

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 1 月 4 日 (04.01.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/000495 A1

(51) 国际专利分类号:
G01R 31/311 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2016/092256

(22) 国际申请日: 2016 年 7 月 29 日 (29.07.2016)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201610480725.4 2016年6月27日 (27.06.2016) CN

(71) 申请人: 中国科学院深圳先进技术研究院 (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。

(72) 发明人: 李慧云 (LI, Huiyun); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。邵翠萍 (SHAO, Cuiping); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。刘玢玢 (LIU, Binbin); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。

(74) 代理人: 北京三友知识产权代理有限公司 (BEIJING SANYOU INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY LTD.); 中国北京市金融街 35 号国际企业大厦 A 座 16 层, Beijing 100033 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD,

(54) Title: CHIP SINGLE-EVENT EFFECT DETECTION METHOD AND DEVICE

(54) 发明名称: 芯片单粒子效应探测方法及装置

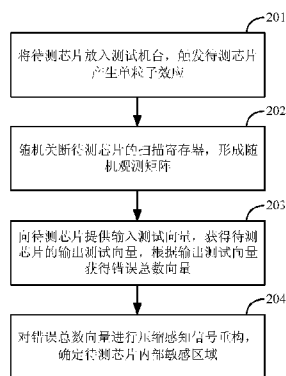


图 2

201 Place a to-be-detected chip in a testing machine, and trigger the to-be-detected chip to generate a single-event effect
202 Randomly turn off a scanning register for the to-be-detected chip and form a random observation matrix
203 Provide an input testing vector for the to-be-detected chip so as to obtain an output testing vector of the to-be-detected chip, and obtain an error total vector according to the output testing vector
204 Carry out compressed sensing signal reconstruction on the error total vector, and determine an internal sensitive region of the to-be-detected chip

(57) Abstract: A chip single-event effect detection method and device, the method comprising: placing a to-be-detected chip in a testing machine, and triggering the to-be-detected chip to generate a single-event effect; randomly turning off a scanning register for the to-be-detected chip, and forming a random observation matrix; providing an input testing vector for the to-be-detected chip so as to obtain an output testing vector of the to-be-detected chip, and obtaining an error total vector according to the output testing vector; and carrying out compressed sensing signal reconstruction on the error total vector, and determining an internal sensitive region of the to-be-detected chip. The method may be used to efficiently and conveniently detect the single-event effect of a chip.

(57) 摘要: 一种芯片单粒子效应探测方法及装置, 其中方法包括: 将待测芯片放入测试机台, 触发待测芯片产生单粒子效应; 随机关断待测芯片的扫描寄存器, 形成随机观测矩阵; 向待测芯片提供输入测试向量, 获得待测芯片的输出测试向量, 根据输出测试向量获得错误总数向量; 对错误总数向量进行压缩感知信号重构, 确定待测芯片内部敏感区域。可以高效、便捷地对芯片单粒子效应进行探测。

GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

芯片单粒子效应探测方法及装置

技术领域

本发明涉及集成电路技术领域，尤其涉及芯片单粒子效应探测方法及装置。

5 背景技术

集成电路可靠性研究的重要性随着半导体行业的快速进步而凸显。新型的小封装、高速度、低功耗的高性能芯片对粒子辐射的敏感程度大大增强，能产生诸多半导体电离辐射效应，也称单粒子效应。图 1 为现有技术中入射高能粒子造成半导体单粒子效应的示意图，如图 1 所示，单粒子效应会导致电子设备偏离正常功能和性能，导致芯片可靠性降低，甚至失效。

除了太空射线能导致芯片单粒子效应，现代集成电路芯片制造过程中也引入了大量辐射损伤的加工工艺步骤，如离子注入、干法刻蚀、电子束或 X 射线光刻、等离子增强化学气相沉积、离子铣、势垒层及金属层建设等。在芯片封装工艺中电离辐射的来源是 α 粒子，如倒装焊球中的铅基同位素，铀、钍等放射性杂质。这些辐射来源都将严重威胁对芯片单粒子效应可靠性。

随着空间技术和核技术的发展，单粒子效应被进一步分类研究，如单粒子闩锁（Single event latch-up, SEL），单粒子翻转（Single event upset, SEU），单粒子功能中断（Single event functional interrupt, SEFI）和单粒子烧毁（Single event burnout, SEB）等。根据单粒子效应对电子元器件造成的影响能否恢复，单粒子效应可以分为不可恢复错误和可恢复错误。“不可恢复错误”，或称“硬错误”，指一旦发生会对器件或系统造成致命的永久性损伤的错误，如 SEB；“可恢复错误”，或称“软错误”，指通过重新启动器件或重新写入数据等方法可以恢复正常的错误，如 SEU、SET、SED 等。其中，单粒子闩锁 SEL 和单粒子翻转 SEU 是发生频率较高的两种单粒子效应。

单粒子效应对深亚微米集成电路，尤其是用于轨道飞船或其他航空电子设备的芯片可靠性具有严重威胁。据美国 NGDC（National Geophysical Data Center）的数据统计，自 1971 年至 1986 年，国外发射的 39 颗同步卫星在飞行期间发生的故障共有 1589 次，空间辐射导致的故障有 1129 次，占故障总数的 71%，而在辐射造成的故障中，单粒子效应造成的故障有 621 次，占辐射造成总故障的 55%。我国发射的航天器也有类似情况出现。中国空间技术研究院统计了 1984 年到 2000 年东方红二号系列六颗通信卫星

的故障，其中空间环境效应引起的故障占故障总数的 40%。2007 年至 2010 年我国航天器单粒子效应故障的统计表明，单粒子效应在空间环境辐射效应中占据主导地位，对航天器的危害日益严重。

利用高能离子束进行辐照研究需要昂贵的专用设备，通常包括粒子加速器、终端束流机台、示波器等。目前只有少数高校和研究机构才能开展这样的实验。科学家发现可以利用脉冲激光模拟空间宇宙射线重离子在微电子器件和集成电路中产生的单粒子效应。1994 年，J.S.Melinger 等对激光单粒子效应的试验和基本机理进行研究，对激光和电子器件材料相互作用过程进行了较详细分析，认为虽然激光产生的电子-空穴对等离子体结构和重离子产生的电子-空穴对等离子体径迹结构存在较大差异，但其在单粒子效应测试方面仍可作为实验室重要评估手段。并且在工程设计应用中，激光单粒子效应测试手段比重粒子加速器更实用。脉冲激光辐照下引起单粒子效应，尤其是软错误的过程，称之为“故障注入”。然而即使利用脉冲激光来测试单粒子效应可靠性也面临低效、繁琐的问题。

15 发明内容

本发明实施例提供一种芯片单粒子效应探测方法，用以高效、便捷地对芯片单粒子效应进行探测，该方法包括：

将待测芯片放入测试机台，触发待测芯片产生单粒子效应；

随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵；

20 向待测芯片提供输入测试向量，获得待测芯片的输出测试向量，根据输出测试向量获得错误总数向量；

对错误总数向量进行压缩感知信号重构，确定待测芯片内部敏感区域。

本发明实施例还提供一种芯片单粒子效应探测装置，用以高效、便捷地对芯片单粒子效应进行探测，该装置包括：

25 测试机台，用于放入待测芯片，所述待测芯片包括扫描寄存器；

触发装置，用于触发待测芯片产生单粒子效应；

随机观测矩阵形成单元，用于随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵；

所述测试机台还用于向待测芯片提供输入测试向量，获得待测芯片的输出测试向量，根据输出测试向量获得错误总数向量；对错误总数向量进行压缩感知信号重构，确定待测芯片内部敏感区域。

