

半导体器件的辐射效应

洪忠悌

(兰州大学原子核研究所)

摘要: 抗核辐射电子学对于国防和经济建设都有重大意义。为了研究出使电子器件和系统具有抗辐射能力的技术措施,就必须首先研究辐射对电子器件和系统的影响(辐射效应)以及辐射如何对电子器件和系统产生影响(损伤机制)。本文评述了辐射环境、辐射效应和损伤机制、模拟实验方法和设备以及发展概况。

一、研究半导体器件辐射效应的重大意义

在核爆炸后的一定时间和空间范围内,处于核辐射破坏半径内的火箭、人造卫星等飞行器及其它设施将受到强烈的核辐射;随着空间和宇航技术的发展,处于外层空间长期活动的人造卫星和飞船也日益增多,它们的电子系统都将受到很强的空间辐射累积剂量。在核潜艇和航天飞行器中所使用的核反应堆,由于其体积和重量都受到限制,所以其中的控制和测量电子系统必将因屏蔽不足而受到很强的核辐射累积剂量。

上述设备中的电子系统所使用的半导体器件都数以万计,它们的工作都是以对电子运动的控制为基础的,而辐射却会使半导体的晶格原子产生位移和电离等效应,所以一定强度的辐射必将对半导体的电学性能进而对电子系统产生显著影响,使它发生故障,甚至失效。因此,在强辐射环境中,如何保证电子系统正常工作就成为上述设备能否正常运行的关键之一。

为了能研究出使电子器件和系统具有抗辐射能力的技术措施(抗核加固),就必须首先研究清楚辐射对电子器件和系统的影响(辐射效应)以及辐射如何对电子器件和系统

产生影响(损伤机制)的问题,这三个研究方向的结合可称为抗核辐射电子学。它的研究涉及核技术、核物理、固体物理及电子技术等一系列学科,对国防和经济建设均有重大意义。

二、辐射环境

1. 核爆炸产生的辐射环境

核爆炸产生极强的中子、 γ 和x射线以及核电磁脉冲等。x射线能量低,对电子器件破坏作用小。核电磁脉冲对电子器件的破坏半径比中子和 γ 射线还大,但它的破坏机理不同。本文将主要讨论中子、 γ 射线等辐射对半导体器件的影响。

有资料表明:一个由四公斤铀或钚制成的裂变弹头,爆炸时会释放出 10^{25} 个中子,中子平均能量约为1.3兆电子伏。由相同重量的氘氚混合物构成的聚变弹头,爆炸时要放出数量更多的中子,其能量多为14兆电子伏左右。对于采用半导体元件的电子系统,百万吨级的高空核爆炸所产生的中子,其破坏半径为10—30公里。它所产生的 γ 辐射,能造成瞬态损伤的破坏半径可达数百公里。在相同当量的低空核爆炸时,由于空气吸收,中子和 γ 射线的破坏半径将减小到1—10公里。

2. 空间辐射环境

宇宙空间存在着质子、中子、电子及 γ 射线等辐射。在行星附近，原子和电子常被行星磁场捕获而以带的形式存在，其辐射强度是高度和时间的函数。如地球附近以同心环形式存在着两个辐射带——范艾伦辐射带。其内带位于160至8000公里的高度间，它

由质子和电子组成，能产生最大照射量率为100伦琴/小时。外带位于4800至32000公里高度间，它主要由电子组成，能产生最大的照射量率为 10^5 伦琴/小时。多数情况下，范艾伦带的电子和质子已成为宇宙飞船的主要威胁。飞船飞行一年在不同高度上所经受的累积辐射照射量见表一。

表一 飞行一年的累积辐射照射量⁽¹⁾ (伦琴)

飞行高度(公里)	370		925		1850		3700	
90°倾角轨道	外表面	内部 ⁽²⁾	外表面	内部	外表面	内部	外表面	内部
(极区轨道)	5×10^6	1×10^4	2×10^7	1.5×10^6	1.5×10^8	1.5×10^7	9×10^7	4×10^6
30°倾角轨道	2×10^5	1.5×10^4	3.5×10^7	3.5×10^6				

(1) 摘自C. A. Harper, Handbook of Electronic Packaging, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 1969.

