https://doi.org/10.1051/jnwpu/20193710107

基于数字微流控的芯片冷却模型与路径优化

王少熙, 阴玥, 樊晓桠

(西北工业大学 软件与微电子学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:使用微流控技术实现集成芯片冷却被认为是扩展摩尔定律生命力的一个方向。高密度热点的散热是制约芯片三维集成的瓶颈。热点通常具有不稳定的空间和时间分布性,是影响电子系统工作性能和导致故障的主要原因,如何针对热点准确冷却成为芯片热管理的关键。基于介电润湿原理,采用数字滴液微流控技术,提出芯片热点自适应冷却方法。构建双平面热点冷却器件的三维模型,分析了冷却热点的工作原理及特性;构建了单平面热点冷却器件的电容模型,并从电学角度深入分析了它的工作原理;设计了一种具有互锁齿结构的电极,从而保证了液滴的连续运动,针对热点动态分布提出滴液路径优化冷却,最后采用蚁群算法验证 2 个液滴遍历所有可能热点的最短路径。

关 键 词:微流控;冷却;优化;路径分析;模型

中图分类号:TH162 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2019)01-0107-07

半导体工艺和技术的进步推动现代电子系统向高性能和微型化方向发展。集成电路(ICs)中晶体管尺寸的减小促进系统性能、功耗和成本的改善,推动了半导体行业过去 50 年的发展。在过去的几十年中,集成电路发展遵循摩尔定律,即芯片的性能和集成度每 18 个月会增加 1 倍,而成本按比例减少[1]。然而随着特征尺寸减小和工作频率升高,互连电阻和封装密度继续增加,功耗也随之增加,在大规模集成电路中功耗的急剧增加导致很高的工作温度和大的热梯度,从而导致严重的可靠性问题[2]。研究指出,芯片的温度每升高 10℃,MOS 电流驱动能力将下降 4%,而互连 Elmore 延迟将会增加约 5%[3]。在某些情况下,存在局部热梯度甚至导致逻辑故障。

美国国防先进研究项目局(DARPA)从 2012 年开始支持一个名为片内/片间增强冷却(intrachip/interchip enhanced cooling fundamentals——ICECool)的项目。此项目旨在研发一系列突破性技术,以解决大量军用电子系统中的热极限问题,从而大幅度降低军用电子系统的体积、重量以及功耗。此项目被认为将在射频电路、高性能计算 CPU 以及大功率激光器等 3 个领域最先取得实际应用。其第一期研究目标是:通过在芯片内或堆叠芯片间制作蒸发微流道的方式,实现亚毫米级热点在至少 1 kW/cm^2 热通量下工作时的温度低于其警戒温度。该项目的核心是采用微流控技术实现冷却。

微流控芯片(microfluidic chip)或称为芯片实验室(lab on chip),是把化学和生物等领域中所涉及的样品制备、反应、分离、检测等基本操作单元集成到一块几平方厘米(甚至更小)的芯片上,由微通道或滴液形成网络,以可控流体贯穿整个系统,用以取代常规化学或生物实验室的各种功能的一种技术平台[4]。2004 年美国 Business 2.0 杂志在封面文章中把其列为“改变未来的七种技术之一”。2006 年 7 月 Nature 杂志发表了一期题为“芯片实验室”的专辑,从不同角度阐述了芯片实验室的研究历史、现状和应用前景,并认为芯片实验室可能成为“这一世纪的技术”[5]。如何提高散热效率,采用芯片三维集成继续延展摩尔定律的生命力,基于微流控技术的芯片冷却技术被认为是一种可能的方向。

