

多组合设备的调度控制研究综述

朱清华^{1,2}, 伍乃骐¹, 滕少华²

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510006)

摘要: 在半导体芯片制造中越来越广泛使用多组合设备. 本文介绍了多组合设备的结构配置、生产运行过程、调度控制问题的一般特征条件、应该满足的约束及周期性调度策略; 分析了问题的复杂性因素. 从多组合设备的结构特征、运行过程特征两方面分类综述了调度问题的建模、分析方法、调度算法及存在的问题, 最后指出了未来的研究方向.

关键词: 半导体制造; 多组合设备; 调度与控制; 调度算法; 建模

中图分类号: TP278 **文献标识码:** A

Survey of scheduling and control for multicluster tools

ZHU Qing-hua^{1,2}, WU Nai-qi¹, TENG Shao-hua²

(1. School of Mechatronics Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China;

2. School of Computer, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: Multicluster tools are increasingly adopted in semiconductor manufacturing. This survey introduces the configurations of multicluster tools, operation processes, constraints, and cyclic scheduling policy. The complexity of the multicluster tool scheduling is analyzed. Then, the state-of-the-art for modeling, analysis and algorithms are reviewed in terms of different configurations and fabrication processes; and the open problems are pointed out. Finally, future research directions are indicated.

Key words: semiconductor manufacturing; multicluster tools; scheduling control; scheduling algorithms; modeling

1 引言(Introduction)

半导体芯片以晶圆(wafer)为基片, 电路以一层一层的方式固定在硅片上(约15~30层), 典型晶圆加工的全部工艺步骤多达450余道, 加工流程非常复杂. 从上世纪90年代开始, 组合设备(cluster tools)这种单片晶圆加工方式逐渐代替传统的批量加工, 它提供了高洁净度的封闭真空环境(大大降低污染或引起硅片氧化)、高度自动化分布式流程^[1,2].

把多个工艺密切的组合设备级联组成多组合设备(见图1)具有如下优势: 1) 加工流程更紧凑, 减少晶圆在单组合设备之间的运输、减少污染; 2) 减少加工过程之间切换延迟; 3) 体现组合设备的柔性特征, 可根据工艺组合配置所需模块集成在一起. 世界著名芯片制造商和芯片制造设备供应商都很重视多组合设备, 如Intel的晶圆加工厂已经采用多组合设备^[3], 在2006~2008年利润连续排行业第一的美国Applied Material公司有初步产品. 我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要》确定的国家重大专

项中, “极大规模集成电路制造技术及成套工艺”列第二位, 多组合设备作为极大规模集成电路芯片的制造装备, 具有重要战略地位.

但是运行这样的系统却是极大挑战: 需要精确控制机械手的动作时刻及顺序、控制晶圆在加工过程中满足加工所需的约束条件. 多组合设备是最复杂的制造系统之一, 其调度是有NP性质^[4,5]的组合(combinatorial)问题, 属于一类广泛代表性的调度理论科学问题. 由于多组合设备仅仅是近几年应用在半导体晶圆加工中, 因此其相关研究还处于起步阶段. 国内对单组合设备的调度和控制已有相当程度的研究, 例如本课题组就做了一些重要的工作. 但目前国内未见多组合设备的相关研究报道. 由于应用需求的驱动, 研究多组合设备建模、分析、调度与控制, 揭示运行规律, 提供有效方法有重要意义. 本文希望能够起到抛砖引玉的作用.

本文接下来介绍多组合设备的结构、生产运行过程, 描述了其调度控制问题, 分析了问题的复杂

收稿日期: 2010-01-24; 收修改稿日期: 2010-04-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60974098); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20094420110002); 广东省自然科学基金资助项目(9151009001000007).

性,总结了研究现状与方法、待解决的问题,最后指出了研究方向.

2 多组合设备(Multicluster tools)

2.1 组合设备的构成(Configuration of multicluster tools)

典型组合设备由4~6个加工模块(processing module, PM)、1个搬运模块(transport module, TM)、2个用于存储晶圆的装卸卡盒模块(load lock cassette module, LL CM)组成^[6~8]. TM有单臂^[9]、双臂^[10]机械手两种. 1个PM每次加工1片晶圆.

