

《科技情报》专题报告

内部参考

电控仪 - 36

注意保存

电子元器件在辐射环境中
使用情况综述

第二研究设计院

一九七四年九月

目 录

- 一、引 言
- 二、国外电子元器件的抗辐射性能
- 三、电子元器件的抗辐射措施
- 四、电子元器件在反应堆工程上应用的情况
- 五、结束语

一、前言

射线同物质的相互作用可以引起物质的物理、机械、电气或化学性能的变化。这种作用称为辐射效应。

电子材料的辐射效应，一般有两种形式。一种是位移效应：即入射粒子和被辐射的材料原子核发生碰撞而产生的一种效应。另一种是电离效应：即当入射粒子穿进物质和原子中的电子相互作用时，入射粒子把足够的能量传给电子，使电子脱离轨道，此时被辐射的物质便发生电离。

电子，质子，中子和 γ 射线对电子材料均能产生辐射效应。对反应堆来说产生辐射损伤效应的主要形式是中子和 γ 射线。当中子和 γ 射线同物质相互作用时产生了高能电子，这些电子再次同物质相互作用，就会引起物质的更大损伤。材料的辐射效应一般分为瞬时效应和永久效应两类，两者对材料的性能均有影响，但其影响程度不同。永久效应是属破坏性的一种效应。

能引起辐射效应的辐射源有：反应堆、核爆炸、宇宙射线以及千居里级以上的强放射性同位素源。例如，一枚一百万吨量级的核武器在空间爆炸时所造成的辐射环境为：距爆炸中心约32公里的范围内，至少存在有 10^{18} 中子/厘米²的中子通量；距爆炸中心约160公里内产生的 γ 射线剂量率约为 10^7 拉特/秒。（注：1拉特 $\sim$ 100尔格/克）

辐射对电子元器件和整个数据处理系统的影响，对空间和防御系统的科学家来说是不可缺少的知识。同样，对从事原子能工业控制和仪表研究设计的科学技术工作者也是不可缺少的知识。

随着反应堆堆芯检测技术的发展和运用，辐射效应对堆芯使用的检测装置提出的特殊要求，是一个很重要的问题。国外在这方面进行了大

量工作，有很多文献资料可作参考，这个问题很值得我们注意和重视。

下面就电子元器件抗辐射的有关资料作一简要报导，供大家参考。

二、国外电子元器件的辐射性能

辐射对电子元器件的影响程度，取决于辐射的类型和剂量强度、辐射能谱、被辐射元器件所用的材料以及环境（温度、压力、湿度）等。在强辐射环境中工作的普通电子元器件，易受辐射损伤，严重的甚至完全失效。在未加固的电路中，就中子辐射而言，一般半导体易损伤的中子通量极限为 10^{13} 中子/厘米²。引起半导体器件暂时失效的 γ 射线的极限剂量率约为 10^5 拉特/秒。

1. 电子材料的抗辐射性能

有机材料在辐射环境下容易引起损伤，它表现为物理机械性能，尺寸稳定性及电气性能等方面的变化。聚四氟乙烯在 γ 剂量为 8.7×10^5 拉特下，大部分裂介，其熔粘度减低几个数量级；在 γ 剂量为 4.35×10^6 拉特下，每克聚四氟乙烯有 3.6 微克的氟气放出来；在中子通量为 5×10^{13} 中子/厘米² 或 γ 射线剂量为 $10^4 - 10^5$ 拉特时就发生脆变。而聚苯乙烯对辐射量为稳定，在中子通量为 2×10^{16} 中子/厘米²，或 γ 射线总剂量达 10^6 拉特时，未发生损坏现象。

辐射对聚乙烯有如下一些效应

- (1) 释放出氢和低分子量的烷烃。
- (2) 在分子间生成 C—C 键，这些键使聚合物变为部分不熔。
- (3) 不饱和度增加。在低剂量下，不饱和度与剂量成正比，随后趋向一个最大值。
- (4) 结晶性破坏。在室温下以晶形存在的物料的百分数随剂量增加而