美国有包括斯坦福大学、麻省理工大学、伦斯勒理工学院、马里兰大学、佐治亚理工学院高校和 IBM

收稿日期:2018-02-26

基金项目:陕西省工业科技攻关(2016GY-091)及西安市科技创新引导项目(201805042YD20CG2612)资助

作者简介:王少熙(1981—),西北工业大学副教授,主要从事生物微电子及可靠性算法研究。

等公司参与此方向的研究中,共同构建了芯片内部沸腾微流体以及 2 项微流体散热的二维、三维散热模型。在此理论基础上包括雷神公司、诺斯罗普·格鲁门公司、英国航空航天公司等军工企业巨头进行了技术实用性研究,分别针对 GaN 器件开展了从器件底层设计到封装方案的内嵌式散热方案开发。

诺斯罗普·格鲁门公司提出了一种芯片内微流喷射散热方式,其在每个晶体管下方集成一个微流喷射口,当器件高负荷工作时,微流喷口直接对着晶体管发热点喷射散热物质,从而实现高效率散热。此方案可使普通 SiC 衬底 GaN 器件工作在 68.5 W 下,对应热流密度达到 1 kW/cm^2。雷神公司提出了一种将 GaN 器件转移到高热导钻石衬底上,并在钻石衬底上键合微流道的方案,其中钻石微流道的宽度为 25 μm,深度达到 191 μm。此方案被证明可使 GaN 器件的晶体管峰值热流密度达到 38 kW/cm^2。英国航空公司提出了一种将 GaN 器件转移到超薄钻石衬底上,并键合在铜合金微流道散热器的方案,其中钻石衬底的厚度仅有 150 μm。此方案被证明可使 GaN 器件的晶体管峰值热流密度达到32.1 kW/cm^2,满足 ICECool 所提出的器件热流密度 1 kW/cm^2 的指标。

国内在微流控领域的研究主要集中在生物医药及化学分析等领域,散热方面尚无类似研究报道。相关散热方面的研究有中电集团 43 所、中国科技大学、吉林大学等。中电集团 43 所曾研究陶瓷烧结式微流道散热器,但受限于低温共烧陶瓷(LTCC)的热导率,其对大功率器件的散热能力提升非常有限,且无法实现芯片内集成。吉林大学的研究为在金属材料上采用电火花加工微流道进行电子器件散热,也同样无法实现芯片内集成微流散热。中科大研究硅基微流道沸腾散热的基础模型与可视化观测平台,但受限于工艺手段,所加工的微流道在亚毫米量级(百微米)并未接触到微米尺度流道的特性,且无进一步器件散热探索。具有高热量的热点在电子系统中普遍存在,对系统性能和可靠性有严重影响,热点通常具有不稳定的空间和时间分布性,移动热点是影响电子系统工作性能和导致系统故障的主要原因,现有的热点冷却技术不能充分解决移动热点问题。本文根据介电润湿(EWOD)[6]的工作原理,提出一种基于数字滴液微流控的自适应冷却技术[7];其次构建了基于介电润湿的热点冷却模型,包括双面 EWOD 结构和单面 EWOD 结构;最后优化液滴的运动路径,利用蚁群算法验证 2 个液滴遍历所有可能热点的最短路径。

1 原 理

数字微流控器件对液滴的驱动是通过固液界面的介电润湿原理实现的,介电润湿就是利用电压来改变固液界面张力和接触角,从而控制液滴在固体表面的亲疏水状态。该原理可以用来驱动液滴运动。我们对液滴施加一个外加电压,在外加电压的作用下,液滴会在固液界面积累一定的静电荷,由于这些静电力作用在液体表面的分子上,会产生同性的排斥力,抵消了一部分液滴分子表面的内聚力,从而减小了液体表面的自由能和固液界面张力,固液界面的接触角会随之减小。这种现象称为介电润湿(EWOD:electro-wetting on dielectric)。

