

# 保形(Conformal)结构互连电容的 BEM 模拟

陆涛涛 喻文健 王泽毅

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

**摘要** 介绍了一种基于扫描线的复杂保形介质结构快速生成算法. 该算法应用多边形的扩展运算和集合运算形成保形介质, 同时处理保形介质中的凹槽, 并已实现于边界元素法三维互连寄生电容提取软件 B3D 中. 数值结果表明, 该算法可靠, 并有很高效率.

**关键词** 边界元素法, 保形介质, 扫描线  
中图法分类号 TN47

## BEM Simulation for Conformal Dielectric Interconnect Capacitance

LU Tao-Tao YU Wen-Jian WANG Ze-Yi

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

**Abstract** This paper presents a fast algorithm to form the complex conformal dielectric structures based on scan line algorithm. It uses set operation and stretch of polygon to generate the conformal dielectrics. The algorithm has been integrated in B3D, a BEM software of 3D parasitic interconnect capacitance extraction. The numerical results show that the algorithm is credible and efficient.

**Key words** boundary element method(BEM), conformal dielectrics, scanline

## 1 引言

VLSI 电路特征尺寸的微细化及多层布线技术的应用, 使互连寄生效应越来越大. 在深亚微米制造工艺下, 互连延迟在电路延迟中所占比例日渐增大, 已经成为电路延迟的主要因素. 因此, 快速、精确地提取互连寄生参数已成为 IC 设计中十分重要的环节.

目前, 在电学诸参数中, 寄生电容的影响最受关注. 近年来, 开发新工艺以提高互连质量, 减少互连延迟取得进展, 出现了如填充气隙<sup>[1]</sup>及保形硅氧化膜<sup>[2]</sup>等新结构. 保形介质结构具有较高的互连性能, 已被广泛应用. 但是, 复杂的保形结构给三维(3D)互连寄生电容提取带来了很大困难. 本课题组与美国 Synopsys 公司合作开发了基于直接边界元法(Boundary Element Method, BEM)的三维互连电容提取软件 B3D. 本文将介绍保形介质结构在 B3D 中的

生成及数值结果等.

BEM<sup>[3]</sup>是一种将模拟区域内微分方程变换为区域边界上积分方程后, 通过边界离散化进行求解的数值方法. 与有限差分法(Finite Difference Method, FDM)和有限元素法(Finite Element Method, FEM)相比, 它有以下突出优点, 并广泛应用于集成电路设计<sup>[4]</sup>:

1) 只对边界离散化, 大大减少了变量数, 提高了处理复杂形体的能力;

2) 由于计算电容所需法向电场直接包含于积分方程中, 有较高的计算精度.

## 2 保形介质结构及其生成

### 2.1 保形介质表面定义

利用高密度等离子化学气相沉积(High Density Plasma Chemical Vapor Deposition, HDPCVD)技术<sup>[2]</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,称保形介质.图 1 所示为一个截自保形工艺版图的互连寄生电容器及其其中一保形介质层的结构.可以看出,保

形介质是一种非平面结构,它具有不规则的三维形状.

