

(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



(10) 国际公布号

WO 2019/119759 A1

(43) 国际公布日

2019 年 6 月 27 日 (27.06.2019)

(51) 国际专利分类号:

G06F 17/50 (2006.01)

(21) 国际申请号:

PCT/CN2018/092482

(22) 国际申请日:

2018 年 6 月 22 日 (22.06.2018)

(25) 申请语言:

中文

(26) 公布语言:

中文

(30) 优先权:

201711362811.6 2017 年 12 月 18 日 (18.12.2017) CN

(71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园,
Beijing 100084 (CN)。

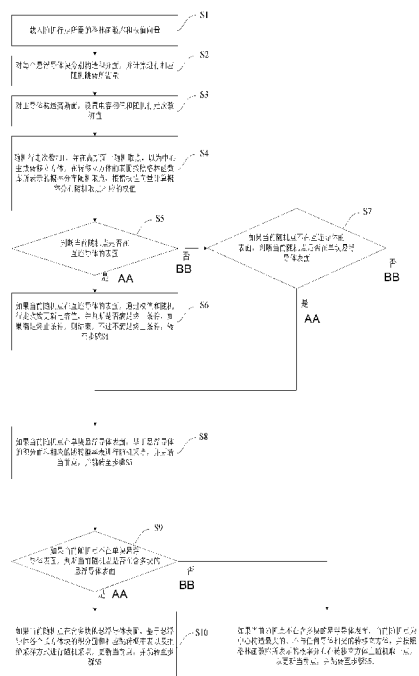
(72) 发明人: 喻文健 (YU, Wenjian); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。

(74) 代理人: 北京清亦华知识产权代理事务所 (普通合伙) (TSINGYIHUA INTELLECTUAL PROPERTY LLC); 中国北京市海淀区清华园清华大学照澜院商业楼 301 室, Beijing 100084 (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, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, 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。

(54) Title: EXTRACTION METHOD FOR RANDOM WALK CAPACITANCE PARAMETERS FOR PROCESSING SUSPENDED CONDUCTOR

(54) 发明名称: 处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法



- S1 Load the Green's function library and the weight vector required for the random walk
- S2 Construct an integral surface for each of the suspended conductor blocks and calculate the amount required for performing the corresponding random jump
- S3 Construct a Gaussian surface for the main conductor, set an initial value of the capacitance and an initial value of the number of random walk
- S4 Increase the number of random walk by 1, randomly take a point on the Gaussian surface to generate a transfer cube using it as the center, randomly take a point on the surface of the transfer cube according to the probability distribution represented by the Green's function library, and calculate the corresponding weight of the randomly taken point of the probability distribution according to the weight vector
- S5 Determine whether the current random point is on the surface of the interconnect conductor
- S6 If the current random point is on the surface of the interconnect conductor, update the capacitance value by the weight and the number of random walk, and determine whether the termination condition is satisfied, if the termination condition is satisfied, then end, if the termination condition is not satisfied, proceed to step S4
- S7 If the current random point is not on the surface of the interconnect conductor, determine whether the current random point is on the surface of the monolithic suspended conductor
- S8 If the current random point is on the surface of the monolithic suspended conductor, take the random point based on the integral surface of the suspended conductor and the corresponding jump probability table, and update the current point and jump to step S5
- S9 If the current random point is not on the surface of the monolithic suspended conductor, determine whether the current random point is on the surface of the suspended conductor containing a plurality of blocks
- S10 If the current random point is on the surface of the suspended conductor containing a plurality of blocks, randomly take a point based on the integral surface of each of the rectangular conductor blocks of the suspended conductor, the corresponding jump probability table and the rejection sampling manner, update the current point, and jump to step S5
- S11 If the current random point is not on the surface of the suspended conductor containing a plurality of blocks, take the current random point as a center to construct the largest transition cube that does not intersect any conductor, and randomly take a point on the transition cube according to the probability distribution represented by the Green's function library so as to update the current point, and jump to step S5
- AA Yes
- BB No

(57) Abstract: Provided is an extraction method for random walk capacitance parameters for processing suspended conductor, wherein a closed integral surface having 26 faces is constructed for each suspended conductor block, and the corresponding random sampling is performed to obtain a jumping scheme when the random walk path encounters the suspended conductor. By combining with the rejection sampling technique, the method can process a complex shaped suspended conductor composed of multiple rectangular solids. When the method is used for the extraction method for suspended random walk capacitance, the capacitance parameter of the integrated

(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))。

circuit interconnect structure including the suspended conductor can be calculated relatively quickly and accurately, and the calculation robustness and calculation efficiency are improved.

(57) 摘要: 一种处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法, 为每个悬浮导体块构造一个含二十六个面的封闭积分面, 并进行相应的随机采样, 得到随机行走路径遇到悬浮导体情况时的跳转方案。该方法与拒绝采样技术结合后可以处理由多块长方体组成的复杂形状悬浮导体。将该方法用于悬浮随机行走电容提取方法中, 能够较快速、准确地计算包含悬浮导体的集成电路互连线结构的电容参数, 提高计算的鲁棒性和计算效率。

处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法

相关申请的交叉引用

本申请要求清华大学于 2017 年 12 月 18 日提交的、发明名称为“处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法”的、中国专利申请号“201711362811.6”的优先权。

技术领域

本发明涉及 VLSI (Very Large Scale Integrated circuits, 超大规模集成电路) 物理设计技术领域, 特别涉及一种处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法。

背景技术

集成电路的设计流程中首先要提出功能描述, 然后经过逻辑设计、版图设计得到描述半导体工艺尺寸、结构的版图, 最后进行版图验证, 即通过计算机软件模拟来验证上述设计是否满足要求, 若满足要求, 则进行下一步的生产制造; 否则, 则返回逻辑设计、版图设计进行必要的修正。在版图验证中, 互连寄生参数提取是一个重要的环节。

