

双极线性稳压器电离辐射剂量率效应及其损伤分析*

王义元¹⁾²⁾³⁾ 陆 妩^{1)2)†} 任迪远¹⁾²⁾ 郭 旗¹⁾²⁾ 余学峰¹⁾²⁾ 何承发¹⁾²⁾ 高 博¹⁾²⁾³⁾

1)(中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

2)(新疆电子信息材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

3)(中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2010年10月8日收到; 2010年12月28日收到修改稿)

为了对双极线性稳压器在电离辐射环境下损伤变化特征及其剂量率效应进行研究, 选择一组器件进行⁶⁰Co γ 高低剂量率的辐照和退火试验. 结果表明线性稳压器的输出电压、最大负载电流、线性调整率、压降电压等多个关键参数都有不同程度的蜕变. 且各器件在高低剂量率下的辐照响应略有不同, 表现出不同的剂量率效应. 文中通过多种形式的测试结果分析, 系统地讨论了各参数变化的原因及其内部各模块对稳压器功能的影响. 结合电离损伤退火特性, 探讨了各剂量率效应形成的原因. 这不但对工程应用考核提供了参考, 而且为设计抗辐射加固器件提供了指导.

关键词: 双极线性稳压器, 总剂量效应, 剂量率效应, 辐射损伤

PACS: 61. 80. - x, 85. 40. - e, 61. 80. Ed

1. 引 言

线性稳压器以其极低的噪声和快速的负载响应而被广泛应用在空间等电子系统中. 然而工作在这些电离辐射环境中的半导体器件, 不可避免的要遭受电离辐照的影响. 电离辐照引起晶体管基极电流增加, 增益减少^[1-4], 导致模拟电路中基础电路——运算放大器的偏置电流、失调电压等静态参数发生改变, 甚至引起共模抑制比、电源电压抑制比、增益带宽积等动态参数蜕变^[4-6]. 而这些参数对于集成线性稳压器的稳压效果和带负载能力都有至关重要的影响. 它们的蜕变可能使稳压器参数蜕变甚至功能失效. 因此, 国外对线性稳压器的电离辐射效应给予充分的重视, 出现大量关于其在辐照环境中的损伤变化的研究报道^[7-11]. 然而这些研究大多只关注其某一参数的变化, 这虽反映出线性稳压器在电离辐射环境下的变化, 却不能反应出其具体的损伤蜕变模式, 无法深入理解稳压器的影响因素, 为抗辐射加固设计带来指导. 20世纪90年代发现双极器件具有低剂量率损伤增强效应

(enhanced low dose rate sensitive, ELDRS) 以来^[1, 11-15], 国外对双极器件和电路进行的大量研究发现, 多数双极模拟器件在低剂量率下的损伤明显大于高剂量率下的损伤, 表现出 ELDRS. 这也为双极器件的航天应用和评估带来新的挑战. 因此, 为便于分析稳压器的损伤规律, 寻找损伤敏感模块, 探讨不同剂量率下的损伤差异, 特选择多种双极性稳压器, 进行了高低剂量率的⁶⁰Co γ 电离辐照及室温退火试验.

2. 线性稳压器工作原理

集成线性稳压器的典型结构如图 1 所示. 其把误差放大器, 带隙基准, 保护电路, 开启电路等集成在一个芯片内, 只需要很少的外部元件(R_1, R_2), 使其在一定的输入电压和负载条件下, 而保持输出电压不变. 因其调整管与负载串联, 负载电流等于调整管的发射极电流, 称为串联型线性稳压器. 由于调整管需要工作在线性区, 稳压器输入电压必须大于设定输出电压与调整管的饱和压降之和, 线性稳压器才能提供恒定输出电压. 而满足要求的最小输入电压与输出电压之差也称为压降电压. 且随着半

* 国家自然科学基金(批准号: 10975182)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn

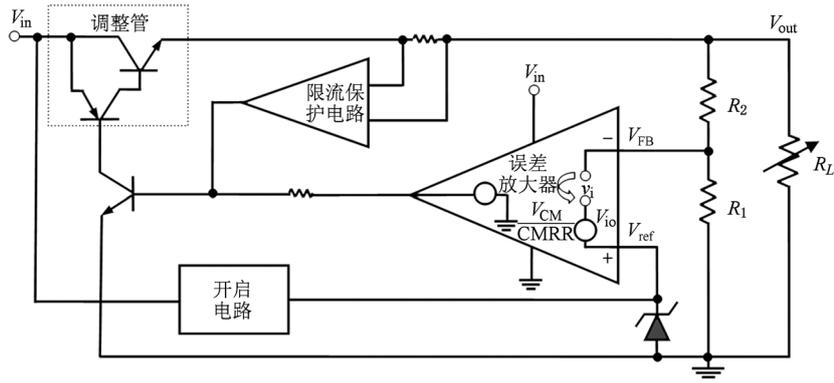


图1 线性稳压器原理图

导体工艺的进步和应用需求的提高,调整管的结构在不断更新. 根据调整管的类型,又可分为标准型、低压差(LDO)和准低压差线性稳压器. 若不考虑调整管和偏置电路的影响,它们的基本原理都是通过高增益误差放大器的比较放大作用来调节器件输出的稳定电压. 在给定电压下,结合图1和放大器的工作原理为^[16,17]

$$V_{out} = A_{VOL}v_i = A_{VOL} \{ (V_{ref} + V_{i0}) - V_{out}\beta \}, \quad (1)$$
整理后可得

$$V_{out} = \{ (V_{ref} + V_{i0}) \} \frac{1}{\beta + \frac{1}{A_{VOL}}}, \quad (2)$$

