

中华人民共和国国家军用标准

FL 6100

GJB 10761-2022

脉冲激光单粒子效应试验方法

Test method for single event effects induced by pulsed laser irradiation

2023-01-05 发布

2023-03-01 实施



中央军委装备发展部 颁布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和定义	1
4 试验条件	2
4.1 安全要求	2
4.2 仪器与设备	2
4.3 试验环境	2
5 试验系统	2
5.1 单粒子效应脉冲激光试验装置	2
5.2 单粒子效应测试系统	3
5.3 试验电路板和电缆	3
6 试验准备	3
6.1 试验方案制定	3
6.2 被试器件准备	3
6.3 激光能量测量及设定	3
6.4 被试器件试验电路板安装调试	4
6.5 偏置条件和测试程序要求	4
6.6 背部辐照激光聚焦平面位置设定	4
6.7 被试器件扫描区域设定	4
6.8 激光注量设定	5
7 试验程序	5
7.1 试验流程	5
7.2 试验启动	5
7.3 单粒子效应敏感度测试	5
7.4 单粒子效应测量	6
7.5 试验停止条件	6
7.6 改变偏置条件或测试程序	6
7.7 更换样品	6
8 试验数据分析处理	7
8.1 激光能量对应的 ELET 值	7
8.2 单粒子效应能量阈值	7
8.3 单粒子效应截面	7
8.4 单粒子效应敏感区域定位	7
8.5 试验结果不确定度分析	7
9 试验报告	7
附录 A (资料性附录) 单粒子效应试验脉冲激光能量与重离子 LET 对应关系	9
附录 B (资料性附录) 被试器件关键参数测试方法	11

前 言

本标准的附录 A、附录 B 是资料性附录。

本标准由中国科学院提出。

本标准起草单位：中国科学院国家空间科学中心、中国航天科技集团有限公司第五研究院、中国航空综合技术研究所、中国人民解放军 63672 部队。

本标准主要起草人：马英起、韩建伟、上官士鹏、朱 翔、曹 洲、梅 博、于庆奎、陈 宇、李明、陈 伟、丁李利。



脉冲激光单粒子效应试验方法

1 范围

本标准规定了利用脉冲激光辐射源开展半导体器件(以下简称器件)单粒子效应试验的条件、系统、程序、数据处理方法及试验报告等内容。

本标准适用于空间电子装备及器件单粒子效应的单光子吸收机制的脉冲激光试验。

2 引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本标准的条款。凡注日期或版次的引用文件,其后的任何修改单(不包括勘误的内容)或修订版本都不适用于本标准,但提倡使用本标准的各方探讨使用其最新版本的可能性。凡不注日期或版次的引用文件,其最新版本适用于本标准。

- GB/T 7247.5 激光产品的安全
- GJB 1649 电子产品防静电放电控制大纲
- GJB 2712 测量设备的质量保证要求—计量确认体系
- GJB 3756 测量不确定度的表示与评定
- GJB 7242—2011 单粒子效应试验方法和程序

3 术语和定义

GJB 7242—2011 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1 单粒子效应 **single event effect; SEE**

