

# 三维互连电容提取中复杂形体的通用处理方法

王玉刚<sup>1)</sup> 喻文健<sup>1)</sup> 陆涛涛<sup>2)</sup> 王泽毅<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

<sup>2)</sup>(北京华天中汇科技有限公司 北京 100084)

**摘要** 介绍一种在三维互连电容提取中处理复杂形体结构的通用方法. 该方法将复杂形体结构用多个简单形体结构描述, 简单形体结构之间允许包含或重叠; 通过形体运算构造出原复杂形体结构. 该方法和相应的算法已在基于边界元素法的三维互连寄生电容提取软件 QBEM 中实现. 数值计算结果表明, 文中方法可靠, 适用于各种复杂形体结构并有很高的效率.

**关键词** VLSI; 寄生电容; 边界元素法; 扫描线算法; 图遍历算法; 高度平衡树  
**中图分类号** TN47

## Generalized Geometric Processing to Handle Complex Structures in 3D Interconnect Capacitance Extraction

Wang Yugang<sup>1)</sup> Yu Wenjian<sup>1)</sup> Lu Taotao<sup>2)</sup> Wang Zeyi<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Department of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

<sup>2)</sup>(Beijing Hua Tian EDA Technology Company, Beijing 100084)

**Abstract** The basic principle is using multiple simple prisms (maybe overlapped with each other) to describe a complex structure and using efficient geometric computation algorithms to construct its surfaces. This method has been integrated into QBEM, a quasi-multiple medium accelerated BEM software for fast 3D parasitic capacitance extraction. Numerical results show the method is reliable and efficient.

**Key words** VLSI; parasitic capacitance; boundary element method; plan sweep algorithm; graph traversal algorithm; balanced binary tree

## 1 引言

随着深亚微米工艺及多层布线技术的广泛应用, VLSI 电路集成密度急剧增长, 互连寄生效应已成为制约电路性能的主要因素. 因此, 快速而精确的寄生参数提取(尤其是电容提取)对高性能集成电路设计极为重要.

在高精度的三维寄生电容计算中, 除有限差分

及有限元法外, 边界元素法(Boundary Element Method, BEM)<sup>[1]</sup>因其精度高、变量少及处理复杂形体能力强等优点得到了更多的重视和应用<sup>[2]</sup>. 此外, 开发新工艺以提高互连质量在近几年也取得了较大进展, 出现了如填充气隙及保形硅氧化膜等新介质结构<sup>[3-4]</sup>. 但是, 这些新的复杂结构给三维互连寄生电容提取带来了一定的困难, 具体表现为在输入文本中较难描述如此复杂形体结构的表面信息. 本课题组与美国 Anchor-Semi 公司正合作开发一个

原稿收到日期: 2004-04-22; 修改稿收到日期: 2004-06-09. 本课题得到国家“八六三”高技术研究发展计划(2004AA1Z1050)资助. 王玉刚, 男, 1978 年生, 硕士, 主要研究方向为 VLSI 互连寄生电容提取. 喻文健, 男, 1977 年生, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为 VLSI 互连寄生参数提取、三维边界元快速算法与应用、互连线建模与分析等. 陆涛涛, 男, 1977 年生, 博士, 主要研究方向为 VLSI 互连寄生参数提取算法研究与开发. 王泽毅, 男, 1940 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 VLSI CAD 中的器件模拟、互连寄生参数提取与分析及其中的串并行数值方法.

基于直接边界元法<sup>[2]</sup>和虚拟多介质(Quasi-Multiple Medium, QMM)方法<sup>[5]</sup>的三维互连电容提取软件 QBEM, 为便于客户使用, 需在输入文本中将复杂形体结构描述为多个简单形体结构的组合<sup>[6]</sup>(这些简单结构之间允许重叠), 再通过有效的形体运算构造出原复杂形体的表面信息. 本文介绍应用于 QBEM 中的形体处理方法, 它使 QBEM 能有效地处理各种复杂互连形体结构.

