

### 摘要

本研究描述了 LMP7704-SP 重离子辐照的各种单粒子效应 (SEE)。该器件是一款具有 CMOS 输入级的耐辐射、四通道、低失调电压、轨到轨输入和输出 (RRIO) 精密放大器。在 125°C 下检测到单粒子门锁 (SEL) 对于  $LET_{EFF}$  的抗扰度为 85MeV-cm<sup>2</sup>/mg。在 25°C 下检测到单粒子瞬变 (SET) 对于  $LET_{EFF}$  的抗扰度规格为 2MeV 至 85MeV-cm<sup>2</sup>/mg。

### 内容

1 概述	2
2 SEE 机制	3
3 测试设备和测试板信息	4
4 辐照设施和设置	5
5 SEL 结果	6
6 SET 结果	7
7 总结	16
A 置信区间计算	17
B 参考文献	19
C 修订历史记录	19

### 插图清单

图 2-1. 典型 LMP7704-SP 应用图	3
图 3-1. LMP7704-SP 引脚分配	4
图 3-2. LMP7704-SP 偏置图	4
图 5-1. SEL 照射行程 10 期间 $V_S$ 电流的电流与时间 (I 与 t) 数据	6
图 6-1. $V_S = \pm 1.35V$ 、增益 = 1 时照射行程 4 中最坏情况下的正瞬变	9
图 6-2. $V_S = \pm 1.35V$ 、增益 = 1 时照射行程 4 中最坏情况下的负瞬变	9
图 6-3. $V_S = \pm 6V$ 、增益 = 1 时照射行程 3 中最坏情况下的正瞬变	9
图 6-4. $V_S = \pm 6V$ 、增益 = 1 时照射行程 3 中最坏情况下的负瞬变	9
图 6-5. $V_S = \pm 1.35V$ 、增益 = 10 时照射行程 5 中最坏情况下的正瞬变	10
图 6-6. $V_S = \pm 1.35V$ 、增益 = 10 时照射行程 5 中最坏情况下的负瞬变	10
图 6-7. $V_S = \pm 6V$ 、增益 = 10 时照射行程 6 中最坏情况下的正瞬变	10
图 6-8. $V_S = \pm 6V$ 、增益 = 10 时照射行程 6 中最坏情况下的负瞬变	10
图 6-9. 电源电压为 $\pm 1.35V$ 且增益为 1 时每次翻转的瞬态恢复时间直方图	11
图 6-10. 电源电压为 $\pm 6V$ 且增益为 1 时每次翻转的瞬态恢复时间直方图	11
图 6-11. 电源电压为 $\pm 1.35V$ 且增益为 10 时每次翻转的瞬态恢复时间直方图	12
图 6-12. 电源电压为 $\pm 6V$ 且增益为 10 时每次翻转的瞬态恢复时间直方图	12
图 6-13. 威布尔图: $V_S \pm 1.35V$ 且增益 = 1 - 通道 1	13
图 6-14. 威布尔图: $V_S \pm 1.35V$ 且增益 = 1 - 通道 2	13
图 6-15. 威布尔图: $V_S \pm 1.35V$ 且增益 = 1 - 通道 3	13
图 6-16. 威布尔图: $V_S \pm 1.35V$ 且增益 = 1 - 通道 4	13
图 6-17. 威布尔图: $V_S \pm 6V$ 且增益 = 1 - 通道 1	13
图 6-18. 威布尔图: $V_S \pm 6V$ 且增益 = 1 - 通道 2	13
图 6-19. 威布尔图: $V_S \pm 6V$ 且增益 = 1 - 通道 3	14
图 6-20. 威布尔图: $V_S \pm 6V$ 且增益 = 1 - 通道 4	14
图 6-21. 威布尔图: $V_S \pm 1.35V$ 且增益 = 10 - 通道 1	14
图 6-22. 威布尔图: $V_S \pm 1.35V$ 且增益 = 10 - 通道 2	14
图 6-23. 威布尔图: $V_S \pm 1.35V$ 且增益 = 10 - 通道 3	14
图 6-24. 威布尔图: $V_S \pm 1.35V$ 且增益 = 10 - 通道 4	14
图 6-25. 威布尔图: $V_S \pm 6V$ 且增益 = 10 - 通道 1	15
图 6-26. 威布尔图: $V_S \pm 6V$ 且增益 = 10 - 通道 2	15

图 6-27. 威布尔图 : $V_S \pm 6V$ 且增益 = 10 - 通道 3.....	15
图 6-28. 威布尔图 : $V_S \pm 6V$ 且增益 = 10 - 通道 4.....	15

## 表格清单

表 1-1. 概览信息 <sup>(1)</sup> .....	2
表 5-1. 在入射角为 $39^\circ$ 时使用 $^{59}\text{Pr}$ 的 LMP7704-SP SEL 条件.....	6
表 6-1. DUT 配置.....	7
表 6-2. 离子和入射角.....	7
表 6-3. SET 结果 : $V_S = \pm 1.35V$ , 增益 = 1.....	7
表 6-4. SET 结果 : $V_S = \pm 6V$ , 增益 = 1.....	7
表 6-5. SET 结果 : $V_S = \pm 1.35V$ , 增益 = 10.....	8
表 6-6. SET 结果 : $V_S = \pm 6V$ , 增益 = 10.....	8
表 A-1. MFTF 以及 $\sigma$ 的实验示例计算 (使用 95% 置信水平) <sup>(1)</sup> .....	18

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 概述

LMP7704-SP 是一款精密放大器，具有低输入偏置、低失调电压、2.5 MHz 增益带宽积和宽电源电压。该器件耐辐射，可在  $-55^\circ\text{C}$  至  $+125^\circ\text{C}$  的军用级温度范围内运行。

该放大器拥有高直流精度等特性，特别是  $\pm 60\mu\text{V}$  的低失调电压和  $\pm 500\text{fA}$  的超低输入偏置，因此非常适合具有高输出阻抗的精密传感器接口。该放大器可配置为换能器/传感器、电桥、应变仪和跨阻放大。

**表 1-1. 概览信息<sup>(1)</sup>**

说明	器件信息
TI 器件型号	LMP7704-SP
MLS 编号	5962-1920601VXC
器件功能	具有宽电源电压范围的耐辐射加固保障 (RHA)、精密、低输入偏置、RRIO 放大器
技术	VIP050
曝光设施	德克萨斯 A&M 大学加速器研究所辐射效应设施
每次运行的重离子通量	$1 \times 10^6 - 1 \times 10^7$ 离子/ $\text{cm}^2$
辐照温度	$125^\circ\text{C}$ (用于 SEL 测试)

- (1) TI 可以提供技术、应用或设计建议、质量表征和可靠性数据或服务，前提是这些项目不得扩展或以其他方式影响 TI 在德州仪器 (TI) 公司半导体产品标准销售条款和条件中规定的保证，半导体产品不应产生任何义务或责任，并且 TI 提供此类项目也不产生任何义务或责任。

## 2 SEE 机制

LMP7704-SP 关注的主要单粒子效应 (SEE) 事件是单粒子门锁 (SEL)。从风险和影响的角度来看，SEL 的发生可能是极具破坏性的 SEE 事件，也是航天应用非常关心的问题。VIP050 工艺用于 LMP7704-SP。CMOS 电路引入了 SEL 易感性。如果由高能离子通道引起的过量电流注入足够高，从而触发形成寄生交叉耦合 PNP 和 NPN 双极结构（在 p-sub 和 n 阱以及 n+ 和 p+ 触点之间形成），则会发生 SEL。由单粒子启动的寄生双极结构在电源和接地之间创建了一条高导通路径（产生的稳态电流通常比正常工作电流高几个数量级），该路径持续存在（被锁存），直到电源断开或器件被高电流状态破坏为止。

执行此研究是为了评估  $V_{IN}$  偏置电压为 5.5V 且电源电压为 12V ( $V_S = \pm 6V$ ) 时的 SEL 影响。使用  $LET_{EFF} = 85MeV\text{-cm}^2/mg$  的重离子对器件进行辐照。在  $125^\circ\text{C}$  下暴露时，离子注量率为  $10^5$  离子/s- $\text{cm}^2$ ，通量为  $10^7$  离子/ $\text{cm}^2$ 。用于缓解 SEL 的 VIP050 工艺修改措施被证实足够有效，因为在通量为  $10^7$  离子/ $\text{cm}^2$ 、 $LET_{EFF}$  高达  $85MeV\text{-cm}^2$  且芯片温度为  $125^\circ\text{C}$  的情况下，LMP7704-SP 未表现出任何 SEL。