多组合设备^[11~14]由多个组合设备通过缓冲模块(buffer module, BM)互连组成. BM被相邻组合设备共享,在设备间传递晶圆或兼有加工功能. BM可以有一个或两个(其一把晶圆送出,其二把晶圆传入),可视为组合设备的真空锁(load lock). 以组合设备为节点,系统拓扑结构呈树状,不形成环^[3]. 每个组合设备至少与另一个相连,但一般最多只与两个相连. 图1是通用的 m 个互连组成的系统.

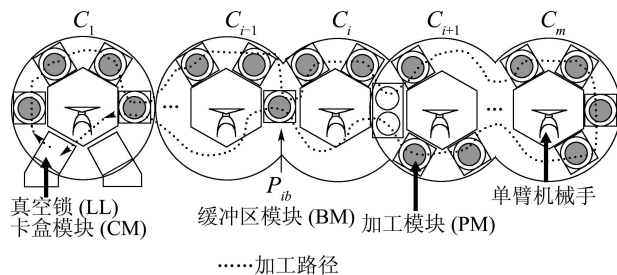


图1 m -多组合设备(m 个组合设备互连)

Fig. 1 m -cluster tools(interconnected by m cluster tools)

2.2 多组合设备的运行过程(Production process of multicluster tools)

见图1所示: 令具有真空锁的组合设备为 C_1 , 其后依次为 $C_2, \dots, C_m$. 从真空锁装入的一卡(lot)晶圆一般为25片, 由机械手把晶圆逐片运至加工模块进行单片加工. 晶圆从 C_1 的真空锁进入, 经过 C_1 中的一些加工模块加工后, 由 C_1 的缓冲模块传出进入 C_2 加工, 然后进入 $C_3, \dots$, 进入 C_{m-1} 加工, 进入 C_m 加工, 完成后再进入 C_{m-1} 的另外一些模块加工, 再依次经过 $C_{m-2}, \dots, C_2, C_1$. 在 C_1 完成加工后返回真空锁. 图中虚线流表示加工晶圆的工艺流程路径.

多组合设备每次运行包含: 初始暂态、稳态、趋停暂态这3个阶段. 假设系统到稳态后, C_i 中有 $N[i]$ 片晶圆在加工. 加工一批晶圆开始时, 每个组合设备都处于空闲状态, 即初始暂态阶段开始. 然后按照工艺要求, 晶圆由真空锁逐步进入系统加工. 当系统中

有 $\sum_{i=1}^M N[i]$ 片晶圆处于加工状态时, 进入稳态. 当系统中有 $\sum_{i=1}^M N[i]$ 片晶圆处于加工状态, 而真空锁中已经没有待加工晶圆且不再输入晶圆时, 进入趋停暂态阶段, 当加工剩余晶圆加工完毕后, 系统回到空闲状态.

3 多组合设备的调度和控制(Scheduling control of multicluster tools)

3.1 问题描述(Problem description)

多组合设备调度问题考虑的一般特征条件和约束: 1) 机械手是单臂或双臂, 或存在两种; 2) 缓冲区容量为1或2, 可兼有加工功能; 3) 有的工艺存在两个以上的加工模块进行相同加工(并行模块); 4) 加工 n 种产品($n \geq 1$); 5) 有的加工工艺存在严格时间约束, 不同种产品的约束可能不同; 6) 有的工艺需要晶圆多次进入同一模块加工完成(多重入).

求解可行调度, 1) 各个组合设备中的机械手的动作开始时刻(顺序); 2) 稳态阶段各个组合设备中的在制品晶圆数量, 即组合设备满足可行调度条件下允许加工晶圆的最大数量.

可行调度指: 1) 机械手调度是可行, 不能将晶圆放入已有晶圆的模块, 或企图到空闲的加工模块中取晶圆; 2) 满足晶圆驻留时间约束; 3) 资源(机械手、加工模块)的调度不存在死锁; 4) 不造成拥塞(congestion).

多组合设备调度控制的目标是在上述特征条件和约束下, 使系统生产率(throughput)最大, 即生产节拍(cycle time)最小. 研究任务是求解可行调度及可调度时满足的条件.