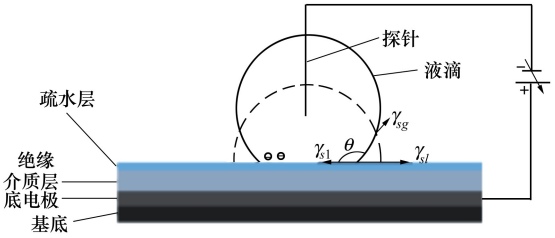


图 1 加电压后固-液界面接触角变化

如图 1 所示,实线表示液滴在疏水表面的初始状态(未加电压),虚线表示加电压之后的液滴,可以看出,当给液滴通过探针施加电压 V 时,固 - 液界面之间的表面张力减小(γ_{sl} 减小),其关系可由 Lippmann-Young 方程描述为:

$$\gamma_{sl}(V)=\gamma_{sl}-\varepsilon_0\varepsilon_r V^2/2d \tag{1}$$

$$\cos\theta=\frac{\gamma_{sg}-\gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \tag{2}$$

式中,γ_{sl} 是施加电压 V 之后固 - 液之间的表面张力,ε_0,ε_r 分别是真空的介电常数和介质层的有效介电常数,d 是疏水介质层有效厚度。由于疏水固体/液滴表面张力变小,导致液滴的接触角变小。此时有

$$\cos\theta(V)=\frac{\gamma_{sg}-\gamma_{sl}(V)}{\gamma_{lg}}=\cos\theta_0+\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r V^2}{2d\gamma_{lg}} \tag{3}$$

式中,θ_0 是未加电压时的接触角,由等式(3)可得,液滴的接触角随外加电压绝对值的增大而减小,且与介质层的厚度及介电常数都有关。通过介质层和

疏水层的选择,可以实现固液界面从疏水到亲水的变化。研究人员常使用 Su-8(5 μm)作为 EWOD 的绝缘介质层,并且在电介质上涂覆薄层的特氟隆用于疏水层。实验表明,当电压值较低时,液滴的接触角与电压的关系满足(3)式,但是当电压增大到一定的程度后,接触角会出现饱和现象,即接触角不再随电压绝对值的增大而减小,此外,当电压增大到超过芯片的额定电压时,会将介质层击穿,器件将不能工作。

2　制造过程

本文将介电润湿应用于三维芯片集成系统中有效而精确的热点冷却,位于电介质表面下的电极阵列为液滴的运动提供了精确的控制,通过连续或顺序地激活电极使它们成为驱动或参考电极,使得液滴能够沿着表面上的任何所需的流动路径在任何方向上移动。EWOD 驱动的特征是每个电极元件上的致动是局部的,液滴实际上逐一经过每个单元,形成数字微流体,也即数字化热传递。由于不需要压力源,所以不需要微通道、微型泵或微型阀就可以构建一个 EWOD 的微流体系统。这大大简化了冷却系统的设计和制造,提供了便携式系统的可能性。介电润湿的另一个优点是电流极低(<1 nA),使得 EWOD 器件具有低功耗。基于 EWOD 的热管理系统大大增强了高密度电子系统的性能,这些功能使系统设计人员在低温下操作器件,提高了器件性能、寿命等。

2.1　双平面数字微流体冷却模型

如图 2 所示,这种结构具有非常薄的尺寸,它只需要 2 个平行的平面芯片,这 2 个芯片被夹在中间的冷却液滴形成的小空间(通常 100 μm 左右)分开,因此可以在三维集成电路的堆栈之间集成,并且有效地从堆栈中移除热量。

这种热点冷却设备由上层芯片和下层芯片组成,芯片在洁净室中使用传统的薄膜半导体制造技术制造,下层芯片包括模拟热点的 ITO(铟锡氧化物)加热器,且还兼作 RTD(电阻温度检测器),电极与加热器对准用铬来图案化。电极可以限定液滴运动的路径,使用 Su-8(5 μm)作为电介质,在电介质上涂覆聚四氟乙烯用于疏水性。同时,上层芯片完全涂覆 ITO 作为地电极,且附着聚四氟乙烯作为疏水层。