本发明实施例中，将待测芯片放入测试机台，触发待测芯片产生单粒子效应；随机
5 关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵；向待测芯片提供输入测试向量，获得待测芯片的输出测试向量，根据输出测试向量获得错误总数向量；对错误总数向量进行压缩感知信号重构，确定待测芯片内部敏感区域；可以高效地将芯片由于故障注入引发的内部变化快速有效地反映在输出结果，并且减少测试中对芯片设计的了解和对测试经验的依赖；能以较少的观测代价，较少的测试时间，高效的进行观测和信号重构。

附图说明

为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还
15 可以根据这些附图获得其他的附图。在附图中：

图 1 为现有技术中入射高能粒子造成半导体单粒子效应的示意图；

图 2 为本发明实施例中芯片单粒子效应探测方法的示意图；

图 3 为本发明实施例中压缩感知用于探测芯片内部 SEU 的信号观测与重构原理框图；

图 4 为本发明实施例中对芯片进行扫描辐照的示意图；

图 5 为本发明实施例中 SEE 敏感点 X 的信号重构流程示意图；

图 6 为本发明实施例中芯片单粒子效应探测装置的示意图；

图 7 为本发明实施例中每一次辐照下的逻辑单元需与被随机使能的扫描寄存器相匹配的示意图；

图 8 为本发明实施例中故障注入设备与压缩感知测试机台各自的任务与协同示意图。

具体实施方式

为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚明白，下面结合附图对本发明实施例做进一步详细说明。在此，本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明，但并不作为对本发明的限定。

发明人发现，现有技术中利用脉冲激光来测试单粒子效应可靠性面临低效、繁琐的问题，这是由于现有芯片的辐射效应测试要求测试工程师在激光辐照下长时间反复扫描抽检芯片，仅凭输出结果来分析和判断芯片内部可靠性。即使得到错误结果，还需结合故障分析方法（Fault Analysis）对数据进行分析判别，才能发现芯片中的漏洞部位。这一方面是由于激光辐照须在时间上与芯片内部关键指令处理同步，在空间上须将故障注入工具聚焦于芯片敏感寄存器区域，这需要具备深厚专业知识的测试人员经过长时间摸索。这样的测试方法费时费力、容易误检漏检，且不能有效帮助防御设计。现有芯片辐射效应可靠性测试方法繁琐低效的另一原因是由于芯片输入输出引脚数目有限，不足以将故障注入引发的内部变化快速有效地反映在输出结果。即使采用 DFT（Design for Test）技术，也无法对每一个逻辑门的响应进行观测。目前有文献指出可利用聚焦高能光子或氦离子的核微探针，或内置刃口探测器进行研究，但是均无法有效探测所有内部节点的状况。

现代半导体制程已大规模采用 45nm 节点工艺，22nm 节点和 16nm 节点工艺进入芯片也指日可待。在这样的深亚微米工艺条件下，制造中的工艺参数变异必然导致辐射效应可靠性降低。对芯片进行精准全面的故障注入，并对响应进行系统分析的测试成为必然趋势。

为了解决现有的单粒子效应可靠性测试方法的弊端，本发明实施例中提供一种采用压缩感知理论探测芯片单粒子效应的方法，该方法具有无损、高效的特点。图 2 为本发明实施例中芯片单粒子效应探测方法的示意图，如图 2 所示，该方法可以包括：

步骤 201、将待测芯片放入测试机台，触发待测芯片产生单粒子效应；

步骤 202、随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵；

步骤 203、向待测芯片提供输入测试向量，获得待测芯片的输出测试向量，根据输出测试向量获得错误总数向量；

步骤 204、对错误总数向量进行压缩感知信号重构，确定待测芯片内部敏感区域。

由图 2 所示流程可以得知，本发明实施例中通过将待测芯片放入测试机台，触发待测芯片产生单粒子效应，随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵，向待测芯片提供输入测试向量，获得待测芯片的输出测试向量，根据输出测试向量获得错误总

数向量，从而进行可测性设计和自动化测试向量，因此可高效地将芯片由于故障注入引发的内部变化快速有效地反映在输出结果，并且减少测试中对芯片设计的了解和对测试经验的依赖；通过对错误总数向量进行压缩感知信号重构，确定待测芯片内部敏感区域，因此能以较少的观测代价，较少的测试时间，高效的进行观测和信号重构。

- 5 本发明实施例基于压缩感知理论研究可测性设计和相应的测试方法，总体设计思想为：1) 在芯片设计过程中将寄存器插入扫描链（如为密码芯片，则可以只将不包含密钥信息的寄存器插入扫描链），然后生成辐射效应可靠性测试向量，避免因扫描链的插入而导致的密钥相关信息泄露。控制每一个扫描寄存器，供测试时建立随机观测矩阵用；
- 10 2) 在芯片制造完成后的测试阶段，利用故障注入，基于压缩感知理论，在测试机台上通过控制关断扫描寄存器，形成随机观测矩阵。通过输出测试向量得到错误总数向量，然后通过信号重构算法得到内部敏感点，即可快速判断该密码芯片的安全程度，或航空电子的 SEE 可靠性。

本发明实施例的芯片单粒子效应探测方法可以将压缩感知、高精度故障注入技术和 DFT (Design for Test) 技术结合形成观测矩阵，大幅降低现有方法中需要的传感器或探测器数量。图 3 为本发明实施例中压缩感知用于探测芯片内部 SEU 的信号观测与重构原理框图。如图 3 所示，在本发明实施例中，芯片内部 SEU 敏感点原始信号经随机观测与压缩采样，可以重构出 SEU 敏感点信号。

实施时先将待测芯片放入测试机台，触发待测芯片产生单粒子效应。在具体的实施例中，将待测芯片放入测试机台，触发待测芯片产生单粒子效应，可以采用激光故障注入技术，当然除了利用激光光束辐照进行故障注入，还可以采用其他单粒子效应触发方式，如重离子微束 (ion beam) 辐照，或其他辐射环境。

实施例中可以结合压缩感知理论和故障注入技术，进行可测性设计和执行相应的测试过程，随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵；向待测芯片提供输入测试向量，获得待测芯片的输出测试向量，根据输出测试向量获得错误总数向量；对错误总数向量进行压缩感知信号重构，确定待测芯片内部敏感区域。

压缩感知理论的实现包含三个关键要素：稀疏性、非相关观测、非线性优化重建。其中信号的稀疏性是压缩感知的必备条件，非相关观测是压缩感知的关键，非线性优化是压缩感知重建信号的手段。其中对于进行非相关观测，假定 X 为待测芯片的内部 SEE 敏感区域， X 为 $x_{ji} = \begin{cases} 0, \\ 1 \end{cases}$ ($i \in 1, 2, \dots, N$, $j \in 1, 2, \dots, M$) 的数组。若 $x_{ji} = 0$ ，表示该逻辑

单元 G_i 在第 j 次辐照下具有 SEE 可靠性, $x_{ji}=1$, 表示该逻辑单元 G_i 在第 j 次辐照下为 SEE 敏感区域。将其在某组 N 维正交基 $\{\psi_i\}_{i=1}^N$ 上展开, 即:

$$x = \sum_{i=1}^N \theta_i \psi_i;$$

若写成矩阵形式, 可得: $X = \Psi \theta$, 其中 $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N]$ 为正交基矩阵, 满足 $\Psi \Psi^T = \Psi^T \Psi = I$; 展开系数向量 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T$ 。假设系数向量 θ 是 K -稀疏的, 及其中非零稀疏的个数 $K \ll N$, 那么采用另一个与正交基字典 Ψ 不相关的观测矩阵 $\Phi: M \times N$ ($M \ll N$), 对信号 X 执行一次压缩观测, 得到:

$$Y = \Phi X$$

$$\text{或} \begin{cases} a_{11}x_{11} + a_{12}x_{12} + \dots + a_{1n}x_{1n} = y_1 \\ a_{21}x_{21} + a_{22}x_{22} + \dots + a_{2n}x_{2n} = y_2 \\ \vdots \\ a_{m1}x_{m1} + a_{m2}x_{m2} + \dots + a_{mn}x_{1n} = y_m \end{cases}; \quad \text{公式 (1)}$$