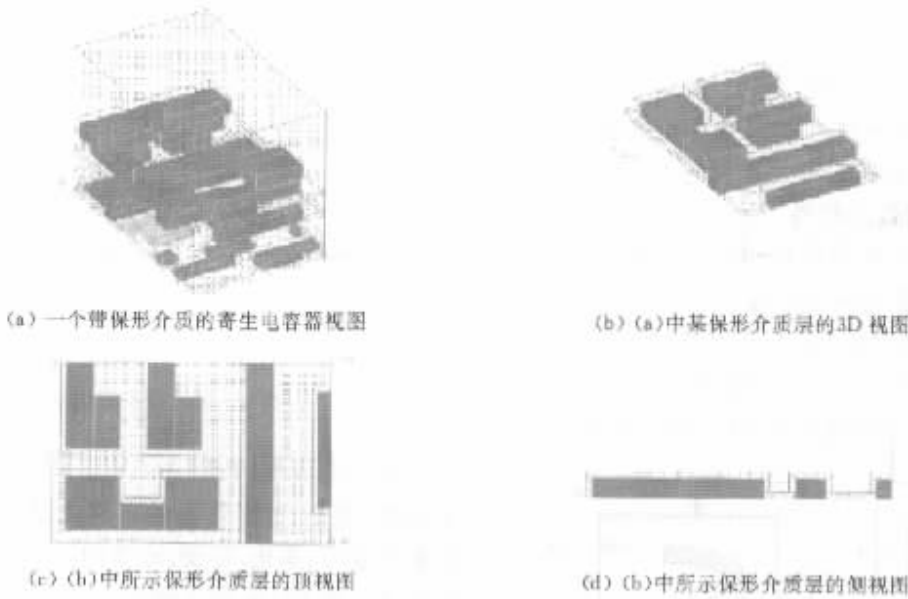


图 1 一个具有保形介质结构的互连电容器

图 2 显示的是一个仅含有两块导体的简单保形结构的顶视图与侧视图,其中保形介质的介电系数

为  $\epsilon_1$ ,与之相邻的两介质的介电系数为  $\epsilon_2$  和  $\epsilon_3$ .

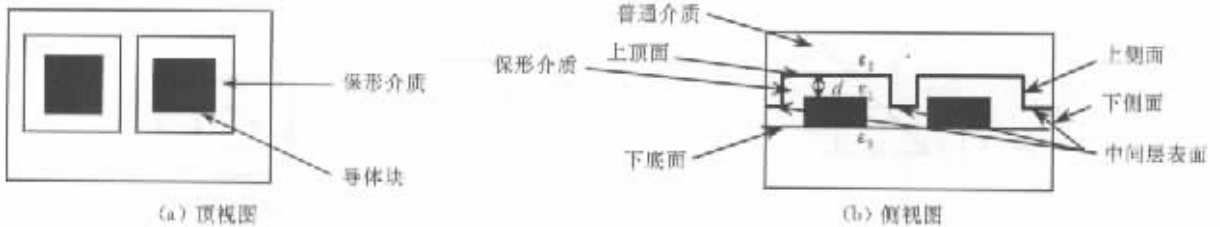


图 2 一个简单保形结构的顶视和侧视图

由图 1,图 2 看出,保形结构是在金属连线所在的层上均匀铺上一层厚度为  $d$  的介质形成的,其介电系数不同于相邻介质.它覆盖金属连线与介质表面,其表面形貌与金属连线的形貌相似.形象地说,“雪花”均匀飘落在介质表面及其金属连线上,便形成了保形介质层.从图 2 可以看出,保形介质表面由以下几部分构成:

- 1) 下底面.与导体的下底面相贴,形状及大小与  $\epsilon_2$  介质层的底面相同.
- 2) 上顶面.位于导体上表面高为  $d$  的位置,形状与导体的顶视形状相似,可由各块导体均匀外扩  $d$  所得图形之并产生.
- 3) 中间层表面.距下底面的距离为  $d$ ,含有很多因导体穿过而产生的孔.
- 4) 下侧面.位于中间层表面与下底面之间的侧面,通常包括 4 个面.

5) 上侧面.位于中间层表面与上顶面之间的侧面,其组成一般比较复杂.

6) 导体表面.保形介质和导体的交界面,是介质的部分边界面.

### 2.2 保形介质表面的生成

保形介质结构各部分表面的生成如下:

- 1) 下底面可由普通介质层  $\epsilon_2$  的底面形成.
- 2) 上顶面由所有导体在  $XOY$  平面内投影形成的多边形进行扩展,然后求并而成.
- 3) 中间层表面是在形成上顶面后,把下底面在  $XOY$  平面内的投影作为外环,上顶面的投影作为内环而形成.
- 4) 下侧面由普通介质层  $\epsilon_2$  的底面向上延伸  $d$  形成.
- 5) 上侧面是在形成上顶面后,由上顶面的每条边沿  $Z$  方向向下伸展一定高度产生.