减少，最后完全消失。

(5)改变颜色。辐射后颜色变黄。

(6)氧化反应。在氢存在下进行辐射时，特别容易在表面附近发生氧化。

一般有机材料的抗辐射性能较差。在这些材料中，环状结构比长链结构有较好的抗辐射性能，但也不超过 10^8 拉特这一剂量级。

在各类电子材料中，一般无机材料的抗辐射性能较好，其中金属及其合金的抗辐射性能最好。辐射对金属及其合金产生两种效应，一是机械性能的退化，二是电阻率变化。在室温下铜、银、镍铂及其合金，在慢中子通量为 10^{18} 中子/厘米² 下，其电阻率最大增加仅百分之几。用于线绕电阻器中的铜—镍、镍—铬在快中子通量为 2×10^{18} 中子/厘米² 时，其电阻率最多增大 0.8%，且无永久性变化。

石英、云母、陶瓷和玻璃等无机材料均具有较好的抗辐射性能，这些材料可以在中子通量为 10^{18} 中子/厘米²、剂量为 10^8 拉特以上的辐射环境下工作。

对于半导体材料来说，在中子通量为 $10^{18} - 10^{19}$ 中子/厘米² 范围内的辐射环境中，其性能不会产生显著的变化。其中玻璃半导体的抗辐射性能最好。一般在快中子通量为 1.2×10^{19} 中子/厘米²，γ射线剂量率为 2×10^{11} 拉特/秒时，它的性能不会有显著的变化。

2. 半导体器件的抗辐射性能

半导体器件和集成电路在电子系统中使用最广泛，但在核辐射环境中它是一个薄弱的环节（即对核辐射敏感）。参见图 1、图 2。

可控硅整流器和单级晶体管最容易受辐射损伤。在 10^{18} 中子/厘米² 的中子通量下，其参数就开始衰退，在质子通量为 5×10^8

质子/厘米²时参数出现较严重衰退，在电离辐射总剂量为 5×10^2 拉特（硅）时，就出现严重的参数衰退。

双极功率晶体管和低频晶体管是一类易受辐射损伤的器件，高频晶体管好一些。双极晶体管对 γ 射线引起的电离效应和中子引起的位移效应特别敏感。 γ 射线辐射将使晶体管产生瞬时光电流（光电流的大小正比于 γ 射线的剂量率），并且使晶体管的存储时间增加。中子辐射则将使晶体管的正向电流增益下降、饱和电压（ V_{CEs} ）和击穿电压（ βV_{CBO} ）增大。

结型场效应管的抗辐射性能比双极晶体管好，同时也比MOS场效应晶体管好。位移效应主要引起跨导、漏——源电流、夹断电压等三个参数的变化。一般结型场效应管，在中子通量为 10^{13} 中子/厘米² 时，其参数出现较小的变化，在中子通量为 $10^{14} - 10^{15}$ 中子/厘米² 时出现严重损伤，重掺杂的器件能经受 $10^{15} - 10^{16}$ 中子/厘米² 的中子辐射。电离效应主要引起栅——漏电流的变化，当 γ 射线剂量超过 10^6 拉特（硅）时，栅——漏电流急剧增大。在剂量率高于 10^6 拉特（硅）/秒时，就容易损坏。

对于MOS场效应晶体管来说，电离效应是引起参数退化的主要机理，其中最敏感的参数是阈值电压，市售商品，在 $10^4 - 10^5$ 拉特（硅）剂量下，其阈值电压常常漂移好几伏。

一般PN结二极管，主要是中子辐射引起其体内电阻的变化以及 γ 射线引起光电流。例如IN₆₆₂二极管在 γ 射线剂量率为 10^5 拉特（硅）/秒时，所产生的光电流达4.3毫安。IN₆₆₂二极管在 10^{13} 中子/厘米² 的中子通量辐射下，其内电阻大约增大125%。

