

# 复杂 3D 寄生电容器的虚拟多介质切割

刘德彦 喻文健 王泽毅

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

**摘要** 虚拟多介质是一种基于直接边界元的寄生电容快速提取方法. 介绍复杂互连寄生电容器的结构及对其实现虚拟多介质切割的方法. 实际算例表明, 该算法可靠, 并有较高效率.

**关键词** 三维寄生电容器; 虚拟多介质切割; 保形介质; 多边形裁剪  
中图法分类号 TN47

## Virtual-Cutting Method for Parasitic Capacitors with Complex 3D Structures

Liu Deyan Yu Wenjian Wang Zeyi

(Department of Computer Science & Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** The quasi-multiple medium (QMM), based on the direct boundary element method, is a fast algorithm for parasitic capacitance extraction. In this paper, the complex 3D structures of VLSI interconnect capacitors and the virtual cutting method for them are presented. The numerical results show that the virtual cutting method is reliable and efficient.

**Key words** 3D parasitic capacitors; quasi-multiple medium (QMM) cutting; conformal dielectric; polygon clipping

## 1 引言

在 VLSI 电路中, 特征尺寸已减小到  $0.18 \mu\text{m}$  并广泛应用 5~6 层布线技术, 使得寄生效应已成为影响延迟、功耗和可靠性等电路性能的主要因素. 目前, 对以计算机芯片为代表的数字系统来说, 互连寄生电容在保证开关速度等方面具有关键的意义, 受到普遍关注<sup>[1-3]</sup>.

材料科学及微加工技术的发展使互连寄生电容器结构日趋复杂, 表现为以下方面: (1) 多种介质, 它们之间或成层次结构, 或相互嵌套; (2) 多块金属导体, 其数量多至数百, 以至数千; (3) 形体比较复杂<sup>[2]</sup>. 这些都给 3D 数值模拟增加了很大困难. 与此同时, 芯片规模迅速增大, 来自关键路径的寄生电容器数目可达数万个, 对电容提取速度提出了更高的

要求. 20 世纪 90 年代以来, 已有多种快速算法提出, 如多极加速算法<sup>[3]</sup>, 层次式计算<sup>[1,4]</sup>, 奇异值分解<sup>[5]</sup>等. 这些方法多基于间接边界元素法, 不可避免地在有限多介质计算中会遇到较大困难. 直接边界元方法是用于寄生电容提取的另一种有效数值方法, 它从以电势及其法向导数作为未知量的直接边界积分方程出发, 便于处理有限多介质问题.

虚拟多介质 (Quasi-Multiple Medium, QMM) 方法是基于直接边界元计算的一种快速算法. 它利用直接边界元法的局部化性质, 并结合稀疏矩阵存储技术和线性方程组迭代解法, 可大大提高计算速度<sup>[2,6]</sup>.

文献 [2,6] 介绍了 QMM 计算的原理以及对简单结构电容器实现 QMM 计算的程序原型. 本文在上述工作基础上, 实现了对复杂结构电容器的 QMM 切割.

## 2 寄生电容的 QMM 计算

### 2.1 多介质电容的直接边界元计算

图 1 所示为一个含 5 种不同介质及多块金属导体的互连寄生电容器。其中,深色为主导体,置 1 V 电压,衬底和其余导体置 0 V 电压。导体表面称为强加边界,其电位已知;介质外表面称自然边界,其法向电场为 0。在三维多介质情形下,电势  $u$  在待解域  $\Omega = \cup \Omega_i (i = 1, \dots, M)$  中满足带混合边界条件的拉普拉斯方程,  $\Omega_i$  表示第  $i$  个介质占据的空间区域,  $M$  是介质总数。以拉普拉斯方程基本解  $u^*$  作为权函数,应用加权余量法与格林公式可将拉普拉斯方程转化为如下直接边界积分方程<sup>[2,6-8]</sup>