系统常处于稳态运行, 一个生产节拍内进入和加工完毕的晶圆数量相等. 多组合设备调度的关键是求得一个节拍最短的稳态周期调度. 周期调度能减少调度复杂性, 有效地分析系统的行为状态及生产率. 经历一个周期, 加工完 k 片晶圆后系统回到在周期开始时刻的状态, 则称为 k -晶圆周期调度^[15].

3.2 问题复杂性(Problem complexity)

k 的取值影响调度的性能, 它与设备结构、各工序的加工时间和机械手操作时间相关^[16,17]. 若 $k=1$ 且某些假设满足, 单个单臂组合设备的拉式调度^[9]为最优的, 单个双臂组合设备的交换式调度^[10]是最优的. 但由于多组合设备中多机械手、缓冲区的存在, 单组合设备中的结论已经不能应用到多组合设备. 而且这些缓冲区既可以是单纯的缓冲, 也可有加工功能. 这导致更多的可选调度方案.

可重入的加工过程是晶圆加工的重要特点, 例如原子加层沉积有时需要重复同一加工5次以上. 若存在重入, 则存在死锁^[18]; 而且多组合设备中的重入流程的拓扑结构复杂.

多组合设备的典型加工过程只生产一种产品. 但随着所产品的多样化^[18], 产品批量的降低, 出现了在同一卡内装有不同产品晶圆的要求. 尽管它们加工工艺和加工路径相同, 但每种产品各工序的加工时间不同, 产品进入多组合设备的顺序如何排列、如何避免死锁才能使调度最优, 这增加了调度的难度.

晶圆在一个模块中加工完毕后, 表面可能被残留的气、热损坏, 必须在规定时间内取出, 即有驻留时间约束^[7, 19]. 求满足约束解的关键问题是解的存在性. 由于缓冲空间和多机械手的存在, 可以预见解的存在性增大, 但可行解空间自然也就增大, 另外还可有并行模块, 这些都造成可选调度增多. 当参数存在波动时, 调度优化问题更为复杂.

多组合设备除了有上述加工过程存在复杂因素外, 它本身有独特的复杂因素^[20]: 1) 组合设备之间的耦合依赖; 2) 组合设备之间的拥塞可能会传播, 使得整个系统的基本周期时间(fundamental period, FP)难以计算; 3) 由于互连的组合设备之间有缓冲区, 每个组合设备中的晶圆个数可变, 这导致很难确定进入整个系统的晶圆数量, 使得既不出出现死锁又达到最高的生产效率; 4) 各个机械手并发工作, 整个系统的约束条件数量很大.

多组合设备调度的难点在于: 1) 对于 k -晶圆调度, k 取何值时能达到最大生产率. 由于 $k = 1$ 时, 易于被操作人员理解, 也容易实现, 因此在工业中应用广泛. 2) $N[q]$ 应该取何值时系统的生产率为最大. 3) 决定生产活动的顺序, 所有活动顺序都取决于机械手动作顺序. 存在多机械手, 导致有协作问题.

4 基于设备的结构特征的调度(Scheduling in term of it's configuration)

多组合设备是一种在工业中新型系统, 其相关研究还处于起步状态. 同时由于问题极其复杂, 目前仅取得有限成果. 第4.5节分别按照配置系统的结构特征、动态运行过程特征所考虑的条件不同进行讨论.

4.1 基本配置(With basic configuration)

基本配置的情况: 晶圆驻留时间约束不考虑、工艺没有重入的过程、所有工序都只有一个加工模块. 这是至今为止研究较为深入的情况.

文献[20]对缓冲区有1或2个模块的情形进行了讨论. 显然, 缓冲区容量为2时, 由于可选调度增加,

其最优调度比容量为1时复杂. 文中提出了资源活动链的概念, 证明在稳态下每个资源活动链只能有一片晶圆在加工. 对多组合设备(单臂)的可调度性及生产节拍的计算给出了闭式的解. 对于2-组合设备, 给出了在加工的晶圆数量在2个组合设备中有3种可能的分布方案. 同时证明: 当缓冲区容量是2时, 最佳的在加工晶圆数量比缓冲区容量为1时多1; 2-组合设备系统可以用多项式算法求得其最优调度.