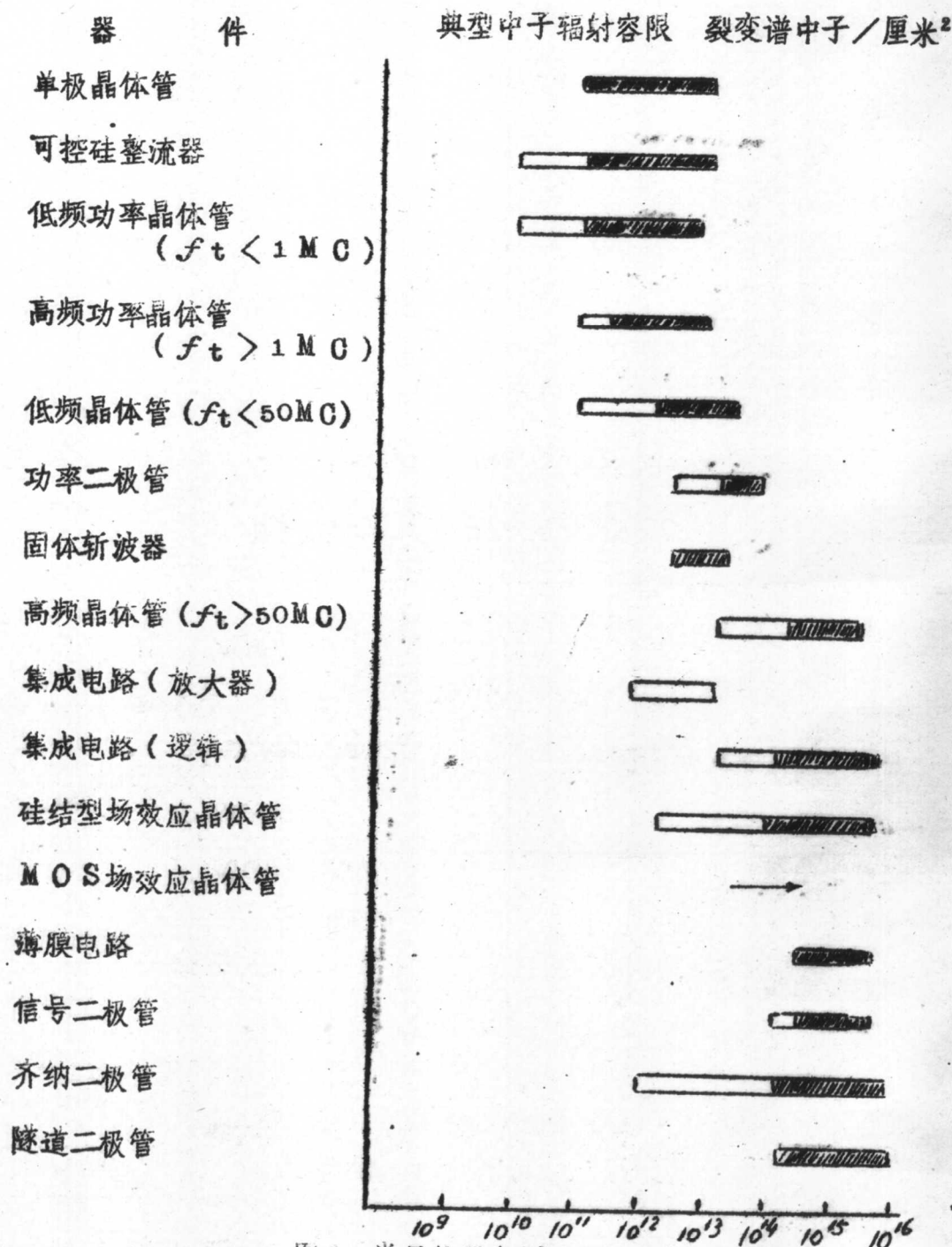


图 1 半导体器件对中子的相对灵敏度

中等~严重程度的参数衰变
 轻微~中等程度的参数衰变
 — 不清楚

器 件

γ 射线容限 拉德 (硅)

