

Q/NSSC

中国科学院国家空间科学中心标准

Q/NSSC 010—2025

星用激光通信光电器件的空间辐射 效应试验指南

Test guideline for Space Radiation Effects of optoelectronic devices in
satellite laser communication

2025-05-15 发布

2025-05-15 实施

中国科学院国家空间科学中心

批准

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号与缩略语	3
5 总则	3
5.1 试验单位	3
5.2 试验人员	3
5.3 仪器与设备	4
5.4 试验环境	4
5.5 非电离效应（位移损伤）产生的电离效应影响	4
5.6 辐射安全和防护	4
6 需考虑的因素	5
6.1 辐射源	5
6.2 试验样品	5
6.3 光电测试	6
6.4 试验方案制定	7
6.5 试验规程	8
6.6 试验报告	8
附录 A（资料性） 国内目前可获得辐射源	10
附录 B（资料性） 地面辐照试验流程图示例	11
附录 C（资料性） 辐照环境专用分析软件简介	12

前 言

本文件按照《空间中心标准管理办法》和GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定给出的规则起草。

本文件由中国科学院国家空间科学中心空间天气效应中心提出。

本文件由中国科学院国家空间科学中心质量管理处归口。

本文件起草单位和部门：中国科学院国家空间科学中心空间天气效应中心、西北核技术研究院、中国科学院上海技术物理研究所。

本文件主要起草人：王英豪、王祖军、孙小进、马英起、上官士鹏、赵旭。

星用激光通信光电器件的空间辐射效应试验指南

1 范围

本文件规定了对星用激光通信光电器件的空间辐射效应进行试验评估的基本要求、方法和程序。

本文件适用于利用地面加速器手段对星用激光通信光电器件的空间辐射效应试验。其它未包含的光电器件类型，如光谱仪、光度计、光电开关、光电导等，可依照其工作原理的相似性参考本指南。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。本文件与现行的总剂量效应、位移损伤效应和单粒子效应相关标准属于并列关系。

GB 18871-2002	电离辐射防护与辐射源安全基本标准
GB/T 42969-2023	元器件位移损伤试验方法
GJB 7242-2011	单粒子效应试验方法和程序
GJB 1649-1993	电子产品防静电放电控制大纲
GJB 2712A-2009	测量设备的质量保证要求-计量确认体系
GJB 548B-2005	微电子器件试验方法和程序

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

总剂量效应 Total Ionizing Dose

γ 射线或高能粒子在集成电路的材料中电离产生电子空穴对，电子空穴随即发生复合、扩散和漂移，最终在氧化层中形成氧化物陷阱电荷或者在氧化层与半导体材料的界面处形成界面陷阱电荷的现象。

注：总剂量效应会使器件的性能降低甚至失效。属于电离效应、累积效应。

3.2

位移损伤效应 Displacement Damage Effects

高能粒子在材料中通过弹性或非弹性碰撞导致材料晶格结构损伤，原始晶格位置出现空位，形成肖特基或弗伦克尔缺陷，从而改变了器件原有的电学结构和性能的现象。

注：属于非电离效应。

3.3

单粒子效应 Single Event Effect

单个高能粒子入射到半导体器件时产生高密度的电子空穴对，并被器件的反偏PN结吸收，导致电路的逻辑状态发生瞬态的扰动甚至永久的损伤的现象。

注：单粒子效应常见有单粒子翻转、单粒子锁定、单粒子烧毁等。属于电离效应、瞬态效应等。

3.4

原位测试 in-situ testing

不移动器件，辐照期间对器件进行的性能或功能测试。

[定义源自GB/T 42969-2023]。

3.5

移位测试 displacement testing

将器件从辐照区移开后对器件进行的性能或功能测试。

[定义源自GB/T 42969-2023]。

3.6

等效注量 equivalent fluence

不同种类或不同能量的粒子产生相同辐射损伤的注量。

[定义源自GB/T 42969-2023]。

3.7

时变效应 time-dependent effects ()

