

第 10 章. MMIC (微波单片集成电路) 器件中的辐射效应

C. Barnes和L. Selva

I. 简介

在民用和军用空间航天器(或飞行器)中,使用微电子器件都要求这些器件能够在恶劣的空间环境下执行任务的整个过程中保持它们的功能。这种环境的一个重要特性是存在各种形式的辐射,包括来自人造的辐射。与本章讨论的可靠性的其他方面不同,辐射很独特并且几乎其他所有高可靠性应用对此不作要求,如汽车、医疗和陆地通信。因此,正是由于辐射环境与众不同的特性,理解辐射对空间系统中使用的微电子器件和电路,尤其是MMIC器件的影响是非常重要的。

本章,我们将概述当前有关MMIC器件辐射效应的研究成果。首先,我们简要论述有关辐射环境以及在基于硅的器件(尤其是数字CMOS)中更“典型的”微电子辐射效应的背景知识。当我们讨论MMIC器件中的辐射效应时,我们还将简单对这些效应和其他基于III-V工艺的器件,如砷化镓(GaAs)数字和III-V光子器件,中的辐射效应进行比较。

II. 辐射环境和来源

由于本指南主要针对空间应用,在此我们讨论的重点将放在自然空间辐射环境。但是,记住还存在其他重要的辐射来源也是很必要的。举例来说,许多军事空间资产的设计必须考虑在核武器强辐射环境下维护功能性。近来Messenger和Ash详细论述了这种增强型环境[1]。此外,存在其他特殊的应用可能包括精细定义的辐射要求,如核电站、核废料处理站检测器、高空航空电子和医疗辐射处理。本节的最后我们简单讨论辐射屏蔽的效果。

A. 自然空间辐射环境

空间中的辐射环境与位置密切相关,并且由各种能量和电离状态剧烈变化的粒子构成。因此,辐射要求在很大程度上由任务的性质和轨道决定。对于地球轨道系统而言,如通信卫星,主要的辐射源是地球磁性层(磁气圈)捕获的电子和质子,如图10-1中高度简化的例图所示。这些捕获的电子和质子区域称为范艾伦辐射带(于1958年由探测器1号发现)在海拔大约1000公里到32,000公里之间是很可观的。它们的范围要大于上述的范围,但是此海拔高度范围之外粒子通量级下降得很快。如图10-1中显示的那样,电子和质子的海拔高度分布差别很大。电子的分布,其能量最大可达到大约7 MeV,显示出两个海拔峰值,分别是大约4000公里和24,000公里,从而产生图10-1中显示的两个电子带,并且在内层和外层电子带之间存在一个相对无粒子的“槽”。质子被限制在内层带,但是它们的能量可以远高于电子的能量——高出几百MeV。对于电子和质子来说,能量更高的粒子集中在更低的高度。在较低的能带,每天的粒子通量可能超出 1×10^8 电子或质子/cm²。