其中, V_{ref} 为稳压器的基准电压; A_{VOL} 为放大器开环增益; V_{i0} 为输入失调电压; v_i 表示放大器正负输入端之间的输入差分电压; $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ 为反馈系数,始终小于1. 对于稳压器中的误差放大器,其设计的开环增益 A_{VOL} 很大,且 V_{i0} 比基准电压小很多,因此(2)式可以简化为如下形式:

$$V_{out} \approx (V_{ref} + V_{i0}) \frac{1}{\beta} = (V_{ref} + V_{i0}) \frac{R_1 + R_2}{R_1}, \quad (3)$$

$$\approx V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (4)$$

(4)式即为可调线性稳压器器件手册中给出的设定输出电压的公式.

3. 实验器件、方法

根据线性稳压器结构的不同,实验器件选用低压差线性稳压器 LP2952, LM2991, 准低压差稳压器 LM1086, 标准型稳压器 LM317, LM317L, LM337, LM7805. 考虑温度对器件输出特性的影响^[8], 实验

中采用基于自动测试设备搭建的脉冲测试方式来测试其不同输入电压、不同负载情况下的输出电压. 且为了全面揭示线性稳压器的损伤变化特征,除测试了常规的电压调整度和电流调整度外,还测试了器件的最大负载电流、压降电压、输入输出特性. 对于输出可调器件,通过改变外部电阻 R_2 ,测试了不同输出电压随辐照总剂量的变化幅度.

辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所的大小⁶⁰Co γ 辐照源上进行,剂量率选用实验室高剂量率(HDR)0.5Gy(Si)/s或0.15Gy(Si)/s(仅LP2952采用)和空间相近的低剂量率(LDR) 1.0×10^{-4} Gy(Si). 辐照时器件均放在铅铝屏蔽盒内,以消除低能散射的影响. 高剂量率辐照至规定剂量后进行相同偏置的退火实验. 退火时间不小于低剂量率累计到相同总剂量所需时间. 为便于不同器件对比,辐照时器件统一采用所有管脚接地的零偏偏置. 辐照及退火均采用移位测试.

4. 线性稳压器敏感参数蜕变及分析

对任何稳压电路都应从两方面考察其稳压特性^[17],一是输入电压(V_{in})的波动,研究其输出电压是否稳定;二是设负载变化,分析其输出电压的变化. 且随着现代技术对稳压器的要求,压降电压也成为一个重要参数. 因此下面将从稳压器输出电压(V_{out}),压降电压(V_{dorp}),线性调整率(Line)和最大负载电流(I_{max})几个参数考核器件在电离辐射环境中的变化,并分析引起其变化的原因.

4.1. 输出电压

图2所示为可调输出稳压器LM317L在高低剂

量率下不同输出电压的变化百分比随辐照总剂量的变化关系. 可以看出输出电压随辐照剂量的积累而

迅速减小. 观察同一剂量率下不同输出电压变化百分比发现, 他们随总剂量的增加, 损伤规律是一致的.

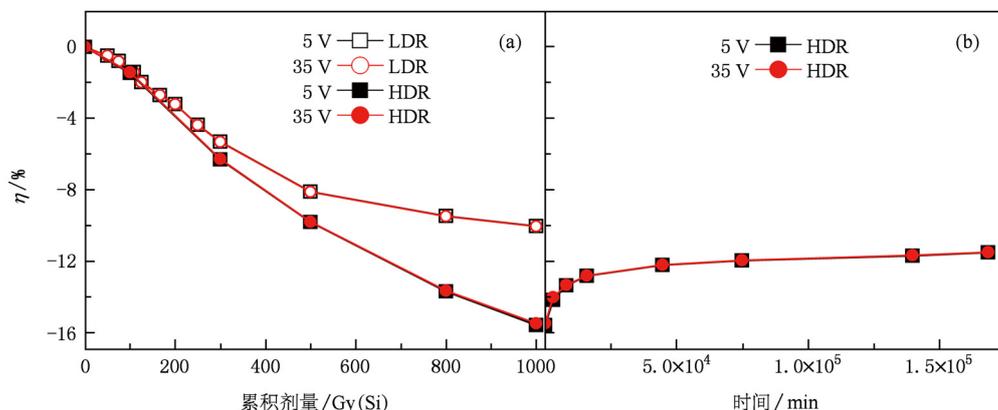


图2 LM317L 不同输出电压的变化百分比随辐照总剂量(a)及室温退火(b)的变化

为便于分析引起器件输出电压变化的原因, 图中引入的电压变化百分比 η , 其计算公式为

$$\eta = (V_{out\ post-irrad} - V_{out\ pre-irrad}) / V_{out\ pre-irrad}, \quad (5)$$