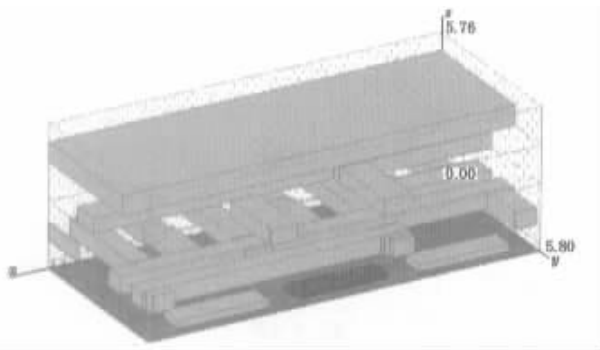


图 1 一个含有 5 层介质及多块金属导体的互连寄生电容器

$$c_s u_s^i + \int_{\partial\Omega_i} q^* u^i d\Gamma = \int_{\partial\Omega_i} u^* q^i d\Gamma \quad (i = 1, \dots, M) \quad (1)$$

其中,  $\partial\Omega_i$  是包围介质  $i$  的边界表面;  $u_s^i$  是介质  $i$  边界表面源点  $s$  的电势;  $c_s$  是与源点附近边界几何形状有关的常数。  $u^* = 1/4\pi r$  是基本解,其沿单位外法向  $\mathbf{n}$  的方向导数  $q^* = \partial u^* / \partial \mathbf{n} = -(\mathbf{r}, \mathbf{n})/4\pi r^3$ ,  $r$  为源点到积分点的距离。此外,在相邻两介质区域  $a, b$  的交界面上,电势和法向电场强度满足连续性条件

$$\begin{cases} \epsilon_a \cdot \partial u_a / \partial \mathbf{n}_a = -\epsilon_b \cdot \partial u_b / \partial \mathbf{n}_b \\ u_a = u_b \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\epsilon_a, \epsilon_b$  分别为相邻两种介质  $a$  和  $b$  的介电常数,  $\mathbf{n}_a$  和  $\mathbf{n}_b$  分别为其在交界面的单位外法向量。应用直接边界元方法,离散化方程(1)(2)可得到如下线性代数方程组<sup>[9]</sup>

$$Ax = f \quad (3)$$

用 GMRES<sup>[10]</sup>等迭代法求解方程组(3),即可得到强

加边界的法向电场强度及寄生电容<sup>[7-8]</sup>。

### 2.2 QMM 原理

从方程(1)看出,仅仅属于同一种介质的离散变量之间存在直接相互作用,这表现为它们在线性方程组(3)的系数矩阵  $A$  中以非零项出现,它们经离散化方程(2)与紧邻介质中的变量相联系。对非紧邻介质间的变量,由于不存在直接相互作用,因此在系数矩阵  $A$  中表现为零元。QMM 方法正是利用了直接边界元方法的这种局部化性质,使方程(3)中的系数矩阵极大稀疏化,以提高计算速度。对于一个单介质问题,直接边界元方法导致一个非对称的稠密系数矩阵。但是,若将介电常数为  $\epsilon$  的单一介质块“切”成  $Q$  个虚拟的介质块(如图 2 所示),它们的介电常数都与  $\epsilon$  相同,那么,一个单介质问题就转化为一个含  $Q$  块虚拟介质的多介质问题。虽然在虚拟切割中会引入虚拟变量而增加了变量总数,但一个简化模型的结论以及大量算例的计算表明,稀疏化带来的好处一般远大于由于变量增加而产生的负作用<sup>[2,6]</sup>。

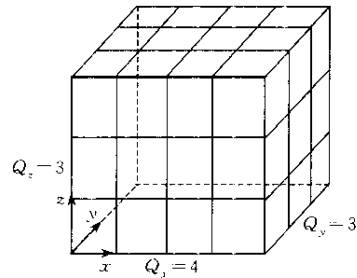


图 2 一个单介质电容器切割为  $Q=Q_x \times Q_y \times Q_z$  块虚拟介质

## 3 复杂多介质电容器

通常情况下,来自实际电路版图的多介质互连寄生电容器由两类形体组成:介质和导体。一般地,不同介电常数的介质块在  $x-y$  方向大小相等,并沿  $z$  方向整齐排列,如图 1 所示。对含有导体的介质层,导体块一般非均匀地分布,同层的导体有相同的高度,不同层中导体块的数量一般不等。导体块的形状按其底面的形状可以分为两种:(1)底面为规则长方形的直导体;(2)底面为不规则凸多边形的斜导体。