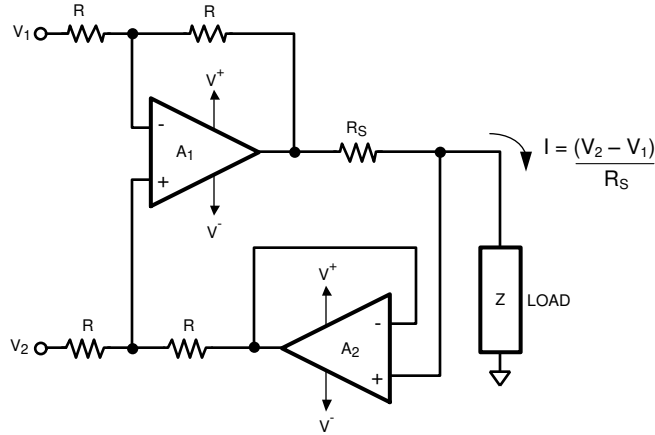


图 2-1. 典型 LMP7704-SP 应用图

### 3 测试设备和测试板信息

LMP7704-SP 采用 14 引脚 HBH CFP 封装，引脚分配如图 3-1 所示。图 3-2 显示了 LMP7704-SP 偏置图。

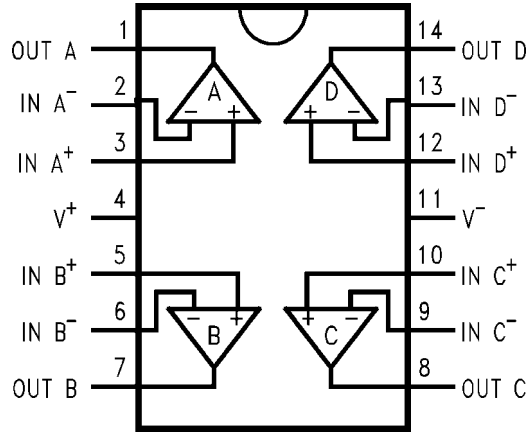


图 3-1. LMP7704-SP 引脚分配

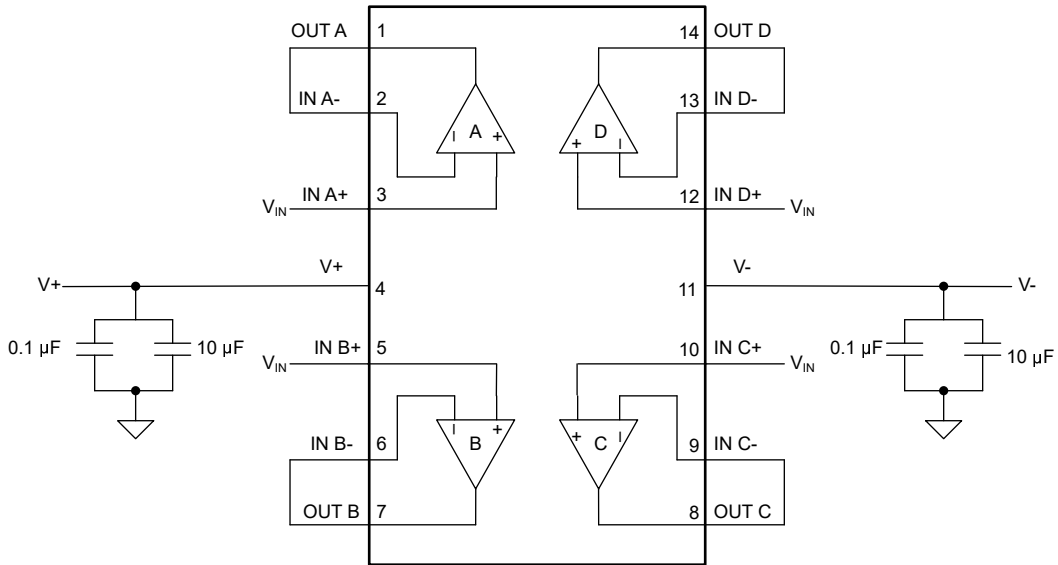


图 3-2. LMP7704-SP 偏置图

## 4 辐照设施和设置

用于本产品 SEE 研究的重离子种类由 TAMU 加速器辐射效应设施<sup>[3]</sup>使用超传导加速器和先进的电子回旋共振 (ECR) 离子源提供和交付。离子束在空气站的 1 英寸直径圆形截面积上以高均匀性传送。通过磁去聚焦实现均匀性。射束强度可在覆盖多个数量级的较大范围内进行调节。在大多数研究中，使用  $10^4$  和  $10^5$  离子/s-cm<sup>2</sup> 之间的注量率提供  $10^6$  到  $10^7$  离子/cm<sup>2</sup> 之间的重离子通量。在这些实验中，使用了镨 (Pr) 离子。所有测试的离子束均匀性均在 91% 至 98% 的范围内。

## 5 SEL 结果

在 SEL 表征期间，使用强制热空气对器件进行加热，从而将 IC 温度保持在 125°C 温度。通过 K 型热电偶监测了温度，该热电偶连接在尽可能靠近 IC 的位置。用于 SEL 测试的物类是镧 ( $^{59}\text{Pr}$ ) 离子，在  $\text{LET}_{\text{EFF}} = 85\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$  时，入射角为 39°。该离子真空中的动能为 2.114GeV (15MeV/amu 线)。两次照射行程使用了大约  $10^5$  离子/s- $\text{cm}^2$  的注量率和大约  $10^7$  离子/ $\text{cm}^2$  的通量。 $V_S$  电源电压在建议的最大电压设置为 12V 时由外部板载供电。实现该通量的照射持续时间大约为 2 分钟。两次照射期间均未观察到 SEL 事件，如表 5-1 所示。图 5-1 所示为电流与时间关系图。

表 5-1. 在入射角为 39° 时使用  $^{59}\text{Pr}$  的 LMP7704-SP SEL 条件

照射行程 #	距离 (mm)	温度 (°C)	离子	角度	注量率 (离子/s- $\text{cm}^2$ )	通量 (离子/ $\text{cm}^2$ )	$\text{LET}_{\text{EFF}}$ (MeV- $\text{cm}^2/\text{mg}$ )
10	40	125	Pr	39°	1.00E+05	1.00E+07	85
311	40	125	Pr	39°	1.00E+05	1.00E+07	85

未观察到 SEL 事件，表明 LMP7704-SP 在  $\text{LET}_{\text{EFF}} = 85\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$  且  $T = 125^\circ\text{C}$  时不受 SEL 影响。使用附录 A 中所述的 MFTF 方法，并结合  $125^\circ\text{C}$  ( $2 \times 10^7$  离子/ $\text{cm}^2$ ) 下两个照射行程的通量（或对其求和），上边界截面（使用 95% 置信水平）使用公式 1 计算得出：

$$\text{LET}_{\text{EFF}} = 85\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg} \text{ 且 } T = 125^\circ\text{C} \text{ 时, } \sigma_{\text{SEL}} \leq 1.84 \times 10^{-7}\text{cm}^2 \quad (1)$$

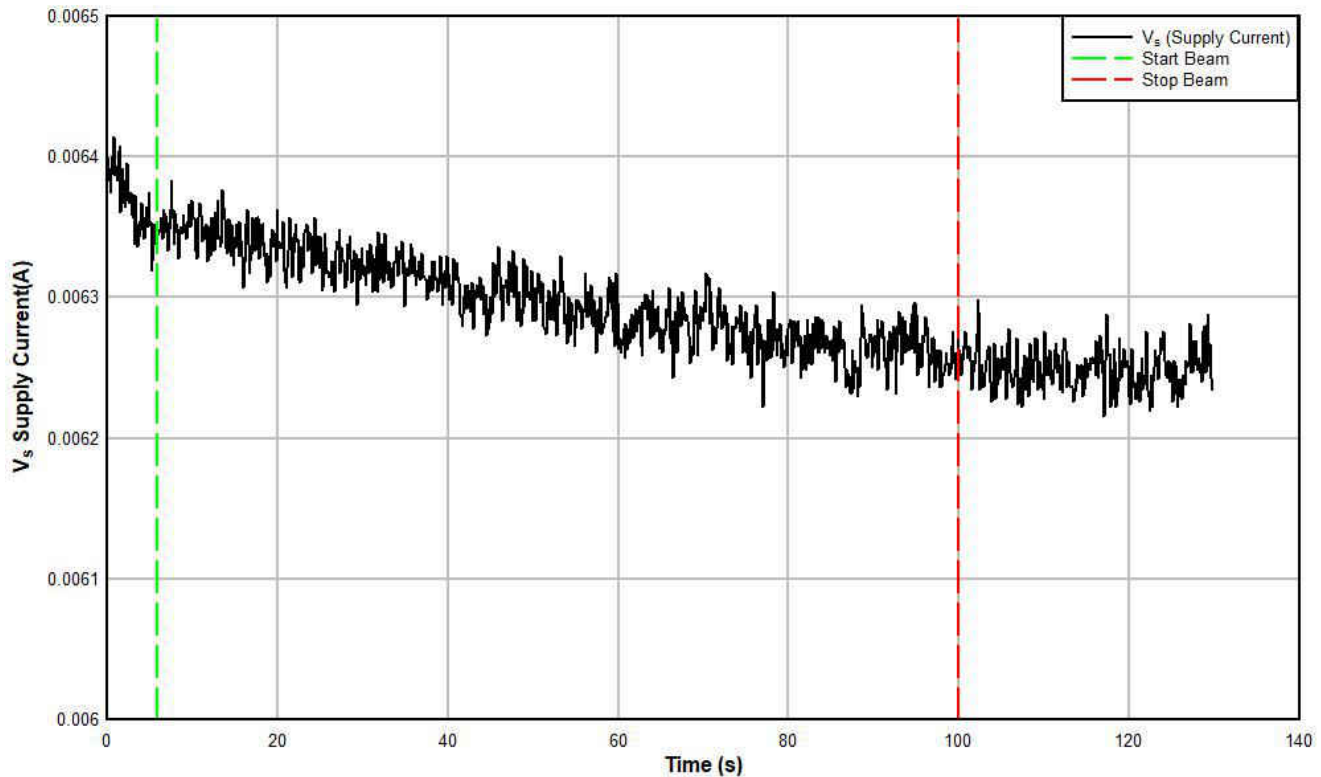


图 5-1. SEL 照射行程 10 期间  $V_S$  电流的电流与时间 (I 与 t) 数据

## 6 SET 结果

LMP7704-SP 可应对 2 至 85MeV-cm<sup>2</sup>/mg 之间的 SET。表 6-2 列出了用于测试的离子。该器件是在室温下以缓冲器配置进行测试的，有四种不同的设置，如表 6-1 所示。所有 SET 照射行程均使用了 10<sup>4</sup> 离子/s-cm<sup>2</sup> 的注量率。本报告中所讨论的 SET 被定义为输出电压超过预期输出 5% 的窗口触发值。测试过程中观察到正负翻转。

