

基于扩展混合 Petri 网的晶圆制造系统建模

周炳海¹, 潘青枝¹, 陶丽华²

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030; 2. 柔性制造系统技术国家重点实验室, 长春 130030)

摘要: 提出了一种扩展的面向对象混合 Petri 网 (EOHPN) 的建模方法: 针对晶圆制造系统的复杂性, 在 EOHPN 模型中融入了面向对象的抽象机制; 为了减少系统建模的复杂性, 引入混合 Petri 网并用面向对象建模技术作了扩展。在定义 EOHPN 模型的基础上, 作了对象模型的拓展。用实例描述了基于 EOHPN 的晶圆制造系统的建模过程, 验证了模型在处理系统建模时的有效性。

关键词: 晶圆制造; Petri 网; 面向对象模型; 混合系统; 建模

Modeling of Wafer Fabrication Systems Based on Extended Hybrid Petri Nets

ZHOU Binghai¹, PAN Qingzhi¹, TAO Lihua²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030;

2. National Key Lab of FMS Technology, Changchun 130030)

【Abstract】 This paper proposes a model method of extended object-oriented hybrid Petri net (EOHPN). To treat with the complexity of the wafer fabrication systems, object-oriented abstraction mechanisms such as encapsulation and classification are combined into EOHPN models. To reduce the complexity of the systems, a hybrid Petri net is introduced and extended with object-oriented modeling technology. Development of object models is suggested on the basis of the defined EOHPN. And a case is presented to illustrate how the proposed EOHPN is used to model the wafer fabrication systems. The resulting model validates that the EOHPN can deal with the modeling complexity of the wafer fabrication systems

【Key words】 Wafer fabrication; Petri nets; Object-oriented model; Hybrid system; Modeling

由于半导体晶圆制造具有混合流程和复杂、多重入等特征, 因此在晶圆制造过程中, 常常会产生在制品 (WIP) 过高、生产周期过长、产品成品率较低、交货期不准等问题^[1,2]。寻找一种科学的方法对复杂晶圆混合流程制造系统进行建模, 已成为半导体晶圆制造管理者和学者关注的焦点。近年来, 针对这种晶圆制造系统建模的研究越来越多, 部分学者提出了一些数学公式来表示一个复杂的混合系统, 例如, 混合自动机、混合 Petri 网、Branicky 模型、Bond 图等^[3]。这些方法在描述复杂的混合系统动态性能, 即连续部分和离散部分的交互时比较有效, 但在描述由许多简单的互相作用的混合系统组成的复杂系统时, 它们不能提供必要的代表这些简单系统的模块^[3]。

针对上述存在的问题, 本文提出一种扩展的面向对象混合 Petri 网 (EOHPN) 方法对复杂的晶圆制造系统进行建模, 这种方法具有模块性和重用性。

1 EOHPN 的定义

在 Petri 网的基础上, 文献[4]用面向对象的 Petri 网对复杂系统建模; 文献[5]用混合 Petri 网进行了具有离散部分和连续部分的系统建模。针对晶圆制造系统建模的复杂性, 本文提出 EOHPN 方法。从面向对象的观点来看, 一个晶圆制造系统由对象和它们之间互相作用的关系组成。EOHPN 就是在这种概念下拓展的, 包括 OP、R、M₀。

其中, OP={OP₁, OP₂, ..., OP_k} 是对象库所的有限集合, OP_i (i=1, 2, ..., k) 是 EOHPN 模型中的对象库所, 代表一个由混合 Petri 网描述的实际对象; R 是对象子网的消息库所之间互相

作用的关系集合; M₀ 是 EOHPN 的初始状态标识。

1.1 对象子网

一个对象子网可以由以下的 6 元组来定义:

$$OP_i = (P_i, T_i, h_i, \tau_i, F_i, M_{0i})$$

其中, P_i=DP_iUCP_iUEP_i 是库所的有限集合: DP_i 是离散库所的有限集合; CP_i 是连续库所的有限集合, 用 2 个同心圆代表一个连续库所; EP_i 是对象子网 OP_i 中的扩展库所的有限集合, 由代表输入消息库所的 IMP_i 和输出消息库所的 OMP_i 联合组成。

T_i=TD_iUTC_i 是变迁的有限非空集合: TD_i 是离散变迁的有限集合, TC_i 是连续变迁的有限集合, 用 代表一个连续变迁, P_i T_i=, P_iUT_i≠。

h_i: PUT {C, D} 表示每个离散节点 (D) 或连续节点 (C)。

τ_i: T_i Γ⁺ 与每一个变迁的一个正实数 d_j 相关, 当变迁为 D-变迁时, t_j 即为时间延迟 d; 当变迁为 C-变迁时, t_j 与最大激发速度关联 d_j 有: v_j=1/d_j。