6) 导体表面由导体的几何信息形成.

可以看出,上顶面的形成是保形结构生成的关键,其算法质量直接影响保形结构生成的结果和效率.上顶面的形成过程可归结为两个步骤:首先在  $XOY$  平面内对导体的投影多边形进行扩展,然后对所有扩展后的多边形加以合并.

### 2.3 金属连线多边形的扩展

金属连线多边形扩展的概念如图 3 所示.扩展多边形可以通过求原始多边形每一个顶点所对应的扩展点而得到.本文采用“三点求一点”的方法求扩展点,即通过原始多边形的 3 个连续顶点  $P_{i-1}, P_i, P_{i+1}$  求得顶点  $P_i$  所对应的扩展点  $P'_i$ .为了使内环和

外环的处理保持统一,可假定外环方向为顺时针,内环为逆时针,如图 4 所示.在定义方向之后,两条边  $P_{i-1}P_i$  和  $P_iP_{i+1}$  也具有自己的方向.将两条边向各自的左侧移动距离  $d$ ,得到新的直线  $l_1$  和  $l_2$ ,其交点  $P'_i$  就是  $P_i$  对应的扩展点.

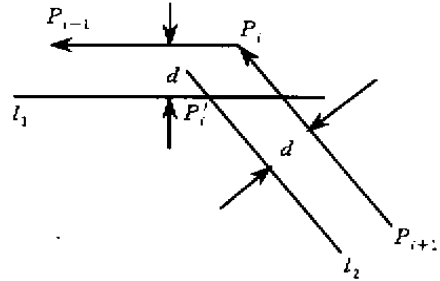


图 4 求对应扩展点的方法

对凸多边形,利用上述方法可得到相应的扩展多边形.但是,凹多边形的扩展比较复杂,会出现多边形的变形、退化、自交,或者凹凸性完全改变(由内环成为了外环)等异常情况.图 5 显示 3 种异常情况.我们注意到,异常多边形的出现不但与扩展距离  $d$  有关,而且与原始的被扩展多边形的形状有关,情况十分复杂.本文仅做初步探讨.

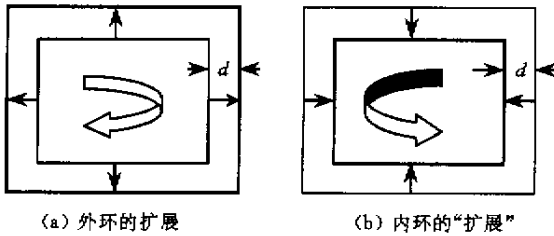


图 3 多边形的扩展

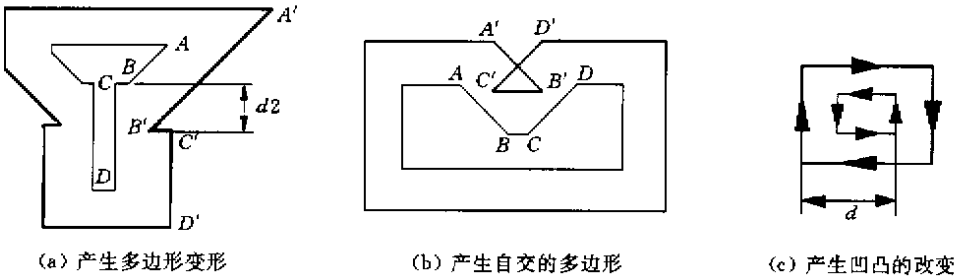


图 5 多边形扩展的异常情况

一般来说,异常情况在  $d$  较大时容易发生,如图 (a) (b) 所示.同时,图 (c) 显示了避免该异常的处理方法.在图 (b) 中,考察点  $A, B, C$  及它们对应的扩展点  $A', B', C'$ .在出现异常时,向量对

$\langle BC \rangle$  和  $\langle B'C' \rangle$  出现了反向,我们称  $BC$  为“隐藏边”,对应的扩展点  $C'$  应被删除,而顺序取下一条边作为当前处理的边.这样,所应形成的扩展多边形示于图 (c).