随着集成电路制造技术的发展, 电路规模不断增大、特征尺寸不断缩小, 当今很多芯片已含有一千万乃至多个器件。然而, 集成电路中互连线的寄生效应造成互连线对电路延时的影响已超过了器件对电路延时的影响。因此, 需要对互连线的电容、电阻等参数进行准确的计算, 以保证电路模拟与验证的正确有效性。为了提高计算精度, 互连线之间的电容参数提取需要使用三维提取方法, 即利用三维场求解器进行求解, 而利用场求解器的计算往往耗时较多。

发明内容

本发明旨在至少在一定程度上解决相关技术中的技术问题之一。

为此, 本发明的目的在于提出一种处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法, 该方法可以有效提高计算的准确度, 提高鲁棒性, 并且提高算法的计算效率。

为达到上述目的, 本发明实施例提出了一种处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法, 包括以下步骤: 步骤 S1: 载入随机行走所需的格林函数库和权值向量; 步骤 S2: 对每个悬浮导体块分别构造积分面, 并计算进行相应随机跳转所需量; 步骤 S3: 对主导体构造高斯面, 设置电容初值为 0 和随机行走次数初值为 0; 步骤 S4: 随机行走次数加 1, 并在所述高斯面上随机取点, 以它为中心生成转移立方体, 在所述转移立方体的表面按照所述格林函数库所表示的概率分布随机取点, 根据所述权值向量计算概率分布随机取点相应的

权值；步骤 S5：判断当前随机点是否在互连导体的表面；步骤 S6：如果所述当前随机点在所述互连导体的表面，通过所述权值和所述随机行走次数更新电容值，并判断是否满足终止条件，如果满足终止条件，则结束，如果不满足终止条件，转至步骤 S4；步骤 S7：如果所述当前随机点不在所述互连导体的表面，判断所述当前随机点是否在单块悬浮导体表面；
 5 步骤 S8：如果所述当前随机点在所述单块悬浮导体表面，基于所述悬浮导体的积分面和相应的跳转概率表进行随机采点，并更新当前点，并跳转至步骤 S5；步骤 S9：如果所述当前随机点不在所述单块悬浮导体表面，判断所述当前随机点是否在含多块的悬浮导体表面；步骤 S10：如果所述当前随机点在含多块的悬浮导体表面，基于所述悬浮导体各个长方体块的积分面和相应跳转概率表以及拒绝采样方式进行随机采点，更新当前点，并跳转至步
 10 骤 S5；步骤 S11：如果所述当前随机点不在含多块的悬浮导体表面，所述当前随机点为中心构造最大的、不与任何导体相交的转移立方体，并按照所述格林函数库所表示的概率分布在转移立方体上随机取一点，以更新当前点，并跳转至步骤 S5。

本发明实施例的处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法，可以通过基于中心差分近似求导方法推导，避免将每个悬浮导体看成互连导体逐一进行电容提取，能够较快速地
 15 准确计算包含悬浮导体的集成电路互连线结构的电容参数，有效提高计算的准确度，提高鲁棒性，并且提高算法的计算效率。

另外，根据本发明上述实施例的处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法还可以具有以下附加的技术特征：

进一步地，在本发明的一个实施例中，所述对每个悬浮导体块分别构造积分面，并计
 20 算进行相应随机跳转所需量，进一步包括：将所述导体的六个面分别向外平移预设距离得到六个第一类面，并连接相邻的两个所述第一类面得到十二个第二类面，且连接相邻的三个所述第二类面得到 8 个第三类面以得到封闭密二十六面体的表面。

进一步地，在本发明的一个实施例中，所述基于所述悬浮导体的积分面和相应的跳转概率表进行随机采点，进一步包括：按概率密度函数 $P_F(\mathbf{r})$ 在积分面 Γ 上随机采点，如得到
 25 的随机点为 $\mathbf{r}$ ，则下一步跳转的落点为 $\mathbf{r}_{\text{out}}$ ，其为从 $\mathbf{r}$ 点出发沿着垂直于 Γ 的直线向外走距离

$s(\mathbf{r})$ 得到的点，其中， $P_F(\mathbf{r}) = \frac{\epsilon(\mathbf{r})}{K \cdot s(\mathbf{r})}$ ， $s(\mathbf{r})$ 为从 $\mathbf{r}$ 点出发沿着垂直于 Γ 的直线到达悬浮
 导体 F 的距离， $\epsilon(\mathbf{r})$ 为 $\mathbf{r}$ 点处的介电常数， $K = \oint_{\Gamma} \frac{\epsilon(\mathbf{r})}{s(\mathbf{r})} d\mathbf{r}$ 。

进一步地，在本发明的一个实施例中，所述基于所述悬浮导体的各个长方体块的积分面和相应的跳转概率表以及拒绝采样的方式进行随机采点，进一步包括：步骤 a：根据各个

悬浮导体块的积分面的总面积大小随机选取一个悬浮导体块 i ；步骤 b ：在所述悬浮导体块 i 的积分面上均匀地随机选一个点 r ；步骤 c ：如果所述点 r 包含在其他悬浮导体块的积分面内部，则舍弃所述点 r ，返回所述步骤 a ；步骤 d ：生成一个 $(0, 1)$ 区间上均匀分布的随机数 x ；步骤 e ：如果 $x > P_f(r)/U$ ，其中， U 为函数 $P_f(r)$ 的一个上限值，则返回所述步骤 a ；

- 5 步骤 f ：获取所述点 r 为悬浮导体积分面上的有效采样点，下一步跳转的落点为 r_{out} ，其为从所述点 r 点出发沿着垂直于 Γ 的直线向外走距离 $s(r)$ 得到的点。

本发明附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出，部分将从下面的描述中变得明显，或通过本发明的实践了解到。

附图说明

本发明上述的和/或附加的方面和优点从下面结合附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解，其中：