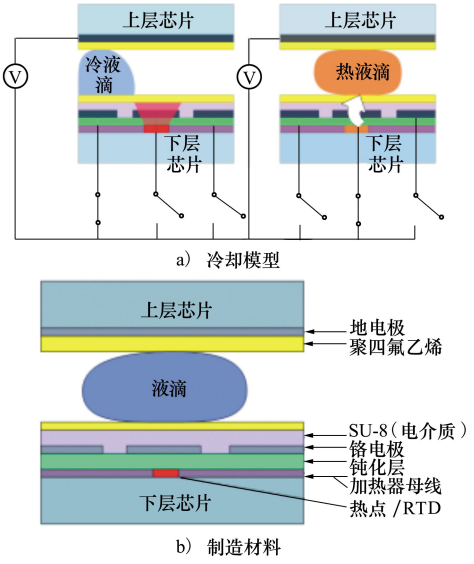


图 2　双平面数字微流体冷却模型

热点冷却开始于运行芯片并在入口储存器电极中分配液体,通过使用特定的电压控制模式,从储存器一定量的液体中分离出一个个液滴并沿着指定路径通过热点,最后携带热点热量的液滴送到出口储存器,液滴可以循环利用。一旦液滴离开热点,就可以让另一个液滴过去,对多个液滴重复该过程,使芯片各处的温度保持稳定,许多液滴可以在可重构的流动路径和流速下流动以消除热不均匀性。

2.2　单平面数字微流体冷却模型

与双平面冷却器件相比,单平面设计导致相对较低的流动摩擦(仅由底板产生),因此可以实现低电压 EWOD 操作。优化的电极设计对于实现即时和低电压液滴驱动至关重要,为了促进液滴的连续传输,设计了具有互锁图的共面控制电极,如图 3 所示:

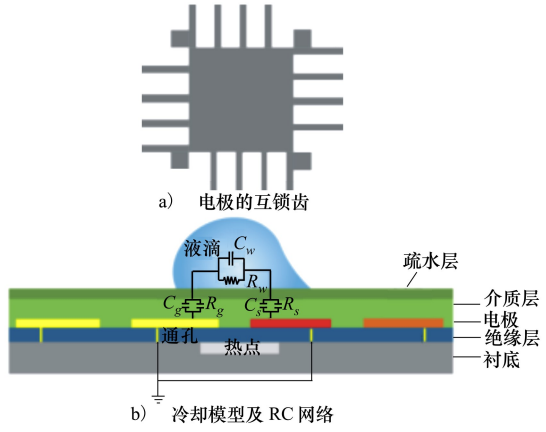


图 3　单平面数字微流体冷却模型

每个电极单元为 3 mm×3 mm,电极间距确定每个 EWOD 移动的单位长度,互锁齿高 1 mm,并向外延伸。这些交叉齿可以促进液滴在相邻电极之间的连续运动。此外,共面电极允许通过导线的简单电连接,各个电极被布置成与下面的热点和 RTD 重叠,为了使控制电极与下面的加热器与 RTD 绝缘,可以通过等离子体增强化学气相淀积(PECVD)在加热器和 RTD 的顶部沉积 1.5 μm 厚的 SiO_2 层,通过这种重叠布置,可以精确地将液滴传送到热点顶部(而不是通过热点),由于水的比热是空气的 3 倍,水冷效果优于空气散热,因此冷却效果显著提高。随后通过 PECVD 在控制电极阵列的顶部淀积 0.25 μm 厚的 Si_3N_4 作为电介质层。PPECVD 辅助介电沉积有效地减少了空隙的数量,避免了液滴和控制电极之间的传导路径。随后使用 50 nm 的聚四氟乙烯产生疏水表面,接着,通过离子反应刻蚀(RIE)选择性地刻蚀 Si_3N_4 层分别暴露用于控制电极阵列、加热器和 RTD 的 Au 接触焊盘。然后,设备通过引脚连接到控制器,定制的 DC/AC 电压控制器具有鼠标控制接口,可在各个通道上提供 0~100 V 的电压。