单个高能粒子作用于器件所引发的翻转、锁定、烧毁等现象。

3.2 单粒子翻转 **single event upset; SEU**

单个高能粒子作用于器件,引发器件逻辑状态发生变化的一种辐射效应。

3.3 单粒子锁定 **single event latchup; SEL**

单个高能粒子作用于体硅 CMOS 电路,导致寄生可控硅结构导通,造成器件低电阻、大电流状态的一种辐射效应。

3.4 线性能量传输 **linear energy transfer; LET**

带电粒子沿径迹单位长度沉积的能量。

注:单位为 $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 。

3.5 激光脉冲入射能量 **incident laser energy**

脉冲激光入射到被试器件表面的单个激光脉冲的能量值。

注:用 E_0 表示,单位为 μJ 。

3.6 激光脉冲注量 **pulsed laser fluence**

单位面积入射到被试器件的激光脉冲总数。

注:单位为 $1/\text{cm}^2$ 。

3.7 脉冲激光辐照 **pulsed laser irradiation**

脉冲激光从器件正面或衬底面进行辐照,诱发电荷被器件有源区内的敏感 PN 结收集后产生同高能粒子作用结果相同的单粒子效应试验方式。

3.8 激光脉冲有效能量 **pulsed laser effective energy**

激光脉冲入射器件后在有源区内沉积的能量。

注：用 E_{eff} 表示，单位为 pJ。

3.9 激光等效重离子 LET 值 **equivalent linear energy transfer; ELET**

以激发的电荷量为参照量，用 LET 值来表征脉冲激光在器件有源区内单位长度沉积的能量。

注：单位为 $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 。

3.10 激光脉冲有效能量阈值 **threshold effective energy of pulsed laser**

诱发单粒子效应发生所需要的最低激光脉冲有效能量。

注：单位为 pJ。

3.11 脉冲激光单粒子效应截面 **cross section induced by pulsed laser**

单位激光脉冲注量导致单粒子效应发生的次数或概率。

注：单位为 $\text{cm}^2/\text{device}$ 或 $\mu\text{m}^2/\text{bit}$ 。

3.12 脉冲激光测试敏感区域定位 **sensitive area mapping by pulsed laser**

脉冲激光对被试器件逐点扫描，同步检测和记录器件发生单粒子效应的情况，获得被试器件内部对单粒子效应敏感的空间分布特征，记录区域坐标信息。

3.13 光斑影响因子 **laser spot effect factor**

聚焦激光束到器件有源区内对诱发单粒子效应具有贡献的激光有效能量与整个激光光斑有效能量的比值。

4 试验条件

4.1 安全要求

4.1.1 试验人员

试验人员应掌握半导体器件的基础知识，了解单粒子效应原理，经过相关专业培训，熟悉相关仪器设备的操作要求。

4.1.2 激光辐射安全和辐射防护

辐射安全防护及操作应符合 GB/T 7247.5 的规定。

4.2 仪器与设备

试验中所使用的仪器与设备应按照 GJB 2712 的规定进行校准。

4.3 试验环境

试验环境要求如下：

- a) 环境温度： $20^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 相对湿度：25%~60%；
- c) 洁净度：激光装置光路开放条件下等级宜优于万级，激光装置光路封闭条件下无洁净度要求；
- d) 静电防护：应符合 GJB 1649 的规定；
- e) 振动：激光装置光路置于隔振光学平台上，对激光聚焦平面上下振幅影响应小于 $3\mu\text{m}$ 。

5 试验系统

5.1 单粒子效应脉冲激光试验装置

单粒子效应脉冲激光试验装置要求如下：

- a) 应考虑被试器件材料的实际禁带宽度大小及激光吸收机制选择激光器；
- b) 所用激光能量计量程应覆盖单粒子效应脉冲激光试验所需能量范围，且能够监测激光脉冲的重复频率及单脉冲激光能量稳定性；
- c) 所用显微镜放大倍数应满足单粒子效应脉冲激光试验对聚焦光斑及工作距离的要求；
- d) 所用三维移动台最小步距应具备 X、Y、Z 三轴方向移动能力，且应满足单粒子效应脉冲激光试验扫描辐照要求。

5.2 单粒子效应测试系统

单粒子效应测试系统应符合 GJB 7242—2011 中对测试系统的要求。

5.3 试验电路板和电缆

被试器件应安装在试验电路板上，且放置于大气试验环境中。试验电路板和电缆应符合以下要求：

- a) 试验电路板和电缆的尺寸、重量应满足三维移动台部件要求；
- b) 试验电路板应具有良好的机械稳定性和可移动性，若辐照试验板需要增加必要的散热部件，应保证其不影响试验板和三维移动台的机械稳定性和可移动性；
- c) 试验电路板和电缆应具有良好的抗电磁干扰能力；
- d) 试验电路板上的安装孔位应符合三维移动台部件要求；
- e) 应保证激光垂直入射到被试器件单粒子效应敏感区域，同时确保其在电路板上的电性能安全；
- f) 被试器件的测试区域平面与聚焦物镜焦平面应重合；
- g) 若辐照试验板上采用了除被试器件外的其他元器件，应保证其不影响显微物镜对被试器件的观察和三维移动台对被试器件的移动。

6 试验准备

6.1 试验方案制定

试验前应制定试验方案，应包括以下内容：

- a) 试验方案编号和试验方案名称；
- b) 试验目的；
- c) 试验地点、试验日期及试验环境；
- d) 试验设备的名称、型号、用途及校准情况；
- e) 激光能量、注量及扫描辐照方式；
- f) 被试器件的名称、类别、型号规格、批次、封装形式、数量、生产单位、质量等级、工艺，样品开封装及衬底减薄处置情况等；
- g) 试验期间被试器件加的偏置条件；
- h) 单粒子效应试验的类别及测试要求：测试周期、频率、测试程序和温度及判据；
- i) 日程安排；
- j) 试验内容及方法；
- k) 试验数据记录及分析处理方法；
- l) 特殊说明。

6.2 被试器件准备

被试器件准备要求如下：

- a) 一般情况下，同一批产品的被试器件数量应不少于 3 只；被试器件应测试合格；每一个被试器件应编号，并在试验中按编号记录数据。
- b) 被试器件应优先背部开孔暴露硅衬底，对未封装的裸芯片宜采用 COB (Chip On Board) 封装并暴露衬底面；已经封装完好的被试器件应优先从器件衬底面开孔；倒装封装的被试器件应从封装正面开孔；非倒装塑封被试器件，从封装背面开孔。
- c) 被试器件的正面开帽应符合 GJB 7242—2011 的规定。开帽后，拍照记录芯片的特征（芯片版本号），应对被试器件进行常态功能和电性能测试，测试合格的被试器件方可进行后续试验。
- d) 开帽后的被试器件在运输中，应采取防机械冲击、防静电等措施。