图 1 为相关技术中的随机行走电容提取过程的二维示意图；

图 2 为相关技术中的悬浮导体的二维示意图；

15 图 3 为根据本发明实施例的处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法的流程图；

图 4 为根据本发明一个实施例的长方体悬浮导体与包围它的积分面的结构示意图；

图 5 为根据本发明一个实施例的多个长方体组成的悬浮导体的积分面，及其跳转方案示意图；

图 6 为根据本发明一个具体实施例的处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法的流程图。

具体实施方式

下面详细描述本发明的实施例，所述实施例的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，旨在用于解释本发明，而不能理解为对本发明的限制。

相关技术中，在集成电路电容参数提取的场求解器方法中，随机行走电容提取算法是一种比较流行的方法。该方法不同于常规的有限差分法、有限元法和边界元法，它无需求解线性方程组，计算中的主要步骤是在空间中随机取点（其得到一系列点的过程被形象地称为“随机行走”）。如图 1 所示，每次随机行走都从围绕主导体（即要算它与其他导体间耦合电容的那个导体，如图 1 中的导体 i ）的高斯面上开始，然后以当前点为中心构造一个最大、不与导体相交的立方体（称为转移立方体），下一次取点则随机地落在转移立方体的

表面。图 1 中, $S^{(1)}$ 和 $S^{(2)}$ 为两个转移立方体的表面 (虚线框)。这个过程重复进行, 直到随机取点的位置达到某个导体表面, 此时结束一次随机行走。要计算主导体 (如图 1 中的导体 i) 与其他所有导体之间的电容值, 需要进行至少上万次的随机行走, 根据每次行走对应计算出的权值求平均可以得到这些电容值。

5 考虑一般的数字集成电路, 所有导体块和整个三维仿真空间都是长方体, 并且它们的任何一条边都平行于 x, y, z 坐标轴中的某一个 (这样的几何结构被称为曼哈顿结构)。如图 1 所示, 随机行走算法中使用转移立方体, 正是考虑到转移立方体可以与曼哈顿结构导体有较大的接触面。

在集成电路制造过程中, 为了保证分层工艺的平整性、或者为了设计一些电容器结构
10 需要在原有的互连线之间加入一些悬浮导体, 即一些与电信号绝缘的导体块。它们的引入会影响互连线间的电容值, 在进行三维电容提取时必须准确考虑。如图 2 所示, 这些悬浮导体在几何上属于曼哈顿结构, 但可能是由多个长方体组成的复杂形状。每个悬浮导体由于与环境绝缘, 其电荷量总保持为零, 处理包含悬浮导体的结构的一种方法是将每个悬浮导体看成是与互连线导体一样, 算出所有导体间的耦合电容, 然后计算互连线导体间电容
15 值时需利用电容电路化简的方法消去悬浮导体对应的电路节点。

然而, 由于需要把悬浮导体设置为主导体, 计算它与其他所有导体间电容, 增加了很多额外的计算量 (尤其当悬浮导体数目很多时), 计算开销很大。

本发明正是基于上述问题, 而提出的一种处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法。

20 下面参照附图描述根据本发明实施例提出的处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法。

图 3 是本发明实施例的处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法的流程图。

如图 3 所示, 该处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法包括以下步骤:

在步骤 S1 中, 载入随机行走所需的格林函数库和权值向量。

25 在步骤 S2 中, 对每个悬浮导体块分别构造积分面, 并计算进行相应随机跳转所需量。

进一步地, 在本发明的一个实施例中, 对每个悬浮导体块分别构造积分面, 并计算进行相应随机跳转所需量, 进一步包括: 将导体的六个面分别向外平移预设距离得到六个第一类面, 并连接相邻的两个第一类面得到十二个第二类面, 且连接相邻的三个第二类面得到 8 个第三类面以得到封闭密二十六面体的表面。

30 进一步地, 在本发明的一个实施例中, 根据悬浮导体的积分面和相应的跳转概率表进行随机采点的依据为:

$$\phi(F) \approx \oint_{\Gamma} P_F(\mathbf{r}) \phi(\mathbf{r}_{out}) d\mathbf{r} = \oint_{\Gamma} \frac{\varepsilon(\mathbf{r})}{K \cdot s(\mathbf{r})} \phi(\mathbf{r}_{out}) d\mathbf{r},$$

其中, $\phi(F)$ 为悬浮导体块 F 的静电势, Γ 为积分面, $\mathbf{r}$ 为 Γ 上的积分点, $\varepsilon(\mathbf{r})$ 为 $\mathbf{r}$ 点处的介电常数, $s(\mathbf{r})$ 为从 $\mathbf{r}$ 点出发沿着垂直于 Γ 的直线到达悬浮导体 F 的距离, $\mathbf{r}_{out}$ 为从 $\mathbf{r}$ 点出发沿着垂直于 Γ 的直线向外走距离 $s(\mathbf{r})$ 得到的点, $\phi(\mathbf{r}_{out})$ 为 $\mathbf{r}_{out}$ 点处的静电势,

5 $K = \oint_{\Gamma} \frac{\varepsilon(\mathbf{r})}{s(\mathbf{r})} d\mathbf{r}$, $P_F(\mathbf{r}) = \frac{\varepsilon(\mathbf{r})}{K \cdot s(\mathbf{r})}$, $P_F(\mathbf{r})$ 为概率密度函数。因此, 上述公式表明, 按照概率密度函数 $P_F(\mathbf{r})$ 在 Γ 上随机采点 $\mathbf{r}$, 然后由 $\mathbf{r}$ 点出发沿着垂直于 Γ 的直线向外走距离 $s(\mathbf{r})$ 得到点 $\mathbf{r}_{out}$, 即为得到的采样点。