其中, y_j ($j \in 1, 2, \dots, M$) 表示每次辐照后的故障总数目。这样就可以得到 M 个结果 $y \in R^M$, 可根据这 M 个结果重构出 X 。

在运用非相关观测时需设计一个与不相关的观测矩阵 $\Phi: M \times N$ ($M \ll N$), 使得内部故障点 X 从 N 维降到 M 维时信号能量不被破坏。利用随机关断扫描寄存器的方法, 可以得到随机观测矩阵如下:

$$\Phi = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \dots & a_{MN} \end{bmatrix};$$

其中, Φ 为随机观测矩阵, 其中的元素 $a_{ji} = 0$ 表示在第 j 次辐照时关断第 i 个被辐照的逻辑单元对应的扫描寄存器, $j \in 1, 2, \dots, M$, $i \in 1, 2, \dots, N$ 。比如在第 j 次辐照, 只有数个至数十个逻辑单元被辐照 (具体数量取决于半导体工艺尺寸和激光聚焦光斑尺寸), 控制开关矩阵, 随机关断其相关的扫描寄存器。如关断第 i 个逻辑单元对应的扫描寄存器, 则 $a_{ji} = 0$ 。这个逻辑单元的 SEE 敏感性产生的错误不会反映在第 j 次辐照的错误总数 y_j 统计中。如同压缩感知成像技术中, 该像素的光未计入观测矩阵。反之则 $a_{ji} = 1$ 。这样在 M 次辐照后, 通过压缩感知信号重构可以恢复出第 i 个逻辑单元是否

SEE 敏感, 即 $x_i = 0$ 或 1 。 $x_i = 0$, 表示该逻辑单元 G_i 在辐照下具有 SEE 可靠性,
 $x_i = 1$, 表示该逻辑单元 G_i 在辐照下为 SEE 敏感区域。

在测试的每次辐照过程中, 按照激光光束或重离子微束聚焦大小建立扫描单元, 图
 4 为本发明实施例中对芯片进行扫描辐照的示意图, 如图 4 所示芯片, 其中 ALU (算术
 5 逻辑单元) 和 decoder (译码器) 区域是重点辐照范围, 以激光光束辐照为例, 图 4 中小
 框为一次光束聚焦范围 (仅为图示, 实际比例比图示小), 图 4 中用方框近似表示光束
 圆形范围。以 $0.18 \mu m$ 工艺为例, 实验数据显示表明辐照光斑直径约 $3.7 \mu m$, 覆盖大约
 10~15 个逻辑单元 (也称逻辑门)。当工艺节点减小到 $28nm$, 则 $3.7 \mu m$ 的激光光斑覆
 盖 160-240 个逻辑门, 以此类推。也可以采用光斑聚焦半径小的技术, 比如飞秒激光。

10 因此在实施例中触发待测芯片产生单粒子效应, 可以包括: 利用激光光束或重离子微束
 辐照对待测芯片进行故障注入。利用激光光束或重离子微束辐照对待测芯片进行故障注
 入, 可以包括: 在测试的每次辐照过程中, 按照激光光束或重离子微束辐照聚集大小建
 立扫描单元。利用激光光束或重离子微束辐照对待测芯片进行故障注入时, 可以利用激
 光光束或重离子微束辐照对待测芯片的算术逻辑单元和译码器区域进行辐照。

15 如图 4 所示芯片在两次辐照下覆盖的不同逻辑单元。假设其中第 p 次辐照的逻辑单
 元 ($G_1, G_4, G_6, G_9, \dots$), 其 SEE 敏感性信号分别为 $[x_1, x_4, x_6, x_9, \dots]$, 则需控制随机
 观测矩阵, 使得公式 (1) 中数组 x_{pi} 的系数 a_{pi} , 即 $[a_{p1}, a_{p4}, a_{p6}, a_{p9}, \dots]$ 中一些系数
 为 1, 其余为 0; 第 q 次辐照的逻辑门 ($G_3, G_5, G_7, G_8, \dots$), 其 SEE 敏感性信号分别为
 $[x_3, x_5, x_7, x_8, \dots]$, 则需控制随机观测矩阵, 使得数组 $[a_{q3}, a_{q5}, a_{q7}, a_{q8}, \dots]$ 中一些系
 20 数为 1, 其余为 0。

具体在利用使能信号随机关断待测芯片的扫描寄存器, 形成随机观测矩阵时, 可以
 包括: 通过串并联译码器形成随机观测矩阵开关阵列, 向待测芯片的扫描寄存器的使能
 端口输出使能信号, 随机关断待测芯片的扫描寄存器, 形成随机观测矩阵; 或者, 可以
 通过控制输入测试向量, 随机关断待测芯片的扫描寄存器, 形成随机观测矩阵, 即由输
 25 入测试向量随机控制是否将某个扫描寄存器可能出现的错误结果纳入总错误数, 形成随
 机观测矩阵。实施例中随机关断待测芯片的扫描寄存器, 形成随机观测矩阵时, 还可以
 包括通过显微镜的二维载物台对待测芯片进行二维移动, 将每一次被随机关断的扫描寄
 存器与被触发产生单粒子效应的待测芯片逻辑单元相匹配。

图 5 为本发明实施例中 SEE 敏感点 X 的信号重构流程示意图。重构算法的设计直接影响了信号的重构质量。在实施中对错误总数向量进行压缩感知信号重构，确定待测芯片内部敏感区域，可以包括：采用线性规划算法或非线性算法对错误总数向量进行压缩感知信号重构，确定待测芯片内部敏感区域。其中非线性算法例如可以是贪婪算法。贪婪算法计算复杂度低，可以简化硬件集成度。贪婪算法经多次迭代，可以使得误差逐渐减小，最终完成 SEE 敏感点 X 的信号重构，获得芯片内部 SEU 可靠性故障所在。实施例中，还可以采用线性规划算法和非线性算法的组合算法对错误总数向量进行压缩感知信号重构，或者是其他相关算法。

图 6 为本发明实施例中芯片单粒子效应探测装置的示意图，如图 6 所示，该装置可以包括：

测试机台 601，用于放入待测芯片，所述待测芯片包括扫描寄存器；

触发装置 602，用于触发待测芯片产生单粒子效应；

随机观测矩阵形成单元 603，用于随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵；

测试机台 601 还用于向待测芯片提供输入测试向量，获得待测芯片的输出测试向量，根据输出测试向量获得错误总数向量；对错误总数向量进行压缩感知信号重构，确定待测芯片内部敏感区域。

如前所述，在实施例中触发装置可以是故障注入设备，例如可以是激光器，如纳秒激光、皮秒激光或飞秒激光器；或者可以是重离子微束发生器等。在实施例中激光器或重离子微束发生器可以进一步用于对待测芯片的算术逻辑单元和译码器区域进行辐照。

具体实例中，随机观测矩阵形成单元可以包括由串并联译码器形成的随机观测矩阵开关阵列，所述随机观测矩阵开关阵列用于向待测芯片的扫描寄存器的使能端口输出使能信号，随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵；或者，随机观测矩阵形成单元可以进一步用于通过控制所述输入测试向量，随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵。

