

# 基于遗传算法的电子元器件优化布局

朱国玺,刘贵喜,赵 地

ZHU Guo-xi, LIU Gui-xi, ZHAO Di

西安电子科技大学 自动控制系,西安 710071

Department of Automation, Xidian University, Xi'an 710071, China

E-mail: zhuguoxi@hotmail.com

ZHU Guo-xi, LIU Gui-xi, ZHAO Di. Placement optimization of electronic components based on genetic algorithm. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(17): 100-103.

**Abstract:** The model for temperature field of electronic components in the printed circuit board has been given using the thermal equation of microelement units. Gauss-Seidel iterative technique has been employed to solve the linear equations set. With the use of an improved Genetic Algorithm (GA), the optimal placement of the electronic components has been obtained. The simulation results show the temperature stress is reduced and the reliability is improved greatly. In addition, the steady temperature field of the components in PCB has been also analyzed with the thermal analysis software. The results show the model and algorithm for optimizing the components layout are effective.

**Key words:** Genetic Algorithm; thermal equations of microelement units; Gauss-Seidel iterative method; placement optimization

**摘 要:** 用微元体热平衡法建立电路板上元件温度场求解的数学模型,采用高斯-赛德尔迭代法求解热平衡方程组。用改进的遗传算法对元件布局进行优化设计,仿真实验表明全局优化大大降低了系统的温度应力,提高了系统的可靠性。此外,用 Flotherm 软件模拟了电路板的温度场,验证了优化布局模型

和算法的有效性。

**关键词:** 遗传算法;微元体热平衡方程;高斯-赛德尔迭代法;优化布局

文章编号:1002-8331(2007)17-0100-04 文献标识码:A 中图分类号:TP302.7;O482.22

随着集成电路技术的不断发展,微电子器件封装密度不断提高,电子设备中元器件的温度应力严重影响其可靠性。资料显示<sup>[1]</sup>,电子设备的失效因素中,有 55% 是温度超应力引起的。统计数据表明,民航电子设备温度每降低 1℃,其失效率将下降 4%,由此可见热优化设计是十分重要的。在自然对流的情况下,电子元件位置的优化设计是热设计中最有效的方法之一,但就目前国内外研究的状况来看,还没有一个成熟的理论和数学方案,许多热设计是根据实验和经验来确定的,其通常是全部设计完毕后,通过实验测量验证再修改设计布局,这使设计成本大大增加,而且不能保证器件布局方案的最佳。遗传算法是全局优化算法,对大规模的组合优化问题尤其适用,它描述简单、使用灵活、运算效率高。本文用遗传算法优化电子元件的位置布局来降低最大温度分布、降低局部温度应力,从而提高整个系统的可靠性,为电子装备的优化设计提供了一种新的可用方案。

## 1 电子系统热分析数学模型

考虑一块电路板上若有若干相联的电子元件,用热电阻网络来模拟计算温度场<sup>[1-5]</sup>。由于系统中每个电子单元都产生热,这

些热一部分传给邻近的单元,一部分通过对流被空气带走。在热产生、热传导和对流冷却效应之间存在热平衡,可以用导热微分方程描述元器件稳态热物理现象,但是微分方程组求解比较困难,所以在工程中用差分方程或者微元体热平衡方程代替导热微分方程。这里微元体热平衡法比节点差分方程更为合适<sup>[2]</sup>,所以用微元体热平衡方程代替导热微分方程来求解各节点的温度。假设每个元器件在给定的时间内可以达到稳定的温度。在数学模型中,矩形板上划分了均等的网格,并假设每个网格点或节点 $(i, j)$ 代表一个电子元件 $(i, j=1, 2, \dots)$ ,是确定节点位置的编号,每一个元器件作为一个微元体,根据微元体能量平衡原理<sup>[2]</sup>推导出各节点的节点方程。以内部节点 $(i, j)$ 为例,如图 1 所示,假定垂直于纸面的第三维方向为一单位长度,那么从节点 $(i+1, j)$ 导入节点 $(i, j)$ 的热量

$$Q_{i+1,j} = \frac{t_{i+1,j} - t_{i,j}}{\frac{\Delta x}{\lambda_0 \Delta y}} \quad (1)$$