可以理解的是, 本发明实施例可以对长方体形状的悬浮导体构造一个包围它的 26 面体, 其表面称为积分面, 以及相应的随机跳转方案。如图 4 所示, (a) 为顶视图, (b) 为正视
10 图, (c) 为侧视图。其中, 在侧视图中标记了构成整个积分面的三种类型的面, 在正视图中, $\mathbf{r}_{in}$, $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{r}_{out}$ 三个点示意了跳转方案。 s_1 , s_2 , s_3 为第一类积分面到悬浮导体的距离。具体地, 它是将导体的 6 个面分别向外平移一定距离得到 6 个第一类面, 然后连接相邻的两个第一类面得到 12 个第二类面, 最后连接相邻的三个第二类面得到 8 个第三类面, 得到封闭密 26 面体的表面。在组成积分面的 26 个面中, 第一类、第二类面都是矩形, 第三类面
15 是三角形, 相应的随机跳转规则遵循如下公式:

$$\phi(F) \approx \oint_{\Gamma} P_F(\mathbf{r}) \phi(\mathbf{r}_{out}) d\mathbf{r} = \oint_{\Gamma} \frac{\varepsilon(\mathbf{r})}{K \cdot s(\mathbf{r})} \phi(\mathbf{r}_{out}) d\mathbf{r},$$

其中, $K = \oint_{\Gamma} \frac{\varepsilon(\mathbf{r})}{s(\mathbf{r})} d\mathbf{r}$, $\phi(F)$ 表示悬浮导体块 F 的静电势, Γ 为积分面, $\mathbf{r}$ 为 Γ 上的积分点, $\varepsilon(\mathbf{r})$

为 $\mathbf{r}$ 点处的介电常数, $s(\mathbf{r})$ 为从 $\mathbf{r}$ 点出发沿着垂直于 Γ 的直线到达悬浮导体 F 的距离。在计算出 K 的值和函数 $P_F(\mathbf{r})$ 之后, 上述公式表明可以按概率密度函数 $P_F(\mathbf{r})$ 在 Γ 上随机采点,

20 假设得到的随机点为 $\mathbf{r}$, 则下一步跳转的落点为 $\mathbf{r}_{out}$, 它为从 $\mathbf{r}$ 点出发沿着垂直于 Γ 的直线向外走距离 $s(\mathbf{r})$ 得到的点, 如图 4 (b) 所示。

另外, 在步骤 S2 中的“计算进行相应随机跳转所需的一些量”指的是计算 K 的值和函数 $P_F(\mathbf{r})$, 使得可以依照概率密度函数 $P_F(\mathbf{r})$ 在 Γ 上随机采点。

在步骤 S3 中, 对主导体构造高斯面, 设置电容初值为 0 和随机行走次数初值为 0。

在步骤 S4 中随机行走次数加 1, 设置电容初值和随机行走次数初值, 并在高斯面上随机取点, 以它为中心生成转移立方体, 在转移立方体的表面按照格林函数库所表示的概率分布随机取点, 根据权值向量计算概率分布随机取点相应的权值。

在步骤 S5 中, 判断当前随机点是否不在互连导体的表面。

- 5 在步骤 S6 中, 如果当前随机点在互连导体的表面, 通过权值和随机行走次数更新电容值, 并判断是否满足终止条件, 如果满足终止条件, 则结束, 如果不满足终止条件, 转至步骤 S4。

在步骤 S7 中, 如果当前随机点不在互连导体的表面, 判断当前随机点是否在单块悬浮导体表面。

- 10 在步骤 S8 中, 如果当前随机点在单块悬浮导体表面, 基于悬浮导体的积分面和相应的跳转概率表进行随机采点, 并更新当前点, 并跳转至步骤 S5;

在步骤 S9 中, 如果当前随机点不在单块悬浮导体表面, 判断当前随机点是否在含多块的悬浮导体表面;

- 15 在步骤 S10 中, 如果当前随机点在含多块的悬浮导体表面, 基于悬浮导体各个长方体块的积分面和相应跳转概率表以及拒绝采样方式进行随机采点, 更新当前点, 并跳转至步骤 S5; 以及

在步骤 S11 中, 如果当前随机点不在含多块的悬浮导体表面, 当前随机点为中心构造最大的、不与任何导体相交的转移立方体, 并按照格林函数库所表示的概率分布在转移立方体上随机取一点, 以更新当前点, 并跳转至步骤 S5。

- 20 进一步地, 在本发明的一个实施例中, 基于悬浮导体的各个长方体块的积分面和相应的跳转概率表以及拒绝采样的方式进行随机采点, 进一步包括: 步骤 a: 根据各个悬浮导体块的积分面的总面积大小随机选取一个悬浮导体块 i ; 步骤 b: 在悬浮导体块 i 的积分面上均匀地随机选一个点 r ; 步骤 c: 如果点 r 包含在其他悬浮导体块的积分面内部, 则舍弃点 r , 返回步骤 a; 步骤 d: 生成一个 $(0, 1)$ 区间上均匀分布的随机数 x ; 步骤 e: 如果 $x > P_F(r)$ / U , 其中, U 为函数 $P_F(r)$ 的一个上限值, 则返回步骤 a; 步骤 f: 获取点 r 为悬浮导体积分面上的有效采样点, 下一步跳转的落点为 r_{out} , 其为从点 r 点出发沿着垂直于 Γ 的直线向外走距离 $s(r)$ 得到的点。
- 25

可以理解的是, 本发明实施例需考虑由多个长方体块组成的较复杂的悬浮导体, 其中, 每个长方体悬浮导体块的跳转方案已经是可行的。具体地,

- 30 a) 首先根据各个悬浮导体块的积分面的总面积大小, 随机选取一个悬浮导体块 i ;
b) 在悬浮导体块 i 的积分面上均匀地随机选一个点 r ;

c)如果点 $\mathbf{r}$ 包含在其他悬浮导体块的积分面内部,如图 5 的点 $\mathbf{r}_2$,则舍弃该点,返回步骤 a);

d)生成一个(0, 1)区间上均匀分布的随机数 x ;

e)如果 $x > P_f(\mathbf{r})/U$, 其中, U 为函数 $P_f(\mathbf{r})$ 的一个上限值,则返回步骤 a);