考虑单臂机械手, 文献[21]分析了在各个组合设备上, 如何分布在加工的晶圆数量以获得最优1-晶圆调度. 给出了多项式计算复杂度的调度算法, 并说明系统的1-晶圆调度取决于各个组合设备的1-晶圆调度节拍及所有组合设备中的晶圆分布. 在此基础上, 文献[15]用类似的方法分析了2-组合设备的最优 k -晶圆多项式调度算法, 分析了能把多组合设备分解为2-组合设备求解其最优 k -晶圆周期调度方案的条件.

若在多组合设备中, 其调度问题可以分解为分别求各个单组合设备的调度问题, 则可以利用单组合设备的求解方法进行求解. 文献[20]研究了 m -组合设备系统($m \geq 2$)可分解的条件. 但分解条件具有相当的局限性, 例如在拉策略下分解2-组合设备, 必须满足在 C_1 中有一个模块有较长加工时间, C_2 中总加工时间及机械手移动时间较短.

文献[13]在不考虑机械手移动时间条件下, 把 M -组合设备分解为 M 个等价的单组合设备的调度. 缓冲区模块对相邻的两个组合设备来说分别视为分解设备的虚拟加工模块、虚拟真空锁. 给出了FP的计算及“无等待”机械手最优调度算法, 算法复杂度为 $O(M)$. 文献[22]在文献[13]的基础上, 用解析法得出了单组合设备的FP计算公式, 用此公式计算各个被分解的单组合设备的 FP_i , 以 $\max(FP_1, \dots, FP_M)$ 作为整个系统的FP. 给出了调整从第2个到第 M 个设备的机械手的起始动作开始时刻进行恰当延时的算法, 得出了拉式和交换式的机械手调度. 在此基础上, 给出了缓冲区具有加工功能条件下系统的FP的计算公式, 对各个机械手的起始动作开始时刻的延时做进一步修改. 文献[3]给出了文献[22]中系统在稳态下的计算FP下界的算法, 推导了达到下界这一最优调度的可调度条件. 文献[3, 13, 22]的工作提供了“分而治之”——分解的思路求解调度, 不足之处是忽略了机械手的移动时间.

文献[23]对多组合设备的机械手活动的调度使用了基于规则或优先级的启发式方法, 而文献[24]对双臂多组合设备的加工模块动态设置优先级而实施启发式调度.

多组合设备结构上的一个重要特点是有缓冲区,它可以是单纯作联接的缓冲,也可兼有加工功能.可以有些用作单纯缓冲,有些同时兼具两种功能.因此,值得进一步研究如何设置可达最优.同时,已有文献仅研究了缓冲区容量为1或2的情况,容量为多少才是最优这一问题尚无结论.上述调度算法应用了解析方法,但这种解析是有条件的.如果条件不满足如何求解也成为一个问题.

4.2 具有并行模块的结构(Configured with parallel modules)

当第 i 道工序的加工模块增加使得具有并行模块时,那么该工序的加工时间 FP_i 相当于变小,组合设备的 FP 也发生改变,如何求解 FP 成为问题.

文献[25~27]研究的系统与多组合设备类似,但其拓扑结构呈线型,同一工序的并行模块在物理位置上并行排列.文献[25,27]提出了最小公倍数(LCM)调度算法,计算了生产节拍的下界.

在系统配置给定(即各工序具有的模块数确定)的条件下,文献[3]用文献[28]的 FP 计算方法,将并行模块等价为一个模块,研究了多组合设备的调度.但没有考虑几个组合设备中都有并行模块时如何运用LCM算法进行调度.

多组合设备在稳态阶段的运行可分两种模式^[9,10]: 1) 加工主导(process-bound)模式,其生产节拍由最长时间的工序决定,机械手有空闲时间; 2) 运输主导(transport-bound)模式,其生产节拍由机械手的任务时间所决定,机械手一直处于繁忙状态.当在工序 i 增加模块而形成并行模块时, FP_i 减小,当然也就影响 FP .其结果可能使系统由加工主导变为运输主导.由于多组合设备具有多个机械手,改变一道工序的加工模块数目对系统节拍影响变得复杂化.同时,缓冲模块的存在,也可能对此产生影响.至今为止,对此还没有任何相关的结论.另外,有并行模块的多组合设备的 k -晶圆调度问题待研究.