式中,分母表示节点 $(i+1, j)$ 与节点 $(i, j)$ 之间的导热热阻; $\lambda_0$ 是节点之间的传热系数; $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 是横轴和纵轴方向网格大小尺寸; $t_{i+1,j}$ 、 $t_{i,j}$ 是节点 $(i+1, j)$ 、 $(i, j)$ 的温度。类似地可以分别得到节

基金项目:国家部委基金资助项目(the Pre-Research Foundation of China Ministries and Commissions)。

作者简介:朱国玺(1976-),男,硕士生,研究方向为嵌入式计算机系统设计与刘贵喜(1966-),男,教授,研究方向为现代信号处理、机器视觉、智能控制;赵地(1979-),男,硕士生,研究方向为嵌入式计算机系统低功耗设计。

$(i-1,j), (i,j+1), (i,j-1)$  导入节点  $(i,j)$  的热量表示式。

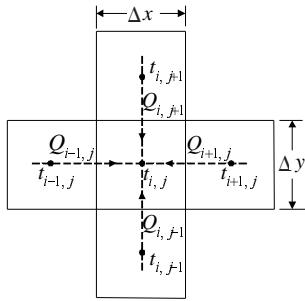


图1 内部节点

假设节点垂直于纸面的方向为对流换热<sup>[6]</sup>,并假定外界的空气温度为  $t_\infty$ ,垂直于纸面方向的空气与节点  $(i,j)$  之间的换热系数为  $\alpha_\infty$ ,则垂直于纸面方向导入节点  $(i,j)$  的热量是:

$$Q_\infty = \alpha_\infty \Delta y (t_\infty - t_{i,j}) \quad (2)$$

如果节点  $(i,j)$  是一个单位时间产生热量为  $q_{i,j}$  的热源节点,在稳定状态下,根据能量平衡原理应该有:

$$Q_{i+1,j} - Q_{i-1,j} + Q_{i,j+1} + Q_{i,j-1} + Q_\infty + q_{i,j} = 0 \quad (3)$$

即

$$\frac{t_{i+1,j} - t_{i,j}}{\Delta x} + \frac{t_{i-1,j} - t_{i,j}}{\Delta x} + \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j}}{\Delta y} + \frac{t_{i,j-1} - t_{i,j}}{\Delta y} + \alpha_\infty \Delta y (t_\infty - t_{i,j}) + q_{i,j} = 0 \quad (4)$$

以上方程是对于内部节点而言,在实际情况中一般还会有直线边界节点和  $90^\circ$  拐角边界节点,下面先介绍用微元体热平衡法处理对流换热的直线边界节点。由图 2 可以看出,节点  $(i-1,j)$  导入节点  $(i,j)$  的热量是不变的,由节点  $(i,j+1)$  导入节点  $(i,j)$  的热量是:

$$Q_{i,j+1} = \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j}}{\Delta y} \quad (5)$$

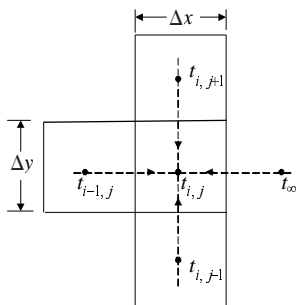


图2 直线边界节点

这只是理论上的结果,这里用节点代表的是电子元件,不会有半个节点出现,所以由节点  $(i,j+1)$  导入节点  $(i,j)$  的热量仍然是:

$$Q_{i,j+1} = \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j}}{\Delta y} \quad (6)$$

类似地可以得到节点  $(i,j-1)$  导入节点  $(i,j)$  的热量。边界方向导入节点  $(i,j)$  的热量可以表示为

$$Q_\infty^b = \alpha_\infty^b \Delta y (t_\infty^b - t_{i,j}) \quad (7)$$

这里  $\alpha_\infty^b$  是边界方向空气与节点之间的换热系数; $t_\infty^b$  是边界方向的环境温度。同样如果节点  $(i,j)$  是一个单位时间产生热量为