5 f) 得到 $\mathbf{r}$ 为悬浮导体积分面上的有效采样点,下一步跳转的落点为 $\mathbf{r}_{\text{out}}$, 它为从 $\mathbf{r}$ 点出发沿着垂直于 Γ 的直线向外走距离 $s(\mathbf{r})$ 得到的点,如图 4 (b) 所示。

举例而言,如图 6 所示,本发明一个具体实施例的处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法的步骤如下:

(1) 载入随机行走所需的格林函数库和权值向量。

10 (2) 对每个悬浮导体块,构造它的积分面,并计算进行相应随机跳转所需的一些量。

(3) 对主导体 i 构造高斯面,并设置电容初值: $C_{ij} := 0, \forall j$; 设置随机行走次数初值 $npath := 0$;

(4) 随机行走次数加 1,在主导体 i 的高斯面上随机取点 $\mathbf{r}$,以为中心生成转移立方体,在该转移立方体表面按照格林函数库所表示的概率分布随机取点 $\mathbf{r}^{(1)}$,在载入的权值向量的帮助下计算 $\mathbf{r}^{(1)}$ 相应的权值 ω 。

(5) 判断当前随机点 $\mathbf{r}^{(x)}$ 是否在互连导体的表面

(6) 如果当前随机点 $\mathbf{r}^{(x)}$ 在互连导体的表面,通过权值和随机行走次数更新电容值,并判断是否满足终止条件,如果满足终止条件,即 $\mathbf{r}^{(x)} := \mathbf{r}^{(y)}$ 时,则结束,如果不满足终止条件,转至 (4);

(7) 如果当前随机点 $\mathbf{r}^{(x)}$ 不在互连导体的表面,判断当前随机点 $\mathbf{r}^{(x)}$ 是否在单块悬浮导体 k 表面;

(8) 如果当前随机点 $\mathbf{r}^{(x)}$ 在单块悬浮导体 k 表面,基于悬浮导体 k 的积分面和相应的跳转概率表进行随机采点,并更新当前点,将该点设为 $\mathbf{r}^{(y)}$,并跳转至 (5);

25 (9) 如果当前随机点 $\mathbf{r}^{(x)}$ 不在单块悬浮导体 k 表面,判断当前随机点 $\mathbf{r}^{(x)}$ 是否在含多块的悬浮导体 k 表面;

(10) 如果当前随机点 $\mathbf{r}^{(x)}$ 在含多块的悬浮导体 k 表面,基于悬浮导体 k 各个长方体块的积分面和相应跳转概率表以及拒绝采样方式进行随机采点,更新当前点,将得到的点设为 $\mathbf{r}^{(y)}$,并跳转至 (5); 以及

30 (11) 如果当前随机点 $\mathbf{r}^{(x)}$ 不在含多块的悬浮导体 k 表面,当前随机点 $\mathbf{r}^{(x)}$ 为中心构造最

大的、不与任何导体相交的转移立方体，并按照格林函数库所表示的概率分布在转移立方体上随机取一点，以更新当前点，将该点设为 $r^{(y)}$ ，并跳转至（5）。

可以理解的是，本发明实施例相对于一些包含复杂悬浮导体的高密度片上电容器结构进行电容提取计算实验，结果表明，处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法相比于相关技术提高了 5 倍的准确度，并且在相对的准确度要求的情况下最多比相关技术中快 3.7 倍。

根据本发明实施例提出的处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法，通过基于中心差分近似求导方法推导，避免将每个悬浮导体看成互连导体逐一进行电容提取，能够较快速地准确计算包含悬浮导体的集成电路互连线结构的电容参数，有效提高计算的准确度，提高鲁棒性，并且提高算法的计算效率。

在本发明的描述中，需要理解的是，术语“中心”、“纵向”、“横向”、“长度”、“宽度”、“厚度”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”、“内”、“外”、“顺时针”、“逆时针”、“轴向”、“径向”、“周向”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明的限制。

此外，术语“第一”、“第二”仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此，限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。在本发明的描述中，“多个”的含义是至少两个，例如两个，三个等，除非另有明确具体的限定。

在本发明中，除非另有明确的规定和限定，术语“安装”、“相连”、“连接”、“固定”等术语应做广义理解，例如，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或成一体；可以是机械连接，也可以是电连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部的连通或两个元件的相互作用关系，除非另有明确的限定。对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

在本发明中，除非另有明确的规定和限定，第一特征在第二特征“上”或“下”可以是第一和第二特征直接接触，或第一和第二特征通过中间媒介间接接触。而且，第一特征在第二特征“之上”、“上方”和“上面”可是第一特征在第二特征正上方或斜上方，或仅仅表示第一特征水平高度高于第二特征。第一特征在第二特征“之下”、“下方”和“下面”可以是第一特征在第二特征正下方或斜下方，或仅仅表示第一特征水平高度小于第二特征。

在本说明书的描述中，参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包

含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中，对上述术语的示意性表述不必须针对的是相同的实施例或示例。而且，描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外，在不相互矛盾的情况下，本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例，可以理解的是，上述实施例是示例性的，不能理解为对本发明的限制，本领域的普通技术人员在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

权利要求书

1、一种处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法，其特征在于，包括以下步骤：

步骤 S1：载入随机行走所需的格林函数库和权值向量；

5 步骤 S2：对每个悬浮导体块分别构造积分面，并计算进行相应随机跳转所需量；

步骤 S3：对主导体构造高斯面，设置电容初值为 0 和随机行走次数初值为 0；

步骤 S4：随机行走次数加 1，并在所述高斯面上随机取点，以它为中心生成转移立方体，在所述转移立方体的表面按照所述格林函数库所表示的概率分布随机取点，根据所述权值向量计算随机取点相应的权值；