为适应任意复杂的互连电容结构, 文献[6]提出了一种采用树状结构组织三维空间形体的方法, 作为该方法的补充, 本文详细讨论了在树的节点中如何构造复杂的几何形体. 通过抓住当前复杂结构的特征, 并结合互连电容提取软件的输入描述方式, 本文提出一种简单、快速的三维空间多个凸柱体求并算法, 解决了包括保形结构等复杂形体的边界信息生成问题. 不同于已有的保形介质结构处理方法<sup>[7]</sup>, 本文方法不要求同一保形介质中各金属导体底面和顶面的高度相同, 具有更广泛的通用性. 此外, 本文方法也解决了 QMM 方法中切割复杂形体结构的问题<sup>[8]</sup>, 因为不需要直接对复杂结构进行 QMM 切割, 取而代之的是对简单柱体切割后再求并. 数值实验表明, 本文方法简单、方便, 且效率高.

## 2 复杂形体结构的表面构造

复杂形体结构的构造过程本质上就是空间多个同方向凸柱体求并的过程. 假设空间有  $n$  个柱体,

Step1. 将这些柱体投影到垂直于柱体轴向的某一平面, 得到  $n$  个凸多边形;

Step2. 利用特定的几何算法求这  $n$  个凸多边形的详细几何关系, 这些关系包括任意两个多边形的边界相交、包含、重叠关系;

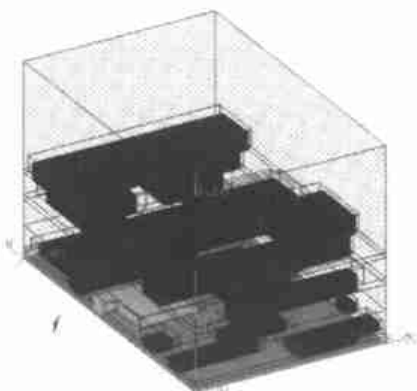
Step3. 根据这些几何关系将这些多边形的部分边界映射到三维空间, 构造出此复杂形体结构所有平行于柱体轴向的表面;

Step4. 根据所有平行于柱体轴向的表面生成所有垂直于轴向的表面.

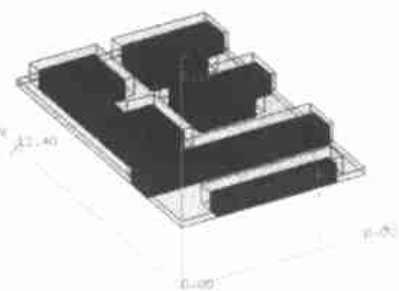
下面先分析一种典型的复杂互连结构: 保形介质结构, 再着重介绍 Step2 和 Step3 的算法, 最后补充说明用到的两个几何算法: (1) 扫描线算法. 求出所有边与边的交点; (2) 图遍历算法. 求出所有弧与多边形的包含、重叠关系.

### 2.1 典型的保形结构

利用高密度等离子化学气相淀积技术<sup>[4]</sup>, 在金属连线表面均匀地铺上一层电学性质优良的介质, 从而形成一层与金属形状相似的介质层, 称为保形结构的介质. 由于金属连线的高度并非总是一样, 因此更一般地说, 保形介质结构实际上可看成空间任意多个同方向柱体合并的结果, 其中每个柱体由对应的金属导体向周围等距离扩大而成. 图 1 所示为一个含保形介质工艺的三维互连寄生电容器以及其中一保形介质层的结构. 可见, 保形结构是一种比较复杂的形体结构, 具有不规则三维形状.



a 带保形介质的寄生电容器



b 某个含保形介质的互连层

图 1 一个含保形介质互连结构的三维视图

### 2.2 多个凸多边形的详细几何关系

本文所介绍的详细几何关系被称为 STRUCT A. 它描述平面上  $n$  个凸多边形各种元素及元素之间的直接位置关系. STRUCT A 最大的特点是: 任一元素均记录了与之有直接位置关系的其他元素.

