 而对于射程较短的离子, 如果灵敏体积正好处于 LET- x 曲线 Bragg 峰右侧附近, 则入射离子的 LET 值与灵敏体积中沉积的能量远不成正比, 所测的数据点必将大大偏离 Weibull 函数分布.

前面对 IDT7164 的处理方法是因为受离子能量的局限没有获得满意结果的情况下所采用的, 但却得到了器件的死层厚度、灵敏体积厚度等这样一些关键参量, 这些参量用其它实验方法往往很难直接进行测量, 在进行在轨预测时, 一般都根据经验给出估算值, 比如灵敏层厚度一般取 $2\mu\text{m}$. 在实验中如果使用上述原理, 我们便得到了一种探测器件灵敏体积参数的有效实验方法, 即: (1) 用一组长、短射程相结合、并具有一定 LET 值范围的离子辐照被测器件, 并测量每种离子产生的翻转截面 σ . (2) 设定器件的死层厚度 h 和灵敏层厚度 d . (3) 根据公式 (1) 或 (2) 计算离子在灵敏体积中沉积的能量 ΔE . (4) 画出 σ - ΔE 曲线, 并用 Weibull 函数拟合, 根据公式 (4) 计算出拟合误差; (5) 重复 (2)~(4) 步, 直到筛选出拟合误差最小的 σ - ΔE 曲线, 所对应的 h 、 d 便是最符合器件实际情况的值. 上述方法也可以编成计算机软件, 从而使数据处理程序化.

将上述方法进一步推广, 我们还可以根据不同情况有针对性地选用不同方法. 比如, 使用单一出射离子, 通过改变离子能量, 得到一系列具有较宽 LET 值覆盖范围和射程变化范围的离子束组来辐照器件, 处理方法与上述相同. 或者使用某种单一离子, 无需改变离子能量, 而逐步改变被测器件的倾角, 也可以达到同样的目的. 总之, 究竟选用哪一种方法, 应根据实验条件而定, 比如, 回旋加速器上, 离子种类调节不方便, 而且申请到的机时又十分宝贵, 采用后一种方法, 即使用单一辐照离子调节器件倾角的方法可省时省力; 而对于直线加速器, 方法的选择要灵活得多. 在加速器上运用上述方法测量器件的 SEU 参数, 正是我们下一步拟开展的实验工作.

参 考 文 献

- [1] Pickel J C. Single-event effects rate calculation. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1996, **43**(2):483—495
- [2] Mclean F B, Oldham T R. Charge funneling in n-and p-type Si substrates. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1982, **29**(6):2018—2023
- [3] Hauser J R, Diehl-Nagle S E, Knudson A R K, Campbell A B C, Stapor W J, Shapiro P. Ion track shunt effect in multi-junction structures. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1985, **32**(6):4115—4121
- [4] Campbell A B C, Knudson A R K, Shapiro P, Patterson D O, Seiberling L E. Charge collection in test structure. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1983, **30**(6):4486—4492
- [5] Zoutendyk J A Z, Schwartz H R S, Nevill L R. Lateral charge transport from heavy ion tracks integrated circuit chips. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1988, **35**(6):1644—1647
- [6] Miroshkin V V, Tverskoy M G. Two parameter model for predicting SEU rate. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1994, **41**(6):2085—2092
- [7] Barak J, Levinson J L, Akkerman A, Lifshitz Y. A simple model for calculating proton induced SEU. *Proc. 3rd RADECS Conf.*, 1995. 431—436
- [8] Calvel P, Barillot C, Lamothe P, Ecoffet R, Duzellier S, Falgere D. An empirical model for predicting proton induced upset. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1996, **43**(6):2827—2832
- [9] Ziegler J F. The Stopping and Ranges of Ions in Matters. Pergman Press. Vol.2—6, 1977—1985
- [10] Roga R, Kolasinski W A K, Osborn J V, Eider J H, Chitty R. SEU test techniques for 256 K static RAMs and comparisons of upsets induced by ions and protons. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1988, **35**(6):1638—1643

A METHOD FOR PROCESSING SEU DATA

HUANG Jianguo HAN Jianwei LIN Yunlong HUANG Zhi

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

LU Xiuqin ZHANG Xin FU Changbo GUO Jiyu ZHAO Kui

(Chinese Academy of Atomic Energy Research)

Abstract

Recently we carried out SEU measurements of some devices in a heavy ion accelerator. Because the ions with higher LET values don't have larger ranges in Silicon, when they are used to probe a device with thick die layer, they are either not able to reach the sensitive volume, or deposit very limited energy in the sensitive volume even though they reach there, as a result, the measured σ -LET curve greatly deviates from weibull function. These kinds of data are usually regarded as unsatisfactory and discarded. In fact, these data may contain very important physical information, and if processed properly, can provide some key parameters about the sensitive volume. To introduce the suggested data processing method, the SEU data for IDT7164 is processed as an example, from which such key parameters as the die layer thickness, the sensitive volume thickness, as well as the threshold of deposited energy for upset are extracted, which are well in agreement with abroad measured results. These parameters are not only very important for SEU sensitivity evaluation of onboard devices, but also difficult to acquire through other experimental methods.

Finally, based on the introduced method, some preliminary thoughts are put forward about how to use combination of ions with large and short ranges to probe the key parameters about sensitive volume of a device. Furthermore, how to select proper combination of ions according to the characteristics of different domestic accelerators is discussed.

Key words Single event upset, Cross-section, LET, Sensitive volume