5 基于设备的运行特征的调度(Scheduling in terms of process characteristics)

本节讨论多组合设备在实际生产运行过程中存在的待解决问题,考虑动态运行特征条件下的调度,除活动时间波动的调度问题外,目前尚未见针对这些问题公开发表的研究结果.

5.1 活动时间波动(Variation of activity time)

活动指晶圆的加工、机械手的操作.前面所讨论的研究都有一个假设:所有活动的时间已知并且是不变的.但是,实际的情况是,活动时间是在某一范围内波动的^[29].系统的最优调度依赖于系统的结构

和各活动的时间.因此,当活动时间波动时,按照确定时间所求得的最优调度可能不再是最优调度.特别严重的是,当具有严格晶圆驻留时间约束时,在确定活动时间下求得的可行解,在活动时间波动时可能不再是可行的.

文献[19]在假设只有一道工序晶圆加工时间波动的条件下,研究了双臂机械手多组合设备的调度.它用网络图建模,求出活动的可能最早开始时刻和最晚开始时刻,然后用关键路径法计算出了固定的动作序列调度的时间顺序.这一研究是针对时间波动对最优解的影响问题.但其假设与实际应用相差较远.

文献[14]在机械手及加工动作顺序确定的条件下,建立其过程的网络图,用扩展关键路径法来计算相应调度的节拍.利用这一方法分析了加工时间变化对生产率的影响.文献[30]首次用仿真法研究多组合设备的调度,把系统分解成多个单组合设备,通过一种扩展的事件图(一种强连通图,本质上是一种特殊的Petri网)建模仿真每个组合设备,所用的事件图求解了不同的加工过程配置及可变的加工时间的情况.这些方法都不能求得最优解.对于一个确定参数下求得的最优调度,当参数在某种范围变化时可能不会改变其最优性.因此,进行敏感性分析可能是很有意义的.

活动时间波动影响最大的是对具有严格晶圆驻留时间约束时的调度,因为可能使得其约束得不到满足,导致严重的产品质量问题,在某种意义上说是绝对不允许发生的.因此需要对此进一步研究.

5.2 晶圆驻留时间约束(Wafer residency constraints)

对于具有晶圆驻留时间约束的调度问题,其关键是调度的可行性.只有解决可调度性问题,才可能求解其调度,因而如何建模具有重要意义.因此,如果能够找到合适的调度使得系统按照模型的约束执行,其解就是可行的.晶圆驻留时间约束本质上就是一种时间窗口约束.文献[7,31~36]研究了单组合设备具有晶圆驻留时间约束问题的调度.

由于满足晶圆驻留时间约束的极其重要性,开展对多组合设备的相关研究是十分必要的.否则,具有严格晶圆驻留时间约束的工艺过程就无法应用多组合设备加工.在具有驻留时间约束条件下,单组合设备的可调度性与各道工序的工作负荷及机械手的负荷密切相关^[34,35].在多组合设备中,由于缓冲模块和多机械手的存在,可调度性判定条件需要进行相关的研究,或许文献[34,35]研究方法可以借鉴.

5.3 混合产品(Mixed products)

从真空锁进入的一卡晶圆可以含有多种不同类型的产品(不同种类的晶圆比例应该和所需产品的相对比例相同, 即minimal part set, MPS^[5]). 稳态下, 一次加工完MPS所经历的时间就是系统的生产节拍.

文献[37]用着色的ROPN建模, 研究了晶圆制造中的track系统的多产品加工调度, 分析了避免死锁的充分条件及相应的控制方法. track系统与多组合设备拓扑结构类似, 但是track系统没有缓冲区.

可以通过对具有晶圆加工路径和工序数相同的产品并批, 但各工序加工时间可能不同. 因此, 对于多组合设备应考虑在这一条件下的优化调度问题的研究.

5.4 多重入过程(Revisiting process)

多重入过程的调度由于系统会出现死锁^[8]和可供选择的可行调度大大增加, 增加了求解最优调度的复杂性. 单组合设备的多重入的过程建模或调度见文献[8,38~40].

多组合设备比单组合设备的加工模块数量更多、离散事件变量更多. 缓冲区也可以是可重入的. 因此, 多组合设备具有可重入过程, 其调度问题更具挑战性. 待研究的问题有: 避免由于可重入导致死锁的充分必要条件、有并行加工模块的多组合设备如何布局各设备的结构才是最优的、可重入的最优加工路径及如何调度.