辐照后，由于辐射感生陷阱电荷的产生或退火引起器件性能参数的显著退化的现象。

[定义源自GJB 548B-2005]。

注：辐照期间器件也可能发生类似效应。

3.8

加速退火试验 acclerated annealing test

利用提高温度来加速时变效应的试验。

[定义源自GJB 548B-2005]。

3.9

过辐照试验 overtest

为了验证器件抗辐射能力达到规定值，对器件进行超过规定剂量的辐射的试验。

4 符号与缩略语

下列缩略语适用于本文件。

PN结：由一个N型掺杂区和一个P型掺杂区紧密接触所构成的触界面

CCD：电荷耦合器件

APD：雪崩光电二极管

PIN：光电二极管

Er：铒元素

Yb：镱元素

⁶⁰Co：钴60

APS：动态像元敏感器

MOS：金属-氧化物半导体场效应晶体管

TID：总剂量效应

5 总则

以下为总剂量、位移损伤和单粒子辐照试验通用的基础原则。

5.1 试验单位

承担辐照试验的单位应有进行高能粒子辐照试验的相关资质。

5.2 试验人员

试验人员应掌握半导体器件的基础知识，了解元器件辐射效应机理，具有辐照试验经验，应接受过相应的技能培训。

5.3 仪器与设备

所使用的仪器和设备应按照GJB 2712A中第4章的要求进行校准，并处于计量有效期内。

重复应用于辐照场内的仪器、设备、线缆，试验前应检查其物理性能和电性能，以确保其性能的有效性。

获得试验方和委托方的共同认可，试验线路板的几何设计及元器件的布局应保证待测器件接受到均匀的辐照。

5.4 试验环境

试验环境要求如下：

- a) 环境温度：15°C-35°C；
- b) 相对湿度：20%-80%；
- c) 静电防护满足 GJB 1649-1993 规定；
- d) 电、水、气线路布置合理且有安全措施，与检测无关的物品不得放置在实验室内；
- e) 安全要求满足 GB18871-2002 标准。

5.5 非电离效应（位移损伤）产生的电离效应影响

位移损伤试验过程中应监测质子产生的电离总剂量（避免其产生的总剂量效应引起的误差），或根据质子能量和注量计算质子产生的电离总剂量。

根据辐照的质子注量，计算试验样品受到的电离总剂量 TID：

$$TID = \Phi(E) \times LET(E) \times 1.6 \times 10^{-5} \dots \dots \dots (1)$$

式中：

TID—质子产生的电离总剂量，单位为 rad(Si)；

$\Phi(E)$ —质子注量，单位为质子数/cm²；

LET(E)—质子穿过被照射物质时，单位路径长度上的电离能损，单位为 MeV cm²/mg；

质子在穿过被照射物质的路径上，能量将出现衰减，其在路径上不同位置的 LET 值也将发生变化。

质子产生的电离总剂量不得超过器件的抗电离总剂量辐射能力。

5.6 辐射安全和防护

位移损伤试验的放射卫生防护按 GB18871 的规定。

经质子、中子辐射的部件具有放射性。经历过辐射环境的试验样品或设备应按 GB18871 或辐射源

单位要求进行处理和贮存。

6 需考虑的因素

6.1 辐射源

a) 辐射源选择应遵循如下原则：

- 1) 选择可获得的加速器产生的高能质子、中子和重离子辐射源；
- 2) 选择高能粒子时，应考虑粒子的射程是否足够，需要时，试验样品应开帽；
- 3) 当选用质子、能量不达标时，若试验样品无法开帽，可考虑中子辐射源；
- 4) 辐照到待测器件处束流能量和注量的非均匀性小于 10%。

b) 质子辐射源

不同能量的质子，非电离损伤不同。建议质子能量在1~100 MeV之间，质子的注量率在 $10^6\sim 10^8/\text{cm}^2\text{ s}$ 范围内可调。