6.3 激光能量测量及设定

6.3.1 激光能量测量与监测

激光能量测量与监测应满足以下要求：

- a) 应选择合适的能量量程并复位能量计;
- b) 试验时, 能量计探头光窗与激光光斑聚焦平面的距离宜在 500 μm ~1000 μm 之间;
- c) 应保证激光垂直入射能量计表面;
- d) 激光能量计应具备实时监测脉冲激光入射能量 E_0 和实时记录脉冲激光重复频率的能力。

6.3.2 辐照试验激光能量值设定

辐照试验激光能量值设定宜满足以下要求:

- a) 参照与被试器件结构、工艺接近器件的单粒子效应阈值试验数据, 推测被试器件的单粒子效应 LET 阈值范围; 或依照试验方案设定试验的 LET 值;
- b) 根据推测的 LET 阈值范围或设定试验方案确定的 LET 值, 按照诱发器件单粒子效应的 LET 值与激光有效能量 E_{eff} 及入射能量 E_0 的对应关系, 具体参见附录 A, 利用公式(1)确定试验需要的初始入射激光能量:

$$E_0 = \frac{e^{\alpha h} \cdot \text{LET}}{k(1-R)(1+R') \times f} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- E_0 ——入射到被试器件表面的激光能量值;
- α ——器件衬底吸收系数;
- h ——器件衬底厚度, cm;
- k ——诱发器件单粒子效应的 LET 值与激光有效能量 E_{eff} 的对应关系系数;
- R ——器件表面反射率;
- R' ——器件金属层反射率;
- f ——光斑影响因子。

公式(1)各参数取值方法参见附录 B。

6.4 被试器件试验电路板安装调试

被试器件试验电路板安装调试应满足以下要求:

- a) 应将连接好的试验电路板固定在三维移动台上, 检测试验板和单粒子效应测试系统的功能和通信是否正常;
- b) 应保证试验电路板与试验台的移动一致性, 保证激光光束可垂直入射被试器件暴露的表面。

6.5 偏置条件和测试程序要求

采用最劣偏置条件进行单粒子效应测试, 除另有规定, 应根据下列要求选择测试条件:

- a) 单粒子翻转测试电压应覆盖产品手册规定的最小工作电压;
- b) 单粒子翻转测试应覆盖产品最高应用工作频率;
- c) 单粒子翻转测试程序应覆盖被试器件所有种类的单粒子效应敏感单元;
- d) 单粒子锁定测试应在产品手册规定的最高工作电压下进行;
- e) 单粒子锁定测试应覆盖器件高温工作环境下的最高工作温度。

若各方同意, 可在典型应用条件下进行单粒子效应测试。

6.6 背部辐照激光聚焦平面位置设定

背部辐照激光聚焦平面位置设定应满足以下要求:

- a) 将激光聚焦平面设定在芯片硅衬底表面;
- b) 依据衬底厚度 h 和硅材料折射率 n , 计算得到激光聚焦平面调节距离 $\Delta Z = h/n$;
- c) 沿三维移动台 Z 轴向上移动距离 ΔZ , 将激光聚焦平面置于器件的有源区区域内。

6.7 被试器件扫描区域设定

被试器件扫描区域设定应满足以下要求:

- a) 脉冲激光的扫描辐照区域应覆盖整个被试器件或拟测试的特定区域;
- b) 应测量被试器件管芯或者拟测试区域的长度和宽度数值;
- c) 脉冲激光扫描辐照区域的长度 a 应比步骤 b) 测得的长度长不少于 $100\mu\text{m}$, 即首尾端比待测区域至少各长 $50\mu\text{m}$;
- d) 扫描辐照区域的宽度 b 不小于步骤 b) 测得的宽度。

6.8 激光注量设定

激光注量设定应满足以下要求:

- a) 激光注量宜在 $2 \times 10^6/\text{cm}^2 \sim 1 \times 10^7/\text{cm}^2$ 之间, 激光注量率与激光重复频率及移动台扫描速度相关。
- b) 安装试验电路板时, 样品长轴对应样品成像观测的 Y 轴, 宽轴对应样品成像观测的 X 轴, 或可成一定角度; 样品的左下角作为成像观测坐标轴原点, 即扫描起点, 如图 1 所示。
- c) 试验时, 设定三维移动台扫描程序作周期扫描移动, 保证激光脉冲均匀覆盖扫描试验器件。除另有规定外, 周期自动扫描程序设定方式应按如下顺序执行:
 - 1) 从扫描起点沿 Y 轴移动距离 a ;
 - 2) 沿 X 轴移动 X 轴步长;
 - 3) 沿 $-Y$ 轴移动距离 a ;
 - 4) 沿 X 轴移动 X 轴步长;
 - 5) 重复上述 1)~4) 过程直到扫描终点。