具体实例中，测试机台还可以包括显微镜的二维载物台，用于对待测芯片进行二维移动，将每一次被随机关断的扫描寄存器与被触发产生单粒子效应的待测芯片逻辑单元相匹配。

具体实例中，随机观测矩阵形成单元进一步用于形成如下随机观测矩阵：

$$\Phi = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdots & a_{MN} \end{bmatrix}$$

其中， Φ 为所述随机观测矩阵，其中的元素 $a_{ji} = 0$ 表示判断在第 j 次辐照时关断第 i 个被辐照的逻辑单元对应的扫描寄存器， $j \in 1, 2, \dots, M$ ， $i \in 1, 2, \dots, N$ 。

具体实例中，测试机台进一步用于对信号 X 执行一次压缩观测，得到：

$$5 \quad \begin{cases} a_{11}x_{11} + a_{12}x_{12} + \cdots + a_{1N}x_{1N} = y_1 \\ a_{21}x_{21} + a_{22}x_{22} + \cdots + a_{2N}x_{2N} = y_2 \\ \vdots \\ a_{M1}x_{M1} + a_{M2}x_{M2} + \cdots + a_{MN}x_{MN} = y_M \end{cases};$$

其中， y_j ($j \in 1, 2, \dots, M$) 表示每次辐照后的故障总数目； X 为待测芯片的内部 SEE 敏感区域， X 为 $x_{ji} = \begin{cases} 0, \\ 1 \end{cases}$ ($i \in 1, 2, \dots, N$) 的数组， $x_{ji} = 0$ 表示该逻辑单元 G_i 在第 j 次辐照下具有 SEE 可靠性， $x_{ji} = 1$ 表示该逻辑单元 G_i 在第 j 次辐照下为 SEE 敏感区域。

10 在实际中还要考虑观测矩阵的硬件实现复杂性。图 7 为本发明实施例中每一次辐照下的逻辑单元需与被随机使能的扫描寄存器相匹配的示意图。图 7 中显示了随机观测矩阵开关阵列及测试机台上的待测芯片母板。随机观测矩阵开关阵列连接待测芯片的扫描寄存器使能端口，利用使能信号随机关断扫描寄存器。由于内部信号点数据巨大，考虑到开关速度，可采用串并联译码器的方法得到随机观测矩阵 Φ 。

15 利用激光器和显微镜的配套软件进行二次开发，对激光光强和同步策略进行控制。如图 7 所示，通过压缩感知信号重构设备上的随机观测矩阵开关阵列数据，利用显微镜的二维载物台实现对芯片的二维移动，使得每一次被随机观测矩阵开关阵列使能的扫描寄存器与被辐照的芯片逻辑单元相匹配。实施例中可以利用样品位移控制命令实现对芯片激光注入的控制并返回控制状态信号。

20 在具体的实施例中，可以将待测的集成电路开盖去封，然后放置入压缩感知信号重构的测试机台，结合故障注入设备（触发装置），输入相应的测试向量与测试协议，直到下一次辐照。图 8 为本发明实施例中故障注入设备与压缩感知测试机台各自的任务与协同示意图，如图 8 所示，对故障注入设备和压缩感知测试机台进行同步控制，故障注

入设备控制第 p 次激光辐照范围，测试机台进行图像处理，对比芯片后端版图 (Layout)，取得被辐照的逻辑单元列表 G_{pi} ，控制随机关断 $[a_{pi}]$ ，建立方程 $Y = \Phi X$ ，并控制移动台继续移动，进行下一次辐照处理。

这样在每次辐照测试后，可在测试向量较少的情况下以较高的测试覆盖率得到每次
5 辐照后的故障总数目 y_j ($j \in 1, 2, \dots, M$)，再通过非线性优化公式 (1)，重建信号

$$x_i = \begin{cases} 0, \\ 1 \end{cases} \quad (i \in 1, 2, \dots, N), \quad x_i = 0, \text{ 表示该逻辑单元在辐照下具有 SEE 可靠性, } x_i = 1, \text{ 表}$$

示该逻辑单，属于辐照下的 SEE 敏感区域。从而获得芯片内部 SEU 可靠性故障所在。

由上述实施例可知，本发明实施例中，将芯片内部单粒子效应 (SEE) 敏感点类比为具有稀疏性的待观测信号，因此可采用压缩感知的方法来无损高效地进行探测。目前
10 芯片的辐射效应可靠性测试要求测试工程师长时间反复扫描抽检芯片，仅凭输出结果来分析和判断芯片内部可靠性。即使得到错误结果，还需结合故障分析方法 (Fault Analysis) 对数据进行分析判别，才能发现芯片中的漏洞部位。如何对芯片进行辐射效应可靠性测试，并高效地将芯片由于故障注入引发的内部变化快速有效地反映在输出结果，是本发明实施例拟解决的关键问题之一。本发明实施例基于压缩感知理论通过建立
15 辐照下随机观测矩阵，和可测性设计测试结合，得到每次辐照后的错误数目，然后通过非线性优化，以较少的观测代价，较少的测试时间，高效地将芯片由于故障注入引发的内部变化快速有效地反映在输出结果。

传统故障注入须在时间上与芯片内部关键指令处理同步，在空间上须将故障注入工具聚焦于芯片敏感寄存器区域，这需要具备深厚专业知识的测试人员经过长时间摸索或
20 进行白盒测试。而在本发明实施例中，可以采用激光精确聚焦待测芯片的故障注入时间和区域，并将聚焦光斑覆盖下的扫描寄存器，利用随机开关控制扫描寄存器的使能端口，形成随机观测矩阵，用以建立压缩感知的随机观测矩阵。

本发明实施例中，通过输出测试向量得到错误总数，然后通过信号重构算法得到内部敏感点，即可快速判断该芯片的辐射效应可靠性程度。本发明实施例中以贪婪算法为例进行信号重构，也可以采用其他相关算法。
25

综上所述，本发明实施例由于进行了可测性设计和自动化测试向量，因此可高效地将芯片由于故障注入引发的内部变化快速有效地反映在输出结果，并且减少测试中对芯片设计的了解和对测试经验的依赖。由于采用压缩感知理论，因此能以较少的观测代价，较少的测试时间，高效的进行观测和信号重构。

目前发明人已初步搭建了一个激光故障注入测试实验平台，采用美国 Spectra-Physics 公司的 Mai Tai Deepsee 激光器以及 Nikon 公司的 A1MP+ 系列共聚焦显微镜。前者可在 680nm-1040nm 范围内提供可调功率的辐照，其采用超稳再生所模具技术，波长调节和激励配置简单易调，光束指向稳定，功率波动小，消除了波长漂移。后者直接内
5 置飞秒激光器并进行了光路设计，可将激光聚焦在 $1\mu\text{m}$ 空间范围内，若采用合适的物镜，可将激光束聚焦在更小的空间范围内。共聚焦显微镜本身具有二维电动载物台，可实现样品的二维移动，实现电子芯片整个表面范围的故障注入攻击。发明人已在实验平台上得到初步结果，能够以 900nm 左右的波长从正面辐照电路，产生稳定的错误。

本领域内的技术人员应明白，本发明的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序
10 产品。因此，本发明可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且，本发明可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质（包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等）上实施的计算机程序产品的形式。

本发明是参照根据本发明实施例的方法、设备（系统）、和计算机程序产品的流程图
15 图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器，使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能
20 的装置。

这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中，使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品，该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

25 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上，使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理，从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

