

半导体器件中金刚石散热器热性能 的传输线矩阵(TLM)法分析

谢志坤

(绍兴文理学院物理系 绍兴 312000)

沈进进 陈抗生

(浙江大学信电系 杭州 310027)

摘要 本文将传输线矩阵(Transmission Line Matrix, TLM)法运用到热扩散问题的求解中,通过对模型的建立、迭代算法的步骤、边界的处理等问题的讨论,详细阐述了传输线矩阵(TLM)法用于分析热扩散问题时的基本理论。最后以半导体器件中金刚石薄膜散热器为例进行了实例分析。

EEACC: 0290, 1130, 2560, 2520

1 引言

随着集成电路的小型化和高速化,器件的功率密度大大提高,为保证器件工作的可靠性、稳定性以及寿命,散热器的作用显得非常重要。有关散热器材料选取以及散热器性能研究方面的工作开展已久,提出了一种兼顾性能、成本的金金刚石薄膜散热器。由于其几何结构的特殊性和导热系数对温度的依赖性,其热学特性的解析解很难求得,文献[1]虽得到了在不考虑材料导热系数温度依赖性条件下的解析解,但仍无法得到对于变导热系数情况下的解析解,然而用如传输线矩阵(TLM)的数值方法来求解这个问题则相对来说比较简单。

传输线矩阵法由 P. B. Johns 等于 70 年代初提出,首先用于电磁场问题的数值求解^[2,3],继而又将它推广到扩散问题的求解^[4]。从此 TLM 法在热扩散问题上的应用迅速发展。

谢志坤 男,1963 年出生,讲师,目前主要从事微波器件数值模拟、电磁场数值计算、视频信号处理等研究。
沈进进 男,1970 年出生,工学硕士,从事微波、毫米波与光导波技术的研究,1997 年 8 月赴美国攻读博士。
陈抗生 男,1939 年出生,教授、博士生导师,电子信息研究所所长,目前主要从事微波、毫米波与光导波技术等研究。

1997-08-20 收到,1998-03-11 定稿

展, 前后相继提出了一维、二维和三维直角坐标系中的热扩散节点模型^[5,6], 并分别用它分析了穿通二极管 (punch-through diode)^[5]、雪崩触发二极管 (TRAPATT diode)^[6]、异质结微波三极管^[7] 等半导体器件和涡轮叶片等物体中的热现象, 本文讨论了传输线矩阵 (TLM) 法用于分析热扩散问题时的基本理论, 成功地分析了在固定导热系数和变导热系数两种情况下, 金刚石薄膜散热器的有关温度分布情况, 并求解了金刚石薄膜不同厚度情况下的一些特性, 为对此类器件进行分析、设计提供了一种有效的辅助分析方法

2 求解热扩散问题的 TLM 方法基本理论

热量在介质中的传播、扩散遵循热传导方程:

$$\nabla^2 T + P = \frac{\rho C_p}{K_T} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

式中 K_T 、 ρ 、 C_p 、 P 、 T 、 t 分别是介质的导热系数、密度、比热、内部产热功率密度、温度分布函数和时间

在微波技术中, 对于有损耗传输线我们有电报 (Telegrapher) 方程:

$$\nabla^2 V = AR_d C_d \frac{\partial V}{\partial t} + BL_d C_d \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \tag{2}$$

式中 V 、 R_d 、 C_d 、 L_d 、 t 分别是波动信号电压、传输线的单位损耗电阻、电容、电感和时间 A 、 B 为常数, 一维空间 $A = 2, B = 1$; 二维空间 $A = 4, B = 2$; 三维空间 $A = 6, B = 3$ 比较式 (1) 和 (2), 我们可以发现当式 (2) 右端的对时间一次微分项大于对时间二次微分项而可以忽略时, 两式具有相同的形式 因此我们可以用所熟悉的式 (2) 来模拟式 (1), 这样就提出了 TLM 算法 下面以二维空间为例讨论 TLM 法的计算问题

3 二维热传导方程的 TLM 法模拟

在二维空间中, 当条件

$$L_d C_d \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \ll 4R_d C_d \frac{\partial V}{\partial t} \tag{3}$$

成立时, 式 (1) 和 (2) 分别变为:

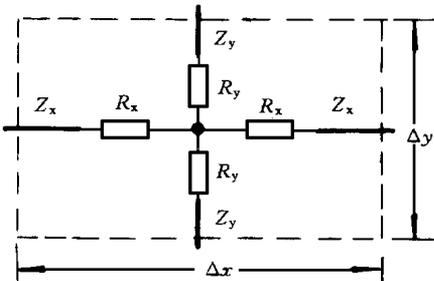


图 1 二维 TLM 节点模型

$$\frac{\partial T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial y^2} + P = \frac{\rho C_p}{K_T} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{4}$$

$$\frac{\partial V}{\partial x^2} + \frac{\partial V}{\partial y^2} = 4R_d C_d \frac{\partial V}{\partial t} \tag{5}$$

对于相同形式的方程 (4) 和 (5), 如果用电压信号代替温度, 用传输线代替传热介质, 我们就可以用传输线网络来模拟介质中的热传导过程

一个固态器件可以看作是由许多分立的节点所组成的一个网络, 其中的每一个网格节点具有如图 1

的传输线结构 图中的传输线是无耗传输线, 带有总量为 C 的分布电容, 其特征阻抗为 Z . 传输线的电容和图中的集总电阻 R 分别用于模拟传热介质的热容和热阻 在每一个时间步长, 从相邻节点各个方向入射的波动信号 V^i 产生相应的节点电压 Φ (对应于热传导过程就是这一点的温度值), 同时当波动信号沿着传输线传播时, 因为该节点传输线的特征阻抗和与之相连的相邻节点传输线的总阻抗是不匹配的, 这样就会在节点和相邻网格传输线连接处产生反射, 而这反射电压自然成为下一个时间步长里相邻节点的入射电压, 从而形成了一个迭代过程 显而易见, 这样的迭代可以有效地进行热传导过程的瞬态分析, 同时传热介质中随着温度会发生改变的热参数 (如导热系数), 也可以很容易地得到处理

在以上节点模型中电容、电阻与热容、热阻有如下的等效关系: 应用基本方程电容 $C = Q/V$, 电流 $I = Q/\Delta t$ (式中 Q 代表电荷, Δt 代表时间步长). 根据欧姆定律, 可以得到节点中传输线的特征阻抗为 $Z = V/I = \Delta t/C$, 对于二维空间由于节点模型中 x 方向与 y 方向的传输线是并联的, 当整个网格的总电容定义为 C , 每条传输线的电容则为 $C/2$ 因此节点中传输线的特征阻抗的形式为 $Z = V/I = 2\Delta t/C$. 这样其中的 C 可以用来模拟所在网格的热容 $C = \rho C_p l_z \Delta x \Delta y$, 而网格中代表热阻的电阻 $R_x = \Delta x/2K_x S_x$, $R_y = \Delta y/2K_y S_y$ (其中 $S_x = l_z \Delta x$, $S_y = l_z \Delta y$ 分别代表网格在 x 方向和 y 方向的横截面积, l_z 为网格在 z 方向的长度, Δx 和 Δy 分别是 x 方向和 y 方向的网格长度).

综合二维情况下计算过程可归纳为以下三个步骤:

(1) 首先计算出节点电压 Φ

$${}_k\Phi = 2 \left(\frac{{}_kV_1^i + {}_kV_2^i}{R_x + Z} + \frac{{}_kV_3^i + {}_kV_4^i}{R_y + Z} \right) / \left(\frac{2}{R_x + Z} + \frac{2}{R_y + Z} \right)$$

式中 k 表示迭代次数; R_x 、 R_y 和 Z 分别为四条传输线的电阻和特征阻抗; V_1^i 、 V_2^i 、 V_3^i 、 V_4^i 表示传输线的入射电压 如果该节点上的产热功率 $P \neq 0$, 则有:

$${}_k\Phi = {}_k\Phi + \Delta T = {}_k\Phi + \frac{P L \Delta x \Delta y \Delta t}{C}$$

式中 ΔT 是时间 Δt 中的温升; P 是单位体积内的产热功率

(2) 计算反射电压 V^r , 根据电路分析可得:

$${}_kV_1^r = \frac{1}{R_x + Z} [Z {}_k\Phi + (R_x - Z) {}_kV_1^i] \quad {}_kV_2^r = \frac{1}{R_x + Z} [Z {}_k\Phi + (R_x - Z) {}_kV_2^i]$$

$${}_kV_3^r = \frac{1}{R_y + Z} [Z {}_k\Phi + (R_y - Z) {}_kV_3^i] \quad {}_kV_4^r = \frac{1}{R_y + Z} [Z {}_k\Phi + (R_y - Z) {}_kV_4^i]$$