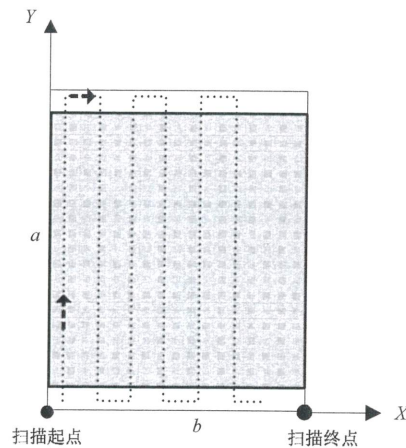


图 1 激光扫描方式示意图

7 试验程序

7.1 试验流程

试验流程如图 2 所示。

7.2 试验启动

对被试器件及单粒子效应测试系统加电, 被试器件和效应检测系统进入正常工作模式。

7.3 单粒子效应敏感度测试

7.3.1 阈值测试

阈值测试流程如下:

- a) 调节脉冲激光装置发射的激光能量并对被试器件进行扫描辐照测试;
- b) 按照设定的初始激光能量, 以最小 10% 幅度逐次增加或减小入射激光能量进行辐照试验。

注: 也可根据目标 LET 值大小设定增减幅度, 使得被试器件发生单粒子效应的最低能量和不发生单粒子效应的最高能量相差小于最低能量的 10% 或能量计的最低分辨率, 获取激光脉冲有效能量阈值。

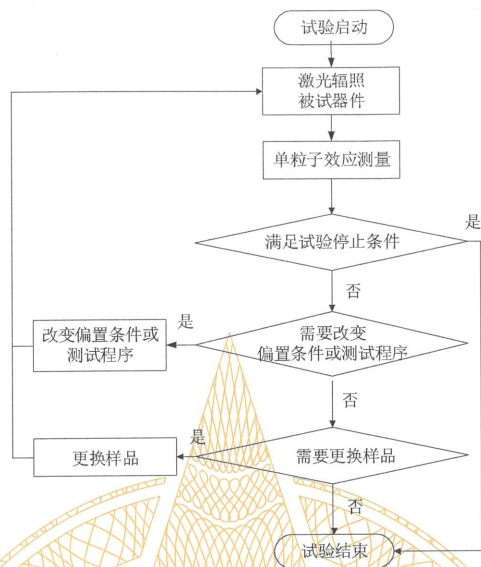


图2 单粒子效应激光试验流程图

7.3.2 截面测试

依据 6.3.2 设定初始入射激光能量，以激光注量垂直被试器件表面进行扫描辐照，检测器件发生单粒子效应事件数。根据两个以上能量辐照下发生的单粒子效应事件数，判断合理的激光能量的增加幅度及区间，改变激光能量，获得 5 种以上不同的单粒子效应事件数数据。激光能量范围覆盖被试器件出现单粒子效应到单粒子效应事件达到饱和截面所对应的有效能量范围。

7.3.3 敏感区域定位

利用脉冲激光逐点逐脉冲辐照扫描被试器件或设定区域，实时同步检测记录其单粒子效应现象和发生单粒子效应的辐照点位置，具体流程如下：

- 建立被试器件暴露的表面的三维坐标系，确定扫描起始原点；
- 获取移动台传感器数据；
- 利用脉冲激光对被试器件进行逐点扫描辐照并记录发生单粒子效应的位置信息，同步检测和记录器件发生单粒子效应的情况；
- 绘制敏感区域坐标分布图。

7.4 单粒子效应测量

利用效应检测系统对被试器件进行单粒子效应测量。记录被试器件发生的单粒子效应类别和数量、激光注量、激光入射能量和单粒子效应敏感位置坐标信息(适用时)。

7.5 试验停止条件

满足下列条件之一，可结束试验：

- 在试验方案规定的最高目标 LET 值、规定激光注量下没有发生单粒子效应；
- 按照试验方案，完成了所有样品的辐照试验。

7.6 改变偏置条件或测试程序

当试验方案有规定时，改变偏置条件或测试程序，进行辐照。记录被试器件发生的单粒子效应类别和数量、激光注量、激光入射能量和单粒子效应敏感位置坐标信息(适用时)，以及相关数据的测量不确定度。