以上所述的具体实施例，对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细
30 说明，所应理解的是，以上所述仅为本发明的具体实施例而已，并不用于限定本发明的

保护范围，凡在本发明的精神和原则之内，所做的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权利要求书

1、一种芯片单粒子效应探测方法，其特征在于，包括：

将待测芯片放入测试机台，触发待测芯片产生单粒子效应；

随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵；

5 向待测芯片提供输入测试向量，获得待测芯片的输出测试向量，根据输出测试向量获得错误总数向量；

对错误总数向量进行压缩感知信号重构，确定待测芯片内部敏感区域。

2、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述触发待测芯片产生单粒子效应，包括：利用激光光束或重离子微束辐照对待测芯片进行故障注入。

10 3、如权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述利用激光光束或重离子微束辐照对待测芯片进行故障注入，包括：在测试的每次辐照过程中，按照激光光束或重离子微束聚集大小建立扫描单元。

4、如权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述利用激光光束或重离子微束辐照对待测芯片进行故障注入，包括：利用激光光束或重离子微束对待测芯片的算术逻辑单元
15 和译码器区域进行辐照。

5、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵，包括：

通过串并联译码器形成随机观测矩阵开关阵列，向待测芯片的扫描寄存器的使能端口输出使能信号，随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵；

20 或，通过控制所述输入测试向量，随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵。

6、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵，还包括：

25 通过显微镜的二维载物台对待测芯片进行二维移动，将每一次被随机关断的扫描寄存器与被触发产生单粒子效应的待测芯片逻辑单元相匹配。

7、如权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述随机观测矩阵如下：

$$\Phi = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdots & a_{MN} \end{bmatrix}$$

其中, Φ 为所述随机观测矩阵, 其中的元素 $a_{ji} = 0$ 表示在第 j 次辐照时关断第 i 个被辐照的逻辑单元对应的扫描寄存器, $j \in 1, 2, \dots, M$, $i \in 1, 2, \dots, N$ 。

8、如权利要求 7 所述的方法, 其特征在于, 所述向待测芯片提供输入测试向量, 获得待测芯片的输出测试向量, 根据输出测试向量获得错误总数向量, 包括对信号 X 执行一次压缩观测, 得到:

$$\begin{cases} a_{11}x_{11} + a_{12}x_{12} + \dots + a_{1N}x_{1N} = y_1 \\ a_{21}x_{21} + a_{22}x_{22} + \dots + a_{2N}x_{2N} = y_2 \\ \vdots \\ a_{M1}x_{M1} + a_{M2}x_{M2} + \dots + a_{MN}x_{MN} = y_M \end{cases};$$

其中, y_j ($j \in 1, 2, \dots, M$) 表示每次辐照后的故障总数目; X 为待测芯片的内部 SEE 敏感区域, X 为 $x_{ji} = \begin{cases} 0, \\ 1 \end{cases}$ ($i \in 1, 2, \dots, N$) 的数组, $x_{ji} = 0$ 表示该逻辑单元 G_i 在第 j 次辐照下具有 SEE 可靠性, $x_{ji} = 1$ 表示该逻辑单元 G_i 在第 j 次辐照下为 SEE 敏感区域。

9、如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 所述对错误总数向量进行压缩感知信号重构, 确定待测芯片内部敏感区域, 包括: 采用线性规划算法或非线性算法对错误总数向量进行压缩感知信号重构, 确定待测芯片内部敏感区域。

10、一种芯片单粒子效应探测装置, 其特征在于, 包括:

测试机台, 用于放入待测芯片, 所述待测芯片包括扫描寄存器;

触发装置, 用于触发待测芯片产生单粒子效应;

随机观测矩阵形成单元, 用于随机关断待测芯片的扫描寄存器, 形成随机观测矩阵;

所述测试机台还用于向待测芯片提供输入测试向量, 获得待测芯片的输出测试向量, 根据输出测试向量获得错误总数向量; 对错误总数向量进行压缩感知信号重构, 确定待测芯片内部敏感区域。

11、如权利要求 10 所述的芯片单粒子效应探测装置, 其特征在于, 所述触发装置为激光器或重离子微束发生器。

12、如权利要求 11 所述的芯片单粒子效应探测装置, 其特征在于, 所述激光器或重离子微束发生器进一步用于对待测芯片的算术逻辑单元和译码器区域进行辐照。

13、如权利要求 10 所述的芯片单粒子效应探测装置，其特征在于，所述随机观测矩阵形成单元包括由串并联译码器形成的随机观测矩阵开关阵列，所述随机观测矩阵开关阵列用于向待测芯片的扫描寄存器的使能端口输出使能信号，随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵；

5 或，所述随机观测矩阵形成单元进一步用于通过控制所述输入测试向量，随机关断待测芯片的扫描寄存器，形成随机观测矩阵。

14、如权利要求 10 所述的芯片单粒子效应探测装置，其特征在于，所述测试机台还包括显微镜的二维载物台，用于对待测芯片进行二维移动，将每一次被随机观测矩阵形成单元关断的扫描寄存器与被触发产生单粒子效应的待测芯片逻辑单元相匹配。

10 15、如权利要求 10 所述的芯片单粒子效应探测装置，其特征在于，所述随机观测矩阵形成单元进一步用于形成如下随机观测矩阵：

$$\Phi = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{M1} & a_{M2} & \cdots & a_{MN} \end{bmatrix}$$

其中， Φ 为所述随机观测矩阵，其中的元素 $a_{ji} = 0$ 表示判断在第 j 次辐照时关断第 i 个被辐照的逻辑单元对应的扫描寄存器， $j \in 1, 2, \dots, M$ ， $i \in 1, 2, \dots, N$ 。

15 16、如权利要求 15 所述的芯片单粒子效应探测装置，其特征在于，所述测试机台进一步用于对信号 X 执行一次压缩观测，得到：

$$\begin{cases} a_{11}x_{11} + a_{12}x_{12} + \cdots + a_{1N}x_{1N} = y_1 \\ a_{21}x_{21} + a_{22}x_{22} + \cdots + a_{2N}x_{2N} = y_2 \\ \vdots \\ a_{M1}x_{M1} + a_{M2}x_{M2} + \cdots + a_{MN}x_{MN} = y_M \end{cases};$$

其中， y_j ($j \in 1, 2, \dots, M$) 表示每次辐照后的故障总数目； X 为待测芯片的内部 SEE 敏感区域， X 为 $x_{ji} = \begin{cases} 0, \\ 1 \end{cases}$ ($i \in 1, 2, \dots, N$) 的数组， $x_{ji} = 0$ 表示该逻辑单元 G_i 在第 j