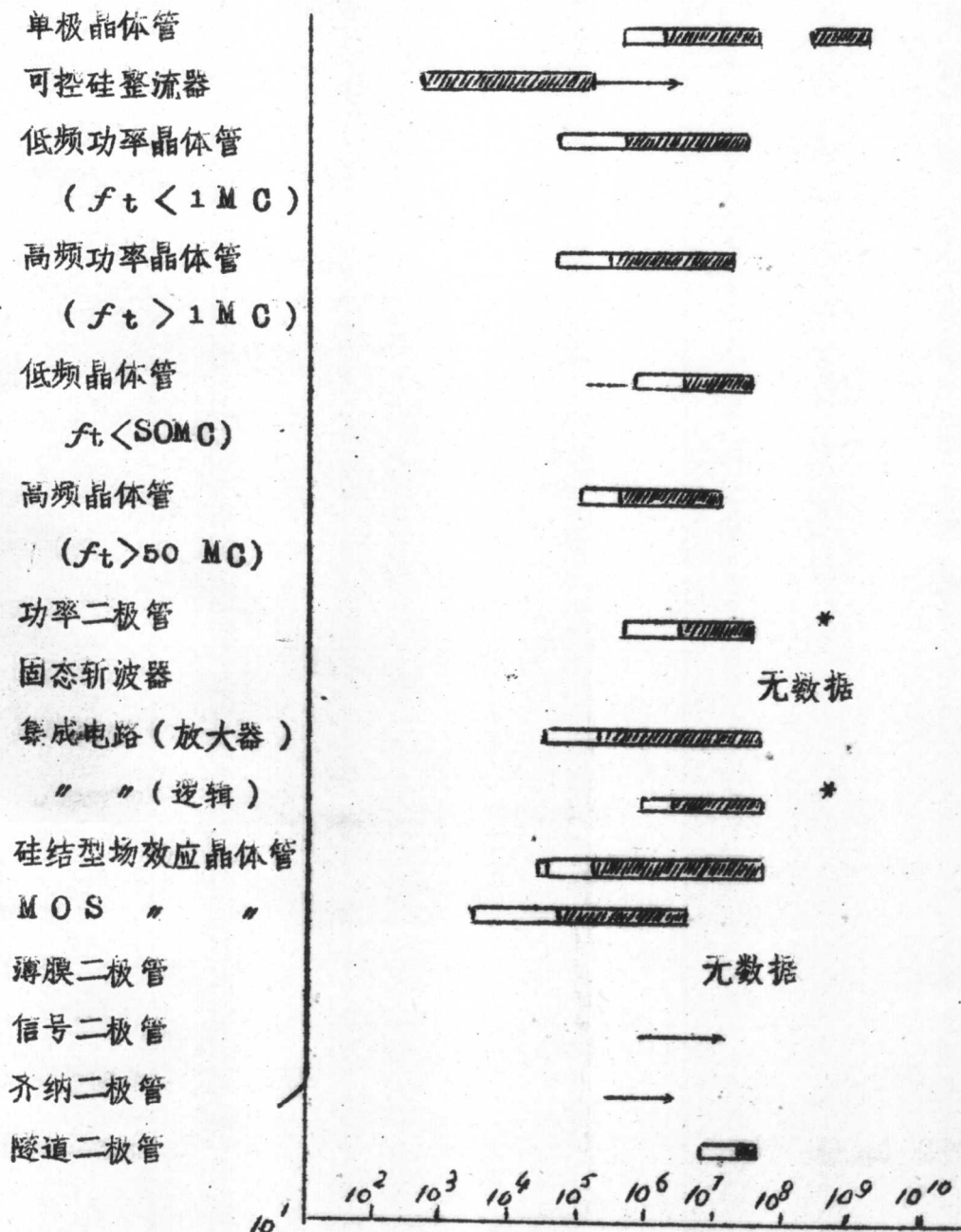


图2 半导体器件对 γ 射线的相对灵敏度

* 仅是位移效应

半导体器件辐射损伤趋势

类 型	工作参数	随剂量变化	说 明
P N 结 二极管	正向电压	增大	由于掺杂分布的缘故具有低击穿电压的快速二极管对永久性效应不灵敏。
	反向击穿电压	稍微增大	
	反向漏电流	增大	
	上升时间	增大	
	存贮时间	减小	
隧道二 极管	峰电流	稍微减小	因为重掺杂，除非较高的辐射剂量否则不受影响。
	谷电流	增大	
双 极 晶体管	电流增益	减小	高频、低击穿电压、外延的器件抗辐射性较好。
	反向漏电流	增大	
	饱和压降	增大	
结型场 效应管	跨导	减小	比双极晶体管器件有更强的抗辐射能力
	漏电流	增大	
	夹断电压	减小	
M O S 场效应 管	跨导	减小	由于电荷存贮在氧化层中，电荷辐射容易引起损伤
	阈值电压	增大	
	沟道电阻	增大	
可控硅 器 件	控制极触发 电流	增大	与此种器件类似的选控电流增益的新器件结构能增加辐射容限。
	控制极触发 电压	增大	