(3) 反射电压沿着长为 ΔL 的传输线经过 Δt 的时间传播到相邻网格而成为入射电压 V^i , 则下一个时间步长各个网格的入射电压可以表示为:

$${}_{k+1}V_1^i(x, y) = \Gamma_1 {}_kV_1^r(x, y) + (1 - \Gamma_1) {}_kV_2^r(x - 1, y)$$

$${}_{k+1}V_2^i(x, y) = \Gamma_2 {}_kV_2^r(x, y) + (1 - \Gamma_2) {}_kV_1^r(x + 1, y)$$

$${}_{k+1}V_3^i(x, y) = \Gamma_3 {}_kV_3^r(x, y) + (1 - \Gamma_3) {}_kV_4^r(x, y - 1)$$

$${}_{k+1}V_4^i(x, y) = \Gamma_4 {}_kV_4^r(x, y) + (1 - \Gamma_4) {}_kV_3^r(x, y + 1)$$

式中 Γ_1 、 Γ_2 、 Γ_3 、 Γ_4 是相邻网格的传输线之间的电压反射系数, 其表达式为:

$$\Gamma_1 = \frac{Z(x - 1, y) - Z(x, y)}{Z(x - 1, y) + Z(x, y)} \quad \Gamma_2 = \frac{Z(x + 1, y) - Z(x, y)}{Z(x + 1, y) + Z(x, y)}$$

$$\Gamma_3 = \frac{Z(x, y - 1) - Z(x, y)}{Z(x, y - 1) + Z(x, y)} \quad \Gamma_4 = \frac{Z(x, y + 1) - Z(x, y)}{Z(x, y + 1) + Z(x, y)}$$

重复进行步骤(1)~ (3)就形成了 TLM 算法的时域迭代过程

4 TLM 法的边界条件处理

边界条件的处理在数值求解中非常重要, 归纳求解热传导问题的边界主要有以下几类:

(1) 恒温边界

是指边界上的温度是恒定的边界 传输线模型中就是边界外侧的节点电压是定值 其中的特例为接理想热沉 处理时将边界之外的温度恒定在环境温度 T_0

(2) 恒流边界

指通过边界的热流密度 q 是恒定的 计算时将其转化为差分形式 $\Delta T = q(\Delta x + \Delta y)/T$, 计算有热流进入的边界节点时, 每次迭代都要使节点电压加上升温 ΔT , 即 $\Phi_k = \Phi_k + \Delta T$. 另外, 处理恒流边界的同时, 需将边界的电压反射系数置为 $\Gamma = 1$.

(3) 吸收边界

吸收边界可以用匹配边界条件来近似, 即设置边界电压反射系数 $\Gamma = 0$ 匹配边界能将垂直入射到该边界的入射波完全地吸收, 但对斜入射的波会产生一定的反射

5 金刚石薄膜散热器热学特性的 TLM 法分析

能否有效导出半导体器件内部的热量, 直接关系到其工作的可靠性、稳定性以及寿命 为获得良好的散热效果, 提出了一种金刚石薄膜散热器, 其几何形状如图 2 所示 这是一种

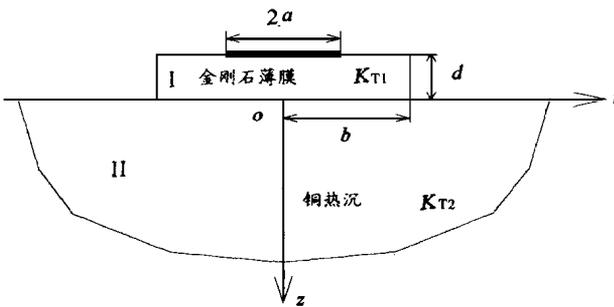


图 2 金刚石薄膜散热器的几何结构

圆柱形散热器, 上部扁柱体形状的金
刚石薄膜(半径为 b , 厚度为 d , 导热
系数为 K_{T1})直接放在圆形热源(半径
为 a)的下面, 起扩展热流的作用, 称
为热扩展层(Heat Spreader), 下部半
无限的是铜质(导热系数为 K_{T2})热沉
(Copper Heat Sink), 向周围空间散
发热量 该散热装置散热的效果如
何, 且金刚石薄膜层多厚为宜, 都需
要加以分析、研究的 虽然南洋理工