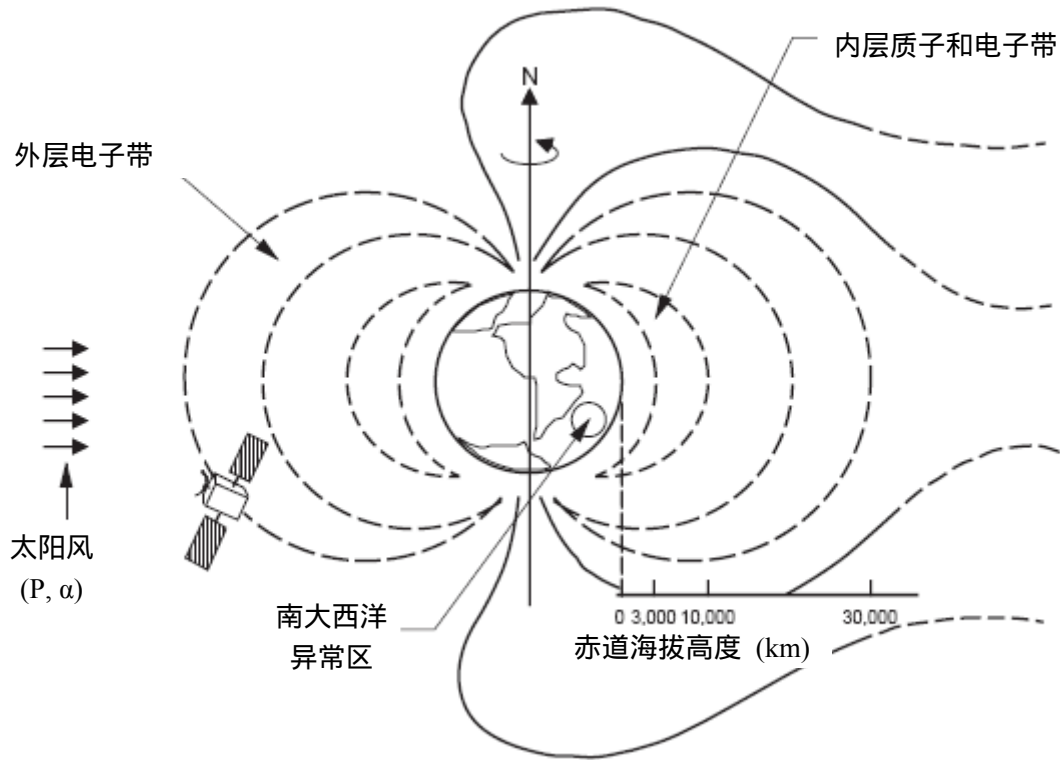


图10-1. 由地球磁性层形成的地球范艾伦辐射带的示意图.

尽管图10-1中的简图表明辐射带相对是对称的，但是这种整体对称性也存在重大例外。举个例子，在地球的极点，外层电子带向下延伸到很低的高度。这些带中的“触角”造成给定高度的粒子通量强烈依赖于倾斜角。另一个非常重要的畸变是由这样一个事实造成的，即地球的地磁场的偶极轴偏离地球的旋转轴大约11度并向西太平洋位移500公里。结果造成离开巴西海岸的地方，范艾伦辐射带向下延伸到大气层的上部，这使得低地球轨道（LEO）卫星在此区域会受暴露在强大的辐射下，此区域称为南大西洋异常区（SAA）。最后，太阳对地球的磁性层的形状也有着重要影响。太阳风在逆太阳的方向会引起一个“头波”和“尾波”，类似于一艘小船在水中滑行的情况，并且会造成磁性层延伸到距地球更远的距离，如图10-1中的示意图表明的那样。

上面简要归纳的范艾伦辐射带的特性得到如图10-2中所示那样的在厚度为 0.2 gm/cm^2 （对于Al（铝）而言近似等于30密耳）的球形屏蔽之后，海拔高度为500公里的电子的剂量率（或放射量率）分布[2,3]。剂量率由（rad）拉德(Si)每单位时间给定，其中拉德(rad)用来度量吸收的电离能并且对于吸收材料（在这个例子是Si）而言等于 100 ergs/gm 。注意到通过等剂量率曲线清楚地描述了SAA，并且看到剂量率在极点附近较大。另外还要注意的，低倾斜角轨道在极点附近没有穿过高剂量率区域。强调的是，这些剂量率都在Al屏蔽之后，因为存在低能量（ $< 0.1 \text{ MeV}$ ）电子和质子的高磁通量，这会在没有屏蔽的时候造成非常大的剂量值。