3. 电子管的抗辐射性能

在辐射环境中，电子管比较稳定可靠，一般比半导体器件的抗辐射性能高两个数量级。超小型和小型电子管比其它类型的玻璃电子管有较高的抗辐射能力，这主要是由于缩小了玻璃外壳的尺寸及玻璃与焊缝的尺寸。

电子管的永久性失效，一般是由辐射使玻璃封装失效所造成的，无硼玻璃具有较高的辐射能力，它能经受住高达 10^{18} 中子/厘米² 的中子通量辐射。陶瓷电子管比类似的玻璃电子管具有更强的抗辐射能力，但存在残余放射性的问题，另外，金属与陶瓷焊接也是一个很困难的问题。参见图 3。

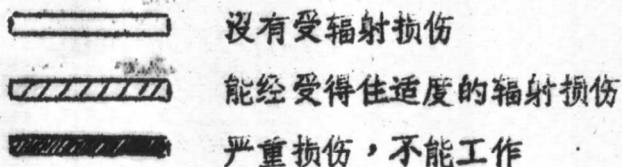
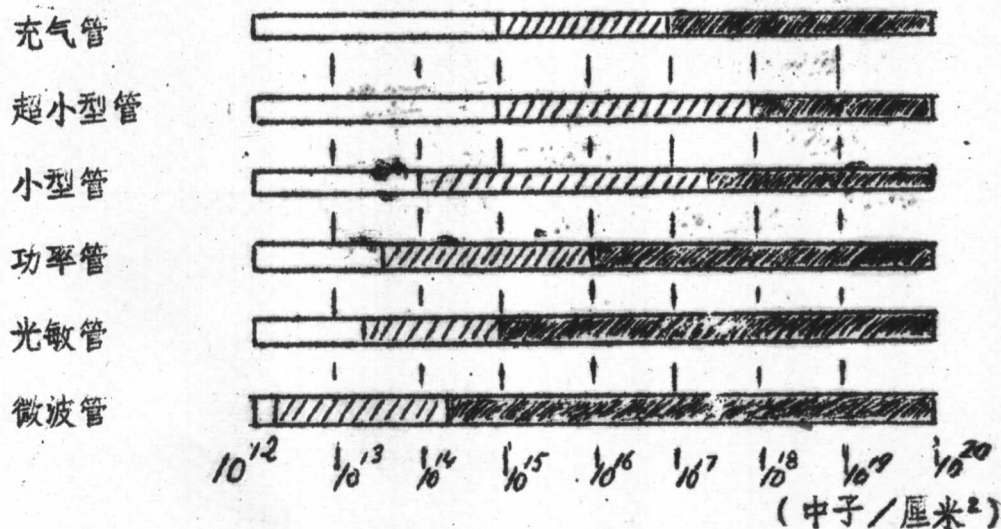


图 3 电子管受辐射的影响

4. 集成电路的抗辐射性能

在集成电路中包含有源元件和无源元件，集成电路在辐射环境下的失效主要是有源元件引起的。对于双极型集成电路来说，位移效应主要引起双极晶体管增益下降，饱和电压增加。对MOS集成电路来说，则是由于 γ 射线的电离效应引起阈值电压的漂移。对大多数线性集成电路来说，辐射时产生的电噪声是主要的。未采取抗辐射措施的普通双极型集成电路和MOS集成电路的抗辐射能力较低，MOS集成电路采取抗辐射措施后，其抗辐射性能显著提高。

根据统计规律，在 5×10^{12} 中子/厘米² 的中子通量辐射下，仅有少数集成电路失效。大多数集成电路在 5×10^{13} 中子/厘米² 的中子通量辐射下失效，少数集成电路能经受 3×10^{14} 中子/厘米² 的中子通量辐射。实际测试水平为： 5×10^{12} — 3×10^{14} 中子/厘米²（95.4%的集成电路）。