结合输出电压和基准电压的关系(4)式, 可得到

$$\eta = (V_{ref\ post-irrad} - V_{ref\ pre-irrad}) / V_{ref\ pre-irrad}, \quad (6)$$

$V_{out\ post-irrad}$ ($V_{ref\ post-irrad}$) 表示辐照至一定的总剂量时的输出电压(基准电压), $V_{out\ pre-irrad}$ ($V_{ref\ pre-irrad}$) 为辐照前的输出电压(基准电压).

由(4)式可以看出, 基准电压及 R_2/R_1 的比值决定了输出电压的大小; 但是(6)式却说明输出电压变化百分比等于基准电压变化百分比. 因此图2中所示同一器件的不同幅度输出电压的变化百分比相等是由基准电压的变化所决定的^[8].

然而回头分析(4)式发现, 式中忽略了误差放大器的失调电压 (V_{io}) 对输出电压的影响. 且对于通用三端稳压器无法直接测试到基准电压 (V_{ref}), 而给出类似图1所示的反馈端电压 (V_{FB}) 作为基准

电压. 辐照前, 电路设计中形成的误差放大器的失调电压很小, 且其大小固定, 对输出电压影响不大, 这种近似也非常精确. 但是随着电离辐照剂量的积累, 失调电压可能发生变化而引起器件输出电压的变化, 此时不得不考虑失调电压对其输出的影响. 为此, 我们选择在器件封装中能直接测试出器件基准电压和反馈端电压的器件 LP2952. 图3(a)给出其输出电压、基准电压和反馈端电压变化百分比随总剂量的变化关系. 可以看出在辐照初期, 三者的变化百分比相同. 而随着总剂量的进一步积累, 发现输出电压变化与反馈端变化保持一致, 而基准电压的变化明显偏离输出电压的变化, 其损伤较大; 且随总剂量积累, 其偏离程度增加. 图3(b)给出的为相同条件下测试的反馈端电压与基准电压差所表示的失调电压随总剂量的变化趋势. 由图3(b)可以看出, 失调电压的不断增大是导致三者损伤差异的原因. 然而图3(a)中, 三者整体变化趋势一

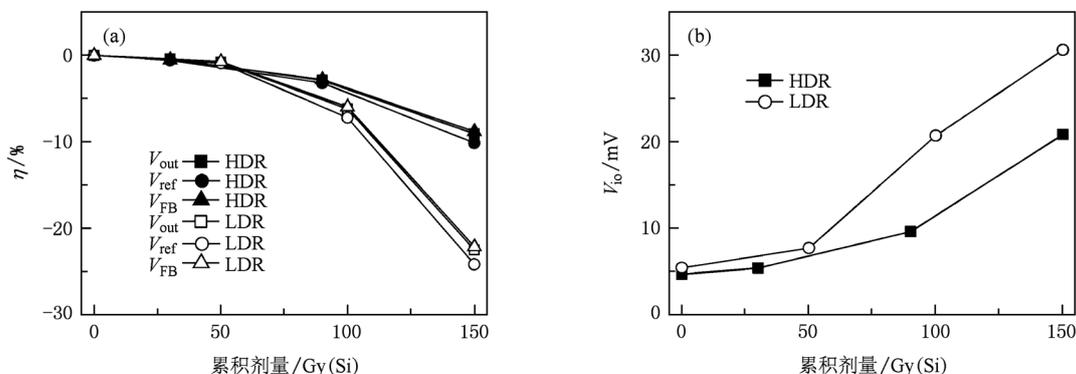


图3 LP2952 的 V_{FB} , V_{ref} , V_{out} 变化百分比(a)及失调电压(b)随总剂量的变化

致,更进一步说明基准电压的蜕变决定了稳压器输出电压的变化;而误差放大器失调电压的蜕变则对器件输出电压有一定的影响^[8].

在器件输出功能失效后,分析 LP2952 实验数据发现,器件的基准电压随总剂量的增加而逐渐减小,但反馈端电压和输出电压却保持为零. 因此,可以认为误差放大器的功能失效是导致整个线性稳压器功能失效主要原因. 文献[9]对由分立元器件组成的稳压器的研究也表明,误差放大器的增益带宽积 (GBW) 的急剧减小而导致其功能失效. 因此误差放大器在线性稳压器中起关键作用,其抗辐射性能直接关系到稳压器的功能.

4.2. 压降电压

压降电压是指在固定负载条件下,要达到稳定输出电压所需要的最小输入电压与输出电压的差. 压降电压越小越可以充分利用电池等电源设备,而使其成为选择线性稳压器的一个重要考察参数. 然

而由图 4(a) 给出的压降电压随总剂量的变化可以看出:开始阶段,压降电压随总剂量增加而缓慢增大;但随着总剂量的积累,器件的压降电压迅速增加.

