

激光模拟单粒子效应试验如何验证 CANFD 芯片的辐照阈值？

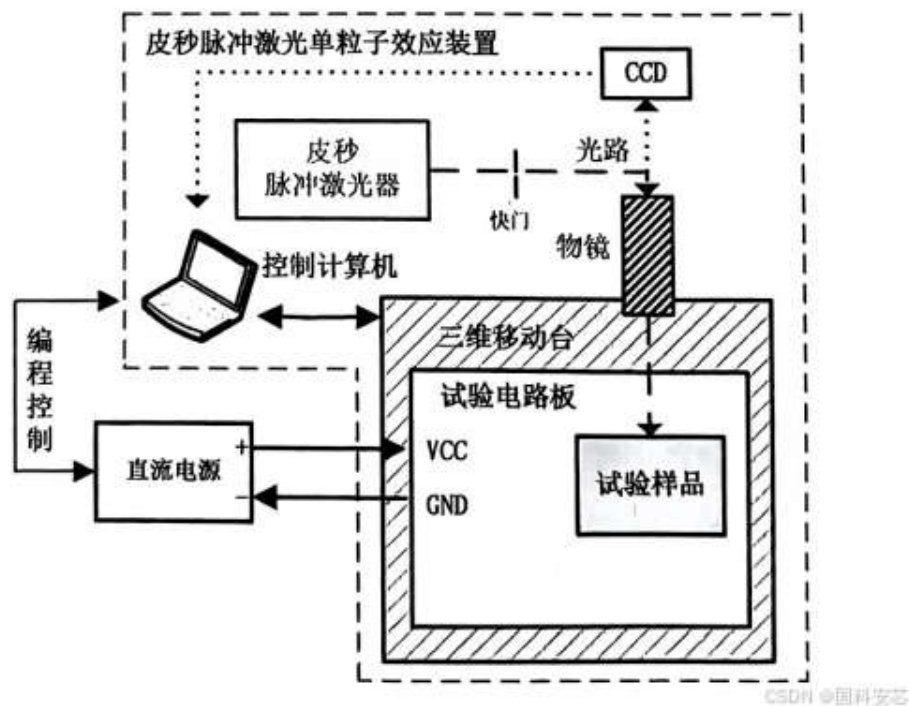
在现代航天电子系统中，CANFD（Controller Area Network with Flexible Data-rate）芯片作为关键的通信接口元件，其可靠性与抗辐射性能直接关系到整个系统的稳定运行。由于宇宙空间中存在的高能粒子辐射，芯片可能遭受单粒子效应（Single Event Effects, SEEs），导致功能异常甚至失效。因此，验证 CANFD 芯片的辐照阈值，即确定其在何种辐射水平下能够正常工作而不发生不可接受的单粒子效应，是确保航天电子设备可靠性的关键环节。激光模拟单粒子效应试验作为一种高效、可控的地面测试手段，为这一验证过程提供了有力支持。本文将详细介绍激光模拟单粒子效应试验的原理、方法、过程以及如何通过该试验验证 CANFD 芯片的辐照阈值。

一、单粒子效应概述

单粒子效应是指高能粒子（如质子、重离子等）穿过半导体器件时，由于电离作用在器件内部产生大量电荷，从而引起器件性能异常的现象。根据不同的表现形式，单粒子效应可以分为多种类型，如单粒子翻转（SEU, Single Event Upset）、单粒子锁定（SEL, Single Event Latch-up）、单粒子功能中断（SEFI, Single Event Functional Interrupt）等。这些效应可能导致存储器数据错误、器件电流异常增加甚至永久性损坏，对航天电子系统构成严重威胁。