双极型集成电路在 10^6 拉特（硅）下能正常工作。MOS集成电路大约在 10^4 拉特（硅）下能正常工作。在 γ 射线剂量率为 10^6 拉特（硅）/秒下，数字集成电路将产生逻辑错误，在 10^{11} 拉特（硅）/秒下，将产生永久性破坏。

5. 阻容元件的抗辐射性能

γ 射线的电离效应在电阻器中引起漏电流，从而使其阻值变小。漏电流是由光子和电子的碰撞产生电子散射建立起来的瞬时电流。中子位移效应引起的电流则使其阻值增大，阻值大变化越大，例如， $1\text{ M}\Omega$ 和 100Ω 相比，其变化的百分比大3-4倍。

不同类型的电阻器的抗辐射水平如下：

线绕电阻器	$10^{15} - 10^{16}$ 中子/厘米 ²
氧化膜电阻器	10^{12} 中子/厘米 ²

碳合成电阻器

10^{14} 中子/厘米²

一般说， γ 射线的电离效应对电阻器的辐射效应並不严重，在 10^7 拉特/秒时才开始有较大的影响。

电容器在辐射环境下将使其电容值、损耗因数和漏电阻产生变化。 γ 射线的电离效应主要使电容器的漏电阻减小，从而使电路的时间常数也减小，结果，可能使电路失效。根据电容器的等效电路，在 10^8 拉特/秒辐射时，近似地计算出 0.01 微法的云母电容器和陶瓷电容器的漏电阻分别为 $21\text{ K}\Omega$ 和 $1.3\text{ K}\Omega$ 。

一般在小于 10^{14} 中子/厘米² 的中子通量水平下，辐射对电容器影响不大，对于大多数电容器的抗辐射性能，对快中子通量的容限为 10^{14} 中子/厘米²。

6. 继电器和开关

对继电器和开关来说，辐射效应主要是使其绝缘材料和结构材料损伤。

一般继电器在快中子通量为 6.5×10^{14} 中子/厘米² 下能正常工作。有些微型开关在 $4 \sim 6 \times 10^6$ 拉特到 10^{14} 中子/厘米² 的辐射环境中出现外壳裂损，一般在 10^7 拉特的 γ 射线辐射下只有小的衰退，在 1.2×10^8 拉特的 γ 射线辐射下出现严重的外壳裂损。

三、电子元器件的抗辐射措施

抗辐射措施，一般从两个方面来考虑。一是从电子元器件的材料、结构和工艺上想办法，这是根本措施。二是从系统电路上采取必要的措施。国外在这两方面都进行了不少工作，报导有关文献资料也比较多，这里只作重点介绍，不予一一赘述。

1. 对双极晶体管和双极集成电路

双极晶体管受辐射时，电流增益下降，反向漏电流、饱和压降和击

穿电压等增大，对于经过表面钝化的管子，电流增益的下降是最主要的影响。而对电流增益影响最大的是中子和 γ 射线。这是因为，双极晶体管是少数载流子的器件，其电流增益的大小，在忽略了发射极注入效率的情况下，主要取决于发射极注入到基极的少数载流子能被集电极收集到的比例。由于中子的位移效应，改变了晶体的有序结构，形成了高密度的复合中心和缺陷，使得基极的少数载流子的寿命显著下降，迁移率也下降，电阻率增大，电流增益下降。

措施

- (1)表面钝化处理，可减少电离效应的影响。
- (2)尽可能减少基区宽度。
- (3)小的几何图形（包括结面积要小），特别是尽量减小发射极的周长。
- (4)重掺杂。
- (5)抽空管壳中的气体。
- (6)严格质量控制，保证表面均匀。
- (7)使晶体管工作在（或接近）电流增益对集电极电流的峰值，这样可以削弱位移效应并使电离效应减至最小。
- (8)对器件进行 γ 辐射或热处理。