结合图 1 分析发现,正常情况下压降电压全部降落在调整管,因此最小压降电压就是图中 NPN 晶体管所需基射电压 V_{BE} 与 PNP 晶体管集电极-发射极 (C-E) 的饱和电压之和. 然而,随着电离辐照的影响,晶体管增益减小,达到规定负载电流时,所需基射电压和 C-E 饱和电压都将增大,从而引起图 4(a) 中压降电压的缓慢增加. 另一方面,线性稳压器一般具有开启电路,只有当输入电压大于开启电压时,稳压器才开始输出. 图 5 给出三种器件在不同总剂量下的输入输出特性. 从中我们可以看出,随着总剂量的增加,器件只有在更高的电压下才能正常工作. 这也是图 4(a) 所示的压降电压的剧烈变化的原因. 应该注意的是,图 5 所示的传输特性的蜕变,在不同器件中有不同表现形式. 图 5(a) 与文

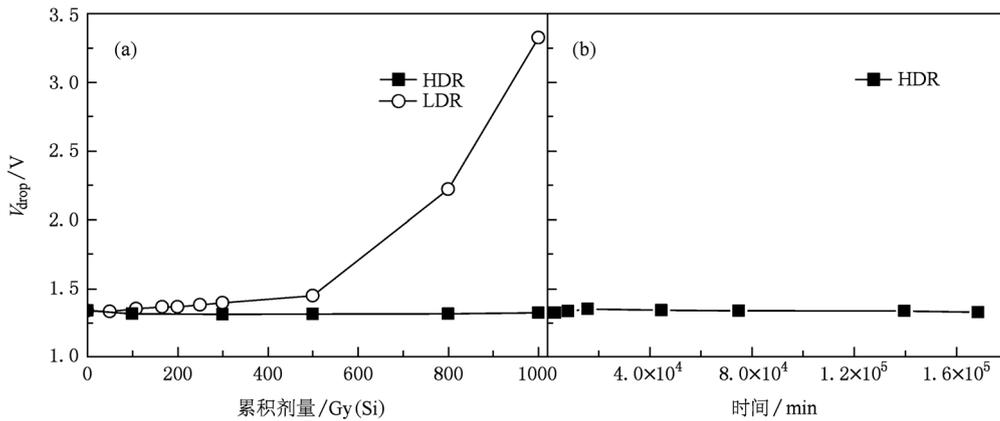


图 4 LM317 压降电压随负载总剂量(a)及退火时间(b)的变化

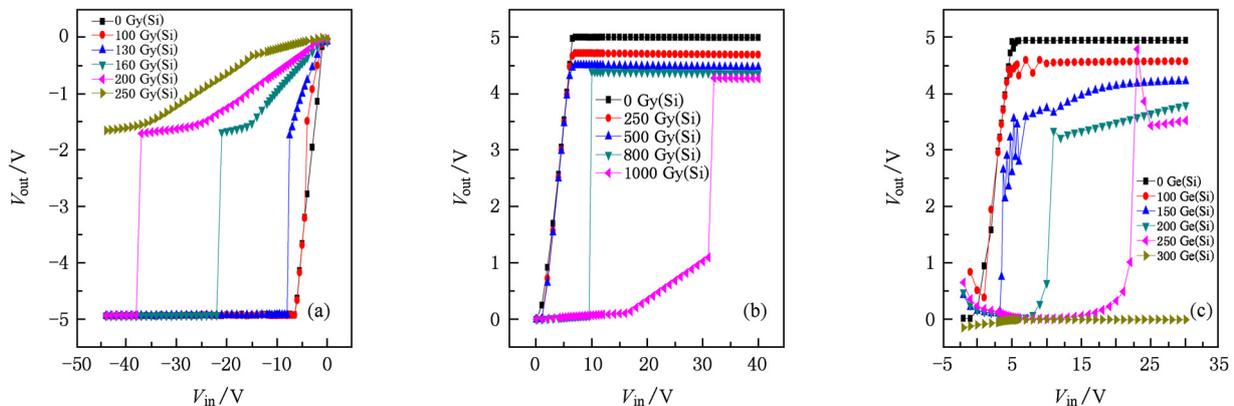


图 5 电离辐射下,输入输出特性的不同蜕变模式 (a) LM337; (b) LM317L; (c) LP2952

献[10]的表现形式相同,只表现出开启电压的增加,输出电压没有较大变化.而图5(b)则是输出电压发生变化的同时开启电压增大.图5(c)不但可以清楚的表现出开启电压的增加,而且在刚开启后,由于各模块间的匹配性能变差,而发生震荡^[18].因此,通过输入输出曲线,可以更清楚地了解到稳压器在电离辐射环境随输入电压的变化,反映出其内部各模块之间的蜕变影响.