2.3 驱动原理

基于 EWOD 的液滴微流体可以使用直流或者低频交流电压进行操作,作为驱动电极的分配需要将相邻电极指定为接地或参考电极以产生包含液滴的电路,从而能够施加制动电压。在直流电压特别是高电场(例如 5×10^6 V/m)下,为了保护电介质材料,使用间歇的致动机构,电压只施加一次时间为 250 ms。当液滴到达目标单元时,即预定义 250 ms 后,电源将自动关闭。由于电润湿反应时间在几毫秒,所以 250 ms 的电脉冲足够长以激活液滴。这种瞬时激活机制可以避免在电极上长时间施加高电场,否则将不可逆地极化并永久损坏电介质层。或者可以将电介质厚度增加在 0.5~1 μm 的范围内,使其能够承受更高的电压而不会严重损坏。

为了减小介电极化的副作用,也可以施加交流电压驱动液滴。交流信号不仅对极化衰减非常有效,而且可以减少芯片表面的电解。除了被激活的电极,其他电极均保持地电位。施加 AC 电场后,材料的电学性能可以由电阻 R 和关联的电容 C 来表示。图 3b)显示了 EWOD 系统的电阻电容网络,其中致动电极下方的电介质层、接地电极下方的电介质层以及液滴本身的电阻和电容由(4)~(5)式给出:

$$C_a = \frac{\varepsilon_0 \kappa_d A_a}{h}, C_g = \frac{\varepsilon_0 \kappa_d A_g}{h}, C_w = \frac{\varepsilon_0 \kappa_w A_w}{h_w} \tag{4}$$

$$R_a = \frac{h}{\sigma_d A_a}, R_g = \frac{h}{\sigma_d A_g}, R_w = \frac{h_w}{\sigma_w A_w} \tag{5}$$

式中,(κ_d, σ_d) 和 (κ_w, σ_w) 分别是介电材料(Si_3N_4)和液滴(水)的介电常数及电导率。A_a 和 A_g 分别是致动电极和接地电极焊盘上液滴的面积,且有 $A_w = (A_a + A_g)/2$,h 是电介质厚度,h_w 是 A_a 和 A_g 之间的中心距离。3 个区域的阻抗分别定义为:

$$Z_a = \frac{R_a}{1 + \mathrm{i}(\omega R_a C_a)}$$

$$Z_g = \frac{R_g}{1 + \mathrm{i}_g C_g)}$$

$$Z_w = \frac{R_w}{1 + \mathrm{i}(\omega R_w C_w)} \tag{6}$$

式中,$\omega = 2\pi f$,是 AC 电压的角频率。在开放板配置中,Z_a,Z_g 和 Z_w 串联连接,RC 网络的总电容由(11)式表示

$$C_{总} = \frac{1}{\mathrm{i}\omega(Z_a + Z_g + Z_w)} \tag{7}$$

存储在系统中的总能量可表示为:

$$E = \frac{1}{2} C_{总} V^2 \tag{8}$$

因此,此能量对液滴产生的横向(x 方向)驱动力为

$$F = \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} \tag{9}$$

为了传输液滴,共面电极按顺序激活,如图 3b)所示,左边电极被设定为接地电极,而相邻的右边电极被施加驱动电压,液滴的表面接触角在与驱动电极接触的部分改变,由此产生的力驱动液滴沿着驱动电极的方向移动。已知流体性质和施加的电压频率影响驱动力的大小,研究表明,驱动力随着电压频率的增加而减小,在高于 12 000 Hz 的临界频率时,液滴不会产生任何显著的致动力。当液滴的中心到达接地电极和驱动电极之间的间隙时,液滴上的净力反转其方向,阻止液滴进一步向前运动。为了克服这种阻力,提出了如下策略:当液滴到达电极之间的间隙时,将驱动电极切换到接地模式,同时切换下一个相邻的电极到驱动模式。通过切换适当的电极顺序以及时序控制,液滴就能始终在向前的驱动力作用下向前运动。这种共面电极作为接地原件和驱动原件的可互换使用避免了额外的接地电极的