表1小结了相关文献研究多组合设备的建模和调度所用的方法.

表 1 建模和算法总结
Table 1 Summary of modeling and algorithms

作者	Multicluster 或类M	S/D, Mv.T.	Buf.>1, Proc.	并行 加工	时间窗 约束	活动时 间可变	混合 产品	k-晶圆 周期	多重 人	生产过程 分析或模型	FP计算或 调度算法
CHAN W K ^[20]	M	S	✓							基于资源活动链	闭合时间表达式
CHAN W K ^[21]	M	S,✓	✓					✓		—	—
CHAN W K ^[15]	M	S,✓	✓					✓		—	—
YI J G ^[3]	M	S/D	✓							甘特图	解析法
GEISMAR N ^[27]	类似M	S,✓	无缓冲区	✓				✓			解析法
GEISMAR N ^[26]	类似M	D,✓	无缓冲区	✓							—
DING S W ^[19]	M	S				✓				网络图	关键路径法
DING S W ^[14]	M	S/D,✓				✓				事件图、网络图	
DING S W ^[30]	M	S/D								事件图、仿真法	
WU N Q ^[37]	类似M	S	无缓冲区				✓			面向资源PN	
JEVTIC D ^[23]	M	S/D,✓		✓							启发式规则
JEVTIC D ^[24]	M	D,✓		✓							—

表1中用“—”表示此处数据同上面单元格相同位置的数据, “类似M”表示“类似Multicluster tools”, “S/D, Mv.T.”表示“单臂/双臂机械手, 考虑机械手移动时间”, “Buf.>1, Proc.”表示“级联缓冲区容量大于1, 兼有加工功能”.

一般的PN^[41]或事件图^[42]在建模多组合设备时, 其模型庞大而复杂, 用面向资源PN^[34,35,38,43]建模比面向过程PN建模简化得多; 线性规划法、仿真法依赖于具体组合设备的结构配置, 而且算法建立过程复杂、求解实际问题时间太长. 仿真法往往耗很长时间才能产生好的结果, 可以预测组合设备的性能, 但不能解释出现某种结果

的原因. 解析法直接求解, 能揭示求出最优解的来龙去脉, 效率更高; 但在双臂机械手条件下解析法求解将更复杂, 因为交换操作使得机械手动作序列组合比单臂情形的序列组合多.

6 结论(Conclusion)

多组合设备代表了芯片制造中晶圆加工设备的未来发展趋势, 为了增加市场份额及提高技术竞争力, 半导体芯片制造厂和设备制造商一直在探索提高设备生产率的方法. 多组合设备由于结构特殊, 有其独特的调度需求, 生产实践中有很多问题亟待学术界对调度理论和方法的进一步研究. 虽然研究多组合设备的调度问题取得了一些成

果,但是用于解决实际生产中的有相当复杂程度的问题还有很大差距,工业界需要有实时的、可靠的、易于实现的调度模型和算法。

从面向资源的角度来分析生产过程,比如建立面向资源的PN模型、在解析法计算推导时使用面向资源的时间表达式;对加工模块出现故障或进行维护时引入智能的自适应实时调度;基于仿真的优化调度;周期性调度算法;对在实际生产中容易出现组合爆炸的调度问题,可使用进化算法、启发式方法^[44],可先研究分析可调度的条件。这些是研究多组合设备调度问题的未来方向。

参考文献(References):