4.3. 线性调整率

线性调整率是指输入电压变化所引起输出电压的变化.这与稳压器中误差放大器的共模抑制比(CMRR)和电源电压抑制比(PSRR)有密切关系^[16].在现代集成稳压器中,恒流源的设计使放大器具有极大的电源电压抑制比.但是研究发现,电离辐射中由于恒流源的蜕变而使放大器的电源电压抑制比减小^[6],从而引起稳压器线性调整率的蜕变.

理想误差放大器,只有输入端的差分电压影响器件输出电压,共模电压(V_{CM})对输出电压没有影响.而对于实际的运放来说,共模电压却影响着放大器的输出电压.这种效应可以等效为大小为 $V_{CM}/CMRR$ 的附加失调电压^[16,17].因此在(4)式中引入此失调电压,可得输出电压

$$V_{out} \approx \left(V_{ref} - \frac{V_{CM}}{CMRR} \right) \beta$$

$$= \left(V_{ref} - \frac{V_{CM}}{CMRR} \right) \frac{R_1 + R_2}{R_1}, \quad (7)$$

$$V_{CM} = V_{ref} - \frac{V_{IN}}{2}, \quad (8)$$

$$\Delta V_{out} = V_{out@V_{IN} = \text{high voltage}} - V_{out@V_{IN} = \text{low voltage}}$$

$$= \frac{\Delta V_{IN}}{2 \times CMRR} \times \frac{R_1 + R_2}{R_1}. \quad (9)$$

在线性稳压器中,共模电压与输入电压满足(8)式^[16].计算在不同输入电压下器件输出电压的变化,且把(8)式代入(7)式,可得器件输出电压变化量与其共模抑制比的关系式(9).当CMRR较大时,线性调整率将会很小;然而在电离辐照环境中,放大器的共模抑制比CMRR将会减小^[5],从而造成线性调整率的增加,影响线性稳压器的稳压性能.图6就给出两种器件线性稳压器的变化.高剂量率下,线性调整率变化均不明显;而低剂量率下却发生显著变化,表现出低剂量率损伤增强效应.与双极误差放大器的剂量率效应相同^[4].同时观察图5(c)更能直观的看到线性调整率的变化.辐照前,当输入电压达到开启电压后,器件开始工作,达到需求最低电压后,器件输出电压恒定.然而辐照一定总剂量后,器件开始工作后,输出电压随输入电压的增加而不断变化.

4.4. 最大负载电流

最大负载电流是指器件输出保持在一定值时,所能驱动的最大电流.图7给出不同负载下,输出电压随负载电流(I_{out})的变化关系.可以清楚看出,在辐照前,器件负载电流近0.9 A.但是随着辐照总剂量的积累,在较低的负载电流下,器件输出电压就已经降到较小的电压值.图8给出器件的最大负载电流随总剂量的变化.发现器件最大负载电流不但会减小,而且有可能增大.