STRUCT A 定义 5 种元素: 多边形 *polygon*, 多边形的顶点 *vertex* (简称顶点), 多边形的边 *edge* (简称边), 多边形的弧 *arc* (简称弧), 不同多边形之间边的交点 *inter point* (简称交点); STRUCT A 还定义了各种元素之间的直接位置关系. 下面首先介绍各种元素, 然后介绍元素之间存在的直接位置关系.

5 种元素中, *polygon*, *vertex*, *edge* 的意义比较直观, 如图 2 中的  $v_1, v_2, \dots, v_n, w_1, w_2, \dots, w_m$  都是 *vertex*, 而  $e_1, e_2, \dots, e_n, f_1, f_2, \dots, f_m$  都是 *edge*,

$P_1, P_2$  为 *polygon*. *inter-point* 是指两个不同多边形之间边与边的几何交点,如图 2 中的  $i_1, i_2$ ; *arc* 是指在一个多边形中,以 *inter-point* 为边界端点,从多边形边界中截出的一段. 所以, *arc* 是以 *inter-point* 为端点,中间不包含任何 *inter-point* 的一段多边形边界,如图 2 中的  $a_1, a_2, a_3, a_4$ . 如果某多边形不与其他任何多边形相交,其本身可视为一段弧,且弧的两个重叠端点可取为多边形任意一个顶点. 同时约定,多边形顶点的顺序取顺时针方向,则边和弧都是有向的,即与所在多边形有相同的顺时针方向. 如图 2 中  $e_3$  的方向是  $v_3 \rightarrow v_4$ ,  $a_2$  的方向是  $i_2 \rightarrow w_3 \rightarrow w_4 \rightarrow i_1$ .

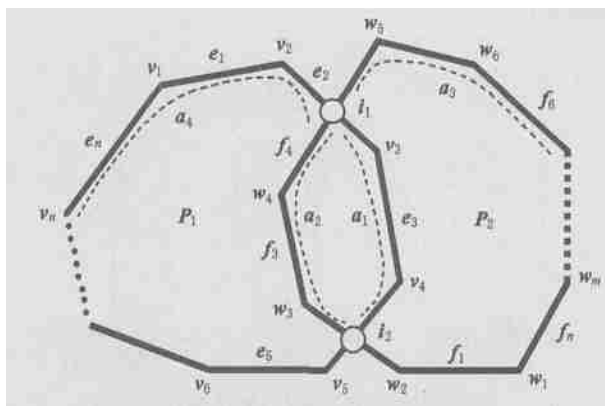


图 2 STRUCT A 的各种元素和直接位置关系

在 STRUCT A 中,每一个元素都记录与其有直接位置关系的其他元素,以方便快速查询. 下面介绍各种元素直接位置关系的含义. 对于顶点  $v_i$ , 与之有直接位置关系的元素指  $v_{i+1}, v_{i-1}, e_i, e_{i-1}, P_1$  以及它所在的弧;对于边  $e_i$ , 与之有直接位置关系的元素指  $P_1, e_{i-1}, e_{i+1}, v_i, v_{i+1}$  以及位于其上所有交点的集合  $\{i_l, i_k, \dots\}$ , 且这些交点已按边的方向排好序;对于多边形  $P_1$ , 与之有直接位置关系的元素指顶点集合  $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 边的集合  $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ , 弧的集合  $\{a_1, a_4, \dots\}$ ;对于交点  $i_1$ , 与之有直接位置关系的元素指以其为端点弧的集合  $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$  以及经过此交点所有边的集合  $\{e_2, f_4\}$ ;对于弧  $a_1$ , 与之有直接位置关系的元素指所在多边形  $P_1$ , 起点  $i_1$ , 终点  $i_2$ , 其上包含的顶点集合  $\{v_3, v_4\}$ , 而且更重要的是,它记录了完全包含它的多边形集合  $\{P_2\}$  和完全与之重叠的弧的集合. 应当强调,弧以及弧记录的直接位置关系是 STRUCT A 的核心所在.