二、激光模拟单粒子效应试验原理

激光模拟单粒子效应试验是利用高能激光束模拟宇宙空间中的高能粒子，通过精确控制激光的能量、注量等参数，研究芯片在不同辐射条件下的响应特性，从而确定其辐照阈值。试验中使用的皮秒脉冲激光具有极短的脉冲宽度和高能量密度，能够在芯片内部产生与单粒子效应类似的电荷产生和收集过程。通过改变激光的能量和注量，可以模拟不同 LET（Linear Energy Transfer，线性能量传输）值的高能粒子对芯片的影响。LET 是描述粒子能量在单位质量物质中传递的物理量，与单粒子效应的发生概率和严重程度密切相关。



三、 试验方法与过程

（一）试验样品准备

试验样品为待验证的 CANFD 芯片，如 SIT1042AQ、TCAN1042HGVD、ASM1042A 等型号。在试验前，芯片样品需进行开封装处理，使样品正面金属管芯表面完全暴露，以便激光能够直接作用于芯片内部的敏感区域。同时，需要精确测量样品的尺寸，包括芯片的长、宽等参数，为后续的激光扫描和定位提供依据。

（二）试验装置与环境

试验在专业的脉冲激光单粒子效应实验室进行，实验室的环境条件（如温度、湿度等）需严格控制，以确保试验结果的准确性和可重复性。试验装置主要包括皮秒脉冲激光器、光路调节和聚焦设备、三维移动台、CCD 摄像机和控制计算机等。其中，皮秒脉冲激光器是核心设备，其产生的高能激光束经过光路调节和聚焦后，能够精确地照射到芯片样品的指定位置。三维移动台用于精确控制芯片样品的位置和移动轨迹，使激光能够按照预定的扫描方式进行辐照。CCD 摄像机则用于实时观察芯片样品表面的激光光斑位置和形状，确保激光辐照的准确性和均匀性。

（三）试验步骤

- **试验前准备：**将试验电路板固定于三维移动台上，使样片的长 a 对应 CCD 成像的 Y 轴，宽 b 对应 CCD 成像的 X 轴，样品 CCD 成像的左下角作为坐标轴原点，即扫描起点。试验前需完成实验系统的调试，验证芯片是否正常工作。
- **激光参数设置：**根据试验要求，设定激光的频率、能量和注量等参数。初始激光能量通常设定为较低值（如 120pJ，对应 LET 值为 (5 ± 1.25) MeV·cm²/mg），随着试验的进行，逐步增加激光能量，直至芯片出现单粒子效应。
- **激光扫描与辐照：**按照预定的扫描方法，使激光以一定的步长和速度覆盖扫描整个芯片样品。扫描过程中，实时监测芯片的工作状态和电流变化，一旦发现芯片工作状态出现异常（如电流超过正常值的 1.5 倍），则认为发生了单粒子效应。
- **数据记录与分析：**在试验过程中，详细记录每次激光辐照的参数（如能量、注量等）以及芯片的响应情况（如是否发生单粒子效应、效应类型等）。通过对这些数据的分析，确定芯片的辐照阈值，即在何种激光能量或 LET 值下芯片开始出现单粒子效应。

四、 试验结果与辐照阈值确定

（一）试验结果

根据试验报告，三种型号的 CANFD 芯片在不同激光能量下的试验结果如下：

- **SIT1042AQ 型 CANFD 芯片：**在 5V 的工作条件下，利用激光能量为 120pJ（对应 LET 值为 (5 ± 1.25) MeV·cm²/mg）开始进行全芯片扫描，未出现单粒子效应。当能量提升至 920pJ（对应 LET 值为 (37.5 ± 9.25) MeV·cm²/mg）时，监测到芯片发生了单粒子锁定（SEL）现象。
- **TCAN1042HGVD 型 CANFD 芯片：**在 5V 的工作条件下，利用激光能量为 120pJ（对应 LET 值为 (5 ± 1.25) MeV·cm²/mg）开始进行全芯片扫描，未出现单粒子效应。当能量提升至 610pJ（对应 LET 值为 (25 ± 6.25) MeV·cm²/mg）时，监测到芯片发生了单粒子功能中断（SEFI）现象；继续将能量提升至 920pJ（对应 LET 值为 (37 ± 9.25) MeV·cm²/mg）时，监测到芯片发生了单粒子锁定（SEL）现象。