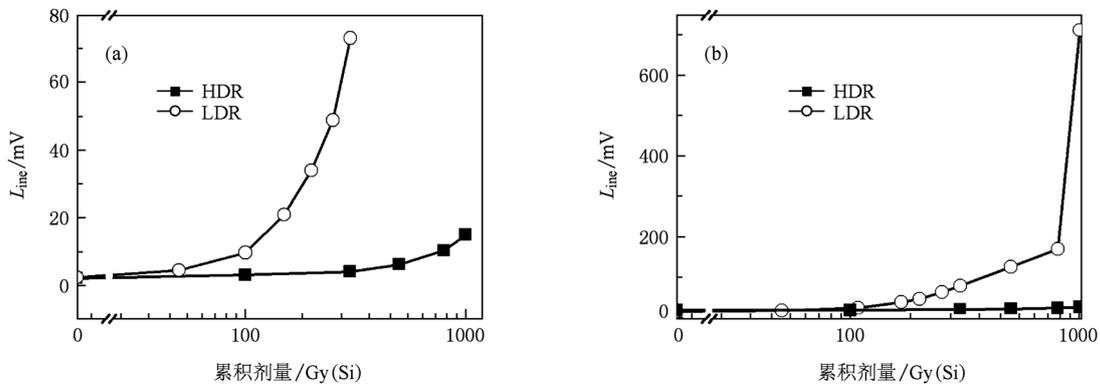


图6 线性调整率随总剂量的辐照变化 (a) LM2991; (b) LM317

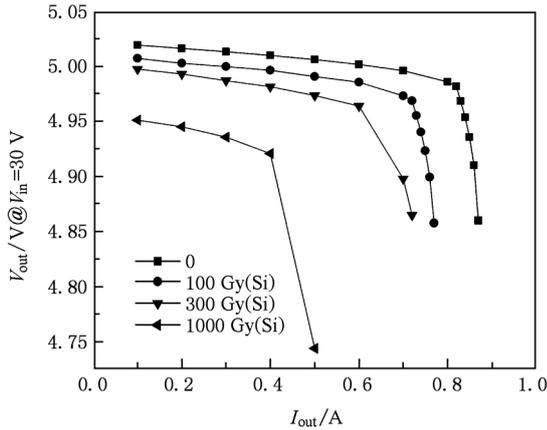


图7 不同总剂量下, LM7805 输出电压随负载电流的变化

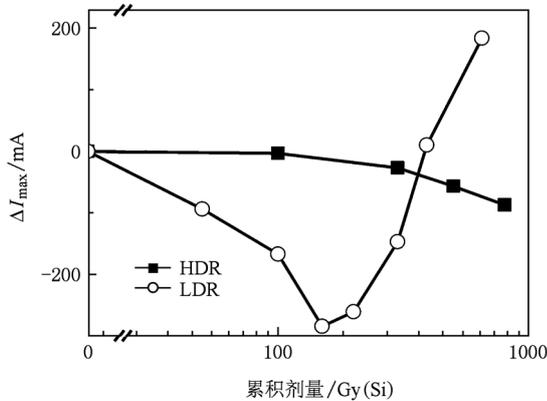


图8 LM2991 最大负载电流随总剂量的变化

根据线性稳压器的结构分析发现,由于调整管的集电极电流直接与负载相连,所以调整管的电流增益直接决定了器件的最大负载电流^[11].但考虑到电路中的限流电路,当器件负载大于设定电流或功率时,为保护器件安全,而关断器件输出.所以限流保护电路对最大负载电流具有一定的调制作用.在电离辐照环境中,当调整管的电流增益减小时,器件的最大负载电流将明显减小;而当保护电路的性能蜕变时,器件可能在较大的电流下才能关断输出,而使测试出的最大负载电流增加.这也就是器件的最大负载电流不同变化趋势的原因.当最大负载电流减小时,线性稳压器可能因不能满足整个电路系统的设定要求,而使系统工作失效;而当最大负载电流增大时,在某些恶劣条件下,器件电流增加,而由于保护电路功能的蜕变,不能及时关闭器件输出,使其功耗过大,甚至由于温度过高而烧毁电源系统.总之,最大负载电流应该作为一个重要

参数来考核,以免引起系统的功能失效.

5. 线性稳压器的剂量率效应

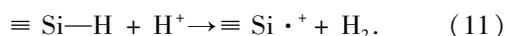
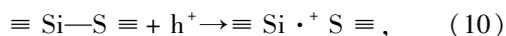
考虑到近年来研究报道双极器件的低剂量率损伤增强效应,在相同偏置条件下对双极线性稳压器进行了高低剂量率的辐照实验.然而实验结果发现不同的线性稳压器表现出不同的剂量率效应.图2所示 LM317L 在高剂量率下的损伤比低剂量率下的损伤要大;在随后的室温退火中,高剂量下的损伤退火到与低剂量率损伤相当的水平,表现出时间相关效应(time dependent effect, TDE)^[19].而图4所示 LM317 的电离损伤在低剂量率下的损伤却明显比高剂量率下的损伤大,且随后的长时间室温退火中也未发生明显变化,表现为 ELDRS 效应.实验器件的敏感参数及其剂量率效应如表1所示.表1中同时给出在高/低剂量率下敏感参数变化量超出10%时的总剂量.可以看出不同器件、不同剂量率下的剂量值有很大差异.

表1 实验器件的敏感参数及剂量率效应

器件	敏感参数	剂量率效应	LDR/HDR 剂量/Gy(Si)
LM317L	$V_{out}, V_{drop}, I_{max}$	TDE	800/500
LM317	$V_{out}, Line, V_{drop}$	ELDRS	100/450
LM7805	I_{ine}, I_{max}	ELDRS	100/500
LM337	V_{drop}	ELDRS	130/ >1000
LM1086	$V_{out}, Line, I_{max}$	ELDRS	50/300
LP2952	$V_{out}, Line, I_{max}, V_{drop}$	ELDRS	120/150
LM2991	$V_{out}, Line, I_{max}$	ELDRS	50/300

研究表明^[20-22],双极器件的辐射损伤主要表现为电离辐照下隔离氧化层的氧空位缺陷($\equiv Si-S \equiv$)和 Si/SiO₂ 界面处的三价硅悬挂键($\equiv Si-H$)俘获辐射产生的电荷,形成氧化物陷阱电荷和界面态,从而导致器件电参数发生变化.当遭受电离辐照时,在氧化层中会产生大量的电子-空穴(e-h)对,同时释放出的能量与 Si-H(或 Si-OH)等氢化物作用形成中性氢.在边缘电场的作用下,逃脱初始复合后的电子被快速地扫出氧化层,而剩下的空穴(h^+)则在氧化层内漂移运动.在运动过程中,一部分被氧化层中的氧空位缺陷俘获而形成带电的氧化物陷阱电荷(式(10)).另一部分或被中性氢俘获形成氢离子(H^+),或与硅氢键反应,使其断裂而释放出氢离子^[20].另外,界面态建立的氢离子两步

模型理论认为,这些电离辐照过程中产生的氢离子被输运到 Si/SiO₂ 界面,与三价硅悬挂键反应,形成界面态(式(11)).