F_i: P_ixT_iUT_ixP_i (0, 1) 是对象间关系的有限集合。F_i=FI_iUFO_i, 其中, FI_i 是输入映射, FO_i 是输出映射。FI_i: 当 h(p_k)=D 时, P_ixT_i Γ⁻; 当 h(p_k)=C 时, P_ixT_i Γ⁺。FO_i: 当 h(p_k)=D 时, P_ixT_i Γ⁻; 当 h(p_k)=C 时, P_ixT_i Γ⁺。FI_i 和 FO_i 必须满足下列情

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60574054); 柔性制造系统技术国防重点实验室基金资助项目

作者简介: 周炳海 (1965 -), 男, 博士、副教授, 主研方向: 离散事件建模与先进制造控制技术; 潘青枝, 硕士生; 陶丽华, 高工

收稿日期: 2006-06-03 **E-mail:** bhzhou@sjtu.edu.cn

形：当 $h(p_k)=D$ 且 $h(t_j)=C$ 时，进行 $FI_i(p_k, t_j)=FO_i(p_k, t_j)$ 验证，其中 $FI_i(p_k, t_j)$ 和 $FO_i(p_k, t_j)$ 分别是 p_k 到 t_j 的输入和输出流，以确保D-库所的状态标识始终为整数。

M_{oi} : OP_i 内部所有状态和消息库所的初始状态标识集合。

对象库所 OP_i 在时间 t 时的状态标识 $M(t_i)$ 可以用下列公式由时间 o 时的标识 M_{oi} 推导出：

$$M(t_i) = M_{oi} + (FO(p, t) - FI(p, t)) \cdot (\sigma(t) + \int_0^t v(u) du)$$

其中， $\sigma(t)$ 代表在起始时间到时间 t 内的D-变迁激发次数，对应C-变迁则等于0；矢量 $v(u)$ 的成员代表C-变迁的瞬时激发速度，D-变迁对应的则等于0。该公式将离散过程和连续过程区别开来，代表了状态标识的变化过程。学者们提出了一些模型计算瞬时激发速度矢量，本文仅考虑常速连续Petri网^[6]。

1.2 对象间的关系

在EOHPN中，对象间的相互关系依靠它们的扩展库所（输入消息库所和输出消息库所），即如果 $EP_i \neq EP_j$ ，则2个对象子网 OP_i 和 OP_j 有关联。系统对象间的相互作用关系可以由一系列的门实现。对象间的关系在数学上可以作如下定义：

$$R = \{R_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, I, i \neq j\}$$

其中 R_{ij} 明确了发送对象库所 OP_i 和接受对象库所 OP_j 之间的消息传递关系。

$$R_{ij} = \{OA_{ij}, G_{ij}, IA_{ij}, E_{ij}\}$$

其中 G_{ij} 被称为门的特殊变迁的有限集合，门变迁位于 EP_i 的输出消息库所 OMP_i 和 IMP_j 的输入消息库所 EP_j 之间，与 R 有关的所有门合起来构成系统中的门的集合；

OA_{ij} ：从 EP_i 的 OMP_i 到门 G_{ij} 的输出弧的有限集合；

IA_{ij} ： EP_i 的 IMP_j 输入弧的有限集合；

$$E_{ij} = [IAF(IA_{ij}, G_{ij}), OAF(OA_{ij}, G_{ij})]$$

其中 $IAF(IA_{ij}, G_{ij})$ 是从门 G_{ij} 到 OP_j 的输入消息库所 IA_{ij} 之间的弧的表达式；

$OAF(OA_{ij}, G_{ij})$ 是从 OP_j 的输出消息库所 OA_{ij} 到门 G_{ij} 之间的圆弧的表达式。

2 对象子网模型

2.1 物理对象的描述

半导体晶圆制造系统(SWFS)是一种典型的复杂混合系统。为了说明如何设计晶圆制造系统的EOHPN模型，本文采用了一个典型的SWFS作为实例。通常，一个典型的SWFS包括加工机器(如切割机、修剪机等)、抛光机、热处理设备、物流搬运系统(MHS)、WIP缓冲以及其它的一些辅助设备。为了建立典型的SWFS的物理对象的对象子网模型，将所有物理对象分为5种主要的抽象对象：(1)加工机器对象(PMO)代表一台通用的加工机器(PM)，拥有输入和输出储料器，一个PM将晶圆从输入储料器中取出并作加工处理，在PM开始处理前，输入储料器中需要一个最小的晶圆量 B (一批)。(2)抛光机对象(PLMO)代表一个通用的抛光机器(PLM)，仅当所有的晶圆批量都到了输入储料器时，一个PLM才开始抛光。(3)热处理设备对象(HTFO)代表一个热处理设备(HTF)，当晶圆抵达输入储料器时是以一盒为单位的，这一盒可以最多容纳 Q 片晶圆，一般而言，当盒子满时热处理设备就开始工作。同一盒子中不能装入不同批的晶圆。最后一个盒子不需要装满^[4]。(4)运输对象(TO)代表MHS设备(如AGV、工业机器人)和操作员，在WIP缓冲区和机器及设备之间运输晶圆。(5)WIP缓冲对象(WBO)代表一个通用的WIP缓冲区，给WIP晶圆提供等待当前系统加工的场所。