$q_{i,j}$  的热源节点,在稳定状态下,根据能量平衡原理应该有:

$$\frac{t_{i-1,j} - t_{i,j}}{\Delta x} + \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j}}{\Delta x} + \frac{t_{i,j-1} - t_{i,j}}{\Delta x} + \alpha_\infty \Delta y (t_\infty - t_{i,j}) + \alpha_\infty^b \Delta y (t_\infty^b - t_{i,j}) + q_{i,j} = 0 \quad (8)$$

$$\alpha_\infty^b \Delta y (t_\infty^b - t_{i,j}) + q_{i,j} = 0$$

实际中的  $90^\circ$  拐角边界节点(图 3)只是比上一种情况多一个边界节点热交换,少一个内部节点热交换,所以很容易得出  $90^\circ$  拐角边界节点  $(i,j)$  的能量平衡方程:

$$\frac{t_{i-1,j} - t_{i,j}}{\Delta x} + \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j}}{\Delta x} + \alpha_\infty \Delta y (t_\infty - t_{i,j}) + 2\alpha_\infty^b \Delta y (t_\infty^b - t_{i,j}) + q_{i,j} = 0 \quad (9)$$

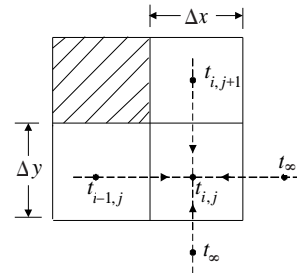


图3 直角边界节点

通过以上对各种微元体节点的分析,可以对整个电路板上的元件分别列出方程,组成线性方程组。假设  $\mathbf{t} = [t_{1,1}, t_{1,2}, \dots, t_{1,j}, t_{2,j}, \dots, t_{i,j}, \dots, t_{i,j}]^T$  是一维列向量,这里表示“ $T$ ”转置, $I$  是微元体的行数, $J$  是微元体的列数; $A$  是  $\mathbf{t}$  的  $IJ$  列的系数矩阵; $B$  是方程等式右边常量组成的一维向量。于是线性方程组可以表示为  $A\mathbf{t} = B$ 。

线性方程组可以采用迭代法求解,迭代法又分为简单迭代法和 Gauss-Seidel 迭代法,迭代过程中 Gauss-Seidel 迭代法是每当求得一个新值以后立即将该新值代入本次循环的计算中去,而不是留至下一循环中使用,因此它比简单迭代法收敛得快,而迭代次数减少。这里采用 Gauss-Seidel 迭代法求解稳态下的温度值。

## 2 改进的遗传优化算法

遗传算法是模拟生物进化过程的计算模型,在求解组合优化问题上显示了良好的搜索性能,作为一种新的全局优化搜索算法以其简单通用、搜索能力强、鲁棒性好以及隐并行性等显著特点受到广泛重视和研究<sup>[7]</sup>。使用该算法的难点是如何将具体问题映射成适于该算法的编码以及根据编码进行各种操作。这里针对文中的问题提出遗传算法的改进方法。

文中每一元件单位时间内稳态发热量是已知的、确定的,且是不完全相等的。要做的是如何优化这些元件的摆放布局,才能使稳态下所有元件的温度场中最高温度值最小。这是多目标优化问题<sup>[8]</sup>,这里将  $IJ$  个元件布局次序作为编码对象,一种布局次序对应一种不同发热功率元件的布局方法,分别用 Gauss-Seidel 迭代法求出每种布局次序对应的目标函数值(最高温度值)。

这里与一般遗传算法的主要不同是遗传算子中的交叉(crossover)和变异(mutation)操作。交叉是遗传算法中最主要的遗传操作。对于选中用于繁殖后代的个体,程序按照一定的概率随机选择交叉点  $k$  (crossover point),由于这里染色体代表的是元件布局次序,所以交换两个基因位置  $k$  的值的的同时,每个染色体要保证交叉前后所代表的每种元件的数目不变(图 4),

即这里的交叉操作带有约束条件。产生的两个新个体组合了其父代的特性,也增加了群体的数量。

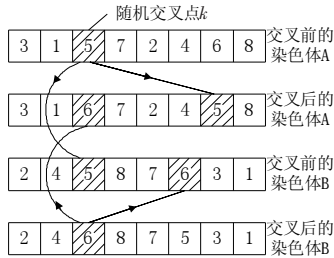


图4 有约束的交叉算子

当群体规模较大时,在交叉的基础上引入适当的变异,不仅能保证引入有用的“新信息”,而且适当地提高了遗传算法的搜索效率。变异操作是按位进行的变异,发生的概率极低。由于这里的染色体代表的是元件的布局次序,所以这里的变异操作实际上是一个染色体的随机两位互换(图5)。当变异与选择、交叉算子结合在一起,就能避免由繁殖和交叉算子引起的某些信息的永久性丢失,保证算法能搜索到问题解空间的每一区域,从而使算法达到全局最优。本文算法中种群规模是100个,经过200代遗传操作得到要求的解。