表 6-1. DUT 配置

配置	增益	电源 (±V)	输入 (V)	预期输出 (V)	触发窗口 (V)
1	1	1.35	1	1	0.95–1.05
2		6	2	2	1.9–2.1
3	10	1.35	0.1	1	0.95–1.05
4		6	0.2	2	1.9–2.1

表 6-2. 离子和入射角

LET <sub>EFF</sub> (MeV-cm <sup>2</sup> /mg)	离子	角度 (度)
85	Ho	25.5
75	Ho	0
72	Pr	25.5
65	Pr	0
54	Ag	25.5
48	Ag	0
23	Cu	25.5
9	Ar	0
2	Ne	0

在重离子照射行程中观察到的事件数显示在表 6-3 至表 6-6 中。在重离子照射行程期间，所有四个通道都受到监控。LMP7704-SP 经过测试，具有 10<sup>6</sup> 至 2 × 10<sup>6</sup> 离子/cm<sup>2</sup> 的通量范围。

表 6-3. SET 结果：V<sub>S</sub> = ±1.35V，增益 = 1

LET <sub>EFF</sub> (MeV-cm <sup>2</sup> /mg)	通量 (离子/cm <sup>2</sup> )	Ch1		Ch2		Ch3		Ch4	
		事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )
85	9.96E+05	28	2.81E-05	252	2.53E-04	248	2.49E-04	45	4.52E-05
75	1.00E+06	20	2.00E-05	248	2.48E-04	194	1.94E-04	40	4.00E-05
72	1.01E+06	23	2.29E-05	17	1.69E-05	4	3.98E-06	4	3.98E-06
65	9.70E+05	18	1.86E-05	13	1.34E-05	6	6.19E-06	20	2.06E-05
54	2.00E+06	20	1.00E-05	17	8.52E-06	7	3.51E-06	26	1.30E-05
48	1.99E+06	16	8.04E-06	14	7.04E-06	10	5.03E-06	17	8.54E-06
23	2.00E+06	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0.00E+00	1	4.99E-07
9	1.99E+06	1	5.03E-07	0	0.00E+00	0	0.00E+00	1	5.03E-07
2	2.00E+06	1	5.00E-07	0	0.00E+00	0	0.00E+00	2	1.00E-06

表 6-4. SET 结果：V<sub>S</sub> = ±6V，增益 = 1

LET <sub>EFF</sub> (MeV-cm <sup>2</sup> /mg)	通量 (离子/cm <sup>2</sup> )	Ch1		Ch2		Ch3		Ch4	
		事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )
85	1.00E+06	14	1.40E-06	67	6.70E-05	41	4.10E-05	28	2.80E-05
75	1.00E+06	16	1.60E-06	53	5.30E-05	59	5.90E-05	11	1.10E-05

表 6-4. SET 结果 :  $V_S = \pm 6V$  , 增益 = 1 (continued)

LET <sub>EFF</sub> (MeV- cm <sup>2</sup> /mg)	通量 (离子/ cm <sup>2</sup> )	Ch1		Ch2		Ch3		Ch4	
		事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )
72	1.00E+06	14	1.40E-06	15	1.50E-05	10	9.97E-06	13	1.30E-05
65	9.80E+05	13	1.33E-05	11	1.12E-05	20	2.04E-05	12	1.22E-05
54	2.00E+06	21	1.05E-05	17	8.50E-06	16	8.00E-06	18	9.00E-06
48	2.00E+06	21	1.05E-05	24	1.20E-05	10	5.00E-06	18	9.00E-06
23	2.00E+06	2	1.00E-06	0	0.00E+00	0	0.00E+00	6	3.01E-06
9	1.99E+06	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0.00E+00
2	1.99E+06	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0.00E+00

表 6-5. SET 结果 :  $V_S = \pm 1.35V$  , 增益 = 10

LET <sub>EFF</sub> (MeV- cm <sup>2</sup> /mg)	通量 (离子/ cm <sup>2</sup> )	Ch1		Ch2		Ch3		Ch4	
		事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )
85	1.01E+06	253	2.50E-04	214	2.12E-04	187	1.85E-04	288	2.85E-04
75	9.99E+05	175	1.75E-04	200	2.00E-04	145	1.45E-04	211	2.11E-04
72	9.68E+05	153	1.58E-04	154	1.59E-04	113	1.17E-04	209	2.16E-04
65	1.00E+06	101	1.01E-04	95	9.50E-05	72	7.20E-05	163	1.63E-04
54	2.00E+06	74	3.70E-05	81	4.05E-05	45	2.25E-05	124	6.20E-05
48	2.00E+06	61	3.06E-05	53	2.66E-05	32	1.60E-05	100	5.01E-05
23	2.00E+06	8	4.00E-06	15	7.50E-06	1	5.00E-07	21	1.05E-05
9	1.99E+06	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0.00E+00	2	1.01E-06
2	1.99E+06	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0.00E+00

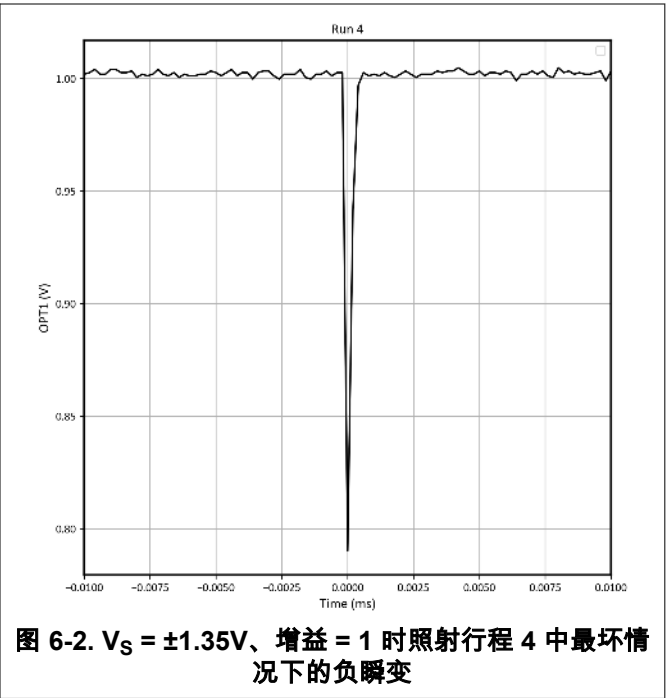
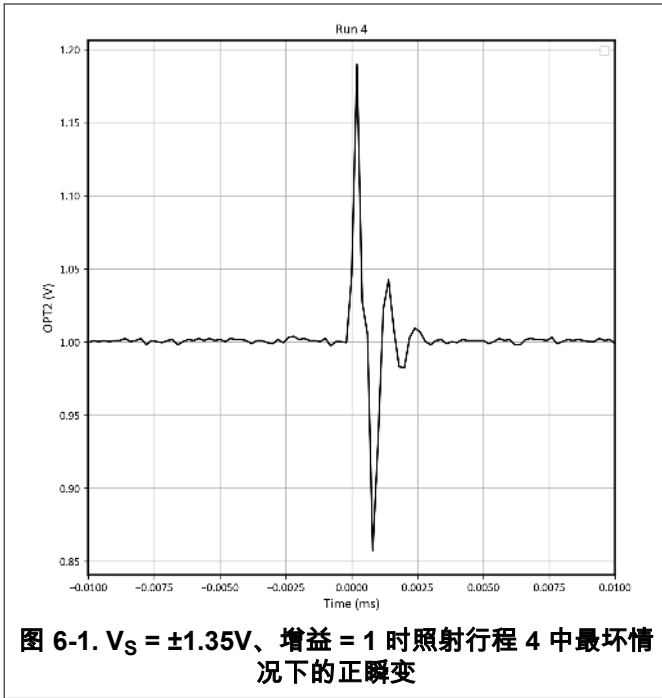
表 6-6. SET 结果 :  $V_S = \pm 6V$  , 增益 = 10