7.7 更换样品

当 1 只被试器件完成了试验方案规定激光辐照试验，更换被试器件，进行单粒子效应测量。

8 试验数据分析处理

8.1 激光能量对应的 ELET 值

激光能量对应的 ELET 值的计算应满足以下要求：

针对试验中的激光入射到被试器件表面的能量 E_0 ，换算为激光到达被试器件有源区的有效能量 E_{eff} ，并可进一步换算为 ELET 值，具体换算按公式(2)、公式(3)、公式(4)，对于特征尺寸小于 $0.13\mu\text{m}$ 的器件单粒子效应试验，应特别考虑激光光斑影响因子 f 对激光有效能量及 ELET 的影响。

$$ELET = k E_{\text{eff}} \dots \dots \dots (2)$$

$$E_{\text{eff}} = (1-R)e^{-\alpha h}(1+R')fE_0 \dots \dots \dots (3)$$

$$ELET = k(1-R)e^{-\alpha h}(1+R')fE_0 \dots \dots \dots (4)$$

式中：

k ——诱发器件单粒子效应的 LET 值与激光有效能量 E_{eff} 的对应关系系数；

E_{eff} ——激光脉冲入射器件后在有源区内沉积的能量；

R ——器件表面反射率；

α ——器件衬底吸收系数；

h ——器件衬底厚度；

R' ——器件金属层反射率；

f ——光斑影响因子；

E_0 ——入射到被试器件表面的激光能量值。

8.2 单粒子效应能量阈值

针对测量到的器件单粒子效应的阈值激光入射能量，根据 8.1 规定处理方法，换算为激光到达被试器件有源区的激光有效能量 E_{eff} ，并进一步换算为 ELET 值。

8.3 单粒子效应截面

针对测量到的器件单粒子效应事件数和激光注量，计算对应的激光入射能量、有效能量(或者相对应 ELET)激光照射下器件的单粒子效应截面，计算方式见公式(5)，利用 5 组以上数据绘制单粒子效应截面随激光有效能量或 ELET 值变化的关系曲线，获得激光单粒子效应截面。

$$\sigma(i) = N(i) / \Phi(i) \dots \dots \dots (5)$$

式中：

$\sigma(i)$ ——第 i 个具有 E_{eff} (或 ELET) 的激光照射下的器件激光测试单粒子效应截面， i 为 E_{eff} 的序号；

$N(i)$ ——第 i 个具有 E_{eff} (或 ELET) 的激光照射下测得的单粒子效应次数；

$\Phi(i)$ ——第 i 个具有 E_{eff} (或 ELET) 的激光照射下的激光脉冲注量。

8.4 单粒子效应敏感区域定位

应根据试验过程中记录的器件单粒子效应敏感位置及对应的单粒子效应数据，在试验确定的坐标系内绘制器件对单粒子效应敏感的分布图，进一步映射至被试器件版图，获得激光测试的单粒子效应敏感区域分布。

8.5 试验结果不确定度分析

对于试验获得的关键数据，依据 GJB 3756 进行试验结果不确定度分析。对于试验获得的关键高 LET 值阈值数据，宜进行重离子辐照源的校对验证。

9 试验报告

试验报告应包括以下内容：

- a) 试验报告编号；
- b) 试验方案编号；

- c) 试验目的;
- d) 试验地点、试验日期及试验环境;
- e) 试验设备的名称、型号、用途及校准情况;
- f) 激光能量、注量及扫描辐照方式;
- g) 被试器件的名称、类别、型号规格、批次、封装形式、数量、生产单位、质量等级、工艺, 样品开封装及衬底减薄处置情况等;
- h) 试验期间被试器件加的偏置条件;
- i) 单粒子效应试验的类别及测试要求: 测试周期、频率、测试程序和温度及判据;
- j) 日程安排;
- k) 试验内容及方法;
- l) 试验数据记录及分析处理方法;
- m) 试验结果及其他。

附录 A (资料性附录)

单粒子效应试验脉冲激光能量与重离子 LET 对应关系

A.1 脉冲激光模拟单粒子效应物理原理

脉冲激光能够模拟试验空间高能粒子在器件中产生的单粒子效应,是由于聚焦的单个激光脉冲能够通过光致电离作用机制,在器件内部产生高电荷密度的电离径迹(大量额外电子-空穴对),额外电荷被器件有源区内的敏感 PN 结收集后,可产生同高能粒子作用结果相同的单粒子效应现象。单粒子效应脉冲激光试验优先推荐采用背部辐照方式。

A.2 背部辐照试验

背部辐照试验要求如下:

- a) 当脉冲激光无法穿透大规模集成电路正面的金属布线层时,宜采用从器件衬底面进行背部辐照试验方式。
- b) 考虑到器件衬底厚度通常为几百微米,与正面辐照试验不同,采用此种试验方法需将激光微束的聚焦平面置于器件有源区区域内的敏感部位。
- c) 依据光学折射定律,可得到公式(A.1)和公式(A.2)所示,计算和实施器件背部辐照激光聚焦平面的调节值。

$$Z_1 = Z_0 + \frac{h}{n} \dots\dots\dots (A.1)$$

$$\Delta Z = Z_1 - Z_0 = \frac{h}{n} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

- Z_1 ——激光聚焦于有源区时的焦平面坐标位置;
 Z_0 ——激光聚焦平面处于衬底表面时在 Z 轴方向的坐标位置;
 h ——器件衬底厚度;
 n ——硅材料的折射率。

A.3 激光能量换算

激光能量换算方法如下:

- a) 入射激光能量 E_0 会经历在器件衬底表面的反射、衬底衰减、器件正面金属布线层的反射,最终达到有源区区域内的为有效激光能量 E_{eff} 诱发器件产生单粒子效应。此过程中涉及到的器件物理参量包括:衬底表面对激光反射率 R ,衬底厚度 h 和吸收系数 α ,激光经器件正面金属布线层的反射率 R' ,激光光斑影响因子 f 。
- b) 入射激光能量 E_0 是能够直接测量的参量,而有效激光能量 E_{eff} 是最终诱发器件单粒子效应的参量。由于不同器件的衬底厚度与掺杂浓度各不相同,需要建立两者的换算公式如(A.3)所示,便于计算诱发单粒子效应的真实有效能量。

$$E_{\text{eff}} = (1-R)e^{-\alpha h}(1+R')fE_0 \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

- E_{eff} ——激光脉冲入射器件后在有源区内沉积的能量;
 R ——器件表面反射率;

- α ——器件衬底吸收系数;
- h ——器件衬底厚度;
- R' ——器件金属层反射率;
- f ——光斑影响因子;
- E_0 ——入射到被试器件表面的激光能量值。

A.4 E_{eff} 与 LET 值的对应关系

E_{eff} 与 LET 值的对应关系如下:

- a) 衡量器件单粒子效应的重要指标是其 LET 阈值, 而脉冲激光模拟试验单粒子效应能够直接给出的试验结果为器件的单粒子效应激光能量阈值。应建立两者之间的对应关系, 使得脉冲激光试验的器件单粒子效应能量阈值与重离子试验的 LET 阈值具有一定的可比性。
- b) 理论与实验研究得到触发 $0.13\mu\text{m}$ 以上(含 $0.13\mu\text{m}$) 体硅 CMOS 工艺器件产生临界状态的单粒子锁定效应的有效激光能量 E_{eff} 与重离子 LET 值有图 A.1 和公式 (A.4) 所示的线性对应关系, 即触发器件单粒子锁定效应的激光有效能量阈值 E_{eff} 对应着有一定偏差范围的重离子 LET 阈值, 如公式 (A.4) 所示:

$$ELET = kE_{\text{eff}} \dots \dots \dots (A.4)$$

式中:

- $ELET$ ——激光等效重离子 LET 值;
- k ——诱发器件单粒子效应的 LET 值与激光有效能量 E_{eff} 的对应关系系数;
- E_{eff} ——激光脉冲入射器件后在有源区内沉积的能量。

基于单光子吸收机制的单粒子锁定效应测试, k 取值推荐为 0.082 , 利用激光有效能量对应得到的等效重离子 LET 值与实测的重离子 LET 值在 85% 置信度下不确定度不超过 25% 。