大学(Nanyang Technical University of Singapore)的惠平博士利用Dini级数和Hankel变换得到了在不考虑材料导热系数温度依赖性条件下的解析解^[1], 但对于变导热系数情况下的解析解仍很难得到 然而用数值方法来求解这个问题则相对来说比较简单, 我们就用 TLM 法分析这种散热器在固定导热系数和变导热系数两种情况下的热学特性

利用该散热器为圆柱形的轴向对称性结构, 求解温度场的分布只需分析一个剖面即可, 因此三维结构的器件转化为采用直角坐标系中的二维 TLM 法进行分析 分析中采用了变网格技术以提高计算效率 从图 2 可以看到铜热沉在 z 向和 r 向的尺寸都是无穷大的, 因此

采取设置匹配吸收边界措施,使网格在某一个地方截断,解决计算机内存的限制问题。为了保证计算精度,迭代的时间步长取得较小($\Delta t = 0.015 \mu s$),在恒定热源的情况下一般经过 7000 次左右的迭代可以收敛,程序在 PC486/80 计算机上计算耗时约 20 分钟。在固定导热系数的情况下,采用文献[1]相同的数据和结构,计算结果如图 3, 4 所示。

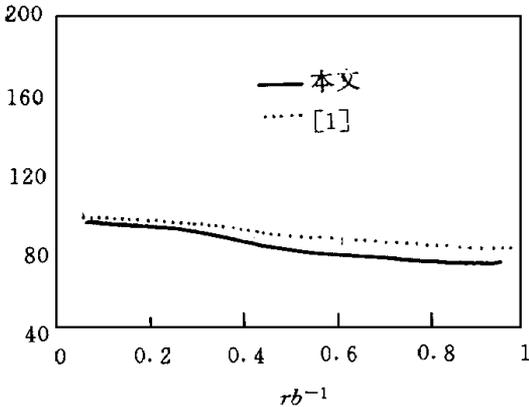


图 3 金刚石薄膜上表面径向温度分布

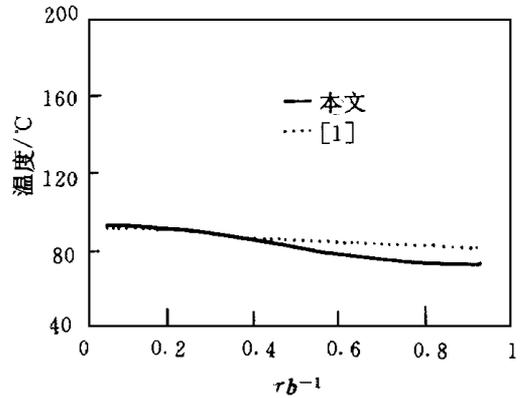


图 4 金刚石和铜交界面温度分布

图 3 是 $d/a = 0.5$ 时金刚石薄膜热扩展层的上表面径向温度分布,与热源直接接触区域温度相对较高,而在此之外的区域温度逐渐降低,这是因为热流被有效地引入到了铜热沉。

图 4 是 $d/a = 0.5$ 时金刚石薄膜与铜交界面上的温度分布。由于有了金刚石薄膜的扩流作用,这儿的温度分布要相对平均一点。

分析数值模拟的结果,与解析解相比较其误差约为 10%,可见 TLM 法对求解热传导问题是很有效的。

在进行了以上分析之后,接着求解了在无金刚石薄膜和不同金刚石薄膜厚度情况下的有关温度分布情况,计算结果如图 5 所示。比较图 5 的各条曲线可以发现,在没有金刚石薄膜情况下,与热源交界处的温度很高,交界面温度的径向分布梯度也很大,这正是由于铜材料的导热系数比较低,导热能力相对较差的体现;而在增加金刚石薄膜扩流层以后,与热源交界处的温度降低了许多,交界面温度的径向分布梯度也相对平均一点,并且随着薄膜厚度的增加,这种趋势更加明显。但要沉积大厚度的金刚石薄膜其成本太高且工艺上也很困难,因此需要综合考虑散热器性能要求、制造工艺和成本,选择一个最佳的薄膜厚度。