- [1] MOSLEHI M M, CHAPMAN R A, WONG M, et al. Single-wafer integrated semiconductor device processing[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1992, 39 (1): 4 – 32.
- [2] WOOD S C. Cost and cycle time performance of fabs based on integrated single-wafer processing[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1997, 10(1): 98 – 111.
- [3] YI J G, DING S W, SONG D Z, et al. Steady-state throughput and scheduling analysis of multi-cluster tools for semiconductor manufacturing: a decomposition approach[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2008, 5(2): 321 – 336.
- [4] DROBOUCHEVITCH I, SETHI S P, SRISKANDARAJAH C. Scheduling dual gripper robotic cells: one-unit cycles[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 171(2): 598 – 631.
- [5] SRISKANDARAJAH C, DROBOUCHEVITCH I, SETHI S P. Scheduling multiple parts in a robotic cell served by a dual-gripper robot[J]. *Operations Research*, 2004, 52(1): 65 – 82.
- [6] ASHE P D. Cluster tool wafer handler reliability modeling using top-down and bottom-up methodologies[C] // *Proceedings of IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*. New York: IEEE, 1994: 257 – 260.
- [7] KIM J H, LEE T E, LEE H Y, et al. Scheduling analysis of time-constrained dual-armed cluster tools[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2003, 16(8): 521 – 534.
- [8] LEE H Y, LEE T E. Scheduling single-armed cluster tools with reentrant wafer flows[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2006, 19(2): 226 – 240.
- [9] PERLOMSON T, MCLARTY P, GYURCSIK R, et al. Single-wafer cluster tool performance: an analysis of throughput[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1994, 7(3): 369 – 373.
- [10] VENKATESH S, DAVENPORT R, FOXHOVEN P, et al. A steady-state throughput analysis of cluster tools: dual-blade versus single-blade robots[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1997, 10(4): 418 – 424.
- [11] LOPEZ M J, WOOD S C. Systems of multiple cluster tools: configuration and performance under perfect reliability[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1998, 11(2): 465 – 474.
- [12] ZUBEREK W M. Timed Petri net models of multi-robot cluster tools [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, Cybernetics*. New York: IEEE, 2001: 2729 – 2734.
- [13] YI J G, DING S W, SONG D Z. Steady-state throughput and scheduling analysis of multi-cluster tools for semiconductor manufacturing: a decomposition approach[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2005: 292 – 298.
- [14] DING S W, YI J G, ZHANG M T. Multicenter tools scheduling: an integrated event graph and network model approach[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2006, 19(3): 339 – 351.
- [15] CHAN W K, YI J G, DING S W, et al. Optimal scheduling of k-unit production of cluster tools with single-blade robots[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. New York: IEEE, 2008: 335 – 340.
- [16] CRAMA Y, KLUNDERT J V D. Cyclic scheduling of identical parts in a robotic cell[J]. *Operations Research*, 1997, 45(6): 952 – 965.
- [17] DAWANDE M, SRISKANDARAJAH C, SETHI S P. On throughput maximization in constant travel-time robotic cells[J]. *Manufacture Service Operation Manage*, 2002, 4(4): 296 – 312.
- [18] PETTINATO J S, PILLAI D. Technology decisions to minimize 450-mm wafer size transition risk[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2005, 11(4): 501 – 509.
- [19] DING S W, YI J G, ZHANG M T, et al. Performance evaluation and schedule optimization of multi-cluster tools with process times uncertainty[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. New York: IEEE, 2006: 110 – 15.
- [20] CHAN W K, YI J G, DING S W. Optimal scheduling of multi-cluster tools with finite inter-cluster buffers and single-blade robots[EB/OL]. [2010-8-31]. <http://sigma.dsces.rpi.edu/ROSL/ Others/ MC/ Chan-Paper2- MultiCluster.pdf>.
- [21] CHAN W K, YI J G, DING S W. On the optimality of one-unit cycle scheduling of multi-cluster tools with single-blade robots[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. New York: IEEE, 2007: 392 – 397.
- [22] YI J G, DING S W, SONG D Z, et al. Scheduling analysis of cluster tools with buffer/process modules[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New York: IEEE, 2007: 985 – 990.
- [23] JEVTIC D. Method and apparatus for managing scheduling a multiple cluster tool: European Patent, 1, 132, 792(A2)[P]. 2001.
- [24] JEVTIC D, VENKATESH S. Method and apparatus for scheduling wafer processing within a multiple chamber semiconductor wafer processing tool having a multiple blade robot: US Patent, 6, 224, 638[P]. 2001.
- [25] GEISMAR H N, DAWANDE M, CHELLIAH S. Robotic cells with parallel machines: throughput maximization in constant travel-time cells[J]. *Journal of Scheduling*, 2004, 7(5): 375 – 395.
- [26] GEISMAR H N, PINEDO M, SRISKANDARAJAH C. Robotic cells with parallel machines and multiple dual gripper robots: a comparative overview[J]. *IIE Transactions*, 2008, 40(12): 1211 – 1227.
- [27] GEISMAR H N, CHELLIAH S, RAMANAN N. Increasing throughput for robotic cells with parallel machines and multiple robots[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2004, 1(1): 84 – 89.
- [28] PERKINSON T, GYURCSIK R, MCLARTY P. Single-wafer cluster tool performance: an analysis of the effects of redundant chambers and revisitation sequences on throughput[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1996, 9(8): 384 – 400.
- [29] KIM J H, LEE T E. Schedulability analysis of time-constrained cluster tools with bounded time variation by an extended Petri net[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2008, 5(3): 490 – 503.
- [30] DING S W, YI J G. An event graph based simulation and scheduling analysis of multi-cluster tools[C] // *Proceedings of Winter Simulation Conference*. New York: IEEE, 2004: 1915 – 1924.