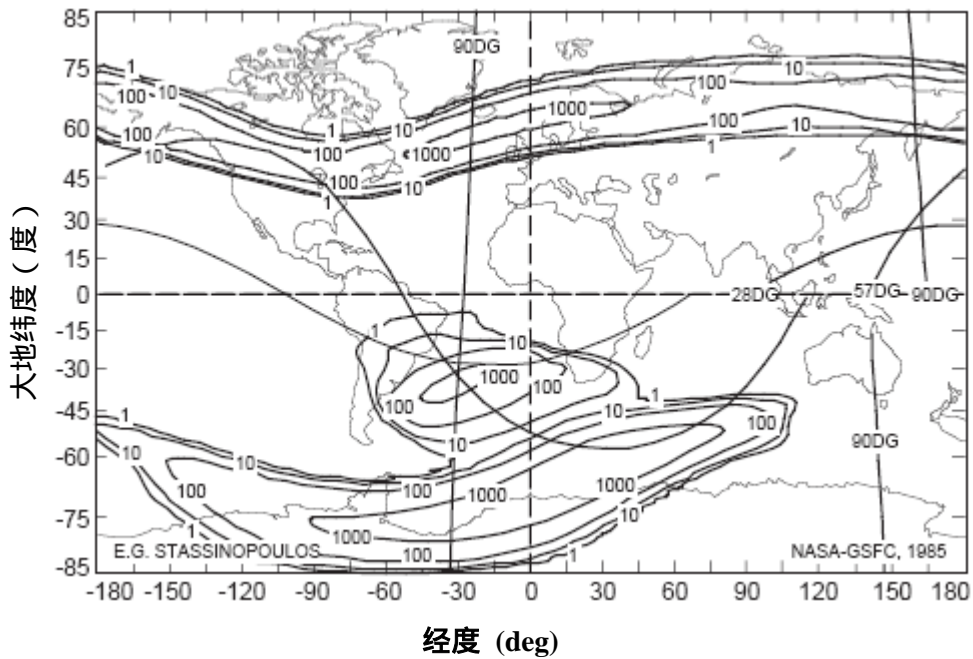


图10-2. 海拔高度为500公里的电子剂量的世界等值线图。对于等值线而言,100 近似等于每天8.6拉德 (Si)。(源自[3]; ©1994年电气和电子工程师协会。)

太阳耀斑是另一个重要的粒子电离辐射源,特别是质子。尽管也会放射出电子、阿尔法粒子和较重的离子,但是其通量要远低于高能量的质子。太阳耀斑出现的首个征兆是突发的X射线到达地球附近。在大约10分钟之后,高能量的质子开始抵达并且可观的质子通量(质子流)可以持续几个小时或一天左右的时间。如图10-3所示,通常太阳黑子的活动周期大约为11年,尽管并非所有这些太阳黑子活动都会导致巨大的太阳耀斑。需要注意的是,巨大的耀斑集中出现在太阳峰年期(或极大期)。出现在1972年8月的巨大太阳耀斑已经成为对太阳耀斑质子流进行报纸估计的基准。如图10-3中能量分区指示的那样,太阳耀斑在它们的质子能量谱中可能变化很大,一些分区的能量谱显得比其他分区强烈很多。由于无法预测太阳耀斑何时出现以及它包含的粒子和能量,这迫使空间系统设计人员对可能的耀斑活动采用保守的较大估计。