20 次辐照下具有 SEE 可靠性， $x_{ji} = 1$ 表示该逻辑单元 G_i 在第 j 次辐照下为 SEE 敏感区域。

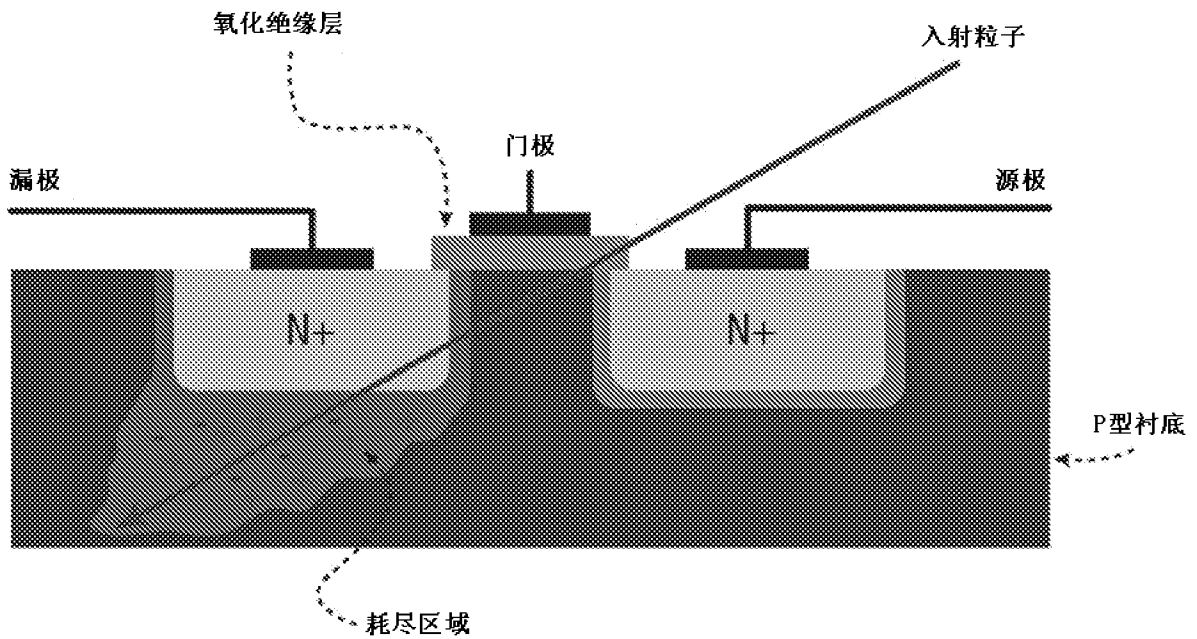


图 1

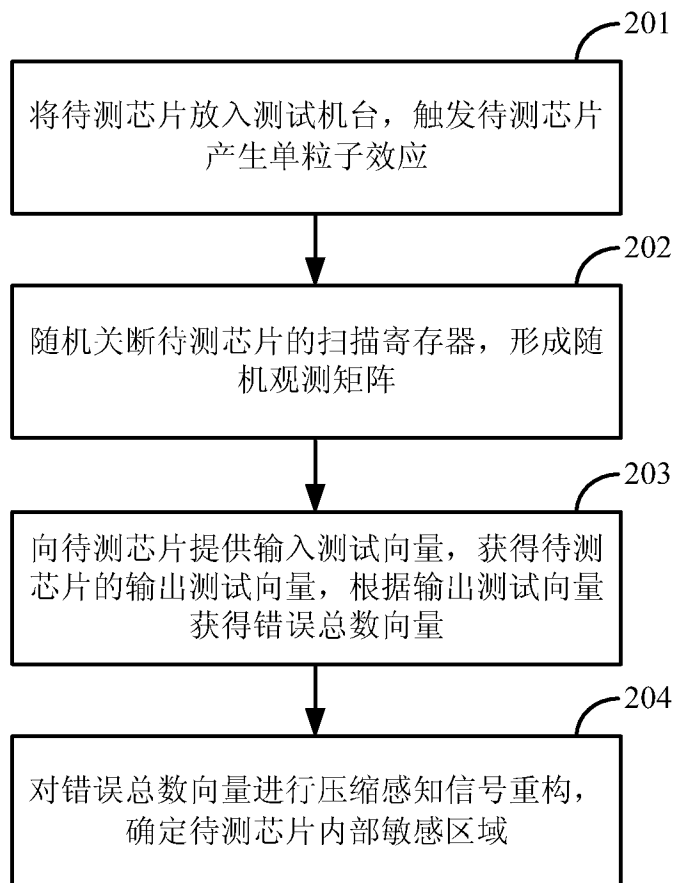


图 2

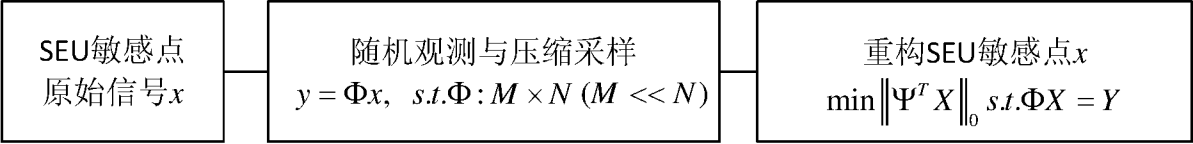


图 3

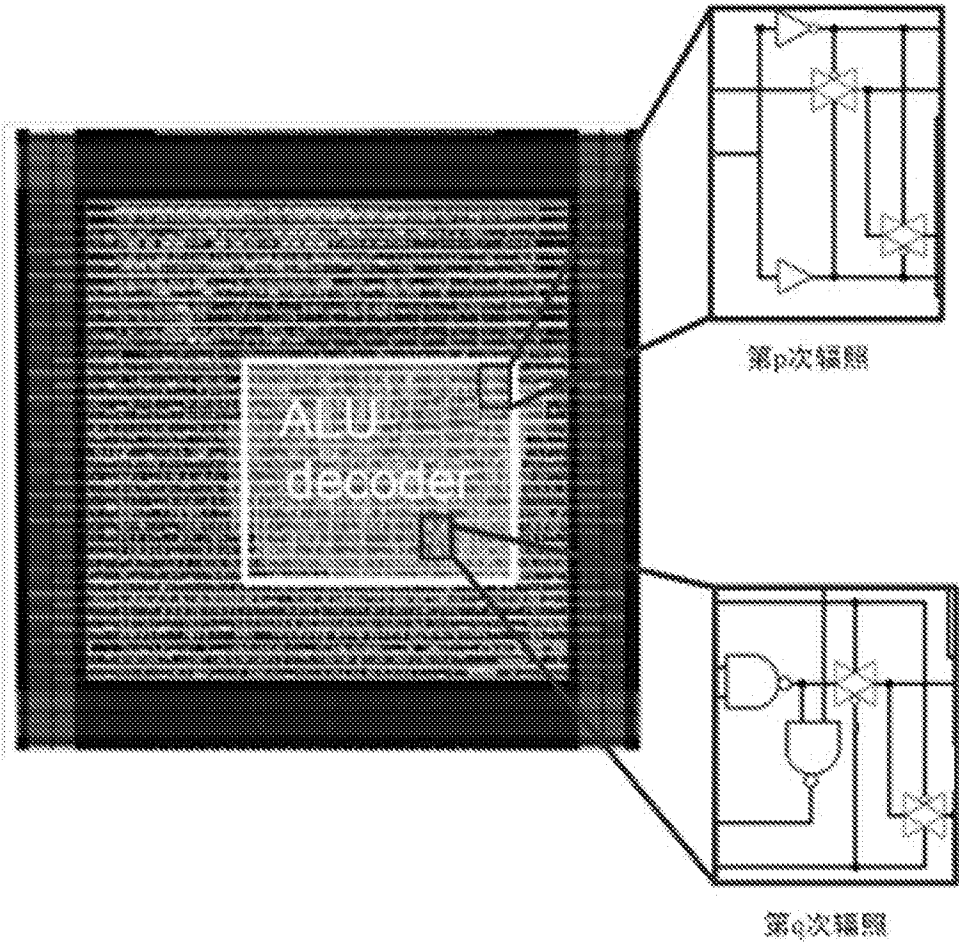


图 4

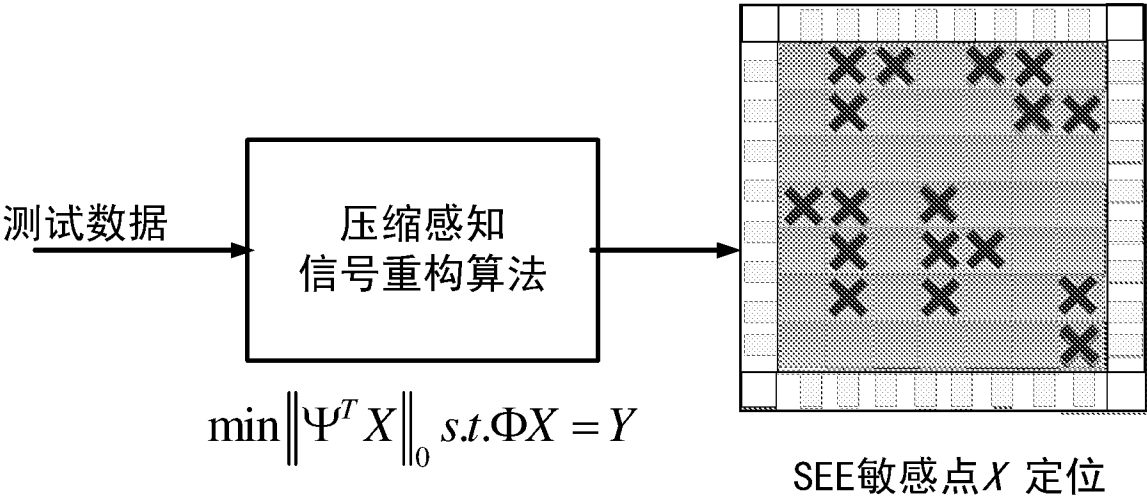


图 5

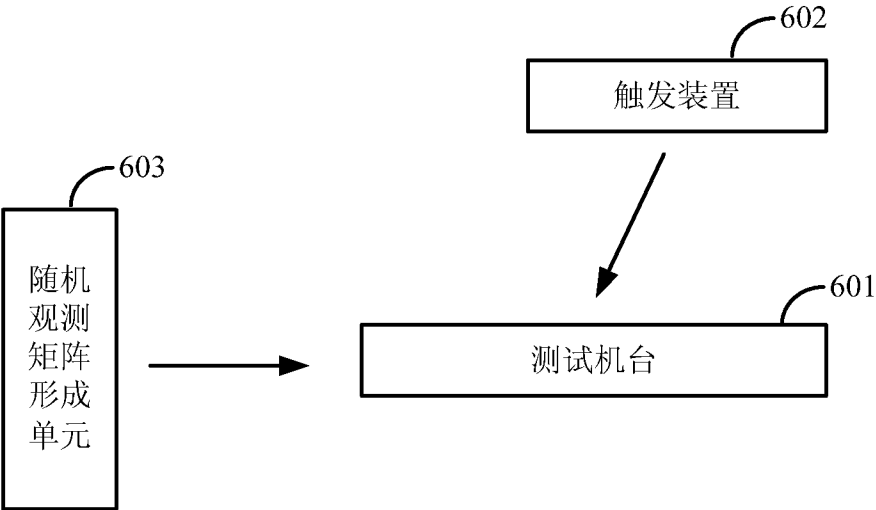


图 6

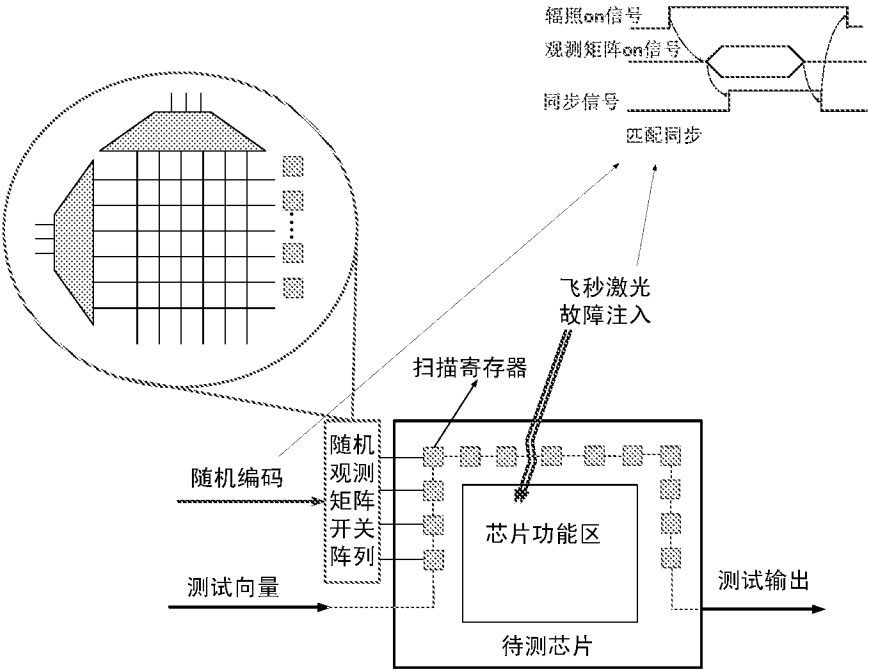


图 7