制造。

为了使共面致动策略起作用,液滴直径必须至少为电极间距的两倍。液滴尺寸和电极间距的缩放关系允许我们通过修改电极几何形状来开发和实现更小尺寸的 EWOD 器件。液滴体积主要取决于电极间距大小,通过选择适当的电极间距尺寸,可以生成并传输各种体积的液滴到达目标热点。更大的液滴可以通过 EWOD 控制的单个液滴的合并形成。

3　路径优化

通过控制连接电极开关的闭合与断开可以控制电极是否有电压,进而影响液滴的运动,为了有效地冷却热点,在热点顶部精确输送液滴至关重要,任何与目标的偏差将显著降低冷却效果。与其他方法相比,可编程 EWOD 方法由于其数字特征和目标导向能力,导致芯片散热能力高。此外,由自动化编程控制,可以独立地操纵多个液滴,甚至可以并行传输多个目标。为了将热点的温度保持在目标以下,需要依次连续输送液滴到热点表面。我们希望找到一条可以遍历所有可能热点的最优路径,此路径的距离是最短的,这里考虑有 2 个液滴的情况,忽略液滴流过热点可能引起的蒸发等。

液滴遍历热点的模型与著名的 TSP 问题(traveling salesman problem)[8] 类似,我们将 TSP 模型应用到液滴最优遍历路径上,通过对比可知,电极对应的位置(可能热点位置)相应于各座城市,假设液滴在移动的过程中可以像蚂蚁一样释放信息素,目标就是液滴的最短哈密顿回路。

3.1　基本参数设置

设液滴的个数为 m,可能热点的数量为 n,热点 i 与热点 j 之间的距离为 d_{ij},t 时刻热点 i 与热点 j 之间的信息素浓度为 $\tau_{ij}(t)$,初始时刻,各个热点之间的信息素浓度相等,假设为 $\tau_{ij}(0)=1$,液滴 k 根据各个热点之间的信息素浓度,决定其下一个要访问的热点,设 $P_{ij}^{k}(t)$ 为 t 时刻,液滴 k 从热点 i 到热点 j 的概率,其计算公式如下

$$p_{ij}^{k}=\begin{cases}\dfrac{[t_{ij}(t)]^{\alpha}\cdot[\eta_{ij}(t)]^{\beta}}{\sum\limits_{s\in \text{allow}}[t_{ij}(t)]^{\alpha}\cdot[\eta_{ij}(t)]^{\beta}} & s\in \text{allow}_k\\ 0 & s\notin \text{allow}_k\end{cases} \tag{10}$$

式中,$\eta_{ij}(t)$ 为启发式函数,$\eta_{ij}(t)=1/d_{ij}$ 表示液滴从热点 i 转移到热点 j 的期望程度;$\text{allow}_k(k=1,2,\cdots,m)$ 表示液滴 k 待访问的热点的集合,开始时,allow_k 为其他 $(n-1)$ 个热点,随着时间的推移,其中的元素不断减少,直至为空,表示所有的热点访问完,即遍历所有热点;α 为信息素的重要程度因子,其值越大,表示信息素在转移中所起的作用越大;β 为启发函数的重要程度因子,其值越大,表示启发函数在转移中所起的作用越大,即液滴以较大的速度转移到距离短的热点;液滴释放的信息素会随时间的推进而减少,设参数 $\rho(0<\rho<1)$ 表示信息素的挥发度,当所有液滴完成一次循环后,各个热点连接路径上的信息素浓度需要及时更新。

$$\tau_{ij}(t+1)=(1-\rho)\tau_{ij}(t)+\Delta\tau_{ij},\Delta\tau_{ij}=\sum_{k=1}^{n}\Delta\tau_{ij}^{k} \tag{11}$$