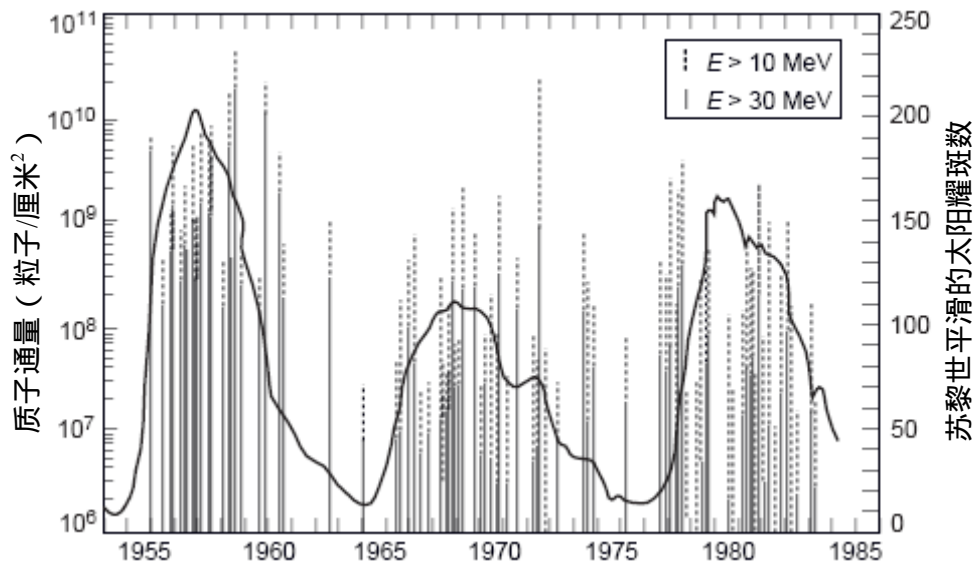


图10-3. 19、20 和21 太阳活动周期的太阳黑子活动和太阳耀斑事件。需要注意 1972 年出现的巨大耀斑是一个基准事件（源自[4]；©J. Geophys. Res., 1988.）

太阳喷射的粒子和地球磁性层之间的相互作用会产生复杂并且有时难以预料的辐射通量的动态行为[3]。举例来说，人们可能预期在太阳峰年活动期左右通常会出现较大的辐射通量，正如图10-3暗示的那样。但是，在较低的海拔高度，由于在海拔200到1000公里的大气密度的增加会造成太阳峰年期质子流通的降低；更大的密度是由于在太阳峰年期增加的太阳能量输出引起的。这种密度增加导致耗尽那些靠近辐射带中最低高度的粒子。举个例子，由于太阳对磁性层的特性会造成影响，在海拔高度更高的地球同步轨道(GEOs)可以观察到复杂的动态波动。我们还注意到对于低海拔高度和倾斜角度，磁性层对太阳粒子提供了一种屏蔽效应，但是对于极轨道质子耀斑可能会向下溢漏到较低的海拔高度，这里再次强调了辐射照射依赖于轨道卫星的倾斜角度。

自然空间环境中第三个重要的辐射源是银河宇宙射线(GCR)，由大约85%的质子、近似14%的阿尔法粒子和大约1%的重核构成[3]。这些粒子源自于太阳系外部并认为它们在整个银河系中均匀分布。GCR的能量可能非常高，最高可达到10 GeV/nucleon（核子）。尽管已经观察到和铀一样重的离子，但是出现原子数量超过铁原子数量的离子的几率很小。图10-4中给出了作为能量函数的GCR离子的分布。像铁（Fe）这样较重的粒子存在于小得多的密度空间中。但是，由于重离子通过半导体器件电路时会存储（或沉积）如此大的能量，尽管它们出现的几率很小但总的来说它们的破坏性更大。

GCR粒子的能量和空间分布随航天器的位置而变化。对于星际间的任务而言，NASA项目的典型情况，能量谱未退化并且GCR通量是全向的。但是，对于低倾斜角度的低地球轨道卫星来说，地球的磁性层对GCR通量提供部分屏蔽。硅离子的这种效应如图10-5所示，它是海拔高度600公里处其能量和轨道倾斜角度的函数[3,5]。需要注意在角度较小的情况下，能谱的低能量部分大大衰减，而在较大的极角度（90度）情况下由于磁性层