10 步骤 S5：判断当前随机点是否在互连导体的表面；

步骤 S6：如果所述当前随机点在所述互连导体的表面，通过所述权值和所述随机行走次数更新电容值，并判断是否满足终止条件，如果满足终止条件，则结束，如果不满足终止条件，转至步骤 S4；

15 步骤 S7：如果所述当前随机点不在所述互连导体的表面，判断所述当前随机点是否在单块悬浮导体表面；

步骤 S8：如果所述当前随机点在所述单块悬浮导体表面，基于所述悬浮导体的积分面和相应的跳转概率表进行随机采点，并更新当前点，并跳转至步骤 S5；

步骤 S9：如果所述当前随机点不在所述单块悬浮导体表面，判断所述当前随机点是否在含多块的悬浮导体表面；

20 步骤 S10：如果所述当前随机点在含多块的悬浮导体表面，基于所述悬浮导体各个长方体块的积分面和相应跳转概率表以及拒绝采样方式进行随机采点，更新当前点，并跳转至步骤 S5；以及

25 步骤 S11：如果所述当前随机点不在含多块的悬浮导体表面，所述当前随机点为中心构造最大的、不与任何导体相交的转移立方体，并按照所述格林函数库所表示的概率分布在转移立方体上随机取一点，以更新当前点，并跳转至步骤 S5。

2、根据权利要求 1 所述的处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法，其特征在于，所述对每个悬浮导体块分别构造积分面，并计算进行相应随机跳转所需量，进一步包括：

30 将所述导体的六个面分别向外平移预设距离得到六个第一类面，并连接相邻的两个所述第一类面得到十二个第二类面，且连接相邻的三个所述第二类面得到 8 个第三类面以得到封闭二十六面体的表面。

3、根据权利要求 1 或 2 所述的处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法，其特征在于，所述基于所述悬浮导体的积分面和相应的跳转概率表进行随机采点，进一步包括：

按概率密度函数 $P_F(\mathbf{r})$ 在积分面 Γ 上随机采点，如得到的随机点为 $\mathbf{r}$ ，则下一步跳转的落点为 $\mathbf{r}_{\text{out}}$ ，其为从 $\mathbf{r}$ 点出发沿着垂直于 Γ 的直线向外走距离 $s(\mathbf{r})$ 得到的点；

其中， $P_F(\mathbf{r}) = \frac{\varepsilon(\mathbf{r})}{K \cdot s(\mathbf{r})}$ ， $s(\mathbf{r})$ 为从 $\mathbf{r}$ 点出发沿着垂直于 Γ 的直线到达悬浮导体 F 的距离， $\varepsilon(\mathbf{r})$ 为 $\mathbf{r}$ 点处的介电常数， $K = \oint_{\Gamma} \frac{\varepsilon(\mathbf{r})}{s(\mathbf{r})} d\mathbf{r}$ 。

5 4、根据权利要求 3 所述的处理悬浮导体的随机行走电容参数提取方法，其特征在于，所述基于所述悬浮导体的各个长方体块的积分面和相应的跳转概率表以及拒绝采样的方式进行随机采点，进一步包括：