式中,$\Delta\tau_{ij}^{k}$ 表示液滴 k 在热点 i 和热点 j 的连接路径上,释放的信息素浓度,$\Delta\tau_{ij}$ 表示所有液滴在热点 i 和热点 j 的连接路径上释放的信息素浓度。$\Delta\tau_{ij}^{k}$ 的计算方法为:

$$\Delta\tau_{ij}^{k}=\begin{cases}\dfrac{Q}{L_k} & \text{第 } k \text{ 个液滴从热点 } i \text{ 访问热点 } j\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{12}$$

式中,Q 为常数,表示液滴循环一次释放的信息素总量;L_k 表示第 k 个液滴经过的路径的长度。

3.2　算法实现步骤

1) 初始化参数

液滴数量 m,信息素重要程度参数 α,启发式因子重要程度参数 β,信息素蒸发系数 ρ,最大迭代次数 NC_max,热点坐标矩阵 $\boldsymbol{C}$,对于 $i=j$,即自己到自己的距离不能给为零,而是给成一个很小的距离,以确保启发式函数 $\eta_{ij}(t)=1/d_{ij}$ 能顺利进行。

2) 构建解空间

将各个液滴置于不同出发点,对每个液滴按照公式(7),确定下一热点。

3) 更新信息素

计算各个液滴经过的液滴长度 L_k,记录当前迭代次数中的最优解(即最短路径),根据公式(8) 更新信息素.

4) 判断是否终止

若没有到最大次数,则清空液滴经过路径的记录表,返回步骤 2)。

3.3 实验结果与分析

编写程序并在 MATLAB 上运行,得到结果如下:

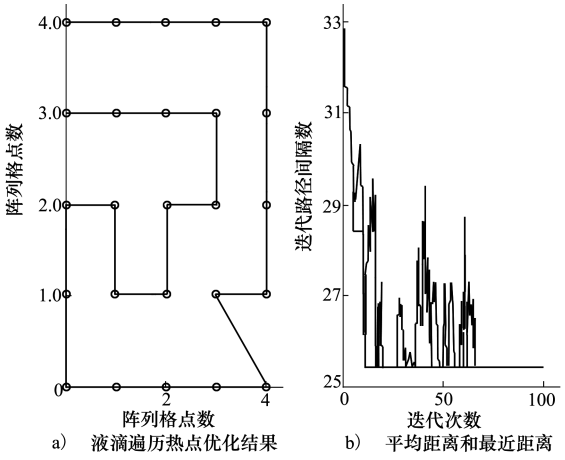


图 4 液滴遍历热点的优化结果以及平均距离和最短距离

由图 4 结果可知,对于 5×5 个可能热点的阵列(假设相邻热点之间的距离为 1),在 2 个液滴的同时作用下,要遍历所有热点的最短距离是 25.414 2,单位是设置阵列的间隔距离,因阵列设置不需要具体单位,因此这里仅表示间隔数。这只是一个可能的最优解,并不是最终的最优解,因为随着液滴数量以及迭代次数的增加,得到的结果会更加接近最优解,但是在热点冷却模型中,我们要追求的不仅是最短距离,更是热点冷却速度,所以设置的液滴数量以及迭代次数应当视具体情况而定。

液滴遍历热点的优化结果中左图中线条表示液滴遍历的路径,每个坐标点都表示一个可能热点。对于不同热点位置,可以将此点的位置抽象为坐标点,改变程序中的阵列从而得到具体情况下的最优遍历路径。平均距离与最短距离图中,右图中线条表示每次迭代使得到的平均路径长度,右图边缘线条表示最短距离。可以看到,平均距离比最短距离高得多,这是因为一些液滴的路径顺利,距离相应变短,而一些液滴路径不是很顺利,路径会很长,最终的最短距离趋近于一个定值,也就是液滴遍历热点的最短距离。从右图边缘线可以看出,直到迭代次数超过 50 次,算法收敛结束之前,其收敛速度也很慢。