LET <sub>EFF</sub> (MeV- cm <sup>2</sup> /mg)	通量 (离子/ cm <sup>2</sup> )	Ch1		Ch2		Ch3		Ch4	
		事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )	事件百分比	截面 (cm <sup>2</sup> )
85	1.03E+06	22	2.14E-05	32	3.11E-05	20	1.94E-05	38	3.69E-05
75	9.97E+05	27	2.71E-05	20	2.01E-05	27	2.71E-05	34	3.41E-05
72	1.20E+06	22	1.83E-05	19	1.58E-05	24	1.99E-05	35	2.91E-05
65	1.00E+06	19	1.90E-05	14	1.40E-05	27	2.70E-05	30	3.00E-05
54	2.00E+06	31	1.55E-05	19	9.51E-06	38	1.90E-05	65	3.25E-05
48	2.00E+06	27	1.35E-05	19	9.50E-06	21	1.05E-05	27	1.35E-05
23	2.00E+06	2	1.00E-06	0	0.00E+00	1	5.00E-07	2	1.00E-06
9	2.00E+06	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0.00E+00	2	1.00E-06
2	1.99E+06	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0	0.00E+00

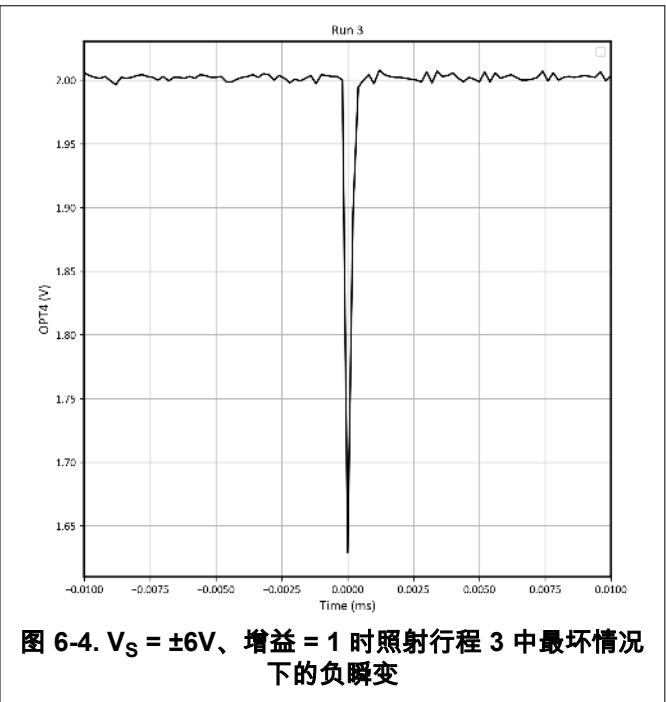
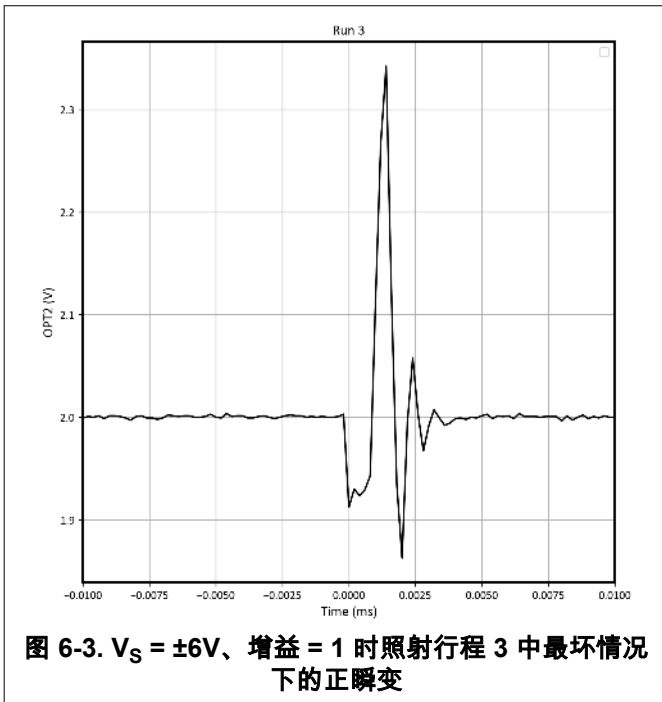
图 6-1 至图 6-8 显示了每种测试配置在 85MeV-cm<sup>2</sup>/mg 条件下的最坏情况正负瞬变。重要的是，未观察到达到电源电压电平的 SET。

当使用  $V_S = \pm 1.35V$ 、增益 = 1 进行测试时，最坏情况的正瞬变发生在通道 2 上并达到 1.189V 的峰值。该事件持续了 1.2 $\mu$ s。最坏情况的负瞬变发生在通道 1 上，达到 0.79V 的峰值。该事件持续了 0.39 $\mu$ s。





当使用  $V_S = \pm 6V$ 、增益 = 1 进行测试时，最坏情况的正瞬变发生在通道 2 上并达到 2.34V 的峰值。该事件持续了 0.81 $\mu$ s。最坏情况的负瞬变发生在通道 4 上，达到 1.62V 的峰值。该事件持续了 0.39 $\mu$ s。



当使用  $V_S = \pm 1.35V$ 、增益 = 10 进行测试时，最坏情况的正瞬变发生在通道 3 上并达到 1.2V 的峰值。该事件持续了 1.44 $\mu$ s。最坏情况的负瞬变发生在通道 4 上，达到 0.72V 的峰值。该事件持续了 1.43 $\mu$ s。

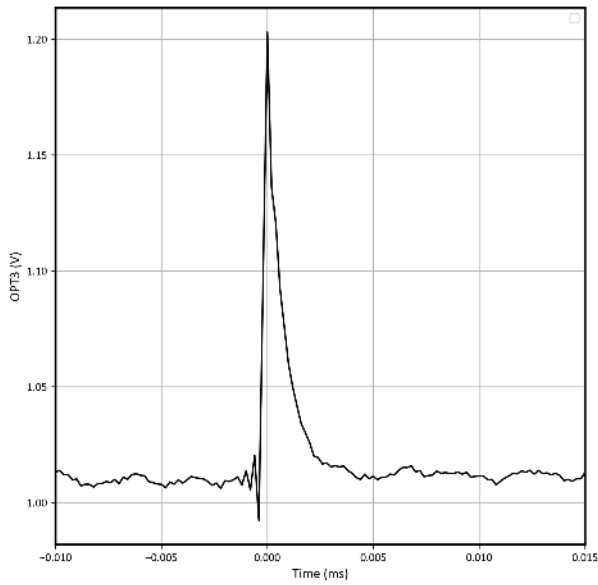


图 6-5.  $V_S = \pm 1.35V$ 、增益 = 10 时照射行程 5 中最坏情况下的正瞬变

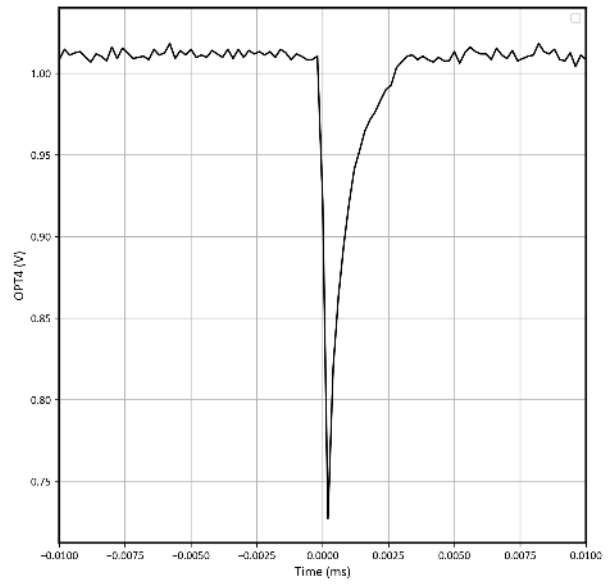


图 6-6.  $V_S = \pm 1.35V$ 、增益 = 10 时照射行程 5 中最坏情况下的负瞬变

当使用  $V_S = \pm 6V$ 、增益 = 10 进行测试时，最坏情况的正瞬变发生在通道 4 上并达到 2.56V 的峰值。该事件持续了  $0.32\mu s$ 。最坏情况的负瞬变发生在通道 1 上，达到 1.7V 的峰值。该事件持续了  $2\mu s$ 。