### 2.3 构造复杂形体表面

在将多边形的部分边界映射到三维空间,构造复杂形体结构中所有平行于柱体轴向的表面时,这

些部分边界就是第 2.2 节中提到的弧,哪些弧需要映射,哪些弧不需要映射,取决于这段弧被什么样的多边形包含和被什么样的弧重叠. 下面以简单的例子来说明映射的过程.

如图 3a 所示,有两段弧  $a_1$  和  $a_2$ , 所在的多边形分别是  $P_3$  和  $P_2$ . 为简单起见,假设这两段弧仅被多边形  $P_1$  包含. 三个多边形对应的柱体在空间的位置关系如图 3b 所示. 弧  $a_1$  映射到空间的位置需要根据  $P_1$  和  $P_3$  的空间位置决定. 在图 3a 中,弧  $a_1$  在空间 C 位置到 E 位置被柱体  $P_1$  包含,在最终复杂形体中不应该存在;在空间 E 位置到 F 位置,没有被其他柱体包含,在最终复杂形体中应该作为表面存在. 所以,弧  $a_1$  映射到空间的位置是从 E 到 F. 同理,弧  $a_2$  映射到空间的位置是从 A 到 B.

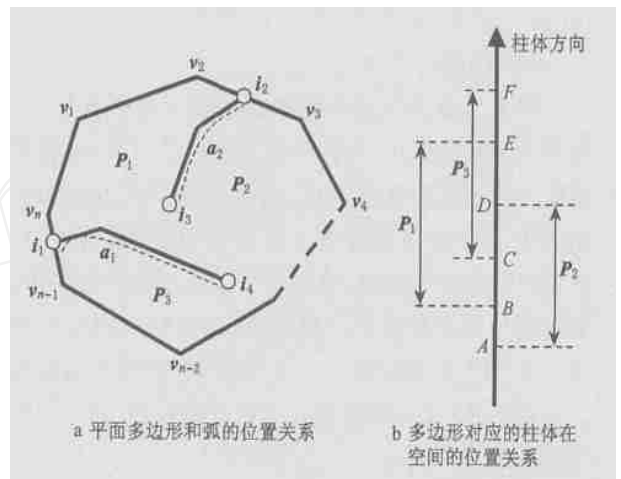


图 3 由弧映射形成复杂形体表面的过程

一般情况下,如果某一段弧被多个多边形包含或者与多个弧重叠,就需要作一次区间运算,运算的结果就是这段弧映射到空间的位置(运算的结果可能是空或者多段小的区间).

### 2.4 求元素间的直接位置关系

下面介绍扫描线算法和图遍历算法. 扫描线算法用于求所有多边形边与边的交点,根据交点的信息构造出所有的弧;然后利用图遍历算法求出所有弧与弧、弧与多边形的关系.

#### (1) 扫描线算法

扫描线算法基于 Bentley 和 Ottmann 提出的求平面上所有线段交点的算法<sup>[9]</sup>,将所有多边形的顶点排好序作为事件点,用一条虚拟的扫描线从左向右扫描,扫描线经过某一事件点时,其穿过的多边形边存放于高度平衡树中. 扫描线上两个相邻的边之间要进行求交点运算,如果交点存在,将其插入到事件点有序集合中. 扫描线到达下一个事件点时,要

从平衡树中删除扫描过的边和加入新扫描到的边;如果此事件点为边的交点,要交换相应边在平衡树中的顺序.

扫描线算法的核心是只需要对扫描线上相邻的边作求交运算,对不曾在扫描线上相邻过的边不作求交运算,大大减少了求交运算的次数,提高了效率;另一个关键是采用高度平衡树,使得边的插入操作和删除操作都在对数(log)复杂度内完成,边的交换操作一步完成.假设多边形平均边数为  $k$ ,不同多边形之间交点为  $l$ ,那么扫描线算法的时间复杂度为  $O(k \times n \times \log(k \times n) + l)$ .在互连电容提取中,由于多边形位置关系都是由工艺产生的,不会杂乱无章,一般情况下交点个数  $l$  是小于边的数目  $k \times n$  的.所以,扫描线算法的平均时间复杂度可认为是  $O(k \times n \times \log(k \times n) + l)$ .