质子试验能量选择应以预期应用的空间辐射环境为依据，采用专用环境分析软件，见附录C，考虑轨道参数和屏蔽厚度，计算航天器内部的质子谱，根据计算结果，选择合适的覆盖航天器内部质子能量范围的质子。

c) 中子辐射源

中子辐射源应能输出等效 1-15 MeV 能量的中子，中子的注量率在 $10^8\sim 10^{10}/\text{cm}^2\text{ s}$ 范围内可调，试验用中子注量率应不高于 $10^9/\text{cm}^2\text{ s}$ 。

d) 注量率

按一般经验，综合考虑成本和地面等效的准确性，建议粒子注量率在 $10^5\sim 10^8/\text{cm}^2\text{ s}$ 范围内，根据辐射源条件、任务情况和等效注量要求，选择合适的注量率。总剂量效应的剂量率一般影响远远没有累积剂量大，在确保样品温度没有明显变化条件下，重点考虑时间成本选择剂量率即可。

e) 束流测量系统

束流测量系统的使用建议如下：

- 1) 采用闪烁探测器、位置灵敏探测器、电离室，或次级粒子探测器等适用的仪器，测量质子的注量。
- 2) 采用快中子活化箔或其它适用的测试仪器，测量中子注量。
- 3) 采用法拉第筒、闪烁探测器等，测量重离子注量。
- 4) 测量精度应优于 10%。

6.2 试验样品

a) 样品数量

除非另有规定，试验样品数为每晶圆1只，或每检验批1只。另有1只对比测试样品，对比测试样品不辐照，每次和试验样品一起测试并保留测试数据。试验样品应为同批次电测合格器件。试验样品应随机抽取。

对于 CCD 等价值较高的器件类型，试验样品数量可减少，但不应少于每检验批 1 只。

b) 样品封装处理

原则上尽量采取开封装的进行实验以保证数据精准性，样品建议按照如下规则进行开封装处理：

对于分立器件或正面键合的器件，可以采用开器件正面封装并正面辐照，样品开封装建议与 GJB 7242-2011 标准要求一致；开封装后，应对试验样品进行测试，只有测试合格的样品方可进行后续试验。

对于不可开封装的器件，可根据封装材料和厚度和高能粒子类型，经过计算后适当调整粒子能量和注量。

6.3 光电测试

a) 光电参数测试

测试项目由试验方和委托方共同确定，并按产品详细标准明确测试条件及判据；对试验样品的测试在辐照前、后均应进行。

b) 一般测试参数

原位测试、移位测试均可。典型器件（含材料）的常见重点测试参数如下：

- 1) 光源激光器：输出光功率、阈值电流、峰值波长位置、工作电流、缺陷类型、缺陷能级等。
- 2) CCD、APD 和点探测器：暗电流密度、阈值电压、成像质量、增益性能（限 APD）、载流子传递效率等。
- 3) PIN 光电二极管：暗电流、感光波长、响应时间等。
- 4) 有源光纤：传输损耗、缺陷色心等。

注：存在时变效应的器件，需额外进行加速退火试验。对于部分温度较为敏感的器件如光源激光器，要做温度试验修正辐照时温度变化而导致的性能波动。

c) 典型光电器件的空间辐射效应和推荐粒子及剂量

- 1) 光源激光器：对基于 PN 结的连续能级半导体激光器采用 ^{60}Co - γ 射线或脉冲加速器产生的 X 射线进行总剂量效应测试，采用直线加速器产生的 $>1\text{ MeV}$ 高能电子束进行位移损伤测试；对分立能级的量子点激光器，采用 $1\text{-}5\text{ MeV}$ 低能质子束进行位移损伤测试。除此之外，由于光源激光器包含电路部分，需要使用重离子进行单粒子效应测试。
- 2) CCD、APD 和点探测器：采用 ^{60}Co - γ 射线进行总剂量测试，使用 $40\text{-}100\text{ MeV}$ （若能开盖可降低至 $5\text{-}10\text{ MeV}$ ）的高能质子进行位移损伤测试，也可使用 $10\text{-}15\text{ MeV}$ 的中子。除此之外，探测器的配套电路部分，需要使用重离子进行单粒子效应测试。

3) PIN 光电二极管：采用 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线进行总剂量测试。配套电路部分需要使用重离子进行单粒子效应测试。