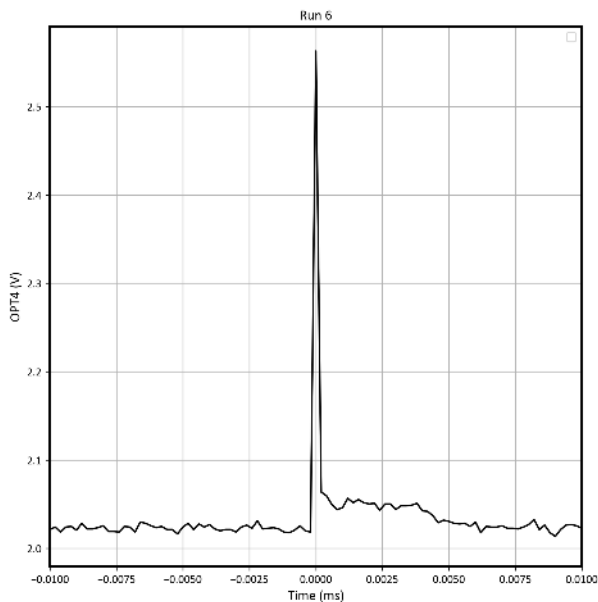


图 6-7.  $V_S = \pm 6V$ 、增益 = 10 时照射行程 6 中最坏情况下的正瞬变

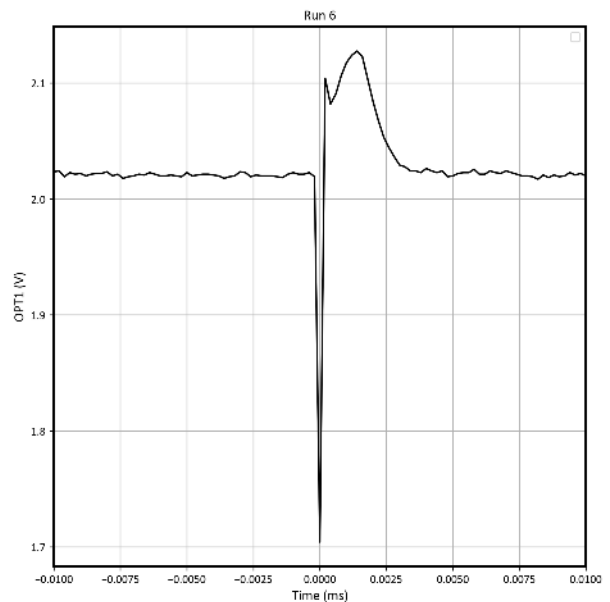


图 6-8.  $V_S = \pm 6V$ 、增益 = 10 时照射行程 6 中最坏情况下的负瞬变

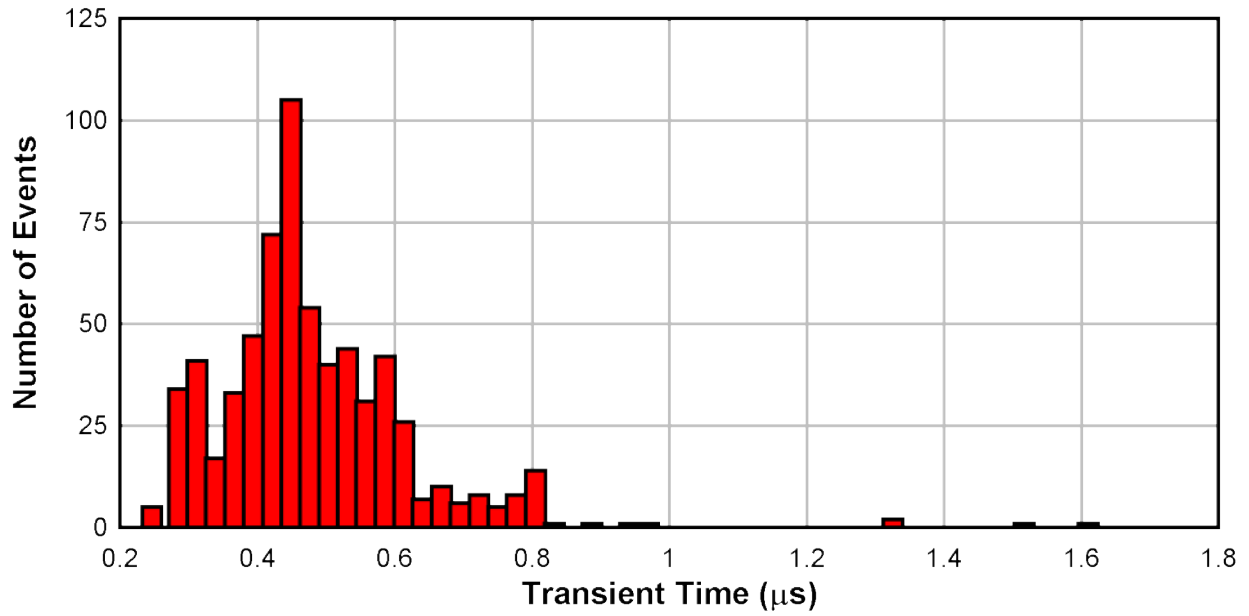


图 6-9. 电源电压为  $\pm 1.35\text{V}$  且增益为 1 时每次翻转的瞬态恢复时间直方图

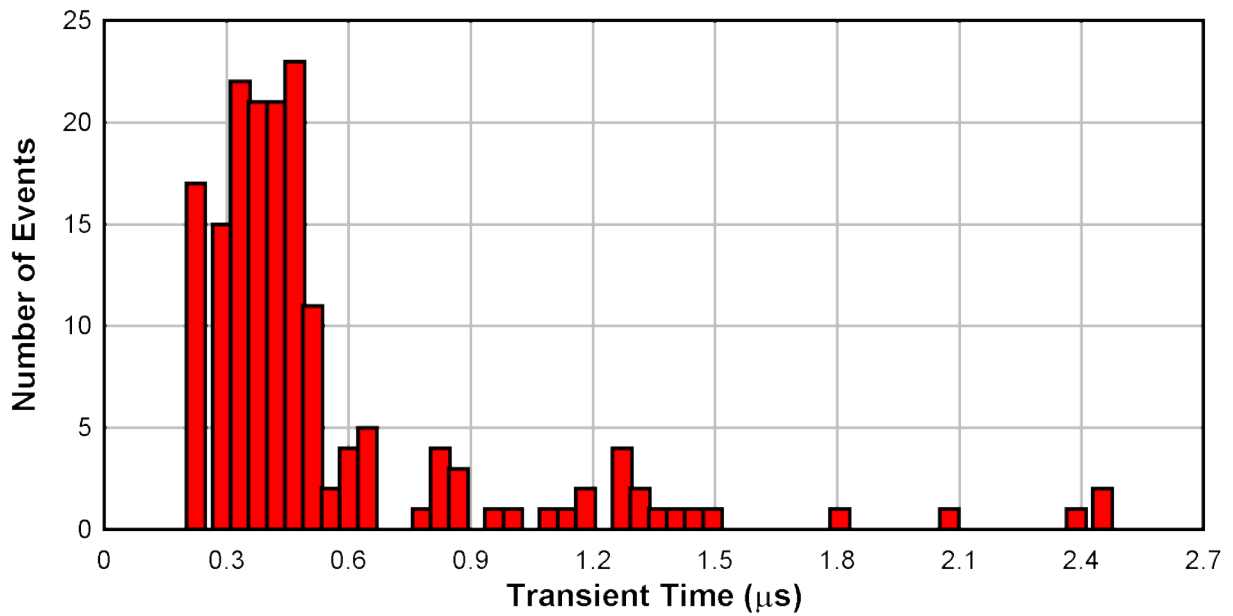


图 6-10. 电源电压为  $\pm 6\text{V}$  且增益为 1 时每次翻转的瞬态恢复时间直方图

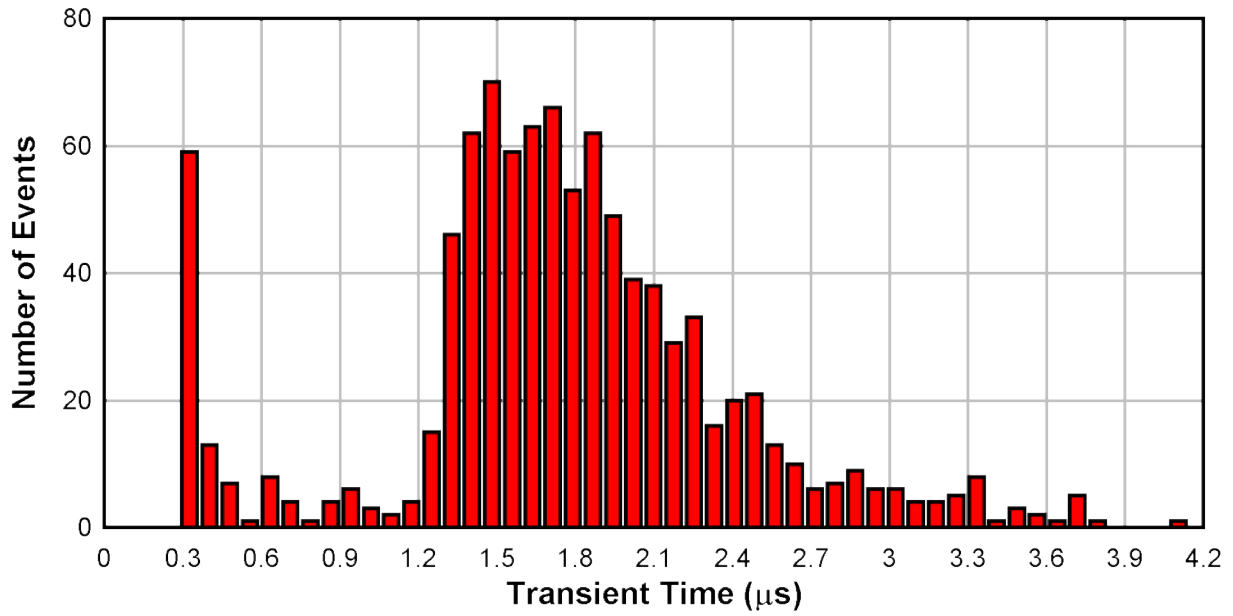


图 6-11. 电源电压为  $\pm 1.35\text{V}$  且增益为 10 时每次翻转的瞬态恢复时间直方图

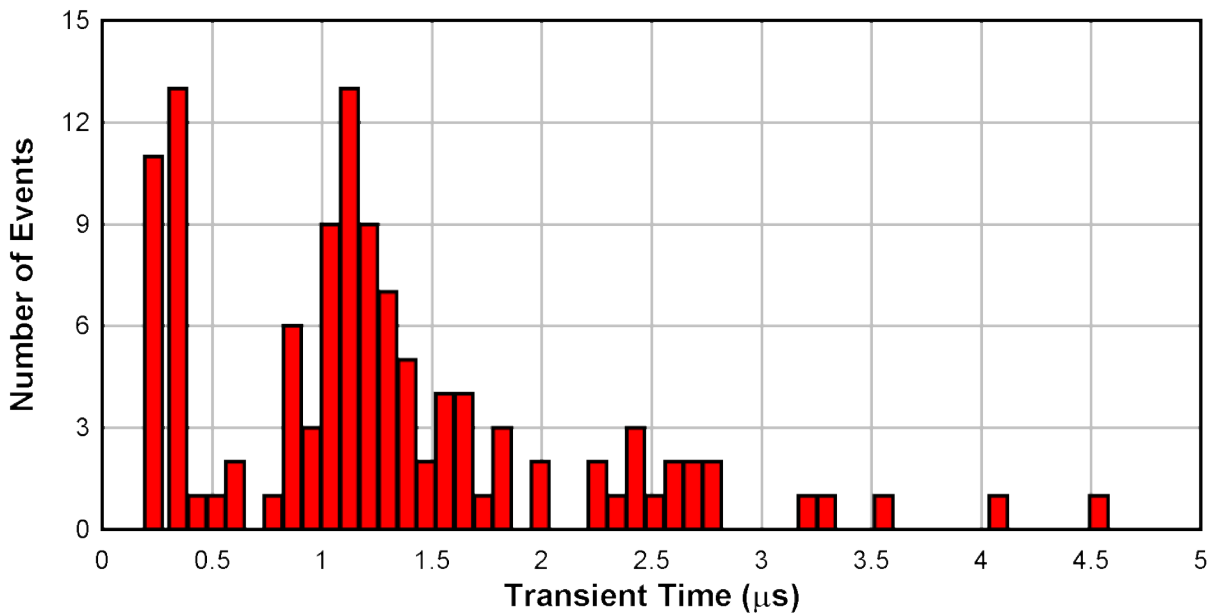


图 6-12. 电源电压为  $\pm 6\text{V}$  且增益为 10 时每次翻转的瞬态恢复时间直方图

图 6-13 至图 6-28 显示了针对每个通道 SET 测试期间使用的不同运行模式的 SET 截面图与 LET 关系图。在较低的 LET 下，发生的瞬态事件极少 ( $\leq 2$ )，导致不同通道的起始时间不同。这会导致每个通道的截面图看起来不同。