然而,空间电荷模型认为在高低剂量率辐照下^[1,12-14],由氧化物陷阱电荷形成的空间电场有很大差异,严重影响了界面态的产生.在高剂量率辐照时,短时间内在晶体管的氧化层内产生大量的氧化物陷阱电荷,这些高密度的氧化物陷阱正电荷在氧化层内将形成一个较强的空间电场,阻碍辐射感生的空穴和氢离子向 Si/SiO₂ 界面运动.且由于辐照时间较短,空穴和氢离子没有足够的时间传输到 Si/SiO₂ 界面.因此只有极少数辐射感生的空穴和氢离子被输运到 Si/SiO₂ 界面,并被界面陷阱俘获形成少量界面态.而在低剂量率辐照情况下,辐射感生的电子空穴对的产生率小,生成的氧化物电荷要少得多,因此形成的空间电场也相对较弱.且辐照到相同剂量所需的时间较长,所以长时间辐照下,较多的辐射感生空穴和氢离子被输运到 Si/SiO₂ 界面,并与那里的悬挂键反应生成界面陷阱电荷,这些界面陷阱电荷在基区表面形成复合中心,从而增加了过剩的基极电流,减小了晶体管的电流增益,最终造成低剂量率辐照损伤增强效应的产生.这也是图 3,4,6,8 所示各参数在低剂量率下的变化明显大于高剂量率的原因.

对于不同器件,其工艺在氧化层中引入的氧空位缺陷和三价硅悬挂键数量不同^[15].当氧化层中含有的大量氧空位缺陷时,电离辐照过程中也将形成大量氧化物陷阱电荷.而氧化物陷阱电荷占主导时,器件表现出 TDE;界面态占主导时,器件表现出 ELDRS.因此 LM317L 工艺中可能引入了大量氧空位缺陷,使其形成的氧化物陷阱电荷主导着器件的辐射损伤.这可以从图 2 的退火过程中得到证实.氧化物陷阱电荷退火温度较低,在室温下就会有大量退火;而界面态退火温度较高,在 100℃ 以上高温才发生大量退火^[23],且在室温退火时,可能会有部分慢界面态的生成^[8].因此图 2(b)室温退火中,由于氧化物陷阱电荷的退火,使高剂量率辐照

后的损伤有明显恢复趋势.由于长时间的低剂量率辐照过程中氧化物陷阱电荷已发生部分退火,因此退火后高低剂量率下的损伤相当.而其他器件,则可能由于工艺中引入的氧空位缺陷较少,形成界面态占主导的损伤模式.低剂量率下界面态显著增加而导致真正的低剂量率损伤增强效应.图 4(b)所示的退火过程中无显著变化也证明这一结论.

线性稳压器的多个参数在电离辐射环境下均会发生变化,且在不同剂量率下的损伤差异十分明显.因此,在工程应用中,根据需求选择合适的剂量率进行全面考核,以正确评估器件参数变化规律,提高电子系统在辐射环境下的可靠性.在设计抗辐射加固器件时,工艺生长中既要提高氧化物生长质量,又要减少 Si/SiO₂ 界面处悬挂键的数量;电路设计中设法提高基准电压和误差放大器的抗辐射性能.且由于晶体管小注入下的“退化增强”^[2],提高电路中晶体管的工作点是一个较简便的方法.

6. 结 论

在电离辐射环境下,线性稳压器的输出电压,最大负载电流,线性调整率,压降电压等多个关键参数均发生改变,不同器件敏感参数略有不同.且因各工艺引入缺陷不同而使辐照时产生的氧化物陷阱电荷与界面态的比重不同,使不同剂量率下的损伤因器件而异,表现出不同的剂量率效应.因此在抗辐射评估考核时要综合考虑,选择恰当的加速评估方法来区分器件的剂量率效应,并测试稳压器的多个参数,以保证器件在空间辐射环境的可靠性和稳定性.

线性稳压器的稳压电压由于带隙基准的漂移而发生改变,且误差放大器的失调电压对其有一定的影响;调整管增益的降低使器件带载能力下降;开启电路性能蜕变,导致器件需要更高的开启电压,增大器件的压降电压;保护电路的衰退则有可能使其失去保护器件的能力;而误差放大器性能的蜕变则使稳压器稳压能力减弱,甚至功能失效.在设计抗辐射加固电路时,要综合考虑各单元电路的影响,进行加固设计.