2 MOS晶体管和MOS集成电路

由于MOS器件是多数载流子的器件，位移效应引起少数载流子寿命的降低不会产生有害的影响。但是电离效应却会使MOS器件的性能严重退化。电离效应能使栅极绝缘层中积累过多的正电荷，从而引起永久性阈值电压漂移。在电离辐射剂量远低于引起阈值电压漂移前，有可能引起衬底结光电流的瞬时效应。

MOS器件的永久性辐射效应。电离效应在栅极绝缘层（二氧化硅）

中产生电子空穴时，空穴相对说是不移动的，它将很快被二氧化硅层中的陷井所俘获。而电子是可移动的，它在内建电场或外加电场的作用下会漂移，一直到重新与被俘获的空穴重合，或从二氧化硅逃脱出去，从而在二氧化硅层中留下被俘获的空穴（正电荷），当二氧化硅层中的电场较强时，大多数电子逃掉了，被俘获的空穴出现在硅——二氧化硅界面上，正电荷在硅中感应出一负的镜像电荷，这就表明MOS晶体管的阈值电压移向更为负的一端。在N型沟道器件断开或P型沟道器件导通之前，栅极必须附加一大得足以抵消此负电荷的负电压，这就是阈值电压的漂移。

MOS器件的瞬时辐射效应。对于MOS器件产生瞬时辐射效应的主要原因是漏电流的形成，当MOS器件受到电离辐射的作用时，在反偏压的漏——衬底PN结上产生瞬时光电流。这种瞬时光电流随漏偏压、辐射剂量率和漏——衬底PN结面积等的增大而增大，而且其影响程度对N型沟道器件比P型沟道MOS器件要大些。如果光电流足够大，由于热而产生损伤可能使电子系统产生永久性失效，对于数字集成电路，光电流会改变门电路的“开——关”状态，从而产生假信号。虽然辐射停止后系统仍能工作，但这种瞬时失效对于数字计算机、控制测量系统、各种电子仪器是不允许的。

措施

(1) 採用掺杂的二氧化硅薄膜作栅极绝缘层，如铬、磷、铅等，其中铬最好。在 10^7 拉特（硅）下，掺铬的MOS器件的阈值电压漂移小于1.5伏。

(2) 採用混合夹层的栅极绝缘层。

(3) 用 Al_2O_3 代替 SiO_2 作栅极绝缘层， Al_2O_3 是目前抗电离辐射最有希望的材料。

(4)减小结面积，提高衬底电阻率。

(5)採用互补MOS器件（即CMOS器件），在 10^5 拉特剂量辐射下，CMOS器件的参数未见变化。

(6)採用兰宝石硅外延技术，能显著改善MOS器件的瞬时效应。这种技术不要隔离结，用兰宝石将晶体管元件分开。

对于电路设计的抗辐射措施，这个问题也很重要，但在实际设计中常常被设计者所忽视。暴露在辐射场中的检测装置及其引线的辐照效应，它将影响系统电路的正常工作。例如，用于堆芯中子通量、 γ 射线、压力、温度、流量、液位、位移和应力等参数的检测装置。它们工作在反应堆的辐射环境中，必然会受到中子、 γ 射线和带电粒子的辐射影响。电子电路中的元器件能否抗辐射，这是一个重要因素，而系统电路的抗辐射能力，並不完全取决于元器件的本身。电路设计中採取必要的措施。同样也能有效地提高抗辐射性能。例如，在电路上加限流电阻，它可以防止辐射引起的过大的光电流；利用反偏压二极管，它产生的电流也可以用来抵消 γ 射线引起的光电流；採用适当的去耦、旁路滤波和反馈，它可以消除 γ 射线和中子辐射等不良影响；增大电路的放大能力，可以补偿辐射造成的放大系数下降；选用抗辐射的电子元器件，使其在辐射环境下工作时不会达到临界的辐照射伤值等（有关辐射对电路的效应可参阅参考资料4）。

四、电子和半导体元器件在反应堆工程上应用的情况

在反应堆控制测量系统中，採用了大量的电子和半导体的元器件。主要包括核辐射探测器、核实验室和反应堆核参数测量仪器、反应堆控制保护和装卸料机控制系统、热工参数检测系统、堆模拟装置、巡检装置以及控制计算机等等。