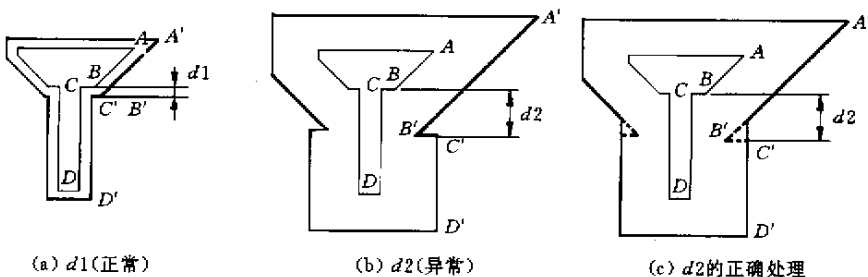


图 6 凹多边形扩展中的异常情况

对图 5 中出现自交的多边形,可采用如下方法解决:当出现自交的多边形后,对此多边形本身调用 2.4 节介绍的求并算法去除自交部分,从而得到正确结果.

### 2.4 多边形求并

多边形合并是图形学中有经典算法<sup>[5]</sup>;也有适用于非正则多边形的算法<sup>[7]</sup>,非正则多边形是指一个顶点可以连接多于两条边的多边形.上述算法都对多边形两两运算,其复杂度为  $O(n^2)$ ,  $n$  是总边数.文献 6 提出了一种基于扫描线的掩膜图形生成算法,具有复杂度  $O(n \log n)$ .本文以扫描线算法思想为基础,修改其中掩膜图形处理部分,使之适用于保形介质结构的快速图形生成,这主要反映在对输出边的不同处理.此外,文献 6 中未介绍垂直边的输出处理,对多边形重构也未作说明,本文将针对保形结构生成要求加以补充.

假定输入多边形是用顶点描述,且以顺时针方向为序.合并后的结果多边形也以顶点输出,并规定:外环以顺时针方向为序,内环(即内孔)以逆时针方向为序.下面介绍算法步骤与改进.

步骤:

Step1. 将多边形所有非垂直边插入 *EdgeFile* 链表,并按各边左端点的  $X$  坐标递增、 $Y$  坐标递减、斜率递减的顺序对它们排序.与文献 6 同,垂直于  $X$  坐标轴的边将不插入链表,它们可在后续步骤中被检测并作处理.

Step2. 用  $Y$  方向扫描线从左到右( $X$  坐标递增的方向)扫描整个平面,形成边的完备集.边的完备集是指仅在端点处与其它边相交的边的集合,是经过边求交分裂后形成的边集.在此基础上,确定将在结果多边形中出现的“有效边”,是算法中关键的一步.

Step3. 用有效边构造结果多边形,这将涉及区别内环与外环多边形,以及决定内环多边形归属等问题.

以下就算法实现中的几个重要环节作进一步介绍.

#### 1) 有效边的判断

为便于有效边判断,可在扫描线的左侧和右侧定义两个计数器 *count1* 和 *count2*,其初值为 0.自上而下地考察该扫描线上的每条边,计数器的值对应于相邻两边之间的区段.计数器的变化规则是:遇到一条前向边(向右)时,加 1;否则,减 1(如图 7 所示).

在图 7 中,对应扫描线  $X_2$ ,*count1* 和 *count2* 的值如图所示.考察 *count1*,如果其值由 0 变为非 0,或者由非 0 变为 0,则表明其遇到有效边;同时,如果

该边在当前扫描线位置上中止,则该边为有效边,将其输出.