近年来,为减少 VLSI 中的互连延迟,出现了如填充气隙<sup>[11]</sup>、多平面及保形硅氧化膜<sup>[12]</sup>等新结构。保形介质结构具有较高的互连性能且工艺简单,已被广泛使用。利用高密度等离子体化学气相沉积技术,

在金属连线表面均匀地铺上一层化学性质优良的介质,从而形成一层与金属形状相似的介质层,称为保形介质.保形介质是一种非平面介质结构,它具有不规则的三维形状<sup>[12-13]</sup>,如图 3,4 所示.保形介质复杂的形体结构给虚拟切割带来了很大困难.

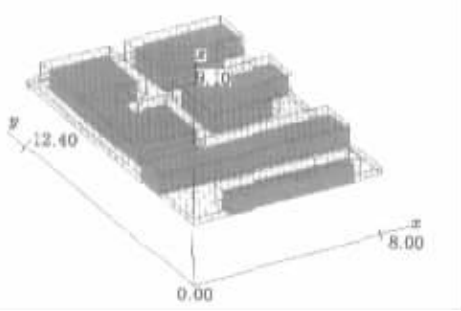


图 3 一保形介质层的 3D 视图

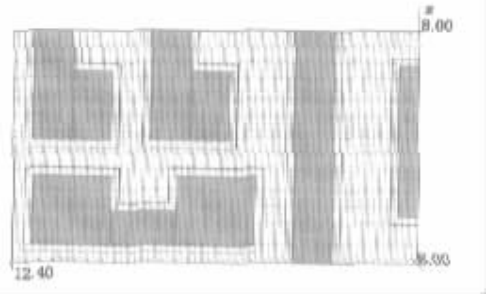


图 4 图 3 所示保形介质层的顶视图

还应指出,一个含有保形介质结构的寄生电容器一般并不意味着它的每一层互连线均由保形介质

覆盖.图 5 所示为一个含简单保形介质的三层互连寄生电容器,保形介质位于中间层,其介电常数为  $\epsilon_1$ ,与介电常数为  $\epsilon_2$  的介质一起组成保形层.图 5 b 已标明保形介质各边界表面,与保形层紧邻的是介电常数为  $\epsilon_3$  及  $\epsilon_4$  的大介质层.因此,一个普通结构寄生电容器由若干大介质层组成(如图 1 所示),而保形结构电容器一般由大介质层与保形层共同构成(如图 5 b 所示).



图 5 一个含简单保形结构的三层互连寄生电容器

## 4 复杂保形结构的虚拟切割

### 4.1 虚拟切割的策略

利用 QMM 计算寄生电容,首先要对介质及导体作“虚拟切割”,并在数据结构中描述切割后的介质与介质、介质与导体、导体与导体之间的关系.虚拟切割可以在  $x, y$  和  $z$  三个方向分别进行.但平面工艺的应用使寄生电容器在  $z$  方向呈真正的多介质结构,可不必再做虚拟切割,所以只需对形体作  $x-y$  两个方向的切割.目前采用均匀切割策略,即切割份数由互连电容器在  $x$  与  $y$  两个方向的长度决定.

### 4.2 虚拟切割的过程描述

加入虚拟切割处理后,3D 电容提取程序步骤如下:

Step1. 从输入文件中读取形体结构,用一维指数数组  $tempBlock[i]$  记录介质及导体结构,其中  $i$  为各个形体的编号.