4) 有源光纤：光纤本身主要受总剂量效应影响，采用 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线进行总剂量测试。一般情况下，掺 Er 光纤比普通光纤总剂量效应大，掺 Yb 光纤比掺 Er 光纤更大（均为一个数量级以上的差距）。有源光纤的芯片部分需要使用重离子进行单粒子效应测试。

d) 测试时间

辐照后，首先进行感生放射性测量和污染监测，若符合 4.6 条规定，光电参数测试应在辐照后 24 h 内完成；若不符合安全操作规定，可延长放置在一周内完成测试，或者进行远距离测试。如果残余的放射性高于安全操作的规定，进行测试的时间可延长到一个月。

e) 地面加速试验与空间轨道辐射环境等价性

不同轨道的地面加速试验与空间轨道辐射环境等价情况见表 1。

表 1 不同轨道的地面加速试验与空间轨道辐射环境等价对照表

轨道类型	重点关注空间辐射效应	辐照剂量/年
低地轨道（LEO）	无	1~3 Krad(Si)
中地球轨道（MEO）	总剂量效应、位移损伤效应	300 Krad(Si)
地球同步轨道（GEO）	单粒子效应	50~100 Krad(Si)

f) 辐照偏置

试验样品若不加偏压，外引线全部短路连接或全部开路，而 MOS 器件和含有 MOS 结构的元器件，应全部短路连接，或采用试验方案中规定的偏置条件。

试验方案中若规定了偏置电压，则整个试验过程中，该偏置电压变化应不超过 10%，否则试验结果无效。

6.4 试验方案制定

试验前应制定试验方案，试验方案至少应包括以下内容：

- a) 试验方案的编号及名称；
- b) 试验目的及辐射试验类别等；
- c) 试验地点、试验日期及试验环境；
- d) 试验设备的名称、型号及用途；
- e) 待测器件描述：器件名称、类别、型号规格、批次、封装形式、数量、生产单位、质量等级、器件工艺；样品处置情况；待测参数；

- f) 试验用辐射源种类、能量、注量率、注量要求；
- g) 测试系统描述：测试周期、频率、静态条件、测试图形、试验期间被测器件所施加的电压；
- h) 辐照试验顺序，描述试验的每一步和这些步骤的相关要求；
- i) 试验数据记录及数据处理方法；
- j) 特殊说明；是否通过辐照试验需与试验方和委托方针对试验器件重点关注参数的辐照前后变化量是否超出实际应用中承受的极限而定。

6.5 试验规程

a) 辐照前光电测试

试验前，试验样品进行编号。按参数标准规定，进行光电参数测试，记录光电参数测试数据。

b) 辐照试验和数据记录

按照试验方案要求，记录被测试器件的工艺及工作偏压、电流等基本信息，记录被测试器件与高能粒子辐照试验相关的参数，辐照到规定的注量后进行光电参数测试。若要求多步辐照，在每步辐照后应进行光电测试。

c) 辐照后测试和结果判定

只有在试验场地对样品作清洁处理后，满足辐射防护要求时，才能把它们取走进行测试。或者采取措施进行远距离测试。必须记录每个器件在每次辐照后的全部要求的数据。

按器件的详细规范规定进行器件输出参数、光损、功耗、工作电压等是否超过规范规定范围的判据值进行辐射效应试验结果判定。需要时，分析数据，画出主要电参数与辐照注量的关系曲线，进行在轨等效时间的计算。

6.6 试验报告

试验后应写试验报告，给出辐射效应结论判断。试验报告格式一般包括以下内容：

- a) 试验编号及试验名称；
- b) 试验目的；
- c) 试验地点、试验日期、试验环境和试验操作人员；
- d) 器件描述：器件的名称、类别、型号规格、批次、封装形式、数量、生产单位、质量等级、器件工艺；样品处置情况；
- e) 试验设备及过程的详细描述；
- f) 测试系统描述：测试周期、频率、静态条件、测试图形、试验期间被测器件所施加的电压；
- g) 辐照试验顺序，描述试验每一步和这些步骤的相关要求；

- h) 试验数据及数据分析：辐照试验相关信息，包括辐照试验标准、辐射源、能量、注量、注量率，样品试验前后的光电参数测试报告；
- i) 测量不确定度分析；
- j) 试验中出现的异常现象及分析；
- k) 试验结论。

附录 A

(资料性)