其数据主要来自美国飞船《探险者—15》。

(2) 飞船铝蒙皮厚度为0.1英寸。

在星际空间飞行时，将受到宇宙射线、太阳耀斑辐射、太阳风等的袭击。只要飞船离太阳的距离不小于水星距太阳的距离，其所受的空间辐射一般都低于核爆炸爆心附近的辐射强度。但由于飞船飞行持续时间往往很长，所以其累积剂量值就会很大，足以破坏电子系统的正常工作。

空间飞船常使用核动力电源，所以飞船中的电子系统还会受到很强的 γ 或中子辐射。

三、辐射效应和损伤机制

工作于核辐射环境下的电子器件，以半导体器件对辐射最为灵敏，为了对电子系统进行抗核加固，首先必须研究材料和器件的辐射效应和损伤机制。

辐射效应就辐射种类而言，可分为中子、质子、电子、和 γ 射线的辐射效应；就其对半导体材料的影响来看，则可分为永久性位移效应、瞬时电离辐射效应和总剂量电离辐射效应。在核爆炸的环境中，中子主要产

生永久性位移效应， γ 主要产生瞬时电离辐射效应。在空间飞行中，主要考虑电子和质子所产生的永久性位移效应和总剂量电离辐射效应。

1. 位移效应

半导体等单晶材料，其晶格的完善性对材料物理性能的影响极大，所以晶格的缺陷对半导体的电学性能非常敏感。一定能量的中子、质子、甚至电子通过晶体时，会与晶体中的原子碰撞而把能量传递给原子，使它离开原有的平衡位置而进到晶格之间(间隙)的某一新位置上，因而在晶体中产生空格点和填隙原子。如果这个原子获得的能量足够大，它也能碰撞别的原子而产生新的空位和填隙原子。这种级联式的碰撞将持续到有关原子的动能减小到低于位移阈值时为止，于是就造成大量的空格—间隙原子对(即形成缺陷群)。如一个1兆电子伏中子所产生的缺陷群可包含多达200—1000个移位的点阵原子。

半导体材料有三个主要的微观物理参

数,即多数载流子密度 n 、少数载流子寿命 τ 及迁移率 μ ,位移效应对上述参数都有重要影响。

①对多数载流子密度的影响

位移效应产生的缺陷可起陷阱的作用,它束缚多数载流子并使之不能参与导电,这种作用叫载流子去除效应(Carrier removal)。载流子密度 n 随辐射注量 ϕ 的变化可用下式表示:

$$n_{\phi} = n_0 + \phi \frac{dn}{d\phi} \quad (1)$$

式中 n_{ϕ} 和 n_0 各为经受辐照后和前的多数载流子密度。对于硅和砷化镓材料,位移效应都是

使载流子密度减小,即 $\frac{dn}{d\phi}$ 都是负的。随着

辐射注量的增加,载流子密度将逐渐趋近于

本征值,这意味着电阻率增加。对于锗, $\frac{dn}{d\phi}$

不仅与原始电阻率有关,而且与辐射的类型有关,随着辐射注量的增加,锗材料将向低

电阻率P型方向变化。对于以多数载流子为

导电机理的半导体器件,载流子去除效应是使其性能退化的主要原因。

②对少数载流子寿命的影响

辐射形成的缺陷可在半导体材料原子的

禁带内引入附加能级,这就增加了导带电子

与价带空穴之间的复合几率,因而可以认为

“空位-间隙原子对”是少数载流子的复合中心。它增加了与多数载流子复合的几率,即缩短了少数载流子的寿命。

半导体材料的少数载流子寿命是对中子辐射最灵敏的参数。

③对载流子迁移率的影响

在半导体中,载流子除了与点阵原子碰撞外,还与杂质原子碰撞,杂质原子相当于

散射中心。粒子辐射在半导体内所引入的缺陷也可以作为载流子的散射中心,它能有效地降低载流子的迁移率。

辐射引入的位移效应对某些半导体性质的影响还可用表二概括:

表二 辐射对半导体性质的影响

半导体类型	多数载流子密度	多数载流子迁移率	少数载流子寿命
硅	变成本征	退化	退化
锗	接近P型,电阻率 $1\Omega\cdot\text{cm}$	退化	退化
砷化镓	变成本征	退化	退化

2. 电离效应

一定能量的辐射(如电子、质子和 γ 射线等)入射到半导体材料中会引起电离效应,

表三 材料性能变化对器件性能的影响

器件类型	少数载流子寿命退化	多数载流子密度减小	氧化物表面电荷效应
二极管(击穿电压)	○	△	
二极管(漏电,正向电流)	△		○
结型场效应器件	○	△	
MOS 器件			△
双极型晶体管	△	○	
开关器件	△	○	
发光二极管	△		

表四 各类辐射对晶体管参数的影响

粒子类型	粒子能量 (模拟试验)	在25℃下 的效应	对参数的影响
快中子	$>0.1\text{MeV}$	永久	h_{FE} 下降 V_{CES} 上升 I_{CBO} 上升
质子	$>0.1\text{MeV}$	永久	h_{FE} 下降 V_{CES} 上升 I_{CBO} 上升
电子	1—22MeV	瞬时到半永久	$I_{光电}$ 上升 h_{FE} 下降
x和 γ 射线	300—699KeV 1—6MeV	瞬时	$I_{光电}$ 上升

h_{FE} ——共发射极直流放大系数,

V_{CES} ——集电极-发射极饱和压降,

I_{CBO} ——反向漏电流, $I_{光电}$ ——光电流。

它使半导体和绝缘材料的电导率升高，若遇到高强度的辐射源，电离效应能引起很大的电流。电离效应有时还能引起材料的化学变化，在某些情况下，被辐照材料的表面或界面能留下电荷(即电荷俘获)。

3. 辐射对半导体器件性能的影响

辐射会导致半导体材料的载流子密度、迁移率及少数载流子寿命发生变化，由于有些半导体器件的工作取决于少子的运动状态，而另一些器件则主要取决于多子的一些物理性能，因此，材料性能上不同程度的退

化，对不同的器件也起着不同的作用。表三列出了材料性能变化对多种器件性能的影响，其中 Δ 代表主要因素， \circ 代表次要因素。表四列出了各种类型辐射对晶体管参数的影响。