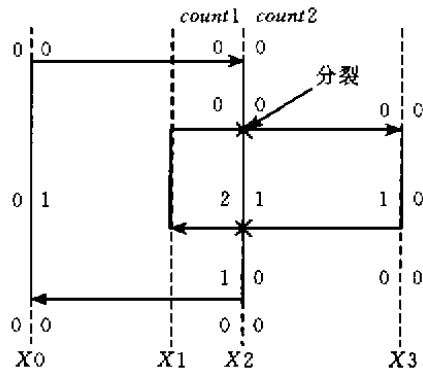


图 7 在扫描线上判断有效边和垂直边

#### 2) 垂直边的输出

仍使用计数器 *count1* 和 *count2*,如图 7 所示.考察同一区段的 *count1* 和 *count2*,如其中一个为 0,另一个为非 0,则表明这一区段有一垂直边,应将其作为有效边输出.同时,由计数器中大的一方,可判断出该有效边的方向.对垂直边应检查端点处的两条边是否有“贯穿边”(被当前扫描线穿过),若有则需将它“分裂”为两条边,并将它们加入相应的扫描线链表.

#### ·结果多边形的构造

本文采用点链的数据结构存储有效边.在输出一条有效边时即判断它是否能与现有点链相接.若能相接,即将其加入点链;否则,则为它建立一新点链.若该边两个端点均与同一个点链相接,则构成一个环(一个结果多边形),可以删除该点链,并将形成的多边形输出.若没有形成环,则需扫描所有点链,将可合并的两个点链合并成一条更长的点链.

每判断一条有效边与现有点链的关系时,只做两次点的比较,这种方法容易实现,效率也较高.大量实例表明,上述算法在处理 VLSI 版图中互连多边形的并运算是正确的,并有如下优点:(1)算法复杂度低;(2)能处理各种复杂多边形及其相互关系,鲁棒性好;(3)算法稍做修改,可用于其它布尔运算,如求交集、差集等.

### 2.5 保形介质中凹槽的处理

在利用前述算法形成保形结构时,往往出现如图 8(a)所示的凹槽,其形成的原因已在图中说明,即当两导体的距离  $d_1$  满足  $d_1 = 2d + \mu$  时,就会产生一个宽度为  $\mu$  的凹槽.当  $\mu$  较小时,在 BEM 计算中往往导致较大误差.

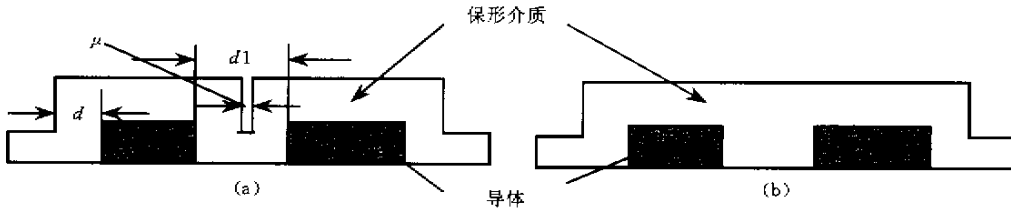


图 8 凹槽及其填平

为了避免凹槽的产生,本文采用如下方法:

- (1) 在扩展单个多边形时,将扩展量取为  $d + \delta$ ,  $\delta$  是允许的两介质表面最小距离之半;
- (2) 对含扩展量  $\delta$  的多边形进行合并;
- (3) 对合并后的多边形收缩  $\delta$ , 形成满足扩展量为  $d$  的多边形集合。

### 3 数值计算结果

下面通过若干来自实际版图的算例说明本文算法具有较高的效率及精度。各算例均运行于 Sun E450 工作站。

- 1) 形成保形介质结构所需时间
- 3 个实际算例的数据如表 1 所示。

表 1 保形介质的形成时间

例子	导体数	保形介质生成时间(s)	B3D 计算时间(s)
12.bem	90(含斜线)	0.08	122.3
81.bem	60(含斜线)	0.04	35.4
b3d.254	65	0.08	228.5