的屏蔽使得硅离子通量的衰减要小很多。

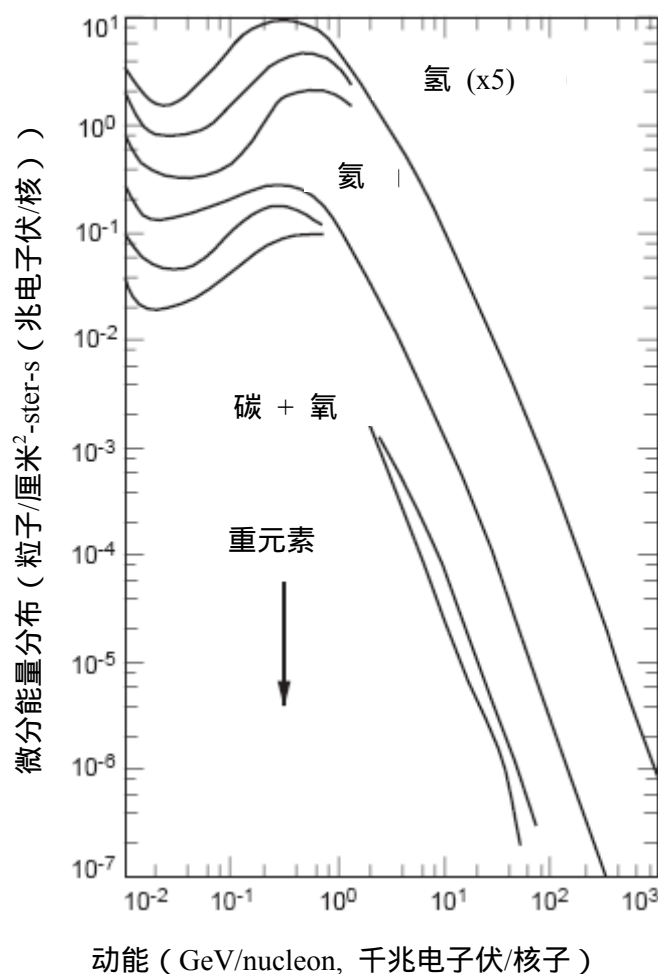


图10-4. 各种银河宇宙射线粒子的能量和充足量分布情况。(源自[5]；©1988年电气和电子工程师协会。)

尽管为特定的任务（使命）计算预期的辐射环境存在某些不确定性，这主要是因为太阳耀斑造成的，但是复杂的模型和计算代码已经出现了一段时间，并且这些模型和代码或多或少会持续得到改进和更新[5-8]。因此，为给定的任务计算期望的剂量和重离子通量的环境预测已经变成相当常规的做法。屏蔽计算的情况也是如此，对于相对复杂的航天器结构来说，这种计算可能很复杂。

B. 其他辐射源

军用空间资产的设计往往不仅要承受自然空间环境，还要考虑附近的核武器爆炸引起的额外因素。对于这种情景，除了GRR离子、太阳耀斑粒子和范艾伦辐射带电子和质子之外，还必须添加巨大的中子通量、高能量伽马射线和电子、低能量X射线以及很高剂量率的瞬时突发的伽马射线。由此看来，军用辐射环境非常苛刻和严格，尤其是瞬时伽马剂量，其典型的剂量范围在109 rad(Si)/s到1012 rad(Si)/s之间。