国内目前可获得辐射源

目前，国内可获得的各种辐射源如下：

A.1 用于位移损伤试验的辐射源：

- a) 国家空间科学中心，50 MeV 质子加速器
- b) 401 原子能院，30~90 MeV 质子加速器，1~14 MeV 中子加速器
- c) 新疆理化所，60MeV 质子加速器
- d) 西北核技术研究院，200 MeV 质子加速器
- e) 广州高能物理所，散裂中子源

A.2 用于单粒子效应的辐射源：

- a) 401 原子能院，重离子源
- b) 兰州近代物理研究院，重离子源，37~99 MeV
- c) 哈尔滨工业大学，重离子源

A.3 用于总剂量效应的辐射源：

- a) 北京大学，钴源
- b) 北京师范大学，钴源
- c) 中国计量科学研究院，钴源
- d) 新疆理化所，钴源

附录 B
(资料性)
地面辐照试验流程图示例

辐照试验的流程图见图 B.1。

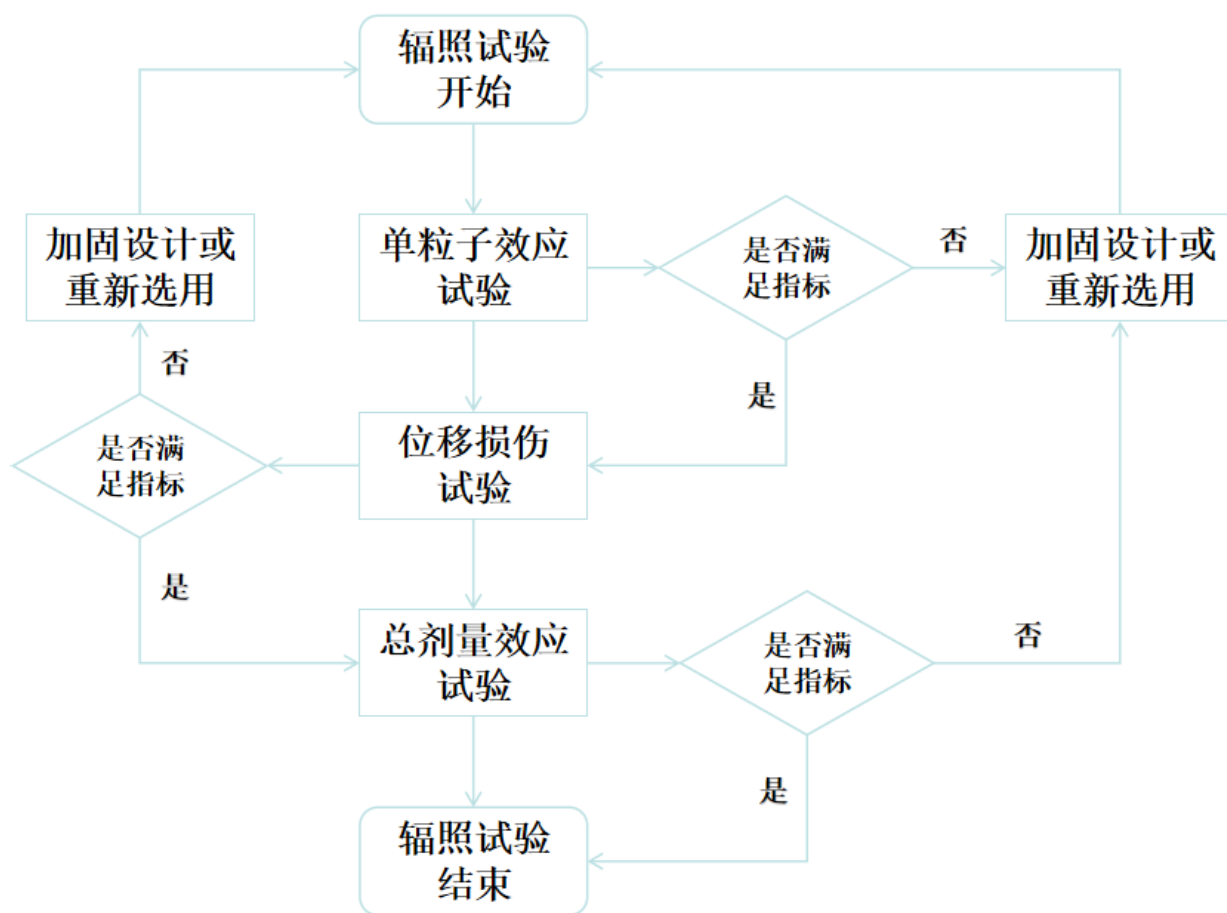


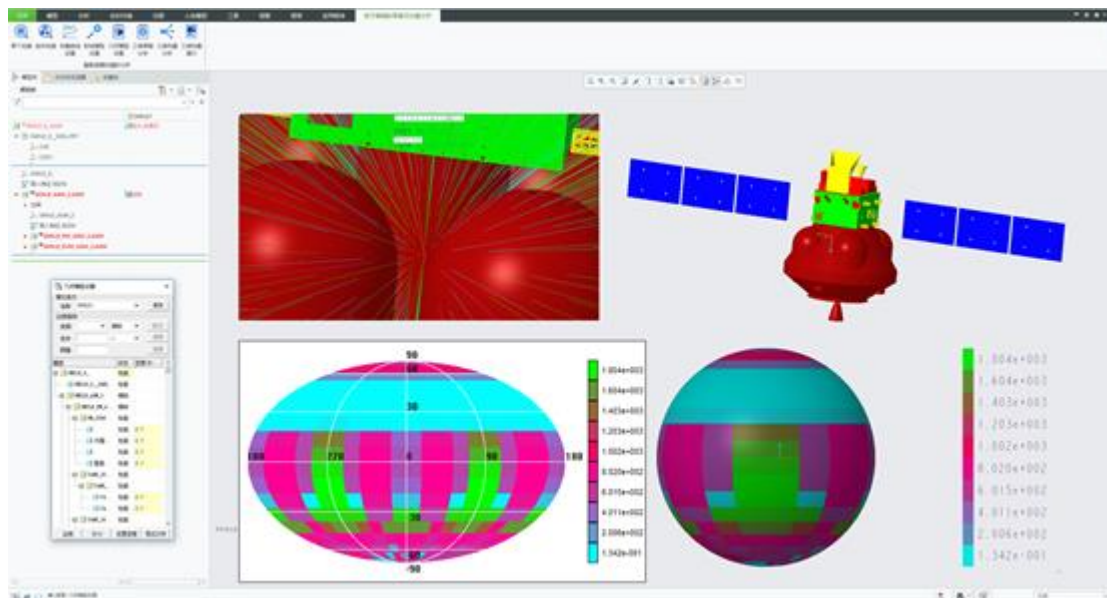
图 B.1 辐照试验流程图

附录 C
(资料性)
辐照环境专用分析软件简介