Step2. 虚拟切割处理.

a. 根据互连电容器的长宽,分别定义  $x, y$  方向的切割份数,从而得到每条切割线的位置.

b. 对  $tempBlock$  中的每个形体调用切割函数进行切割处理(见第 4.3 节).  $x, y$  方向的切割线构成一组二维网格,每个网格单元为长方形窗口,可对这些窗口进行编号,以标示出每个窗口的位置.依次用每一个窗口对形体进行切割,用二维指数数组  $tempVmmBlock[i][j]$  标示切割后的形体,其中  $i$  为切割前形体编号,  $j$  为窗口的位置.

c. 对切割后的介质重新编号,对切割后的导体,标示其所属的介质.

d. 删除指数数组  $tempBlock$ ,用  $tempVmmBlock$  中的信息重新生成新的  $tempBlock$ .此时,  $tempBlock$  中记录的形体均为切割后的形体,即完成了程序对形体的虚拟切割.

Step3. 对  $tempBlock$  中每个形体作预处理,主要是在形体的表面生成用于边界元划分的母元,判断同层导体之间的关系,标记主导体附近的导体块等<sup>[14]</sup>.

Step4. 对  $tempBlock$  的每个形体划分边界元<sup>[14]</sup>.

Step5. 求解边界元方程,并输出结果.

### 4.3 不同形体结构的切割处理

组成互连电容器的导体和介质是虚拟切割的对象,下面讨论对它们的切割处理方法.两类形体的切割都用到 Sutherland-Hodgeman 裁剪算法<sup>[15]</sup>.

### (1) Sutherland-Hodgeman 算法简介

Sutherland-Hodgeman 算法用于二维平面多边形的裁剪.它的思路是把一个裁剪过程分解成几个简

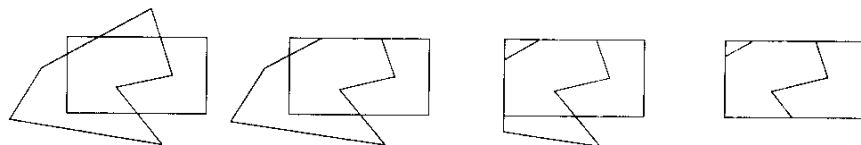


图6 Sutherland-Hodgeman 分边裁剪过程

该算法的步骤如下:首先把待裁剪多边形的各顶点按照一定方向组成有序的顶点序列,然后以一条裁剪边依次检验顶点序列中的每个顶点  $P_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ).处于裁剪边可见侧的顶点被列入新产生的顶点序列中,而处于裁剪边不可见侧的顶点被删除.此外,还要检验  $P_i$  和它的前一点  $P_{i-1}$  是否处于裁剪边的同侧,如不在同侧,则要求出裁剪边和直线段  $P_i P_{i-1}$  的交点,并把这个交点作为新的多边形顶点加入新产生的顶点序列中.

### (2) 导体的切割

在寄生电容器中,导体均可看作  $x, y$  平面多边

单过程,首先用裁剪窗口的一条边框直线(裁剪边)对整个多边形裁剪,得到一个新的多边形,再用第二条边框直线对这些新产生的多边形进行裁剪,直至4条边框直线都裁剪完毕,多边形即被裁剪完成,如图6所示.

形沿  $z$  方向长出的一定高度的直棱柱.所以对导体的切割可以简化为对其底面的切割,然后根据原导体的高,生成切割后导体的立体结构.对一个复杂的导体结构,在输入文件中是分为若干结构简单的导体描述的.这些结构简单的导体即是前面提到的直导体和斜导体.对于直导体,其底面是规则的长方形,问题简化为用长方形窗口对长方形进行切割,处理起来比较简单;对于斜导体,其底面是不规则的凸多边形,可用 Sutherland-Hodgeman 算法切割.图7所示为一实际互连电容器中某层导体被  $3 \times 3$  虚拟切割的三维视图和顶视图.