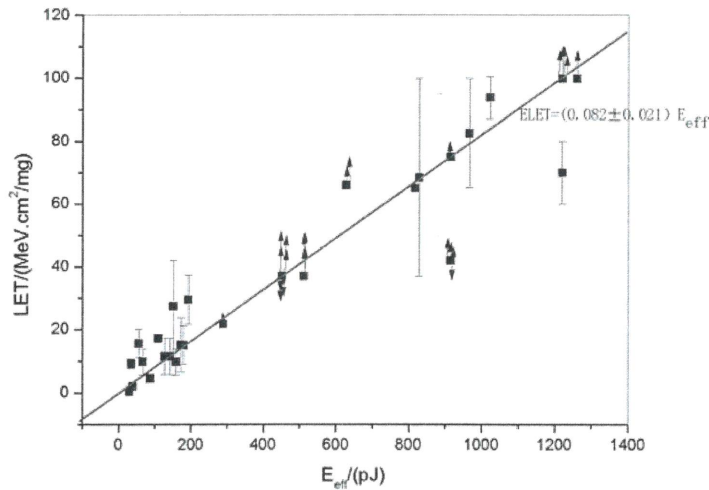


图 A.1 诱发器件单粒子锁定效应的激光有效能量与重离子 LET 对应关系图

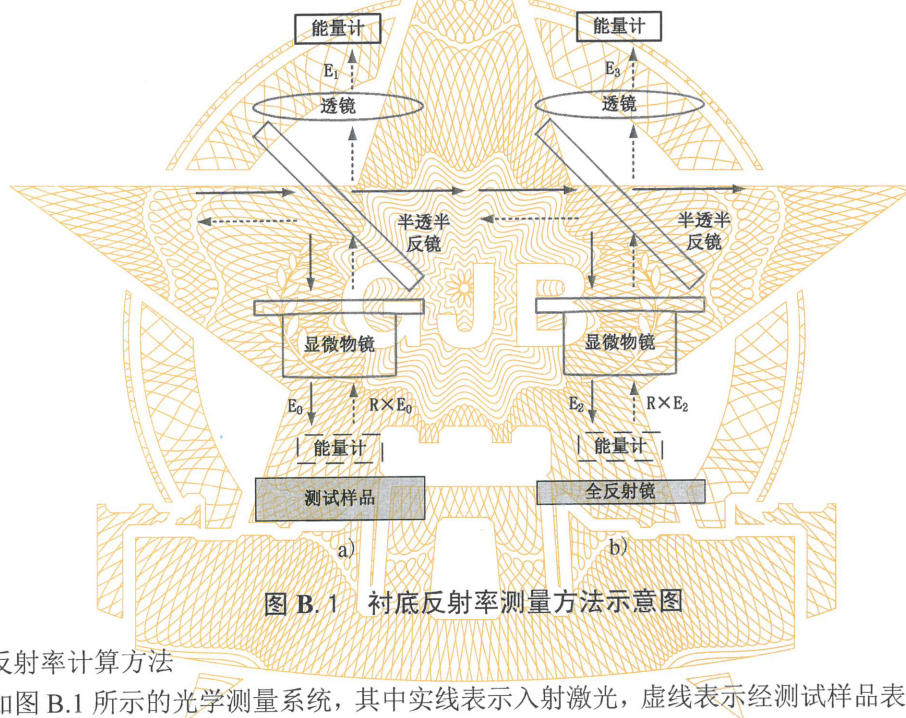
附录 B
(资料性附录)
被试器件关键参数测试方法

B.1 衬底反射率

被试器件衬底反射率测试方法如下：

a) 光学测量系统

建立如图 B.1 所示用于衬底反射率测量的光学系统，组成包括：测试样品及标准全反射样品（全反射镜），用于测量入射和反射激光能量的能量计，用于汇聚反射激光的透镜，用于导入入射激光的半透半反透镜，显微物镜。



b) 反射率计算方法

如图 B.1 所示的光学测量系统，其中实线表示入射激光，虚线表示经测试样品表面反射后的激光。样品反射率 R 计算如公式 (B.1) 所示：

$$R = E_1 / (E_0 \times k_1) \dots \dots \dots (B.1)$$

式中：

R —— 器件表面反射率；

E_1 —— 反射激光经过一系列透镜后到达上方的能量计时的能量；

E_0 —— 入射到被试器件表面的激光能量值；

k_1 —— 光学测量系统对反射激光的衰减系数。

c) 衰减系数的测量方法

将激光导入到光学测量系统中；使用激光能量计在显微物镜下方测量入射激光能量数值 E_2 ；放入全反射镜（反射率 $R=1$ ）到图 B.1 中的测试样品处；能量计测量反射的激光能量数值 E_3 。将测量得到的数值代入衰减系数计算公式 $k_1 = E_3 / (E_2 \times R)$ 中，即可得到光学测量系统的衰减系数 $k_1 = E_3 / E_2$ 。

d) 测试样品制备

将被试器件的封装去除, 获得该器件的裸芯片。去除裸芯片的金属布线层, 即完成测试样品的制备。

e) 衬底反射率测量

将激光导入到光学测量系统中。使用激光能量计在显微物镜下方测量入射激光能量数值 E_0 。

衬底面向上放入测试样品, 如图 B.1 所示; 能量计测量反射的激光能量数值 E_1 ;

将测量得到的数值代入反射率测量公式 $R = E_1 / (E_0 \times k_1)$ 中, 其中 k_1 为测量得到的数值, $k_1 = E_3 / E_2$, 即可得到测量样品的实际反射率: $R = (E_1 \times E_2) / (E_0 \times E_3)$ 。

B.2 衬底厚度

被试器件衬底厚度获取方法如下:

a) 厂商提供

直接从器件制造商处获得芯片的衬底厚度数据。

b) 膜厚测试仪测量

将被试器件衬底面朝上放置于膜厚测试仪的托盘上, 启动膜厚仪初始位置自校准。

校准成功后, 启动被试器件的面扫描测量参数设置, 扫描测量点数量不少于 10 个。编辑被试器件的界面属性(一般采用硅-空气-金属), 参考被试器件工艺, 设定被试器件模糊厚度。

启动厚度测量, 获得被试器件的厚度数值, 最终取测量均值作为测量厚度。

B.3 衬底吸收系数

被试器件衬底吸收系数获取方法如下:

a) 厂商提供

直接从器件制造商处获得芯片的衬底掺杂浓度数据。

b) 二次离子质谱仪测量

1) 将测试芯片衬底取出, 并将金属层研磨掉, 采用合适的化学品将多余氧化物层等剥离掉。

2) 确定样品衬底掺杂类型及要分析的元素, 根据样品所要分析的元素选择所需离子源, 测定标准样品, 搜集和分析二次离子, 将二次离子计数-时间曲线进行数据处理后, 得到掺杂浓度的测试结果。