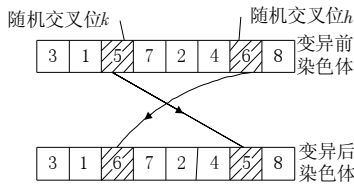


图5 有约束的变异算子

在解决此类优化组合问题时,退火算法在文献中也得到应用<sup>[4]</sup>。但是,模拟退火算法中控制参数 $t$ 很难选择,尤其 $t$ 的初值更难确定<sup>[5]</sup>;由于模拟退火算法的搜索过程是随机的,且当控制参数 $t$ 值较大时可以接受部分恶化解,而随着 $t$ 值的衰减,恶化解被接受的概率逐渐减少直至趋于零。另一方面,某些当前解要达到最优解时必须经过暂时恶化的“山脊”。因此无法保证算法所得最终解必定是最优的。特别地,甚至无法保证最终解正好是整个搜索过程中曾经达到过的最优解<sup>[5]</sup>。对于多极值问题,这种情况更为突出。

### 3 仿真实验与结果分析

实验中,印制电路板上(尺寸为长230 mm,宽230 mm,厚1.6 mm)有25个元件,每个元件长宽均为10 mm(长宽也可以不相等),厚2.5 mm,选择 $Q_1=0.4 \text{ W/cm}^3$ 、 $Q_2=1.2 \text{ W/cm}^3$ 、 $Q_3=2.0 \text{ W/cm}^3$ 和 $Q_4=2.7 \text{ W/cm}^3$ 四种功耗密度的元件,见图6,图中25个大矩形代表25个元件,它们之间间距是30 mm,5行5列布局,每个元件的数字是元件排列顺序编号,左边是初始功率布局,右边是优化后的功率布局。

环境温度 $t_\infty=20^\circ\text{C}$ ;初始温度也为 $t_0=20^\circ\text{C}$ ;边界温度也是 $t_\infty=20^\circ\text{C}$ 。采用空气自然对流方式散热。本文所用遗传算法采用MATLAB6.5编程,图6是用遗传算法优化前后元件的布局图。初始布局是作者根据经验手工进行的布局。用上述的热分析数学模型计算出初始布局的PCB板上各元件温度,其中最高温度是 $63.9843^\circ\text{C}$ ,平均温度是 $43.5226^\circ\text{C}$ ,最低温度 $31.4594^\circ\text{C}$ ;用同样数学模型计算出优化布局后PCB板上各元件温度,其

中最高温度是 $51.9946^\circ\text{C}$ ,平均温度是 $42.5637^\circ\text{C}$ ,最低温度 $32.3402^\circ\text{C}$ 。优化前后的温度变化见表1。

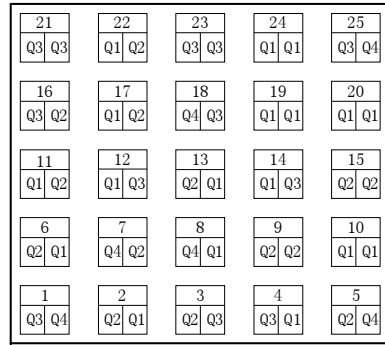


图6 不同功率密度的元件的布局(左边是初始布局,右边是优化布局)

表1 优化布局前后由数学模型求解温度的变化

	最高温度	平均温度	最低温度
初始布局温度/ $^\circ\text{C}$	63.984 3	43.522 6	31.459 4
优化布局温度/ $^\circ\text{C}$	51.994 6	42.563 7	32.340 2
绝对差/ $^\circ\text{C}$	11.989 7	0.958 9	-0.880 8
相对差/%	18.7	2.2	-2.8