2.2 对象模型的设计

一个PMO模型抽象了主要PMS的行为。图1描述了PMO子网。表1和表2分别给出了其中每一个库所和变迁的含义。输入消息库所 IMP_{11} 接收到给输入储料器装入一批晶圆待加工的请求信息，输入储料器(库所 P_{12})开始持续地每隔 D 单位时间就装入一批晶圆(每批数量为 B)，库所 P_{11} 中的托肯用于激发变迁 T_{11} 。在 D 单位时间后，变迁 T_{11} 激发并且PM开始处理。由于PM的作用，输入储料器中的晶圆以 V 的速率减少。当 P_{13} (输出储料器)等于 B 时，所有批量的晶圆都已经处理好了，变迁 T_{13} 瞬间激发，托肯从 P_{14} 流向 P_{15} ，PM恢复空闲状态，输出消息库所 OMP_{11} 发送消息，请求将一批晶圆从输出储料器运到WIP缓冲区中。

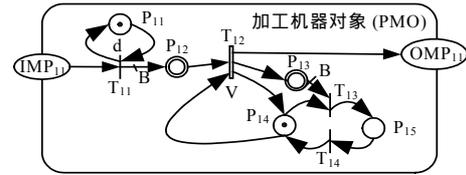


图1 PMO的对象子网模型

表1 对象子网 PMO 中的库所的含义

库所	含义
P_{11}	输入储料器可用
P_{12}	一批晶圆待装入输入储料器
P_{13}	一批晶圆待装入输出储料器
P_{14}	当有托肯时，PM 处于加工中的状态
P_{15}	当有托肯时，PM 空心并且可用
IMP_{11}	一批晶圆请求装入输入储料器
OMP_{11}	一批晶圆请求卸载到 WIP 缓冲

表2 对象子网 PMO 中的变迁的含义

变迁	含义
T_{11}	一批晶圆正在装入输入储料器
T_{12}	一批晶圆正以速度 V 被处理
T_{13}	一批晶圆已经处理完毕，PM 空闲。
T_{14}	一批晶圆准备好，可以上被处理

一个 PLMO 模型抽象了通用抛光机的行为。图2描述了 PLMO 子网。表3和表4分别给出了其中每一个库所和变迁的含义。

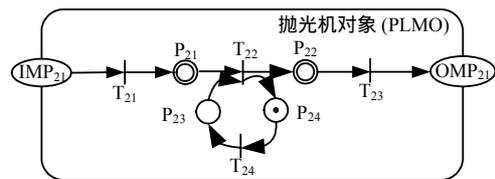


图2 PLMO对象子网模型

表3 PLMO子网中的库所的含义

库所	含义
P_{21}	一批晶圆待装入输入储料器
P_{22}	一批晶圆待装入输出储料器
P_{23}	当有托肯时，PLM 使用中
P_{24}	当有托肯时，PLM 空闲并且可用
IMP_{21}	一批晶圆请求装入输入储料器
OMP_{21}	一批晶圆请求卸载到 WIP 缓冲

表4 PLMO子网中的变迁的含义

变迁	含义
T_{21}	一批晶圆正在装入输入储料器
T_{22}	一批晶圆正被上抛光
T_{23}	一批晶圆已上抛光，PLM 空闲
T_{24}	一批晶圆准备好，可以上抛光