步骤 a：根据各个悬浮导体块的积分面的总面积大小随机选取一个悬浮导体块 i；

步骤 b：在所述悬浮导体块 i 的积分面上均匀地随机选一个点 $\mathbf{r}$ ；

10 步骤 c：如果所述点 $\mathbf{r}$ 包含在其他悬浮导体块的积分面内部，则舍弃所述点 $\mathbf{r}$ ，返回所述步骤 a；

步骤 d：生成一个(0, 1)区间上均匀分布的随机数 x；

步骤 e：如果 $x > P_F(\mathbf{r})/U$ ，其中，U 为函数 $P_F(\mathbf{r})$ 的一个上限值，则返回所述步骤 a；

步骤 f：获取所述点 $\mathbf{r}$ 为悬浮导体积分面上的有效采样点，下一步跳转的落点为 $\mathbf{r}_{\text{out}}$ ，

15 其为从所述点 $\mathbf{r}$ 点出发沿着垂直于 Γ 的直线向外走距离 $s(\mathbf{r})$ 得到的点。

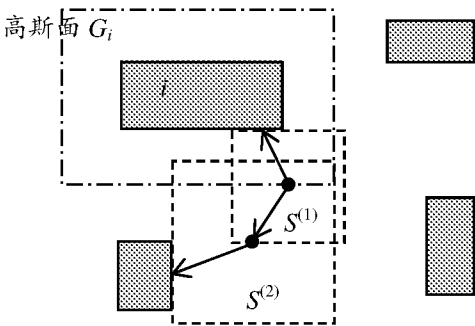


图 1

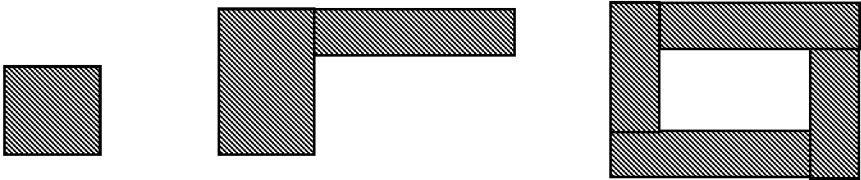


图 2

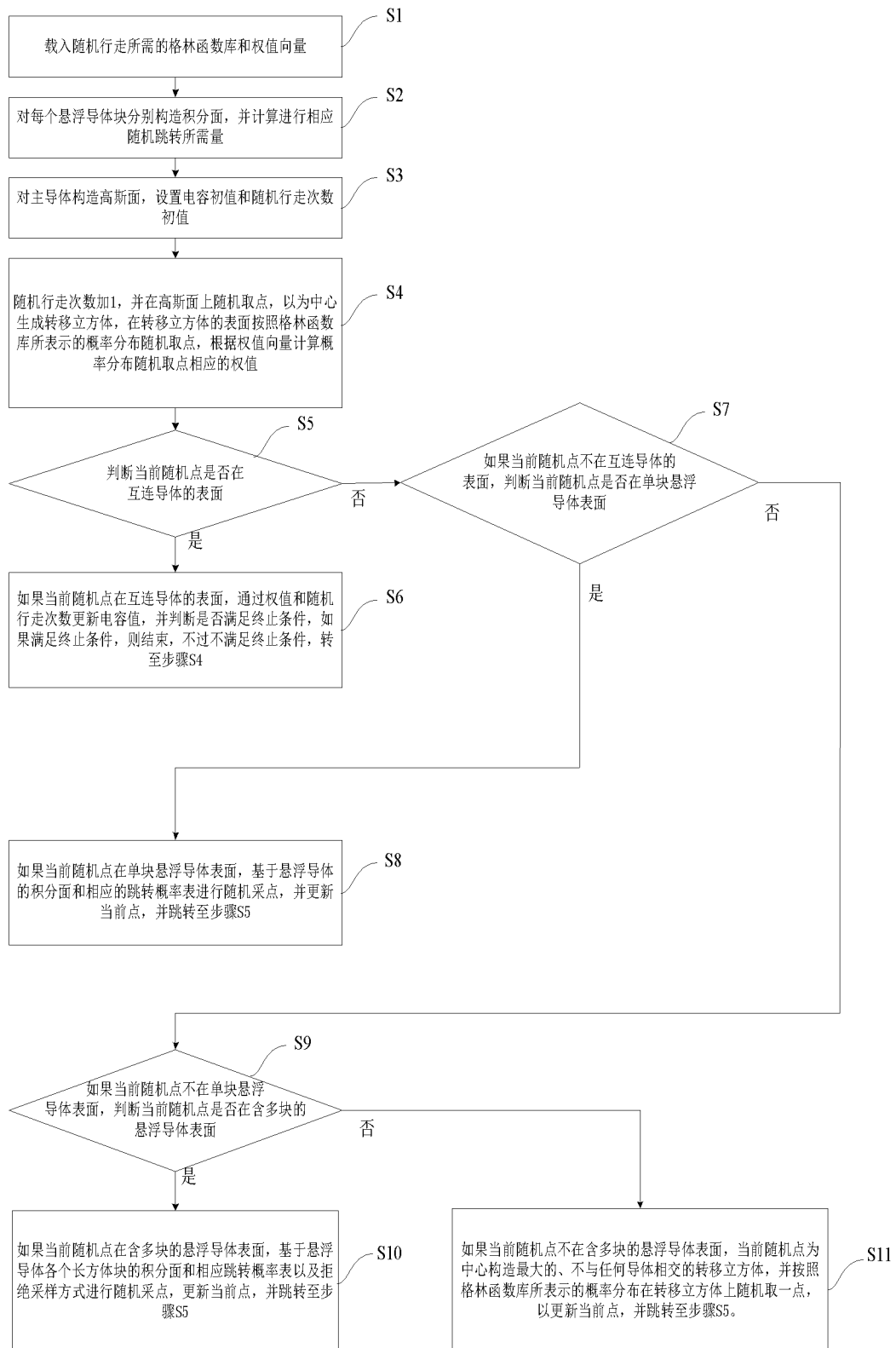


图 3

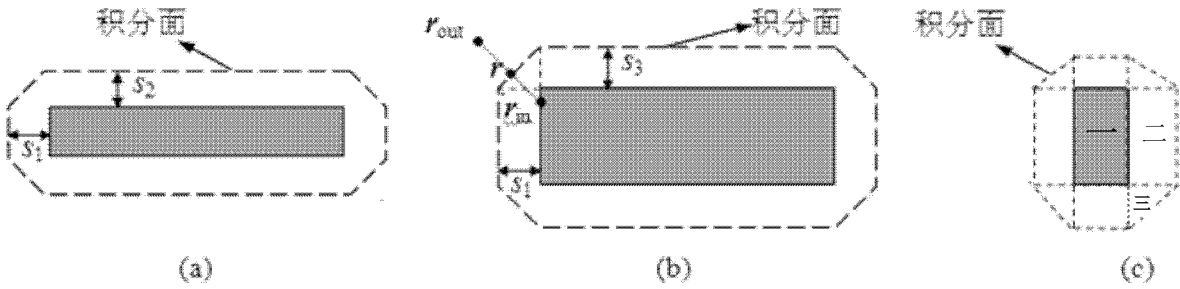


图 4

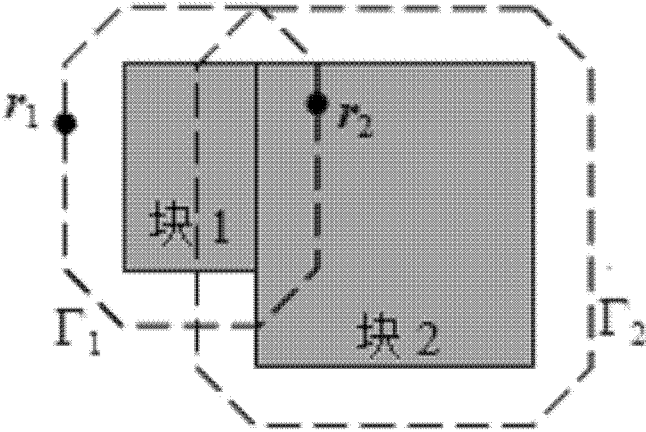


图 5

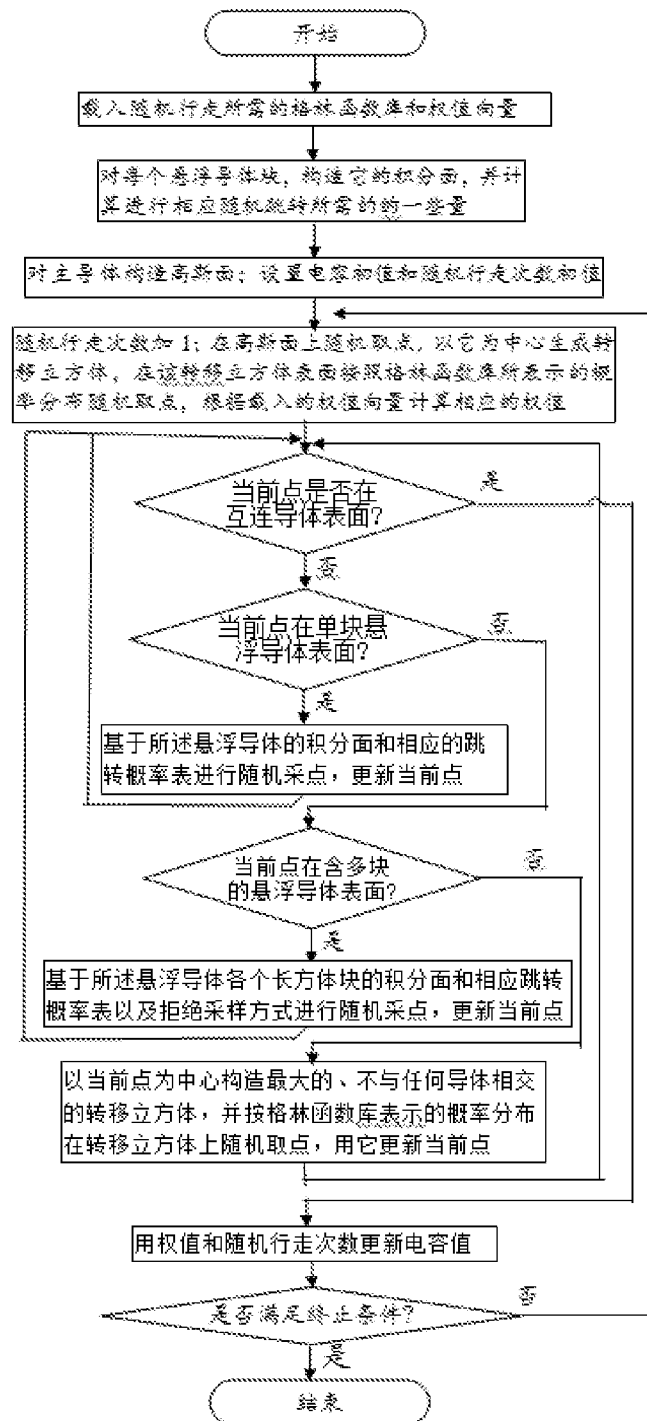


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/092482

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/50(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)

G06F

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)

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 悬浮, 导体, 互连, 连接, 随机行走, 电容, 参数, 高斯, 面, 立方体, 跳转, 转移, 概率, suspend, conductor, connect, random, walk, capacity, parameter, gauss, Gaussian, surface, face, cube, transition, probability

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 107844674 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 27 March 2018 (2018-03-27) claims 1-4	1-4
A	CN 105930572 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 07 September 2016 (2016-09-07) description, paragraphs [0003] and [0032]-[0046], and figure 1	1-4
A	CN 102651047 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 29 August 2012 (2012-08-29) entire document	1-4
A	CN 105335567 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 17 February 2016 (2016-02-17) entire document	1-4
A	US 2016180007 A1 (SYNOPSYS, INC.) 23 June 2016 (2016-06-23) entire document	1-4
A	US 2016342729 A1 (HELIC, INC.) 24 November 2016 (2016-11-24) entire document	1-4



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“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)

“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

“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