由表1可以看出,初始布局的PCB板上温度分布很不均匀,这容易造成个别元件由于温度应力过高而损坏,从而导致整个电子设备的失效。优化布局后PCB板上最高温度大大降低(降低了 $11.9897^\circ\text{C}$ ),这就有效地提高了电子设备的可靠性。PCB板上平均温度降低了将近 $1^\circ\text{C}$ ,对于平均温度来说这个数据是可观的,这也说明了优化设计的有效性。PCB板的最低温度有所上升,但这不会影响设备的可靠性。

图7是实验初始布局用Flotherm软件模拟得出的平稳状态下的温度场,图中的温度由浅蓝到深红颜色表示温度由低到高,模拟温度场中最高温度是 $59.119^\circ\text{C}$ ,可以看出初始布局的温度分布很不均匀。图8是用遗传算法优化布局后用Flotherm软件模拟得出的温度场,最高温度 $54.641^\circ\text{C}$ 。可见经优化最高温度降低了 $4.478^\circ\text{C}$ ,只凭经验来布局元件位置是很难达到这样理想情况的。而且随着元件数的增多,只有应用优化算法才会实现真正意义上的优化设计。

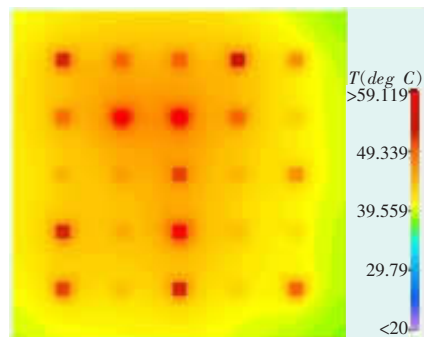


图7 初始布局的模拟温度场

图9和图10是元件优化布局前后PCB模拟温度场的等温线表示,等温线颜色表示了温度的高低,图中高温元件位置由于高温等温线密集而呈现红褐色。

图11和图12是优化布局前后用Flotherm软件模拟求解温度场过程中监测点温度随求解迭代次数变化曲线。这些监测点监测的是几个大功率元件的温度,图中MB\_Comp后面的编号7、8、16、18、23、1、5、6、20、21对应于图6元件位置编号。从图7、图8、图9和图10可以看出这些监测点监测的确是几