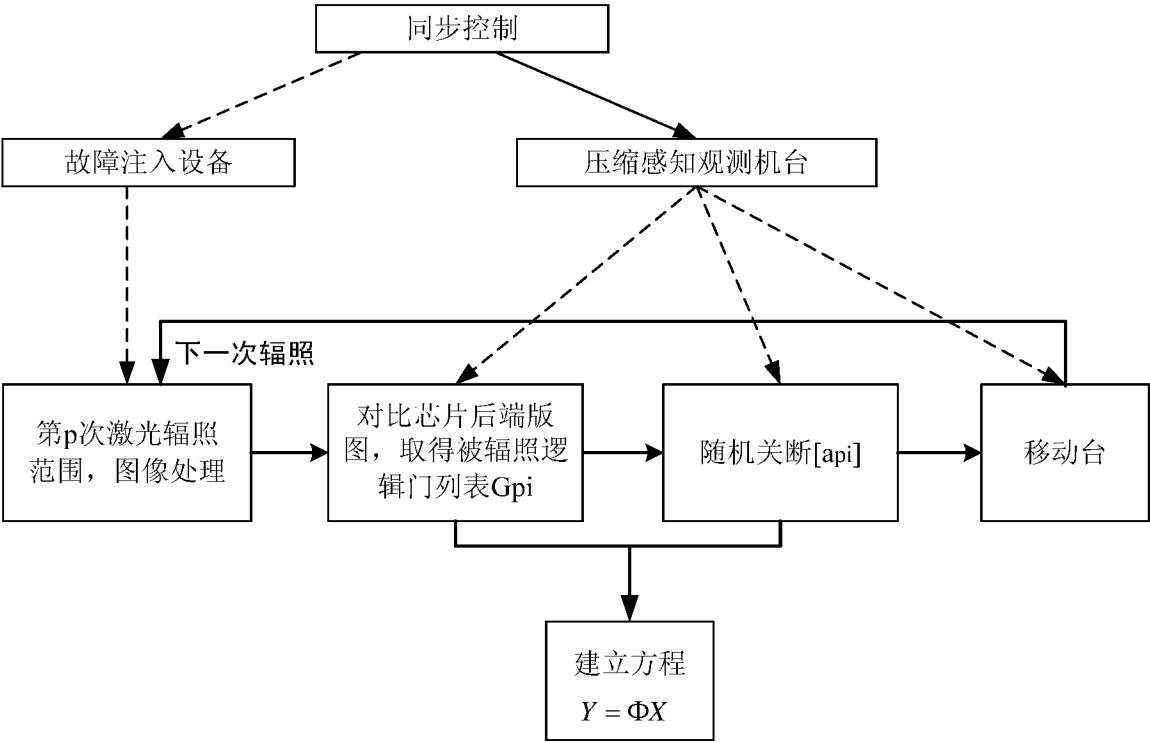


图 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2016/092256

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01R 31/311 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01R; G06F; H03K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNXTX; CNABS; SIPOABS; DWPI: single-particle, single event, test, detect, scan, register, vector, random, compress, reconstruct