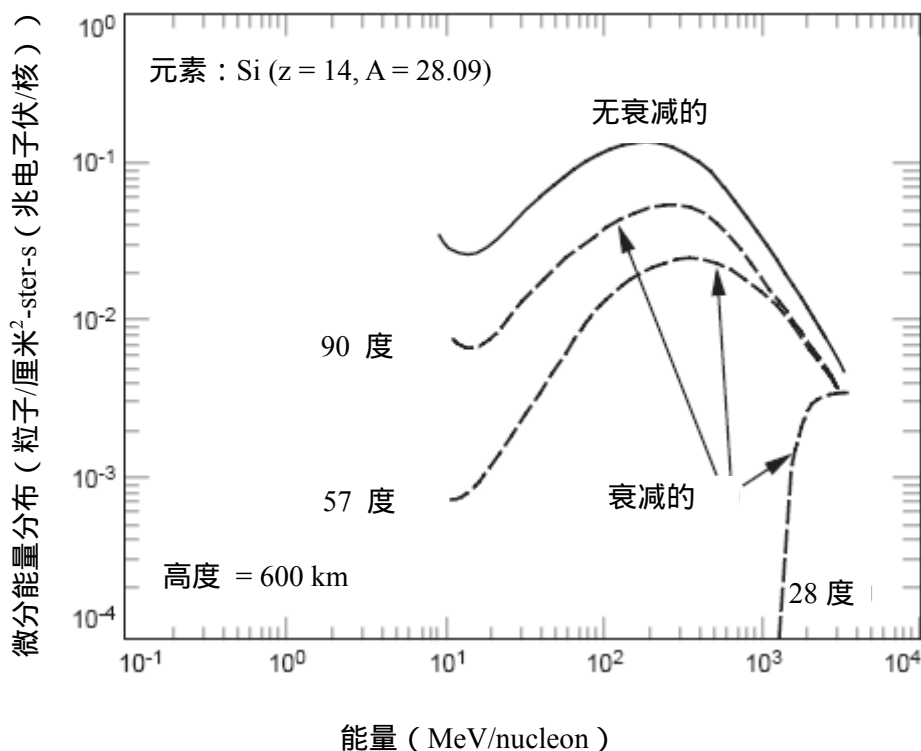


图10-5. 在海拔 600km 高度各种倾斜角度情况下银河宇宙射线硅离子经由地球的磁性层的衰减 (源自[5]; ©1988年电气和电子工程师协会。)

在特殊的情况下，其他人造的辐射源也会变得很重要。对于延伸到太阳之外很远距离的星际间任务，就拿到木星的Galileo（伽利略）任务来说，核能源常常用来为航天器和它的仪器提供电力。放射性同位素热电式发电机(RTG)产生足够的伽马射线和中子来影响RTG附近的航天器上微电子电路的性能。今后，如果出现其他的核能源，如星载核反应堆，那么对位于核能源附近的电子产品的辐射影响需要给予类似的关注。

当高能量辐射通过诸如辐射屏蔽这样一种材料时，会出现与此材料的原子核进行的核相互作用，从而导致放射出次级辐射，其表现形式是由高能光子（韧致辐射）、伽马射线、电子、阿尔法粒子和中子构成的连续能量谱。这些次级粒子也会按照与初级辐射相同的方式对电子电路造成损害。因此，在确定到达微电子器件和电路的总辐射通量时必须考虑次级辐射，尤其是存在密集的高-Z（高原子数量）材料的情况下。

C. 辐射屏蔽

辐射屏蔽作为保护电子元件的一种方法，其效果往往依赖于电路和它的封装或电路板配置。但是，在这个时候提供一些有关屏蔽的一般性评论是适当的。我们已经注意到自然空间环境中的各种辐射源包含大量的低能量成分。因此，即使是额定（或标称）屏蔽(小于100-密耳 Al)，典型是由航天器结构和电子盒提供的，也能够减少剂量几个数量级。在图10-6中可以很容易地看到这种效果，图中给出了对于一个高度为500公里且倾斜角为60度的轨道，作为能量和Al屏蔽厚度函数的差异捕获的质子通量[5]。十分常见的

情况是,对于特定的任务以任意精度确定总的剂量辐射要求的难点之一在于屏蔽随航行器内部位置的变化而变化。通常来说,额定的总剂量,例如对于卡西尼任务是100 krad (千拉德) (Si),是由预期的任务轨道和所处的环境确定的;然后对于航天器内特定的位置再计算得到确切的剂量。当设计人员希望使用不满足标定要求的元件时,遵循此过程的愿望尤为强烈。