个最高温度元件的温度,在迭代 140 步后模型收敛。

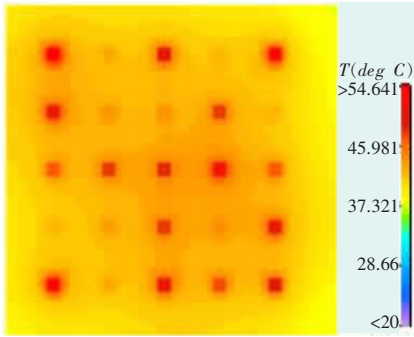


图 8 优化布局后的模拟温度场

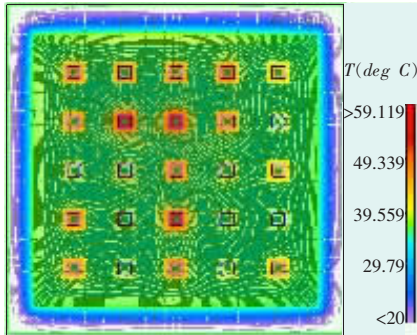


图 9 等温线表示的初始布局温度场

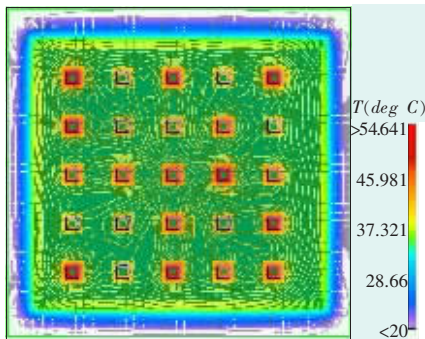


图 10 等温线表示的优化布局温度场

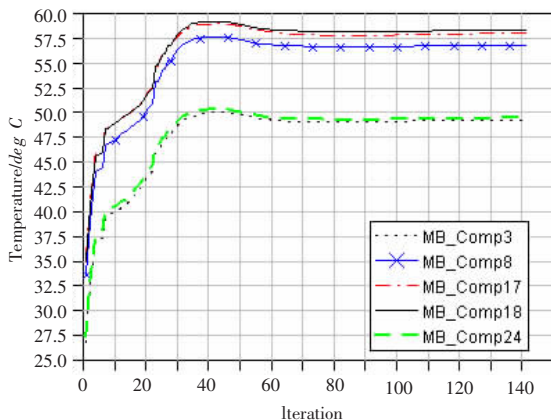


图 11 初始布局监测点温度随求解迭代次数变化曲线

同样,在 Flotherm 软件模拟中使用温度监测点可以得到所有元件的温度,得到优化布局前后温度场的变化,见表 2。由表 1 和表 2 对比可以看出,用数学模型求解降温幅度达到 11.989 7 °C,而实际中可能不会有这么大的降温幅度,这是由于数学模型的建立中还无法全面考虑实际中的许多因素。但是即使能够降温 3 °C 至 7 °C,电子设备的可靠性也将有可观的改

善。由数学模型分析计算和 FLOTHERM 软件模拟得出的结果有些差异,但这种差异是合理的。在这里的实验中,对于 25 个元件 4 种功耗的布局情况,其可能的布局大约有至数量级。故采用全局优化遗传算法来优化布局。

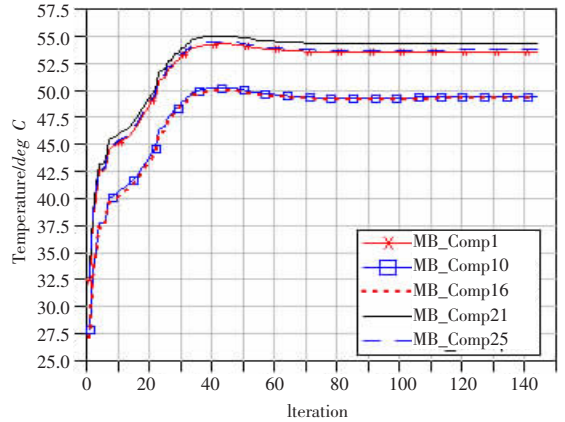


图 12 优化布局监测点温度随求解迭代次数变化曲线

表 2 优化布局前后由 FLOTHERM 软件模拟温度场的变化

	最高温度	平均温度	最低温度
初始布局温度/°C	59.119 0	48.716 5	41.856 7
优化布局温度/°C	54.548 9	47.649 5	42.653 1
绝对差/°C	4.570 1	1.067 0	-0.796 4
相对差/%	7.7	2.2	-1.90

#### 4 结论

热优化设计问题已经成为集成电路芯片及高密度嵌入式系统设计及可靠性设计中的重要问题。本文用微元体热平衡法给出了电路板上元件温度场分析求解的数学模型。论文采用改进的遗传算法对电路板上各不同功耗密度的元器件进行优化布局,使电路板上元器件的温度场分布最合理、最优化,从而为电子设备的可靠性热设计研究提供了一种分析与设计思路。(收稿日期:2006 年 11 月)

#### 参考文献:

- [1] 全国军用技术装备可靠性标准化技术委员会.国家军用标准《电子设备可靠性热设计手册》使用指南[M].北京:国防科工委军用标准化中心,1994:104.
- [2] 程尚模.传热学[M].北京:高等教育出版社,1990:89-126.
- [3] 康立山,谢云,尤矢勇,等.模拟退火算法[M].北京:科学出版社,1994:169-192.
- [4] 李晓明,高泽溪,吕善伟.模拟退火在电子元件位置优化上的应用[J].系统工程与电子技术,1998,17(7):77-80.
- [5] Lee Jing. Thermal placement algorithm based on heat conduction analogy[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2003, 26(2): 473-482.
- [6] Cahlon B, Gertsbakh. A model for the convective cooling of electronic components with application to optimal placement[J]. Mat Comput Modeling, 1991, 15(2): 59-75.
- [7] Tang K S, Man K F, Kwong S, et al. Genetic algorithms and their applications [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13 (2): 22-37.
- [8] Kalyanmoy Deb, Prateek Jain, Naveen Kumar Gupa, et al. Multiobjective placement of electronic components using evolutionary algorithms [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2004, 27(3): 480-492.