4 结 论

散热是芯片三维集成的重点考虑问题,严重影响了系统的性能与可靠性。由于热点时间与空间的不可知性,目前的冷却方法难以实现热点冷却。本文提出了一种基于数字微流控的热点冷却方法,使用液滴作为冷却介质具有灵活性、自适应性的冷却特点。基于介电润湿现象(通过控制施加到液滴的电场来改变液滴的接触角与界面张力,从而利用压力差促使液滴运动),提出了 2 种热点冷却模型,分别是双平面热点冷却模型与单平面热点冷却模型。论文构建双平面热点冷却器件的三维模型,分析了冷却热点的工作原理及特性;构建了单平面热点冷却器件的电容模型,并从电学角度深入分析了它的工作原理;设计了一种具有互锁齿结构的电极,从而保证了液滴的连续运动,并且分析得到液滴的尺寸应该大于电极间距这一结论;从直流电和交流电的应用分析驱动原理和对电介质的影响。最后研究了液滴的路径优化,构建了液滴遍历所有可能热点的模型,采用蚁群算法进行了两滴液案例的验证。

参考文献:

[1] EMMA P G, KURSUN E. Is 3D Chip Technology the Next Growth Engine for Performance Improvement? [J]. IBM Journal of Research & Development, 2008, 52(6): 541-552

[2] WAN Z, WEN Y, JOSHI Y, et al. Enhancement in CMOS Chip Performance through Microfluidic Cooling[C]//International Workshop on Thermal Investigations of ICS and Systems, 2014: 1-5

[3] WEN Y, WAN Z, HE X, et al. Active Fluidic Cooling on Energy Constrained System-on-Chip Systems[J]. IEEE Trans on Components Packaging & Manufacturing Technology, 2017, 7(11): 1813-1822

[4] OH H, ZHANG Y, SARVEY T E, et al. High-Frequency Analysis of Embedded Microfluidic Cooling within 3-D ICs Using a TSV Testbed[C]//2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference, 2016: 68-73

[5] DAW R, FINKELSTEIN J. Lab on a Chip[J]. Nature, 2006, 442(7101): 367-367

[6] BINDIGANAVALE G S. Study of Hotspot Cooling for Integrated Circuits Using Electrowetting on Dielectric Digital Microfluidic

System[D]. Gradworks, The University of Texas at Arlington, 2015
[7] PARK S Y, NAM Y. Single-Sided Digital Microfluidic (SDMF) Devices for Effective Coolant Delivery and Enhanced Two-Phase Cooling[J]. Micromachines, 2016, 8(1):3
[8] NÖHRING F. Traveling Salesman Problem[J]. Operations Research, 2007, 4(1):61-75

The Chip Cooling Model and Route Optimization with Digital Microfluidics

WANG Shaoxi, YIN Yue, FAN Xiaoya
(School of Software and Microelectronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Using microfluidic technology to achieve integrated chip cooling is becoming a promising method to extend Moore law effective period. The thermal management is always critical for 3D integrated circuit design. Hot spots due to spatially non-uniform heat flux in integrated circuits can cause physical stress that further reduces reliability. The critical point for chip cooling is to use microfluidic cooling accurately on the hot spots. First, based on electro-wetting on dielectric, the paper presents an adaptive chip cooling technique using the digital microfluidics. Then, a two-plans 3D chip cooling model has been given with its working principle and characteristics. And single plan chip cooling model is presented, including its capacitance performance and models. Moreover, the dentate electrode is designed to achieve droplet continuing movement. Next, the ant colony optimization is adopted to get optimal route during electrode moving. Last, the experiments demonstrate the adaptive chip cooling technique proposed in this paper is effective and efficiency.

Keywords: microfluidics; chip cooling; model; route analysis; ant colony optimization; electro-wetting

© 2019 Journal of Northwestern Polytechnical University.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.