3) 依据衬底吸收系数与其掺杂浓度的关系, 确定相应掺杂浓度对应的吸收系数。

B.4 金属布线层反射率

被试器件金属布线层反射率测试方法如下:

a) 光学测量系统

建立用于金属布线层反射率的光学系统, 测量方法及用到的主要设备与衬底反射率测量相同, 所不同的是待测样品为去除衬底将金属布线层暴露于外的芯片样品, 如图 B.2 所示。

b) 芯片处理方法

利用等离子体刻蚀设备(二氟化氙)将器件衬底材料去除。经过二氟化氙处理的器件样品, 可以完整保留器件正面金属布线层的结构, 即衬底与金属布线层的界面。

c) 金属布线层相对于空气的反射率测量方法

采用与衬底反射率测量相同的方法与步骤, 测得金属布线层相对于空气的反射率 $R_{\text{布线层-空气}}$ 。

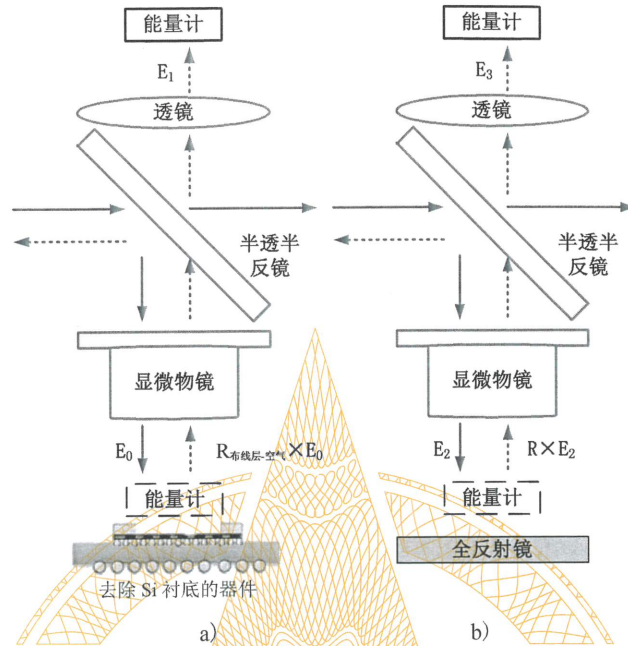


图 B.2 金属布线层反射率测量方法示意图

d) 硅中的金属布线层反射率测算方法

上述试验测试得到的仅是金属布线层在空气中的反射率，实际单粒子效应试验中脉冲激光是在金属布线层与硅材料交界处发生的反射，需要对上述测量数值进行换算，得出脉冲激光在金属布线层与器件硅材料交界面的反射率 R' ，如公式 (B.2) 所示：

$$R' = \frac{\left[\frac{n_{\text{空气}} + \sqrt{R_{\text{布线层-空气}}}}{n_{\text{空气}} - \sqrt{R_{\text{布线层-空气}}}} - n_{\text{硅}} \right]^2}{\left[\frac{n_{\text{空气}} + \sqrt{R_{\text{布线层-空气}}}}{n_{\text{空气}} - \sqrt{R_{\text{布线层-空气}}}} + n_{\text{硅}} \right]^2} \quad (\text{B.2})$$

式中：

- $n_{\text{空气}}$ —— 激光在空气中的折射率；
- $n_{\text{硅}}$ —— 激光在器件硅中的折射率；
- $R_{\text{布线层-空气}}$ —— 脉冲激光在金属布线层与空气交界面的反射率；
- R' —— 器件金属层反射率。

B.5 光斑影响因子

激光辐照被试器件测得单粒子效应阈值时，激光光斑中心在单粒子效应敏感区域中心。对于敏感节点尺寸不小于聚焦激光光斑的单粒子效应测试，如特征尺寸不小于 $0.13\mu\text{m}$ 的器件单粒子效应测试， f 取值推荐为 1。对于敏感节点尺寸小于聚焦激光光斑的单粒子效应测试，如特征尺寸小于 $0.13\mu\text{m}$ 的器件单粒子效应测试，ELET 值的计算应考虑光斑影响因子 f 的校正，采用公式 (B.3) 计算，进入到单粒子效应敏感区域的激光能量 E_{sv} 与全光斑能量 E_{cftw} 的比值即为光斑影响因子 f 。

$$f = E_{\text{sv}} / E_{\text{cftw}} \quad (\text{B.3})$$

式中：

f ——光斑影响因子；

E_{sv} ——进入到单粒子效应敏感区域的激光能量；

E_{effw} ——激光脉冲入射器件后的全部光斑能量。



中华人民共和国
国家军用标准
脉冲激光单粒子效应试验方法
GJB 10761—2022

*

国家军用标准出版发行部出版
(北京东外京顺路7号)
国家军用标准出版发行部印刷车间印刷
国家军用标准出版发行部发行
版权专有 不得翻印

*

开本 880×1230 1/16 印张 1¼ 字数 38 千字
2023年2月第1版 2023年2月第1次印刷

*

军标出字第 14906 号