航天器内部辐射屏蔽及剂量分析软件（Spacecraft Internal Shielding and Dose Analysis Software）可进行航天器三维屏蔽与辐射剂量仿真评估。本软件已经在国内多个型号任务中得到了应用和检验，是开展辐射防护屏蔽优化设计的有力工具。

空间辐射环境诱发的元器件总剂量效应是制约航天产品长寿命在轨工作的重要因素。航天器内部结构非常复杂，为准确评估航天器内部元器件的屏蔽厚度分布和辐射剂量必须开展三维仿真计算。与一维分析计算不同，三维分析可充分考虑航天器内部不同设备之间的相互屏蔽贡献，得到元器件在不同方向的屏蔽厚度和辐射剂量。本软件将有限元原理和 ProE 工程软件相结合，自主开发了一种新型的航天器三维屏蔽与辐射剂量评估方法。典型几何模型的测试结果表明，基于 ProE 的三维屏蔽与辐射剂量计算方法准确、可靠、高效。与国外基于蒙特卡罗的三维屏蔽与辐射剂量分析方法相比，本软件不再需要对异常复杂的航天器 ProE 工程图进行转化建模，具有更强的工程适用性。

航天器内部辐射屏蔽及剂量分析软件运行例图 C.1。



注：网址：<https://www.seeep.ac.cn/fz>

图 C.1 航天器内部辐射屏蔽及剂量分析软件运行例图