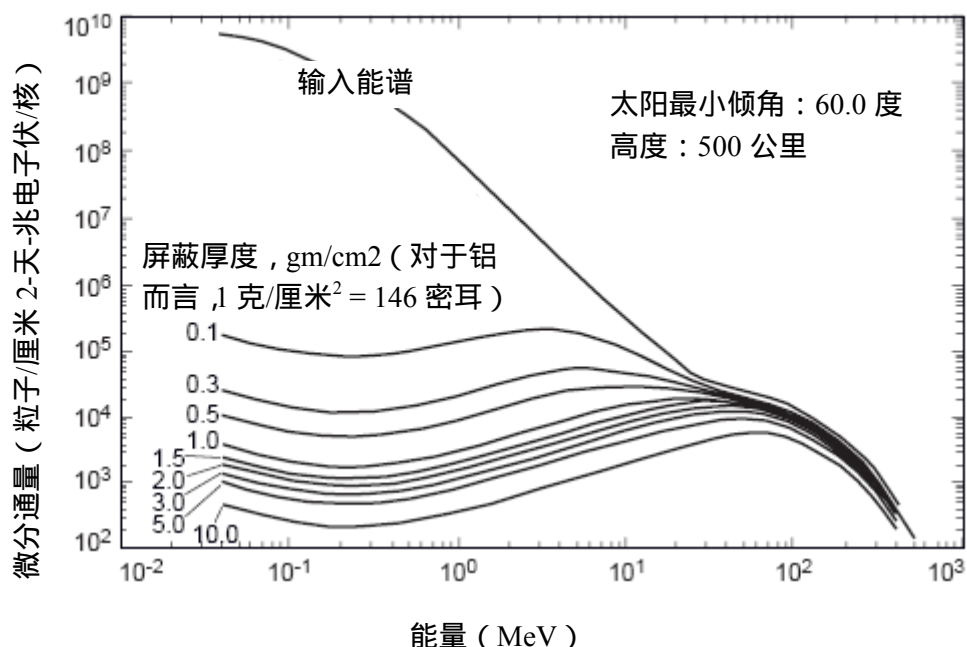


图10-6. 对于一个高度为500公里且倾斜角为60度(太阳最小倾角)的轨道,各种厚度的球形屏蔽引起的范艾伦带捕获的质子谱。(源自[5];©1996年电气和电子工程师协会。)

随着商业电子元件在空间的广泛使用,经常会出现这样一种情况,即航天器结构提供的屏蔽达不到要求并且也没有可供替换的耐辐射元件。在这种情况下,元件的现场屏蔽是恰当的,包括将屏蔽材料(像钽或钨这样的高Z元素)集成到元件封装本身中,这种工艺常常称为“RadPak”。正如上面提到的那样,已经较好建立了用来确定某种材料对各种类型的辐射的通量和能量谱影响的屏蔽计算方法,这一事实有助于实现用于减少期望的总剂量的上述各种屏蔽机制。这些计算也考虑了次级辐射的产生。

尽管屏蔽可以在许多场合下便于使用“软”元件,认识到屏蔽并非总是有效并且甚至会使情况变得更糟是很重要的。根据经验,屏蔽对于减少电离辐射的低到中等能量的成份最有效,也就是电子和质子。对于能量很高的辐射,如伽马射线和GCR离子,屏蔽并不是特别有效,甚至还会起到反作用。造成这种情况的部分原因是在屏蔽材料中产生了次级辐射,并且还由于电子元件中每单位长度的能量损耗随着粒子能量的减少而增加。次级辐射的产生导致屏蔽效应的不对称行为。换句话说,第一个薄的屏蔽层在减少辐射上要比附加的厚屏蔽有效的多,如图10-6所示。因此,除了几十密耳的铝当量屏蔽外,重量上的付出的代价往往要超过辐射屏蔽带来的额外收益。

屏蔽在减少注入到航天器电子元件上总辐射量的效果在自然空间环境和核武器增

强的环境之间会产生明显的差别[1]。正如前面提到的那样，核武器爆炸导致瞬时的突发的高能量伽马射线，并且稍后一点时间会出现很大的14Mev中子注量。屏蔽在遏制这些辐射威胁面前显得无能为力。类似的，难以屏蔽作为发电过程副产品的RTG连续放射的中子和高能量伽马射线。正是由于这种原因，卡西尼（Cassini）上的RTG已证明是一种针对航天器上的微电子元件的难以处理的辐射威胁。