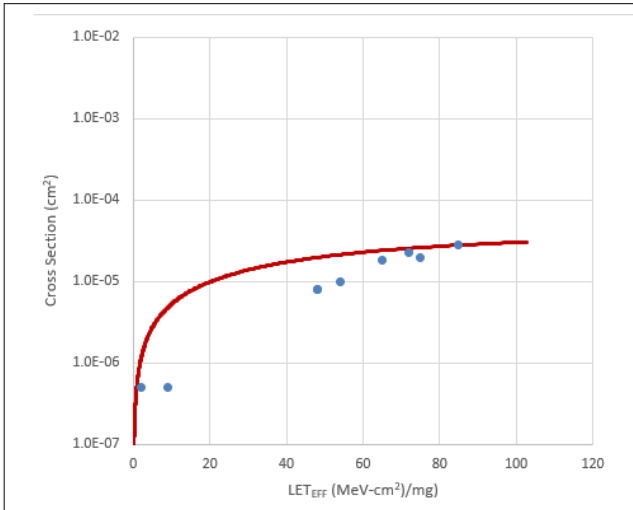


图 6-13. 威布尔图 :  $V_S \pm 1.35V$  且增益 = 1 - 通道 1

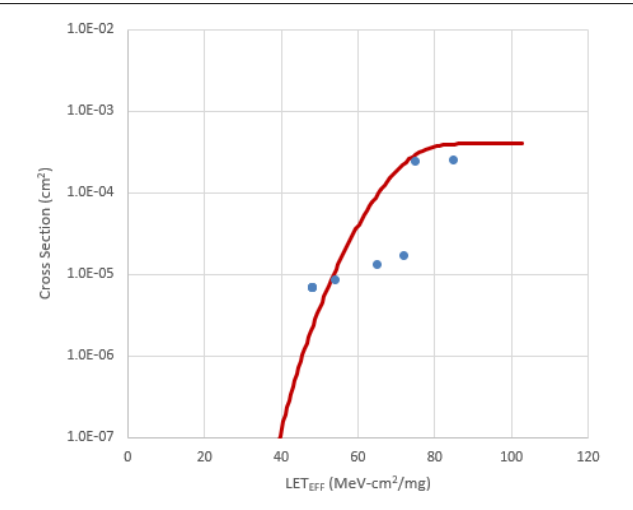


图 6-14. 威布尔图 :  $V_S \pm 1.35V$  且增益 = 1 - 通道 2

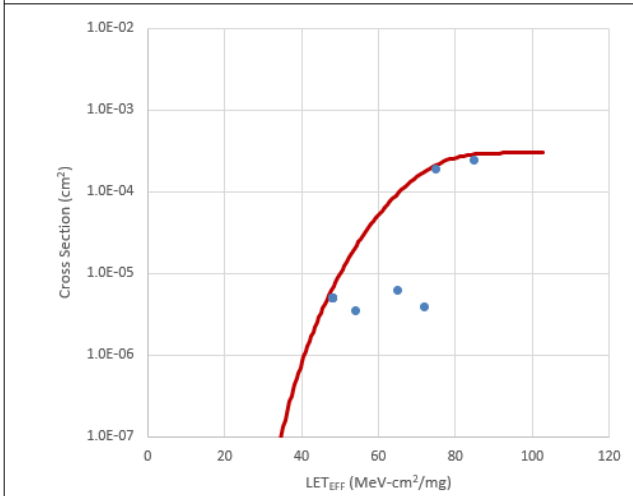


图 6-15. 威布尔图 :  $V_S \pm 1.35V$  且增益 = 1 - 通道 3

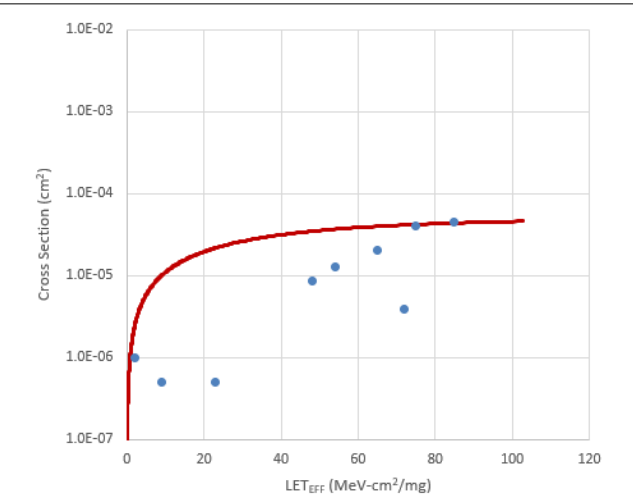


图 6-16. 威布尔图 :  $V_S \pm 1.35V$  且增益 = 1 - 通道 4

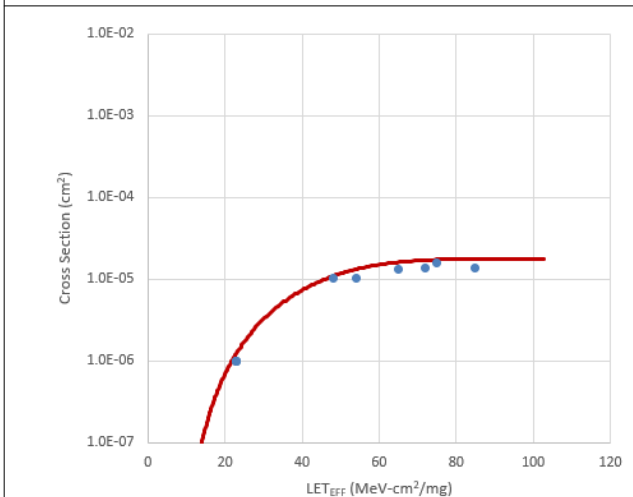


图 6-17. 威布尔图 :  $V_S \pm 6V$  且增益 = 1 - 通道 1

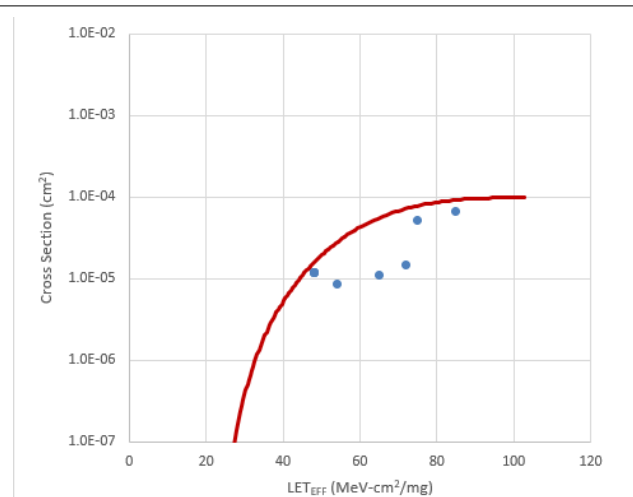


图 6-18. 威布尔图 :  $V_S \pm 6V$  且增益 = 1 - 通道 2

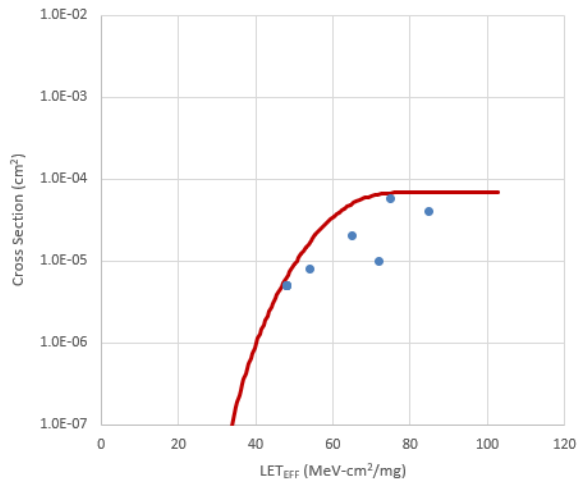


图 6-19. 威布尔图 :  $V_S \pm 6V$  且增益 = 1 - 通道 3

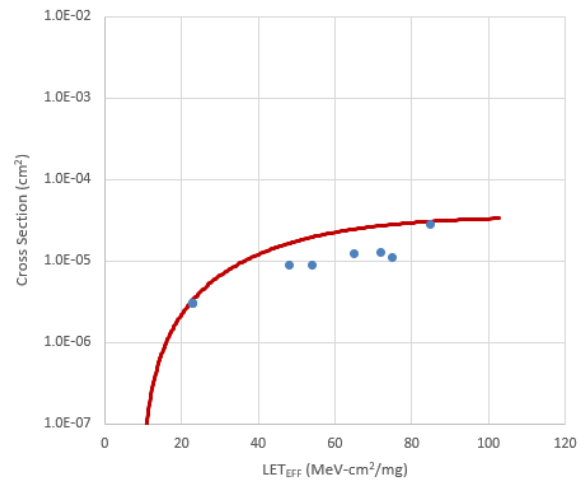


图 6-20. 威布尔图 :  $V_S \pm 6V$  且增益 = 1 - 通道 4

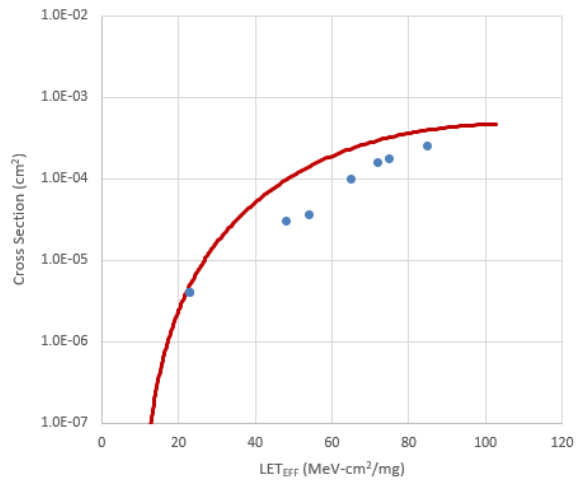


图 6-21. 威布尔图 :  $V_S \pm 1.35V$  且增益 = 10 - 通道 1

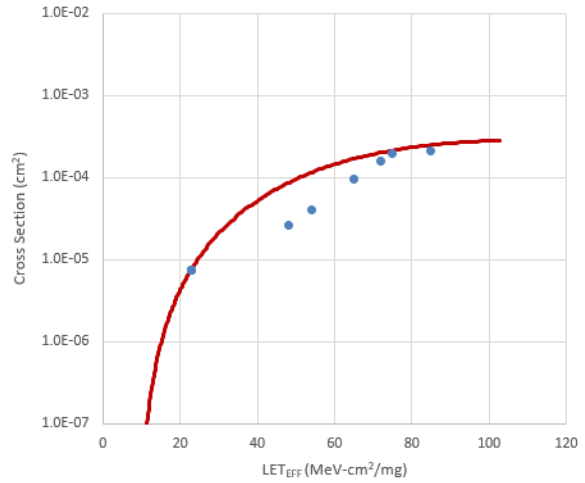


图 6-22. 威布尔图 :  $V_S \pm 1.35V$  且增益 = 10 - 通道 2

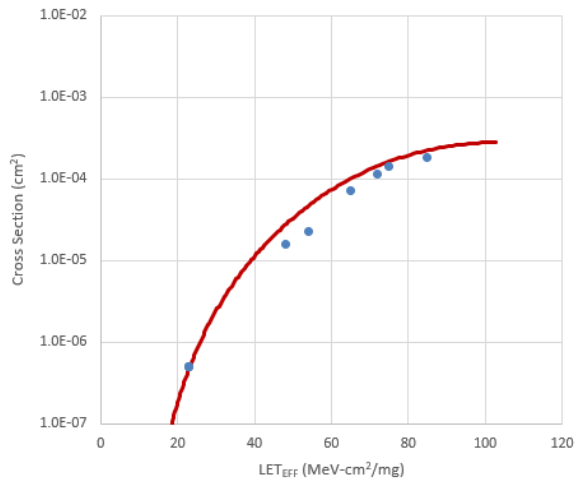


图 6-23. 威布尔图 :  $V_S \pm 1.35V$  且增益 = 10 - 通道 3

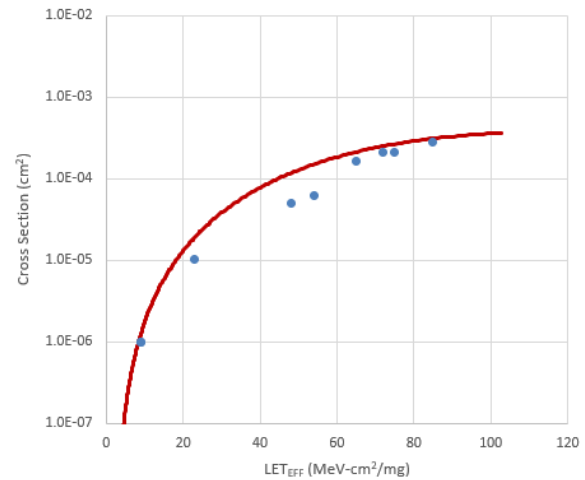


图 6-24. 威布尔图 :  $V_S \pm 1.35V$  且增益 = 10 - 通道 4

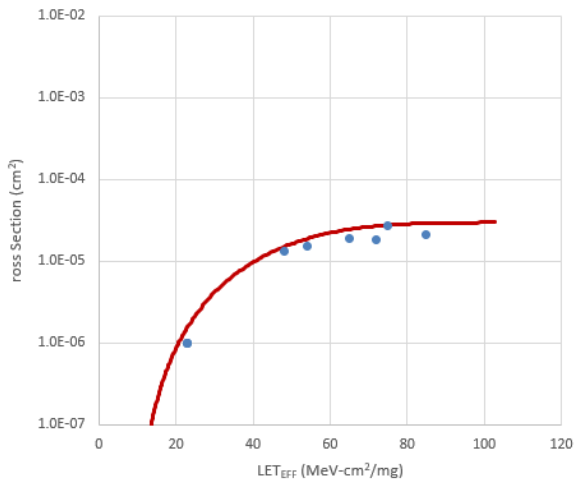


图 6-25. 威布尔图 :  $V_S \pm 6V$  且增益 = 10 - 通道 1

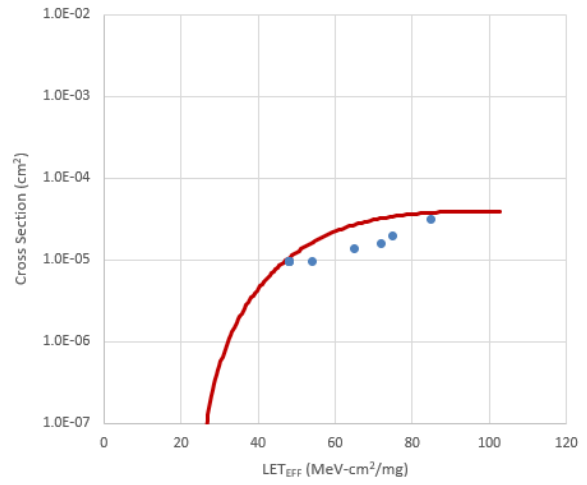


图 6-26. 威布尔图 :  $V_S \pm 6V$  且增益 = 10 - 通道 2

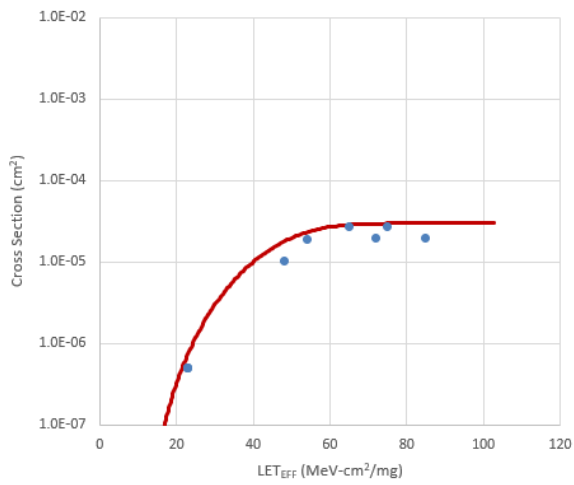


图 6-27. 威布尔图 :  $V_S \pm 6V$  且增益 = 10 - 通道 3

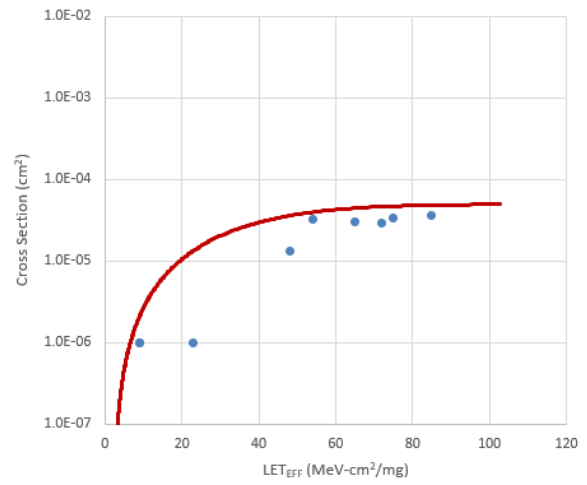


图 6-28. 威布尔图 :  $V_S \pm 6V$  且增益 = 10 - 通道 4

## 7 总结

我们研究了 LMP7704-SP 的辐射影响，LMP7704-SP 是一款具有轨到轨输入和输出以及 CMOS 输入级的耐辐射精密放大器。该器件通过测试，具有闩锁效应抑制，T = 125°C 时抗扰度高达  $LET_{EFF} = 85\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。SET 抗扰度规格为  $LET_{EFF} = 2\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$  至  $LET_{EFF} = 85\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。其中包含最差情况下的瞬变和截面图。测试是在多种配置和电源电压下进行的。