目前，尽管国外有关方面对堆芯检测技术开展了不少研制工作，然

而，据所报导的文献资料看，在国外多数反应堆上除自给能中子探测器、热电偶等放在堆芯外，还有裂变室、中子电离室等探测器均放在靠堆芯的反射层内，堆用电缆放在电离室管道中，它们所受辐射影响较大。其他控制测量装置多数仍集中在远离堆芯的中央控制室。如果堆芯检测装置要同动力堆燃料元件同寿命的话，那么堆芯检测装置必须设计成能在 $10 \times 10^{20} \sim 10^{21}$ 中子/厘米² 的中子通量辐射下工作，国外至今也未研制出这类的堆芯检测装置。

国内，在这方面也进行了一定的研究试验工作，并且取得了不少的试验数据，下面仅就几个问题作一简介。

1. 反应堆中子通量探测器

A、裂变室

它是利用测量裂变核 (U^{235} 、 Pu^{239} 等) 在中子作用下，产生强电离碎片所形成的脉冲电流来测量反应堆的中子通量。

由于它在反应堆内的位置和使用的测量方案不同，所受的辐射也不一样。目前在测量裂变室脉冲计数的方案中，一般测量后提至通量较低的位置，所以辐射对其工作影响不大。如在太强的 γ 辐射场工作时，由于 γ 脉冲的存在会使裂变室的中子灵敏度下降。而当用统计涨落的原理，测量裂变室输出信号的均方值来测量反应堆功率的方案中，则所在的测量位置其中子通量和 γ 场强度都较大，如在某试验堆上用的裂变室，它是在中子通量为 $1 \sim 2 \times 10^{20}$ 中子/厘米²·秒， γ 射线剂量为 3×10^7 伦琴/小时的环境中工作，故必须考虑长期工作时的辐射影响。同时若在高温条件下工作，这一因素还必须予以考虑。

B、中子电离室 (带 γ 补偿)

它是利用测量物质与中子作用下，产生 α 粒子所引起的电离电流来测量反应堆的中子通量。

安放电离室的位置，一般辐射剂量都比较大。如中子通量为 $1 \sim 2 \times 10^{10}$ 中子/厘米²·秒， γ 射线剂量为 3×10^7 伦琴/小时，考虑满功率情况下运行一年则总的积分通量为 $10^{13} \sim 10^{14}$ 中子/厘米²， $10^{11} \sim 10^{12}$ 伦琴。在此条件下进行试验，试验前电离室的绝缘电阻在 10^{11} 欧姆以上。经长期辐射后，绝缘电阻显著下降。

C、自给能中子探测器

国外，西德林根（Lingen）沸水堆使用了各种堆芯中子探测器。特别强调採用自给能中子探测器——钽、铈和钴探测器。经过两年以上的运行观察，性能令人满意。理论研究结果认为用钽和铈作为发射体，其性能将更好，实验证实正在进行之中。

在加拿大皮克林核电站安全系统中，堆芯钴探测器作为堆外电离室的备用设备。钴探测器也用作堆内空间控制。在加拿大根蒂莱堆中採用了钴探测器，但存在一些问题，铈探测器较好。

国内，近几年来也在进行自给能中子探测器的研制工作，並取得了成就。例如，用铈作发射体的自给能中子探测器，把它安放在堆芯。测量铈与中子作用后产生的 β 射线来直接探测中子通量。同时，此种探测器，也可用来监测元件燃耗情况。

用铈丝作发射体，用 Al_2O_3 绝缘，外用不锈钢包壳的自给能中子探测器，它的体积小。如目前正在试制一种为 $\phi 1 \times 20 \text{ mm}$ ，质量为 200 mg ，灵敏度为 $(2 \sim 5) \times 10^{-21} \text{ a/n}\cdot\text{v}$ ，可在最高中子通量为 10^{14} 中子/厘米²·秒的条件下使用。另外，目前正在研制一种用于温度为 250°C ，中子通量达 10^{21} 中子/厘米²，要求绝缘电阻保持在 10^{11} 欧姆以上的自给能中子探测器。

2.堆内电缆

与中子电离室连接的电缆，要求其绝缘电阻大于 10^{12} 欧姆以上。