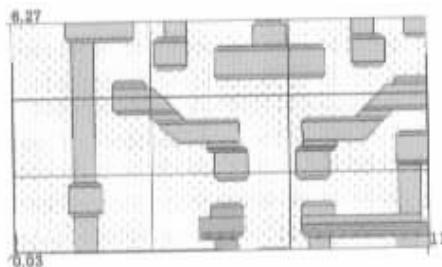
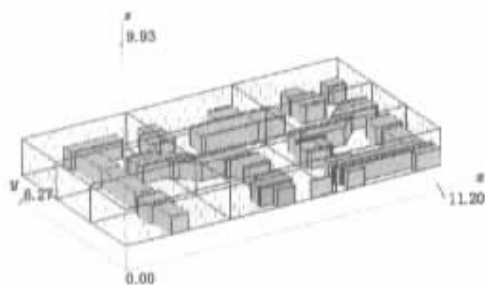


图7 对电容器某层导体作  $3 \times 3$  虚拟切割的三维视图及顶视图

### (3) 介质的切割

如前所述,复杂结构寄生电容器中一般包括大介质和保形介质两种介质层.对这两种介质层的虚拟切割有不同的处理方法,下面分别加以介绍.

图1所示为一个含5层介质的寄生电容器,每层介质是一个大介质.这些大介质沿  $z$  方向分布,长宽相同,但高度不一定相同.对每一介质层,其底面是规则的长方形结构,因此根据已确定的  $x-y$  方向的切割份数  $m$  与  $n$  对长方形进行  $m \times n$  的切割,并将原介质层的高度取作切割后的介质层高度,即可生成新的虚拟长方体介质结构.

保形介质是一种复杂的形体结构,它不能像大

介质和导体那样仅给出底面图形和高就能定义出立体结构.在本文采用的数据结构中,保形介质是按各个面描述的.整个结构分为上顶面、上侧面、中间层表面、下侧面和下底面,如图5所示.其中,上顶面和中间层表面的结构比较复杂,可能是含有内环的任意多边形.因此,对保形结构的切割即是针对各个面的切割,然后将切割后的面和因切割引入的新面组合出虚拟的新保形结构.

对保形结构的切割问题归结为对任意多边形的切割,这等价于用  $m \times n$  个规则长方形窗口对任意多边形作切割,可借鉴 Sutherland-Hodgeman 算法.但该算法对于保形结构的虚拟切割还有一些不足,如

对图 8 a 所示的输入图形 ,裁剪所得结果应是多个封闭的多边形 .但经 Sutherland-Hodgeman 算法得到的

是一个单一点序列(点的顺序用 1 ~ 11 表示 ) ,而没有把这多个多边形分割开 ,如图 8 b 所示 .

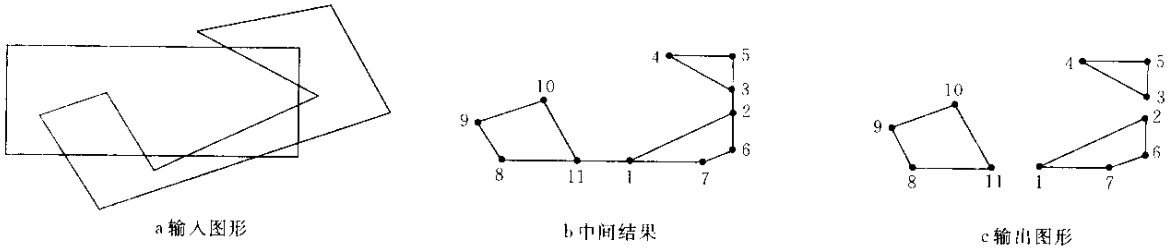


图 8 Sutherland-Hodgeman 算法改进前后裁剪多边形的一个实例

针对 Sutherland-Hodgeman 算法的上述不足 ,本文对这个算法进行了改进 ,主要是对其输出结果做进一步处理 .在改进的算法中 ,需判断输出结果中是否有部分点组成了封闭图形 ,如果有 ,则将输出结果分离成两个点集 .通过递归 ,对分离后的点集继续处理 ,直到结果点集中不存在部分点组成封闭图形 .

7)和点集 4(8,9,10,11).至此 ,在点集 1、点集 3 和点集 4 中 ,不再有部分点组成封闭图形 ,算法结束 ,输出结果 (3,4,5),(1,2,6,7),(8,9,10,11),如图 8 c 所示 .