(2) 图遍历算法

图遍历算法的基本思想是从某一段弧开始,沿弧的方向向前遍历,当到达这段弧的终点时,可得到以此点为端点的其他的弧,通过这些弧的方向和张角的大小可以获得这些弧之间的包含、重叠关系.然后以这个点为端点,选择下一条弧继续向前遍历,直到遍历完所有能遍历到的弧(连通区域内所有的弧).平面上可能存在多个连通区域,不同连通区域之间的关系(只可能是包含或者分离)可以通过扫描线的方法来判断.

下面以图示的方式说明这两个过程

沿弧向前遍历过程.如图 4 所示,当前遍历到的弧是 arc,它所在的多边形对应的下一条弧为  $a_4$ ,与弧 arc 同端点、同时不被其所在多边形包含的弧为  $\{a_7, a_5, a_8, a_3\}$ ,这些弧按对弧 arc 张角的大小排列.那么根据弧的方向可以知道,所有包含弧 arc 的多边形(除  $a_7$  所在的多边形)都包含弧  $a_7$ ;所有

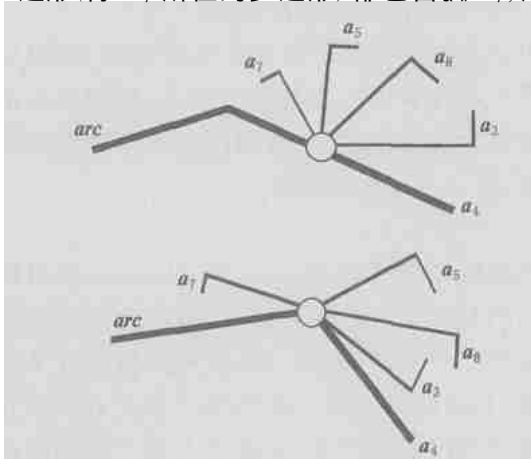


图 4 遍历图过程中的两种弧端点

包含  $a_7$  的多边形都包含  $a_5$ ,所有包含  $a_5$  的多边形都包含  $a_8$ ,  $a_5$  所在的多边形也包含  $a_8$ ;所有包含  $a_8$  的多边形都包含  $a_3$ ,  $a_8$  所在的多边形也包含  $a_3$ ;所有包含  $a_3$  的多边形都包含  $a_4$ .然后将  $\{a_7, a_5, a_8, a_3, a_4\}$  按顺序压入堆栈,从栈头向下开始选择第一个没有遍历过的弧进行遍历.

扫描线判断不同连通区域之间的关系.如图 5 所示,图 5a 中的弧 a 不被任何其他多边形包含;图 5b 中的弧 a 被弧 b 所在多边形包含,而且,包含弧 b 的所有多边形都包含弧 a,并且和弧 b 重叠的弧所在的多边形也包含弧 a;图 5c 中包含弧 b 的所有多边形都包含弧 a(因为弧 a 和弧 b 之间不存在其他的弧).

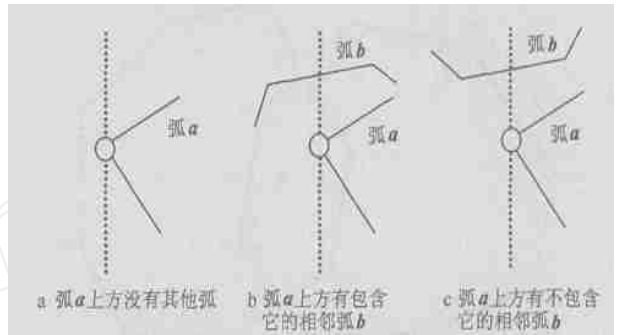


图 5 扫描线上当前弧与相邻弧的各种位置关系

当通过扫描线得到弧 a 与所有多边形的位置关系后,遍历与弧 a 连通的整个连通区域.遍历完毕后,扫描线继续向前扫描直到没有遍历过的弧.根据图 5 所示的 3 个规则获得此弧与其他多边形的位置关系,然后再进行遍历的过程.依此类推,直到扫描过程结束.