- **ASM1042A 型 CANFD 芯片：**在 5V 的工作条件下，利用激光能量为 120pJ（对应 LET 值为 (5 ± 1.25) MeV·cm²/mg）开始进行全芯片扫描，未出现单粒子效应。即使在能量提升至 3050pJ（对应 LET 值为 (100 ± 25) MeV·cm²/mg）时，仍未出现单粒子效应。

（二）辐照阈值确定

通过上述试验结果，可以确定三种芯片的辐照阈值：

- **SIT1042AQ 型 CANFD 芯片：**其辐照阈值对应的 LET 值约为 37.5MeV·cm²/mg，即在此 LET 值下芯片开始出现单粒子锁定效应。
- **TCAN1042HGVD 型 CANFD 芯片：**其辐照阈值对应的 LET 值约为 25MeV·cm²/mg，即在此 LET 值下芯片开始出现单粒子功能中断效应；进一步提升能量至 37MeV·cm²/mg 时，出现单粒子锁定效应。
- **ASM1042A 型 CANFD 芯片：**在试验所使用的最高激光能量（对应 LET 值为 100MeV·cm²/mg）下，仍未出现单粒子效应，表明其辐照阈值高于 100MeV·cm²/mg，具有较高的抗单粒子效应能力。

五、 试验意义与应用

激光模拟单粒子效应试验作为一种有效的地面测试手段，为 CANFD 芯片的辐照阈值验证提供了有力支持。通过该试验，可以在芯片设计、制造和应用阶段提前评估其抗辐射性能，为航天电子系统的可靠性设计提供重要依据。例如，在芯片设计阶段，可以根据试验结果优化芯片的电路结构和工艺参数，提高其抗单粒子效应能力；在芯片制造过程中，可以通过质量控制措施确保芯片的抗辐射性能符合设计要求；在航天电子系统的应用阶段，可以根据芯片的辐照阈值合理设计系统的防护措施，降低单粒子效应导致的故障风险。

此外，激光模拟单粒子效应试验还具有以下优点：

- **可控性高：**试验中可以精确控制激光的能量、注量等参数，能够模拟不同 LET 值的高能粒子对芯片的影响，为研究芯片在不同辐射条件下的响应特性提供了便利。
- **重复性好：**由于试验条件的可控性，试验结果具有较高的重复性，能够为芯片的抗辐射

性能评估提供可靠的统计数据。

- **安全性高：**与传统的加速器辐射试验相比，激光模拟试验不需要使用高能粒子束，试验过程更加安全，对试验人员和设备的风险较低。

六、 结论

激光模拟单粒子效应试验是验证 CANFD 芯片辐照阈值的重要手段。通过精确控制激光的能量和注量，模拟宇宙空间中的高能粒子对芯片的影响，可以有效评估芯片的抗单粒子效应能力。本文以 SIT1042AQ、TCAN1042HGVD、ASM1042A 型 CANFD 芯片为例，详细介绍了激光模拟单粒子效应试验的原理、方法、过程以及试验结果。试验结果表明，不同型号的 CANFD 芯片具有不同的辐照阈值，通过该试验可以为芯片的设计、制造和应用提供重要的参考依据。随着航天技术的不断发展，激光模拟单粒子效应试验将在航天电子设备的可靠性评估中发挥越来越重要的作用。

七、 未来展望

尽管激光模拟单粒子效应试验已经取得了显著的成果，但仍有一些问题需要进一步研究和解决。例如，如何进一步提高试验的精度和可靠性，以更准确地模拟真实空间环境中的单粒子效应；如何结合其他测试手段（如加速器辐射试验、空间飞行试验等），建立更加完善的芯片抗辐射性能评估体系；以及如何针对新型芯片结构和材料，开发更加有效的激光模拟试验方法等。这些问题的解决将有助于进一步提高航天电子设备的可靠性和安全性，为我国航天事业的发展提供有力保障。