判断是否有部分点组成封闭图形的思路如下 :结果点集中两个相邻点连接成一线段 ,如果点集中有其它点落在此线段上 ,则必有一个封闭图形产生 .

对于含有内环的多边形结构 ,同样可以用上面的方法依次对内环和外环进行切割 ,形成切割后的内环链表数组和外环链表数组 ,然后 ,对内环链表中的每一个内环判断它属于哪一个外环 .判断方法是从内环中的一点向外引一条射线 ,判断这条射线和某一个外环的交点个数 .如果有奇数个交点 ,则这个内环属于该外环内部 .

算法描述如下 .

Step1. 应用 Sutherland-Hodgeman 算法 ,对输入多边形进行裁剪 ,得到中间结果多边形 tempPoly 链表 .

### 5 数值结果

Step2. tempPoly 中的两个连续点  $P_i, P_{i+1}$  组成线段 ,如果此线段在裁剪多边形的边上 ,则自  $P_i$  开始向 tempPoly 链表的头部进行扫描 ,如果链表中存在一点在  $P_i, P_{i+1}$  组成的直线上 ,则此点到  $P_i$  之间的点集组成一个封闭的图形 ,将 tempPoly 链表分离 .如果没有这样一点 ,则自  $P_{i+1}$  开始向 tempPoly 链表的尾部进行扫描 ,如果链表中存在一点在  $P_i, P_{i+1}$  组成的直线上 ,则  $P_{i+1}$  到此点之间的点集组成一个封闭的图形 ,将 tempPoly 链表分离 .

下面通过一些数值结果说明本文介绍的 QMM 切割方法是正确和有效的 .硬件环境 Sun Ultra Enterprise 450 ,时间单位为 s ,电容器单位为  $10^{-18}$  F ,内存单位为 Mb ,长度单位为  $\mu\text{m}$  .

#### 5.1 含大量斜导体的互连寄生电容器

Step3. 递归处理分离后的多边形链表 ,直到每个多边形不存在部分点组成封闭图形 .

如图 8 b 所示 ,中间结果点集的 11 个点中 ,点 2,3 位于裁剪长方形窗口的右边上 ,点 5 位于点 2,3 所组成的直线上 ,则点 3 至点 5 之间的点组成一个封闭图形 .将中间结果点集分成两个集合 :点集 1(3,4,5)和点集 2(1,2,6,7,8,9,10,11).点集 1 构成一个单一的封闭多边形 ,可不再继续处理 .在点集 2 中 ,点 1 位于点 7,8 所组成的直线上 ,所以点 1 至点 7 组成一个封闭图形 ,点集 2 分离成点集 3(1,2,6,

图 9 所示为一个含 668 块导体的 5 层互连寄生电容器 ,其中含大量斜导体 .电容器在  $x, y, z$  方向的大小分别为 18,13 和 10.为测试虚拟切割的效率 ,在  $x, y$  方向上电容器作  $4 \times 4, 6 \times 6$  和  $8 \times 8$  的多种切割 .采用 QMM 方法后 ,计算速度得到了很大的提高 ,而且保证了较高的计算精度 .同时可看出 ,虚拟切割有较高的效率 ,不同虚拟切割方式仅占总计算时间的 1% ~ 4% 左右 (如表 1 所示) ,对总提取时间影响不大 ,保证了 QMM 快速计算性能的发挥 .