在图遍历算法中,任何一段弧被且仅被处理一次.在处理某一段弧时需要对同端点的弧进行排序,而一般情况下,同端点弧的平均个数为一个常数.故可认为,图的遍历算法的时间复杂度为  $O(\text{弧的数目} + \text{扫描线的时间复杂度})$ .

所以,扫描线算法和图遍历算法的总的平均时间复杂度可以认为是  $O(k \times n \times \log(k \times n))$ ,其中  $n$  为多边形的数目,  $k$  为多边形平均边的条数.

### 3 数值计算结果

本文算法已经在三维边界元电容提取软件 QBEM 中实现,为反映其实际应用的效果,下面对若干来自实际版图的结构进行计算,并以工业界著名的电容提取软件 Raphael 的结果为标准.时间单位为 s,电容单位为  $10^{-18}$  F,所有计算均在 SUN UI-

tra V880 服务器(主频750 MHz)上进行。

图6所示为一个实际版图算例(10.qbem)经过本文算法处理后图形输出的结果(其中深色的为导体),从中可以看出,本文算法对保形介质的处理是

正确无误的。该算例和另两个实际版图算例的结构信息以及保形介质生成时间、形体处理时间和总时间如表1所示。

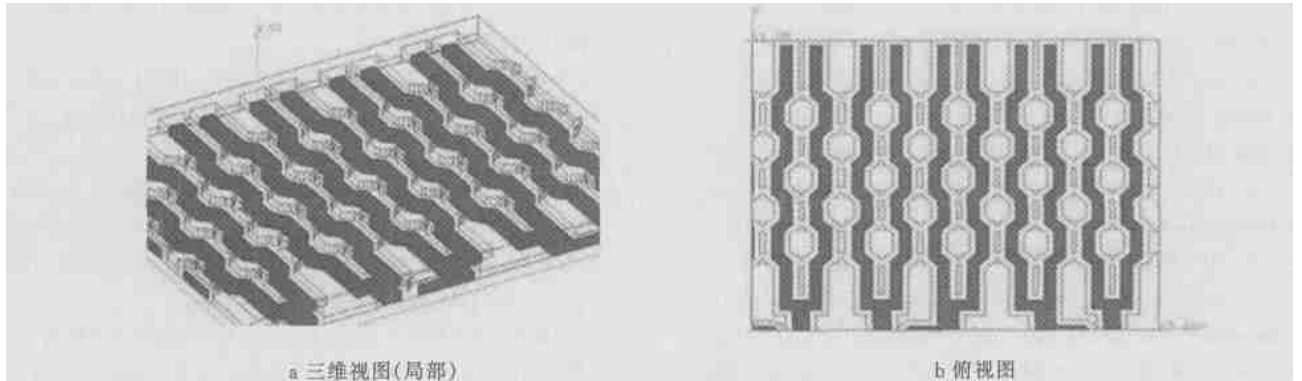


图6 实际版图的、含保形介质互连结构的图形显示

表1 保形介质的形成时间

| 算例      | 导体数目  | 介质数目 | 保形介质数目 | 保形介质生成时间(s) | 形体处理总时间(s) | 总计算时间(s) |
|---------|-------|------|--------|-------------|------------|----------|
| 10.qbem | 435   | 6    | 2      | 0.65        | 2.8        | 62.3     |
| 25.qbem | 753   | 8    | 2      | 0.93        | 7.6        | 357.3    |
| 83.qbem | 1 006 | 8    | 2      | 1.34        | 11.1       | 567.9    |

从表1中的数据看出,保形介质结构的形成时间与边界元形体处理和总的电容提取时间相比,完全可以忽略。

Raphael 是采用有限差分法的著名商用软件,具有很高的计算精度和稳定性,其稠密网格下的结果常被作为标准值,但其缺点是速度较慢。上述3个算例规模太大,Raphael 无法在有限的时间和空间内

完成计算。因此,我们又选择了较小的三个含保形介质的实际算例,来显示使用本文算法的QBEM的计算精度和速度。以Raphael在十分稠密网格下的结果作为标准值,详细比较数据如表2所示。