## A 置信区间计算

对于在单次曝光中出现数百次故障的传统产品，可以确定在重离子光束中测试的器件的平均故障率，该故障率是高确定性和合理严格的标准偏差的函数，因此，我们对计算出的截面是否准确有很高的把握。

但是，使用耐辐射器件时，很难确定截面，因为在整个暴露过程中通常很少或没有观察到故障。使用具有标准偏差的平均故障率来确定截面不再可行，并且假设在结果为零时发生单个错误的常见做法会最终导致截面被大大低估。

在观察到少量故障或观察不到故障的情况下，建议使用置信区间和卡方分布。卡方分布特别适合在故障以恒定速率发生时用于确定可靠性级别。在 SEE 测试中，如果在辐照区域内离子事件的时间和位置随机，则预计故障率与时间无关（假设总电离剂量引起的参数偏移不会影响故障率），因此，使用卡方统计技术是有效的（由于事件非常少，通常使用指数分布或泊松分布）。

在典型的 SEE 实验中，将待测器件 (DUT) 暴露在已知的固定通量（离子/cm<sup>2</sup>）中，同时监控 DUT 上是否发生故障。这类似于固定时间可靠性测试，更具体地说，是定时截尾测试，即在固定时间后，无论是否发生故障，可靠性测试都会终止（在 SEE 测试中，用通量代替时间，因此是固定通量测试）。计算置信区间专门提供了一系列值，其中可能包含所需参数（实际故障数/通量）。置信区间是在特定的置信水平上构建的。例如，95% 的置信水平意味着，如果对给定数量的器件进行多次采样并且估算每次测试的置信区间，那么生成的置信区间将在大约 95% 的情况下包含真实的总体参数。

要使用置信区间从零结果（给定通量下未观察到任何故障）估算截面，我们先使用 [方程式 2](#) 确定固定时间测试的下限（最小）平均失效前时间的标准可靠性（假定为指数分布）：

$$MTTF = \frac{2nT}{\chi^2_{2(d+1); 100(1-\frac{\alpha}{2})}} \quad (2)$$

其中

- *MTTF* 是最小（下限）平均失效前时间
- *n* 是待测器件数（假设每个器件在相同条件下进行测试）
- *T* 是测试时间
- $\chi^2$  是在  $100(1 - \alpha / 2)$  置信水平下评估的卡方分布
- *d* 是自由度（观察到的故障数）

本文稍作修改，我们对不等式进行倒数计算并用 *F*（通量）代替 *T*，如 [方程式 3](#) 所示：

$$MFTF = \frac{2nF}{\chi^2_{2(d+1); 100(1-\frac{\alpha}{2})}} \quad (3)$$

其中

- *MFTF* 是平均失效前通量
- *F* 是测试通量
- $\chi^2$  是在  $100(1 - \alpha / 2)$  置信水平下评估的卡方分布
- *d* 是自由度（观察到的故障数）

MTTF 和事件发生率之间的反比关系可用于 MFTF。因此，上限截面等于 MFTF 的倒数，如 [方程式 4](#) 所示：

$$\sigma = \frac{\chi^2_2(d+1); 100(1 - \frac{\alpha}{2})}{2nF} \quad (4)$$

假设所有测试均在总通量为  $10^6$  离子/cm<sup>2</sup> 时终止。此外，假设在相同条件下测试多个性能差异较大的器件。假设置信水平为 95% ( $\sigma = 0.05$ )。请注意，随着  $d$  从 0 个事件增加至 100 个事件，实际置信区间会变小，这表示总体参数（在本例中为截面）的真实值范围接近平均值 + 1 标准偏差。这样就解释了为何随着观察到的事件越多，统计信息可以得到优化，从而降低实际器件性能的不确定性。

**表 A-1. MFTF 以及  $\sigma$  的实验示例计算 (使用 95% 置信水平) <sup>(1)</sup>**

自由度 (d)	2(d + 1)	$\chi^2 @ 95\%$	计算的截面 (cm <sup>2</sup> )		
			上限 @ 95% 置信水平	平均值	平均值 + 标准偏差
0	2	7.38	3.69E-06	0.00E+00	0.00E+00
1	4	11.14	5.57E-06	1.00E-06	2.00E-06