四、模拟试验方法和设备

模拟基本上包括两种形式——分析和环境试验。在分析过程中，可计算元件遭受辐射和电磁脉冲时电路和系统所受的影响。

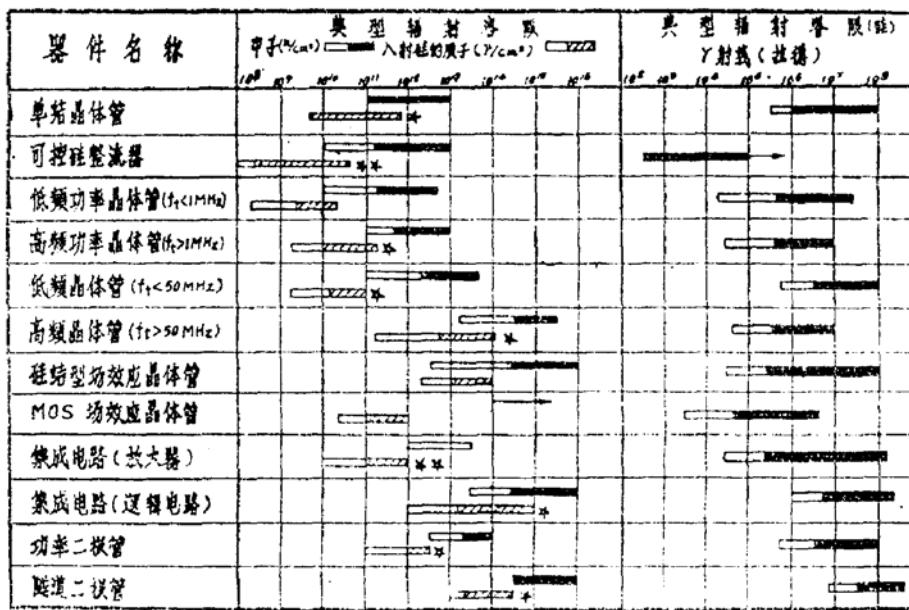


图1. 中子、质子和 γ 射线辐照引起的各种元件参数退化概况(六十年代末水平)。图中空白长条：轻微到中等程度的参数退化；带斜线长条和涂黑长条：中等到严重程度的参数退化或完全失效；单五角星仅是位移损伤；双五角星包括电离损伤。辐射实验用的中子为裂变中子。

半导体器件和系统的环境试验，主要考虑的是核爆炸环境和空间辐射环境，但实验室中，这些环境虽不能得到精确的模拟，但能进行大致的模拟。使用的模拟设备有核反应堆、强流中子发生器、闪光X射线机、电子直线加速器和钴-60源等。其中反应堆主要输出中子和 γ 射线，可用它来进行位移效应和电离效应的实验；强流中子发生器能近似地模拟氢弹和中子弹爆炸时所产生的2.5兆电子伏和14兆电子伏左右的中子辐射环境对半导体器件的影响；闪光X射线机和电子直线加速器通常用来模拟瞬时电离效应；若要

对随剂量而变的电离效应作长时间的模拟时，可用钴-60源。

五、发展概况

在国外，在五十年代中期就已比较集中而大量地开始了辐射效应的研究。因为在此期间，半导体器件的发展已开始引起电子技术的大变革，而半导体器件对辐射又较为敏感，所以引起了人们对辐射效应的关注，但缺乏系统的理论。在六十年代，半导体器件已广泛应用于核武器及空间技术。同时也认

识到对核武器及空间技术的发展来说，提高电子器件及系统抗辐射能力的极端重要性，因而对辐射效应的研究进一步深入，并从材料转向各种半导体器件，同时相应地开展了损伤机制及加固的研究。由于利用了核物理，固体物理及电子计算机等先进科学技术，使辐射效应及损伤机制的研究从表象进入微观，揭示了损伤机制和效应的内在联系，初步建立了损伤机制的理论及物理模型。在此期间，为了进行辐射模拟试验，建立了一系列大型辐射模拟设备及测试设备，如美国建立了脉冲中子反应堆八座、脉冲 x 光机二十四台、直线加速器六台等。在六十年代末，中子、质子和 γ 射线辐照引起的各种半导体元件参数退化概况如图 1 所示。

七十年代，辐射效应及损伤机制的研究已进入成熟阶段，其工作重点已转到大规模集成电路的辐射效应及加固研究，并取得了

重大进展。对晶体管而言，中子辐射容限比六十年代提高了二个量级，电离辐射损伤阈（硅）也提高了二个量级。对 MOS 器件，电离辐射损伤阈（硅）约提高了三个量级。

在八十年代，预计集成电路的辐射容限也会有大幅度地提高。

在国内，这个领域的研究工作开始得较晚比国外落后约十五年左右。目前在辐射效应或损伤机制的研究方面都还有许多工作要做，某些模拟设备尚待完善或建立。虽然这个领域的工作与国外先进水平相比有较大的差距，但是只要我们把科研，教学和生产结合起来，组织多种有关学科协同攻关，并充分利用有关学科的先进技术成果和手段，把辐射效应、损伤机制的研究与辐射加固的研究推广密切结合，这样我们就能在不太长的时间内赶上国际先进水平。