从表2可以看出,由于采用了本文提出的有效的形体处理方法,QBEM计算复杂结构时显示了很高的精度,而其计算速度比Raphael快两个数量级以上。

表2 QBEM计算保形结构的精度

| 算例      | 导体数目 | Raphael 计算结果 |                    |          | QBEM 计算结果          |       |         |
|---------|------|--------------|--------------------|----------|--------------------|-------|---------|
|         |      | 网格数          | 电容值( $10^{-18}$ F) | 计算时间(s)  | 电容值( $10^{-18}$ F) | 误差(%) | 计算时间(s) |
| 12.qbem | 90   | 8M           | 986.1              | 19 834.2 | 968.3              | - 1.8 | 112.4   |
| 81.qbem | 60   | 2.4M         | 359.8              | 10 525.1 | 354.2              | - 1.6 | 28.5    |
| b3d-254 | 65   | 8M           | 13 344.3           | 20 516.2 | 13 241.1           | - 0.7 | 184.5   |

## 4 结 论

边界元法三维寄生电容提取中,一般分为4个步骤:形体运算,边界元划分,列方程和解方程。本文方法解决了形体运算步骤中所遇到的复杂形体难以构造的问题,提出将复杂形体分解为多个简单柱体加以描述,设计描述凸多边形位置关系的数据结构用以快速完成多边形各种运算,从而形成复杂形

体结构的全部有效表面。针对实际工艺中的保形介质等结构,计算结果表明本文方法是有效的,同时具有非常高的效率。

## 参 考 文 献

- [1] Brebbia C A. The Boundary Element Method for Engineers [M]. London: Pentech Press, 1978

- [2] Yu Wenjian, Wang Zeyi. Research progress on 3D VLSI parasitic capacitance extraction [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2003, 15(1): 21 ~ 28 (in Chinese)  
(喻文健, 王泽毅. 三维 VLSI 互连寄生电容提取的研究进展 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(1): 21 ~ 28)
- [3] Shieh B, Saraswat K C, *et al.* Air-gap formation during IMD deposition to lower interconnect capacitance [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1998, 19(1): 16 ~ 18
- [4] Park M, Yu H K, *et al.* High-quality conformal silicon oxide films prepared by multi-step sputtering PECVD and chemical mechanical polishing [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1998, 27(11): 1262 ~ 1267
- [5] Yu Wenjian, Wang Zeyi, Gu Jiangchun. Fast capacitance extraction of actual 3-D VLSI interconnects using quasi-multiple medium accelerated BEM [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, 51(1): 109 ~ 120
- [6] Yu Wenjian, Wang Zeyi, Wang Yugang, *et al.* An efficient boundary generation method for arbitrary complex structures in parasitic capacitance extraction [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(2): 214 ~ 220 (in Chinese)  
(喻文健, 王泽毅, 王玉刚, 等. 一种可适应复杂互连电容结构的边界元形体处理方法 [J]. *半导体学报*, 2004, 25(2): 214 ~ 220)
- [7] Lu Taotao, Yu Wenjian, Wang Zeyi. BEM simulation for conformal dielectric interconnect capacitance [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2001, 13(8): 684 ~ 689 (in Chinese)  
(陆涛涛, 喻文健, 王泽毅. 保形 (Conformal) 结构互连电容的 BEM 模拟 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2001, 13(8): 684 ~ 689)
- [8] Liu Deyan, Yu Wenjian, Wang Zeyi. Virtual-cutting method for parasitic capacitors with complex 3D structures [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2003, 15(2): 180 ~ 186 (in Chinese)  
(刘德彦, 喻文健, 王泽毅. 复杂 3-D 寄生电容器的虚拟多介质切割 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(2): 180 ~ 186)
- [9] Lauther U. An  $O(N \log N)$  algorithm for Boolean mask operations [A]. In: *Proceedings of Design Automation Conference*, San Francisco, California, 1981. 555 ~ 562

www.cnki.net