注:算例 12.bem 和 81.bem 均含有斜导体,即某些导体在 XOY 平面投影中含 45°斜线。

从表中的数据看出,保形介质结构的形成时间与边界元分析相比可以忽略。

#### 2) 保形结构的计算精度

仍取表 1 的 3 个算例。Raphael 是当前十分著名的商用软件,具有很高的计算精度,其稠密网格下的结果常被作为标准值。这里的精度比较以 Raphael 在十分稠密网格下的结果作为标准值。比较结果如表 2 所示。

表 2 以 Raphael 的计算结果作为标准值, B3D 计算保形结构的精度

实例	导体数	Raphael 计算结果			B3D 计算结果		
		网格数	电容值(10aF)	计算时间(s)	电容值(10aF)	误差(%)	计算时间(s)
12.bem	90(含斜线)	8M	986.1	19 981.2	982.9	-0.3	122.3
81.bem	60(含斜线)	2.4M	359.8	10 981.5	359.3	-0.1	35.4
b3d.254	65	8M	13 344.3	22 359.4	13 401.2	0.4	228.5

注:算例 12.bem 和 81.bem 均含有斜导体,即某些导体在 XOY 平面投影中含 45°斜线。

- 3) 凹槽消除前后计算结果的比较
- 凹槽的出现会对 BEM 计算带来较大的误差,凹

槽消除后的计算误差往往可以显著地减小,并提高计算速度。

表 3 凹槽消除前后计算结果的比较

实例	导体数	Raphael 计算结果(10aF)	凹槽消除之前			凹槽消除之后		
			电容值(10aF)	误差(%)	计算时间(s)	电容值(10aF)	误差(%)	计算时间(s)
25.bem	753	3 261	2 945	-9.7	679	3 301	1.2	486
Pyc1	98	907	868	-4.3	320	887	-2.2	266

## 4 结 论

通过扫描线算法实现于 B3D 的保形介质结构寄生电容提取取得了良好结果。它具有计算精度高,处理时间短等优点。模拟结果表明,基于 BEM 的三

维电容提取软件 B3D 对制造工艺的研究和开发具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 B Shieh, K C Saraswat, et al. Air-gap formation during IMD deposition to lower interconnect capacitance. IEEE Electron Device Letters, 1998,

- 19(1):16 - 18
- 2 Min Park , Hyun Kyu Yu , *et al.* High-quality conformal silicon oxide films prepared by multi-step sputtering PECVD and chemical mechanical polishing. *Journal of Electronic Materials* , 1998 , 27( 11 ) :1262 - 1267
- 3 C A Brebbia. *The Boundary Element Methods for Engineers*. Beijing : Science Press , 1986( in Chinese )  
( C A 布莱比亚 . 工程师用的边界单元法 . 北京 : 科学出版社 , 1986 )
- 4 Wu Qi-Ming , Wang Ze-Yi. Application of boundary element methods on IC-CAD. *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 . 计算物理 , 1992 , 9( 3 ) 285 - 292 )
- 5 Sun Jia-Guang , Yang Chang-Gui. *Computed Graphics*. Beijing : Tsinghua University Press , 1995( in Chinese )  
( 孙家广 杨长贵 . 计算机图形学 . 北京 : 清华大学出版社 , 1995 )
- 6 Ulrich Lauther. An  $O(N \log N)$  algorithm for Boolean mask operations. In : *Proceedings of DAC* , Nashville Tennessee , 1981 . 555 - 562
- 7 Avraham Margalit , Gary D Knott. An algorithm for computing the union , intersection or difference of two polygons. *Computer & Graphics* , 1989 , 13( 2 ) :167 - 183