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102854456 A (INSTITUTE OF ELECTRONICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES), 02 January 2013 (02.01.2013), description, paragraphs [0010]-[0028], and figures 1-8	1-16
A	CN 103473159 A (XIDIAN UNIVERSITY), 25 December 2013 (25.12.2013), the whole document	1-16
A	CN 104793080 A (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY), 22 July 2015 (22.07.2015), the whole document	1-16
A	US 2004124876 A1 (PLANTS), 01 July 2004 (01.07.2004), the whole document	1-16
A	WO 2015051175 A2 (ORBOTECH LTD. et al.), 09 April 2015 (09.04.2015), the whole document	1-16
A	JP 2005107733 A (NEC ENGINEERING LTD.), 21 April 2005 (21.04.2005), the whole document	1-16

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 13 March 2017 (13.03.2017)	Date of mailing of the international search report 24 March 2017 (24.03.2017)
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer LIU, Le Telephone No.: (86-10) 62411579

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2016/092256

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102854456 A	02 January 2013	None	
CN 103473159 A	25 December 2013	CN 103473159 B	02 March 2016
CN 104793080 A	22 July 2015	None	
US 2004124876 A1	01 July 2004	EP 1956713 A1	13 August 2008
		EP 1584138 A1	12 October 2005
		JP 2006519511 A	24 August 2006
		US 2007103966 A1	10 May 2007
		US 7173448 B2	06 February 2007
		US 7075328 B2	11 July 2006
		US 2008297191 A1	04 December 2008
		US 7443191 B2	28 October 2008
		US 6838899 B2	04 January 2005
		DE 60329628 D1	19 November 2009
		EP 1584138 A4	22 August 2007
		US 7288957 B2	30 October 2007
		US 2005040844 A1	24 February 2005
		JP 4358187 B2	04 November 2009
		US 2008007288 A1	10 January 2008
		US 2006145722 A1	06 July 2006
		WO 2005067147 A1	21 July 2005
		EP 1584138 B1	07 October 2009
		AU 2003304697 A1	12 August 2005
WO 2015051175 A2	09 April 2015	JP 2017502484 A	19 January 2017
		US 2016299103 A1	13 October 2016
		TW 201530602 A	01 August 2015
		CN 105793716 A	20 July 2016
		WO 2015051175 A3	19 November 2015
		KR 20160066028 A	09 June 2016
JP 2005107733 A	21 April 2005	None	

A. 主题的分类 G01R 31/311 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																							
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) G01R; G06F; H03K 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNTXT; CNABS; SIPOABS; DWPI: 单粒子, 测试, 扫描, 寄存器, 向量, 随机, 压缩, 重构, single event, test, detect, scan, register, vector, random, compress, reconstruct																							
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 102854456 A (中国科学院电子学研究所) 2013年 1月 2日 (2013 - 01 - 02) 说明书[0010]-[0028]段, 附图1-8</td> <td>1-16</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103473159 A (西安电子科技大学) 2013年 12月 25日 (2013 - 12 - 25) 全文</td> <td>1-16</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104793080 A (西安交通大学) 2015年 7月 22日 (2015 - 07 - 22) 全文</td> <td>1-16</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2004124876 A1 (PLANTS) 2004年 7月 1日 (2004 - 07 - 01) 全文</td> <td>1-16</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>WO 2015051175 A2 (奥宝科技有限公司等) 2015年 4月 9日 (2015 - 04 - 09) 全文</td> <td>1-16</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 2005107733 A (日本电气工程株式会社) 2005年 4月 21日 (2005 - 04 - 21) 全文</td> <td>1-16</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 102854456 A (中国科学院电子学研究所) 2013年 1月 2日 (2013 - 01 - 02) 说明书[0010]-[0028]段, 附图1-8	1-16	A	CN 103473159 A (西安电子科技大学) 2013年 12月 25日 (2013 - 12 - 25) 全文	1-16	A	CN 104793080 A (西安交通大学) 2015年 7月 22日 (2015 - 07 - 22) 全文	1-16	A	US 2004124876 A1 (PLANTS) 2004年 7月 1日 (2004 - 07 - 01) 全文	1-16	A	WO 2015051175 A2 (奥宝科技有限公司等) 2015年 4月 9日 (2015 - 04 - 09) 全文	1-16	A	JP 2005107733 A (日本电气工程株式会社) 2005年 4月 21日 (2005 - 04 - 21) 全文	1-16
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
A	CN 102854456 A (中国科学院电子学研究所) 2013年 1月 2日 (2013 - 01 - 02) 说明书[0010]-[0028]段, 附图1-8	1-16																					
A	CN 103473159 A (西安电子科技大学) 2013年 12月 25日 (2013 - 12 - 25) 全文	1-16																					
A	CN 104793080 A (西安交通大学) 2015年 7月 22日 (2015 - 07 - 22) 全文	1-16																					
A	US 2004124876 A1 (PLANTS) 2004年 7月 1日 (2004 - 07 - 01) 全文	1-16																					
A	WO 2015051175 A2 (奥宝科技有限公司等) 2015年 4月 9日 (2015 - 04 - 09) 全文	1-16																					
A	JP 2005107733 A (日本电气工程株式会社) 2005年 4月 21日 (2005 - 04 - 21) 全文	1-16																					
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																							
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																							
国际检索实际完成的日期 2017年 3月 13日		国际检索报告邮寄日期 2017年 3月 24日																					
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10) 62019451		受权官员 刘乐 电话号码 (86-10) 62411579																					

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/092256

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	102854456	A	2013年 1月 2日	无			
CN	103473159	A	2013年 12月 25日	CN	103473159	B	2016年 3月 2日
CN	104793080	A	2015年 7月 22日	无			
US	2004124876	A1	2004年 7月 1日	EP	1956713	A1	2008年 8月 13日
				EP	1584138	A1	2005年 10月 12日
				JP	2006519511	A	2006年 8月 24日
				US	2007103966	A1	2007年 5月 10日
				US	7173448	B2	2007年 2月 6日
				US	7075328	B2	2006年 7月 11日
				US	2008297191	A1	2008年 12月 4日
				US	7443191	B2	2008年 10月 28日
				US	6838899	B2	2005年 1月 4日
				DE	60329628	D1	2009年 11月 19日
				EP	1584138	A4	2007年 8月 22日
				US	7288957	B2	2007年 10月 30日
				US	2005040844	A1	2005年 2月 24日
				JP	4358187	B2	2009年 11月 4日
				US	2008007288	A1	2008年 1月 10日
				US	2006145722	A1	2006年 7月 6日
				WO	2005067147	A1	2005年 7月 21日
				EP	1584138	B1	2009年 10月 7日
				AU	2003304697	A1	2005年 8月 12日
WO	2015051175	A2	2015年 4月 9日	JP	2017502484	A	2017年 1月 19日
				US	2016299103	A1	2016年 10月 13日
				TW	201530602	A	2015年 8月 1日
				CN	105793716	A	2016年 7月 20日
				WO	2015051175	A3	2015年 11月 19日
				KR	20160066028	A	2016年 6月 9日
JP	2005107733	A	2005年 4月 21日	无			

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)