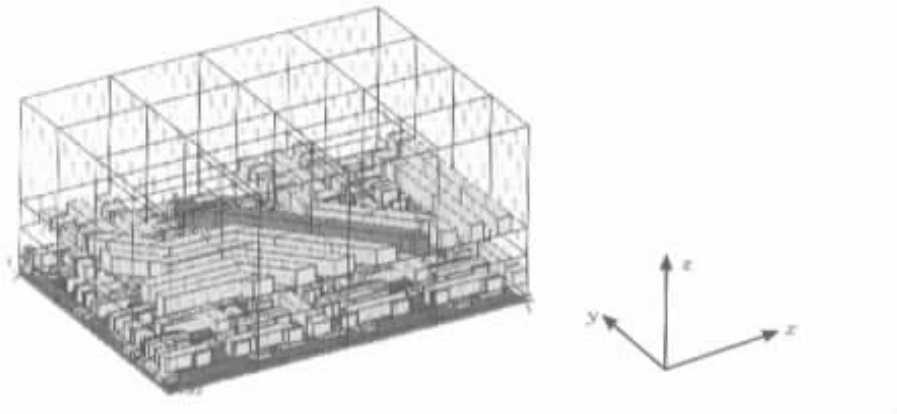


图 9 一个含大量斜导体的互连寄生电容器的三维视图  
表 1 一个含大量斜导体的互连寄生电容器的计算结果

电容器结构		非 QMM 方法		QMM 方法					误差(%)	T1/T3 (%)
层数	导体数	电容	时间 T1	切割数	电容	切割时间 T2	总时间 T3	T2/T3 (%)		
5	668	2.34000.3	298.4	4×4	2.34026.5	0.45	36.5	1.2	1.3	8.18
				6×6	2.34032.2	0.72	28.2	2.6	1.6	10.6
				8×8	2.34048.3	0.93	32.4	2.9	2.4	9.21

### 5.2 含保形结构的互连寄生电容器

图 10 所示为一个 6 层互连寄生电容器,其中有 3 个保形介质层,22 块导体.图 10 b 所示为某一保

形介质层作 4×4 虚拟切割的顶视图.从表 2 可以看出,在满足精度的前提下,计算速度有了很大的提高,虚拟切割的所占的时间也满足计算要求.

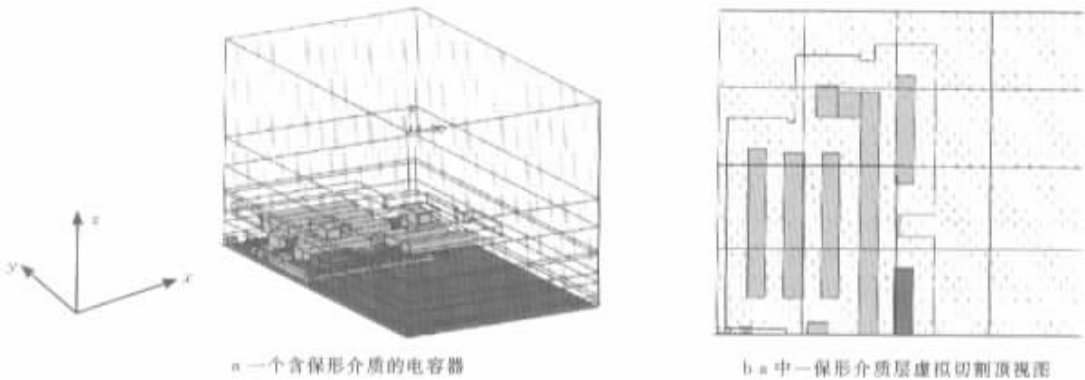


图 10 一个含保形介质电容器的三维视图和保形层的顶视图

表 2 一个含保形介质的互连寄生电容器的计算结果

电容器结构			非 QMM 方法		QMM 方法					误差(%)	T1/T3 (%)
层数	保形介质数	导体数	电容	时间 T1	切割数	电容	切割时间 T2	总时间 T3	T2/T3 (%)		
6	3	22	299.8	13.3	4×4	307.8	0.09	5.65	1.6	2.7	2.35
					6×6	308.2	0.14	6.13	2.3	2.8	2.17
					8×8	310.1	0.20	6.44	3.1	3.4	2.07

## 6 结 论

采用 QMM 方法计算 3D 互连寄生电容取得了良好的加速效果.经过实例计算验证表明,本文介绍的对介质及导体结构的虚拟切割处理方法具有处理时间短,适应复杂结构的优点.