对于金刚石的导热系数是随着温度而发生变化的问题,前面已经指出 TLM 法可以比较方便地模拟这个情况。图 6 是 $d/a = 0.5$ 时考虑了金刚石变导热系数情况下的计算结果。由于金刚石的导热系数随着温度的升高而降低,因此其导热能力将下降,反映出在这种情况下散热器的温度要比恒定导热系数时来得高,金刚石薄膜表面径向温度分布梯度也将相应地增大,计算结果与此相吻合(有关金刚石和铜的热学参数如表 1 所示)。

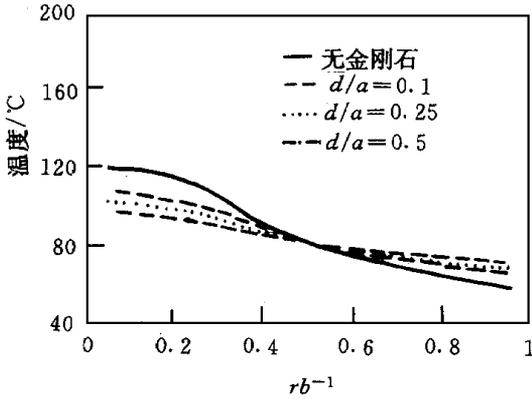


图 5 不同厚度金刚石薄膜上表面的径向温度分布

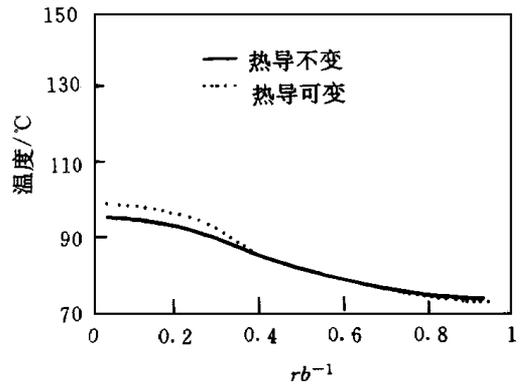


图 6 变与不变导热系数的金刚石上表面温度比较

表 1 金刚石和铜的热学参数

	比热 $C_p / (J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$	密度 $\rho / (g \cdot cm^{-3})$	导热系数 $K_T / (W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1})$
金刚石 ^[7]	6.20	3.51	$4444.4 / (T - 55.5)$
铜 ^[1]	0.385	8.933	3.95

6 结论

以上对 TLM 法在热扩散问题求解中的应用作了一些探讨,并以金刚石薄膜散热器为例进行了实际分析.从热学角度对器件的热学特性加以全面分析,再进行设计是未来这一领域进一步发展的基础.我们认为 TLM 法为这一领域提供了一种有效的分析方法,值得对此做进一步的研究.

参 考 文 献

- [1] P. Hui and H. S. Tan, J. Appl Phys, 1994, **75**(2): 748~ 757.
- [2] P. B. Johns and R. L. Beurle, Proc Inst Electr Eng, 1971, **118**: 1203~ 1208.
- [3] S. Akhtarzad and P. B. Johns, Electron Lett, 1974, **10**(12): 535~ 537.
- [4] P. B. Johns, Int J Numer Model Eng, 1977, **11**: 1307~ 1328.
- [5] D. de Cogan and S. A. John, J. Phys D: Appl Phys, 1982, **15**: 1979~ 1990.
- [6] D. de Cogan and S. A. John, J. Phys D: Appl Phys, 1985, **18**: 507~ 516.
- [7] X. Gui, P. W. Webb and G. B. Gao, IEEE Trans Electron Devices, 1992, **39**(6): 1295~ 1302.

Thermo-Properties Simulation for Diamond Radiator in Semiconductor by TLM Method

Xie Zhikun

(Physics Department, Shaoxing College of Arts and Sciences, Shaoxing 312000)

Shen Jinjin, Chen Kangsheng

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Received 20 August 1997, revised manuscript received 11 March 1998

Abstract In this paper, the Transmission Line Matrix (TLM) method is applied to solve the thermal diffuse problems. For thermal simulation, complete TLM node models are presented and all kinds of boundary conditions are described, and the theory to analyse the thermal diffuse problems using TLM method is elaborated. As an application, a practical heat dissipation system using a cylindrical diamond thin-film heat spreader on a copper heat sink is numerically computed with the assumption that the diamond thermal conductivity is thermo-independent and thermo-dependent respectively.

EEACC: 0290, 1130, 2560, 2520