2	6	14.45	7.22E-06	2.00E-06	3.41E-06
3	8	17.53	8.77E-06	3.00E-06	4.73E-06
4	10	20.48	1.02E-05	4.00E-06	6.00E-06
5	12	23.34	1.17E-05	5.00E-06	7.24E-06
10	22	36.78	1.84E-05	1.00E-05	1.32E-05
50	102	131.84	6.59E-05	5.00E-05	5.71E-05
100	202	243.25	1.22E-04	1.00E-04	1.10E-04

- (1) 针对多个不同的观察结果（在固定通量测试期间， $d = 0, 1, 2, \dots, 100$  个观察到的事件）使用 95% 的置信水平，并假设每个测试的通量为  $10^6$  离子/cm<sup>2</sup>。请注意，随着观察到的事件数量的增加，置信区间接近均值。

## B 参考文献

1. M. Shoga 和 D. Binder, “Theory of Single Event Latchup in Complementary Metal-Oxide Semiconductor Integrated Circuits”, *IEEE Trans.Nucl.Sci.*, 33(6) 卷, 1986 年 12 月, 1714-1717 页。
2. G. Bruguier 和 J. M. Palau, “Single particle-induced latchup”, *IEEE Trans.Nucl.Sci.*, 43(2) 卷, 1996 年 3 月, 522-532 页。
3. TAMU 辐射效应设施网站。 <http://cyclotron.tamu.edu/ref/>
4. “The Stopping and Range of Ions in Matter”(SRIM) 软件仿真工具网站。 [www.srim.org/index.htm#SRIMMENU](http://www.srim.org/index.htm#SRIMMENU)
5. D. Kececioglu, “Reliability and Life Testing Handbook”, 第 1 卷, PTR Prentice Hall, New Jersey, 1993 年, 186-193 页。
6. ISDE CRÈME-MC 网站。 <https://creme.isde.vanderbilt.edu/CREME-MC>
7. A. J. Tylka、J. H. Adams、P. R. Boberg 等, “CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code”, *IEEE Trans. on Nucl.Sci.*, 44(6) 卷, 1997 年 12 月, 2150-2160 页。
8. A. J. Tylka、W. F. Dietrich 和 P. R. Boberg, “Probability distributions of high-energy solar-heavy-ion fluxes from IMP-8: 1973-1996”, *IEEE Trans. on Nucl.Sci.*, 44(6) 卷, 1997 年 12 月, 2140-2149 页。

## C 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (February 14, 2023) to Revision A (February 24, 2023)	Page
• 向节 2 添加了电源电压条件说明。 .....	3
• 更改了节 3 中的 LMP7704-SP 偏置图以更正 V- 电源标签。 .....	4
• 更改了节 5 中的 LMP7704-SP SEL 条件表, 以更正注量率和通量单位。 .....	6
• 更改了节 6 中的 SET 结果表以添加通量单位。 .....	7

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司