“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

“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

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

10 September 2018

Date of mailing of the international search report

25 September 2018

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

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/092482

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	107844674	A	27 March 2018	None	
CN	105930572	A	07 September 2016	None	
CN	102651047	A	29 August 2012	None	
CN	105335567	A	17 February 2016	None	
US	2016180007	A1	23 June 2016	None	
US	2016342729	A1	24 November 2016	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/092482

A. 主题的分类

G06F 17/50(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)

G06F

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))

WPI, EPODOC, CNPAT, CNKI, IEEE: 悬浮, 导体, 互连, 连接, 随机行走, 电容, 参数, 高斯, 面, 立方体, 跳转, 转移, 概率, suspend, conductor, connect, random, walk, capacity, parameter, gauss, Gaussian, surface, face, cube, transition, probability

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 107844674 A (清华大学) 2018年 3月 27日 (2018 - 03 - 27) 权利要求1-4	1-4
A	CN 105930572 A (清华大学) 2016年 9月 7日 (2016 - 09 - 07) 说明书第[0003], [0032]-[0046]段, 附图1	1-4
A	CN 102651047 A (清华大学) 2012年 8月 29日 (2012 - 08 - 29) 全文	1-4
A	CN 105335567 A (清华大学) 2016年 2月 17日 (2016 - 02 - 17) 全文	1-4
A	US 2016180007 A1 (SYNOPSYS, INC.) 2016年 6月 23日 (2016 - 06 - 23) 全文	1-4
A	US 2016342729 A1 (HELIC, INC.) 2016年 11月 24日 (2016 - 11 - 24) 全文	1-4

☐ 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

2018年 9月 10日

国际检索报告邮寄日期

2018年 9月 25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

戴雷

电话号码 86-(10)-53961402

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2018/092482

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	107844674	A	2018年 3月 27日	无	
CN	105930572	A	2016年 9月 7日	无	
CN	102651047	A	2012年 8月 29日	无	
CN	105335567	A	2016年 2月 17日	无	
US	2016180007	A1	2016年 6月 23日	无	
US	2016342729	A1	2016年 11月 24日	无	

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2015年1月)