- [1] Nowlin R N, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Peas R L, Combs W E 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 1686
- [2] Zheng Y Z, Lu W, Ren D Y, Wang Y Y, Guo Q, Yu X F. 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5572 (in Chinese) [郑玉展、陆 妩、任迪远、王义元、郭 旗、余学峰、何承发 2009 物理学报 **58** 5572]
- [3] Zhai Y H, Li P, Zhang G J, Fan X, Luo Y X, Hu B, Li J H, Zhang J, Su P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** (in Chinese) [翟亚红、李 平、张国俊、罗玉香、范 雪、胡 滨、李俊宏、张 健、束平 2011 物理学报 **60**] (已接受)
- [4] Johnston A H, Swift G M, Rax B G 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 2427
- [5] Lu W, Ren D Y, Guo Q, Yu X F, Zhang G Q, Yan R L 1998 *Research & Progress of SSE* **18** 323 (in Chinese) [陆 妩、任迪远、郭 旗、余学峰、张国强、严荣良 1998 固体电子学研究与发展 **18** 323]
- [6] Zheng Y Z, Lu W, Ren D Y, Wang Y Y, Chen R, Fei W X 2010 *Nucl. Tech.* **33** 357 (in Chinese) [郑玉展、陆 妩、任迪远、王义元、陈 睿、费武雄 2010 核技术 **33** 357]
- [7] Abare W, Brueggeman F, Pease R, Krieg J, Simons M 2002 *IEEE Radiation Effects Data Workshop Record Phoenix, Arizona, America, July, 2002*: 177
- [8] Ramachandran V, Narasimham B, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Holman W T, Witulski A F, Pease R L, Dunham G W, Seiler J E, Platteter D G, 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3223
- [9] Adell P C, Schrimpf R D, Holman W T, Todd J L, Caveriviere S, Cizmarik R R, Galloway K F 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3816
- [10] Beacour J T, Carriere T, Gach A, Laxague D 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 2420
- [11] Pease R L, McClure S, Gorelick J, Witzak S C 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2571
- [12] Fleetwood D M, Riewe L C, Schwank J R, Witzak S C, Schrimpf R D 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 2537
- [13] Witzak S C, Lacoé R C, Mayer D C, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Galloway K F 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2339
- [14] Fleetwood D M, Kosier S L, Nowlin R N, Schrimpf R D, Reber R A, DeLaus M, Winokur P S, Wei A, Combs W E, Pease R L 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 1871
- [15] Rashkeev S C, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Witzak S C, Michez A, Pantelides S T, 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2650
- [16] ON Semiconductor, *Linear & Switching Voltage Regulator Handbook* 4th ed. 2002 Arizona: ON Semiconductor Inc. ,
- [17] Tong S B, Hua C Y 2003 *Fundamentals of Analog Electronics* (Beijing: Higher Education Press) p523 (in Chinese) [童诗白、华成英 2003 模拟电子技术基础(北京: 高等教育出版社)第 523 页]
- [18] Wang Y Y, Lu W, Ren D Y, Zheng Y Z, Gao B, Chen R. 2010 *Nucl. Tech.* **33** 465 (in Chinese) [王义元、陆 妩、任迪远、郑玉展、高 博、陈 睿 2010 核技术 **33** 465]
- [19] Freitag R K, Brown D B 1997 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **44** 1906
- [20] Li R M, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3400 (in Chinese) [李瑞珉、杜 磊、庄奕琪、包军林 2007 物理学报 **56** 3400]
- [21] Zhang T Q, Liu C Y, Liu J L, Wang J P, Huang Z, Xu N J, He B P, Peng H L, Yao Y J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2434 (in Chinese) [张廷庆、刘传洋、刘家璐、王剑屏、黄 智、徐娜军、何宝平、彭宏论、姚育娟 2001 物理学报 **50** 2434]
- [22] Li X J, Geng H B, Lan M J, Yang D Z, He S Y, Liu C M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 066103
- [23] Witzak S C, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Galloway K F, Lacoé R C, Mayer D C, Puhl J M, Pease R L, Suehle J S 1997 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **44** 1989

Degradation and dose rate effects of bipolar linear regulator on ionizing radiation *

Wang Yi-Yuan¹⁾²⁾³⁾ Lu Wu^{1)2)†} Ren Di-Yuan¹⁾²⁾ Guo Qi¹⁾²⁾ Yu Xue-Feng¹⁾²⁾ He Cheng-Fa¹⁾²⁾ Gao Bo¹⁾²⁾³⁾

1) (*Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*)

2) (*Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices, Urumqi 830011, China*)

3) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 8 October 2010; revised manuscript received 28 December 2010)

Abstract

In order to investigate the dose rate effects and the radiation response of the voltage regulator, a group of bipolar linear regulators are irradiated by ^{60}Co γ at high and low dose rate. The results show that many of the parameters of the regulator, such as the max drive current, the output voltage, the line regulation and the dropout voltage, are sensitive to ionizing irradiation. Compared the radiation responses of the devices between high and low dose rate, the dose-rate effect is found to be dependent on device. The reasons for the degradation are discussed by combining the radiation response of the transistor and the amplifier with the circuit characteristic of the linear regulator. The dose rate effects are also analyzed from the annealing characteristics. So this is not only useful for their application in space, but also helpful for the design of radiation hardness device.

Keywords: bipolar linear regulators, total ionizing dose, dose rate effect, radiation damage

PACS: 61. 80. - x, 85. 40. - e, 61. 80. Ed

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Gran No. 10975182).

† Corresponding author. E-mail: luwu@ms. xjb. ac. cn