- [31] 李鑫, 周炳海, 陆志强. 基于事件驱动的集束型晶圆制造设备调度算法[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(6): 898 – 901.
(LI Xin, ZHOU Binghai, LU Zhiqiang. Scheduling algorithm for cluster tools of wafer fabrications based on events-driven[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2009, 43(6): 898 – 901.)
- [32] ROSTAMI S, HHMIDZADEH B, CAMPORESE D. An optimal periodic scheduler for dual-arm robots in cluster tools with residency constraints[J]. *IEEE Transactions on Robotic and Automation*, 2001, 17(10): 609 – 618.
- [33] LI L Y, HU J T. Scheduling single-blade cluster tools with time window constraints[C] // *Proceedings of 2008 Chinese Control and Decision Conference*. New York: IEEE, 2008: 1069 – 1072.
- [34] WU N Q, CHU C B, CHU F, et al. A Petri net method for schedulability and scheduling problems in single-arm cluster tools with wafer residency time constraints[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2008, 21(2): 224 – 237.
- [35] WU N Q, ZHOU M C. Schedulability and scheduling of dual-arm cluster tools with residency time constraints based on Petri net[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. New York: IEEE, 2006: 87 – 92.
- [36] LEE T E, PARK S H. An extended event graph with negative places and tokens for timed window constraints[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2005, 2(4): 319 – 332.
- [37] WU N Q, ZHOU M C. Deadlock modeling and control of semiconductor track systems using resource-oriented Petri nets[J]. *International Journal of Production Research*, 2007, 45(15): 3439 – 3456.
- [38] WU N Q, CHU F, CHU C B, et al. A novel approach to scheduling of single-arm cluster tools with wafer revisiting[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. New York: IEEE, 2009: 567 – 572.
- [39] ZUBEREK W M. Cluster tools with chamber revisiting-modeling and analysis using timed Petri nets[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2004, 17(3): 333 – 344.
- [40] 李林瑛, 胡静涛. 复杂单臂机器人集束型装备调度模型[J]. 信息与控制, 2009, 38(4): 431 – 436.
(LI Linying, HU Jingtao. Scheduling model of complicated cluster tools with single-blade robot[J]. *Information and Control*, 2009, 38(4): 431 – 436.)
- [41] ZHOU M C, JENG M D. Modeling, analysis, simulation, scheduling, and control of semiconductor manufacturing systems: a Petri net approach[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1998, 11(8): 333 – 357.
- [42] BUSS A H. Modeling with event graphs[C] // *Proceedings of Winter Simulation Conference*. New York: IEEE-CS, 1996: 153 – 160.
- [43] WU N Q, ZHOU M C. A closed-form solution for schedulability and optimal scheduling of dual-arm cluster tools based on steady schedule analysis[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2010, 7(2): 303 – 315.
- [44] DIMOPOULOS C, ZALZALA A M S. Recent developments in evolutionary computation for manufacturing optimization: problems, solutions, and comparisons[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2000, 4(2): 93 – 113.

作者简介:

朱清华 (1974—), 男, 博士研究生, 讲师, 研究领域为离散事件系统、Petri网理论, E-mail: zhuqh@gdut.edu.cn;

伍乃骐 (1949—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 研究领域为生产调度与控制、离散事件系统及Petri网理论、制造系统及设计, E-mail: nqw@gdut.edu.cn;

滕少华 (1962—), 男, 博士, 教授. 研究领域为网络信息安全技术、网络化制造, E-mail: shteng@gdut.edu.cn.