当前所采用的切割方法是均匀切割.今后的研究课题是对切割策略作进一步完善,找到更好的切

割份数和切割位置,最大限度地减少方程中系数矩阵的非零元个数,从而进一步提高计算速度.

### 参 考 文 献

[ 1 ] Weiping Shi , Jianguo Liu , Naveen Kakani , et al . A fast hierarchical algorithm for 3D capacitance extraction[ A ] . In :Pro-

- ceedings of Design Automation Conference '98, San Francisco, 1998. 212 ~ 217
- [ 2 ] Wenjian Yu, Zeyi Wang. An efficient quasi-multiple medium algorithm for the capacitance extraction of actual 3D VLSI interconnects [ A ]. In : Proceedings of Asia South Pacific Design Automation Conference 2001, Yokohama 2001. 366 ~ 371
- [ 3 ] K Nabors, J White. FastCap : A multiple accelerated 3D capacitance extraction program [ J ]. IEEE Transactions on CAD, 1991, 10( 11 ): 1447 ~ 1459
- [ 4 ] Gu Jiangchun, Wang Zeyi, Hong Xianlong. Hierarchical computation of 3D interconnect capacitance using direct boundary element method [ J ]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics 2000, 12( 8 ): 635 ~ 640 ( in Chinese )  
( 古江春, 王泽毅, 洪先龙. 层次式直接边界元计算 VLSI 三维互连电容 [ J ]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12( 8 ): 635 ~ 640 )
- [ 5 ] Sharad Kapur, David E Long. IES<sup>3</sup> : A fast integral equation solver for efficient 3-Dimensional extraction [ A ]. In : Proceedings of International Conference on Computer Aided Design '97, San Jose, 1997. 448 ~ 455
- [ 6 ] Zeyi Wang, Wenjian Yu. A fast quasi-multiple medium algorithm for 3D interconnect capacitance calculator [ A ]. In : Proceedings of IFIP 16th World Computer Congress 2000, Beijing 2000. 223 ~ 230
- [ 7 ] Wu Qiming, Wang Zeyi. Application of boundary element methods on IC-CAD [ J ]. Chinese Journal of Computational Physics, 1992, 9( 3 ): 285 ~ 292 ( in Chinese )  
( 吴启明, 王泽毅. 边界元素法在集成电路 CAD 中的应用 [ J ]. 计算物理, 1992, 9( 3 ): 285 ~ 292 )
- [ 8 ] Fukda S, Shigyo N, Kato K, *et al.* A ULSI 2-D capacitance simulator for complex structures based on actual process [ J ]. IEEE Transactions on CAD, 1990, 9( 1 ): 39 ~ 47
- [ 9 ] J H Kane. Boundary Element Analysis in Engineering Continuum Mechanics [ M ]. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1994
- [ 10 ] Y Saad, M H Schultz. GMRES : A generalized minimal RESidual algorithm for solving nonsymmetric linear systems [ J ]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1986, 7( 3 ): 856 ~ 869
- [ 11 ] B Shieh, K C Saraswat, *et al.* Air-gap formation during IMD deposition to lower interconnect capacitance [ J ]. IEEE Electron Device Letter, 1998, 19( 1 ): 16 ~ 18
- [ 12 ] Min Park, Hyun Kyu Yu, *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
- [ 13 ] 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 )
- [ 14 ] Gu Jiangchun, Wang Zeyi, Hong Xianlong. A fast boundary element mesh generation approach for multi-hole surface [ J ]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2000, 12( 3 ): 211 ~ 215 ( in Chinese )  
( 古江春, 王泽毅, 洪先龙. 多孔平面的快速边界元划分 [ J ]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12( 3 ): 211 ~ 215 )
- [ 15 ] Sun Jianguang, Yang Changui. Computer Graphics [ M ]. Beijing : Tsinghua University Press, 1995. 206 ~ 209 ( in Chinese )  
( 孙家广, 杨长贵. 计算机图形学 [ M ]. 北京: 清华大学出版社, 1995. 206 ~ 209 )