一个 HTFO 模型抽象了热处理设备的行为。图3描述了

HTFO 子网。表 5 和表 6 分别给出了其中每一个库所和变迁的含义。

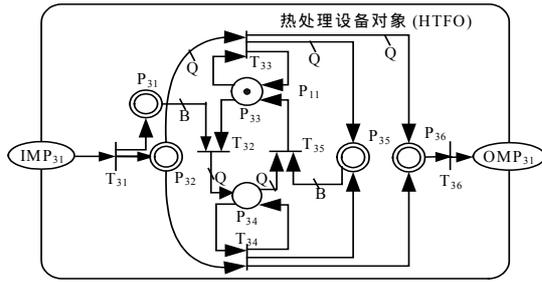


图 3 HTFO 对象子网模型

表 5 HTFO 子网中的库所的含义

库所	含义
P ₃₁	计算进入的晶圆数量
P ₃₂	几批晶圆待装入输入储料器
P ₃₃	当拥有 Q 个托肯时, HTF 开始热处理
P ₃₄	当这里有最后一个托肯时, HTF 正在热处理
P ₃₅	计算已处理的晶圆数量
P ₃₆	几批晶圆待装入输出储料器
IMP ₃₁	几批晶圆请求装入输入储料器
OMP ₃₁	几批晶圆请求卸载到 WIP 缓冲

表 6 HTFO 子网中的变迁的含义

变迁	含义
T ₃₁	几批晶圆正在装入输入储料器
T ₃₂	最后的托肯输入, P ₃₄ 有标识
T ₃₃	盒子已满, 几批晶圆正被处理
T ₃₄	最后一批的盒子正被处理
T ₃₅	Q 个托肯进入, P ₃₃ 有标识
T ₃₆	几批晶圆已经被处理了, HTF 空闲

一个 TO 模型抽象了主要运输设备的行为。图 4 描述了 TO 子网。表 7 和表 8 分别给出了其中每个库所和变迁的含义。

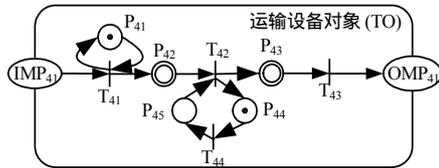


图 4 TO 对象子网模型

表 7 TO 子网中的库所的含义

库所	含义
P ₄₁	运输机容器可用
P ₄₂	几批晶圆等待装入容器
P ₄₃	几批晶圆等待从容器卸载
P ₄₄	有托肯时, 运输机空闲, 可用
P ₄₅	有托肯时, 运输机正在使用中
IMP ₄₁	几批晶圆请求装入容器
OMP ₄₁	几批晶圆请求从容器卸载

表 8 TO 子网中的变迁的含义

变迁	含义
T ₄₁	几批晶圆正装入运输机的容器
T ₄₂	几批晶圆正被运输
T ₄₃	几批晶圆到达目的地, 等待卸载
T ₄₄	几批晶圆准备好, 可以运输

一个 WBO 模型抽象了系统中通用 WIP 缓冲区的行为。图 5 描述了 WBO 子网。表 9 和表 10 分别给出了其中每一个库所和变迁的含义。

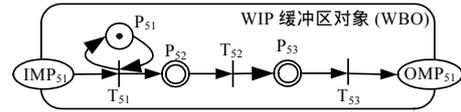


图 5 WBO 对象子网模型

表 9 WBO 子网中的库所的含义

库所	含义
P ₅₁	计算 WIP 缓冲区中已有的批数
P ₅₂	几批的晶圆等待装载/卸载
P ₅₃	几批已经实现装载/卸载操作
IMP ₅₁	几批请求装载/卸载
OMP ₅₁	发送装载/卸载完成的消息

表 10 WBO 子网中的变迁的含义

变迁	含义
T ₅₁	几批等待装载/卸载
T ₅₂	几批正在装载/卸载
T ₅₃	几批已经装载到 WIP 或从 WIP 卸载

3 基于实例的 EOHPN 模型设计

可以通过下列步骤由对象子网模型建立一个 EOHPN 模型：首先将每个对象子网封装成一个对象库所，消息传递门封装成一个活动变迁，然后用托肯代表每个物理对象的内部行为，即对象子网的状态。构建一个 EOHPN 模型的流程可以归纳如下：

第 1 步 封装对象子网，用对象库所 OP_i ($i=1, 2, \dots, m$) 代表每一个封装的对象子网；

第 2 步 用活动变迁 G_j ($j=1, 2, \dots, n$) 代表 EOHPN 模型中的每个门，它们描述了对象之间信息交互的激发条件。输入消息库所用与 (或) 关系连接门变迁，表示当所有 (或某些) 相关的消息库所得到了所需的托肯时门变迁就激发；相应地，门变迁用与 (或) 关系连接到其输出消息库所，表示托肯将流向其所有 (或某些) 输出消息库所；

第 3 步 为了使对象库所之间的消息传递准确可靠，进行 $[OP_i - \text{gate} - OP_j]$ 的消息传递关系描述；

第 4 步 检查 EOHPN 模型是否正确反映了晶圆制造系统的运作，如果没有就修改模型，直到正确为止。

下面举例阐述构建 EOHPN 模型的过程。

1 个车间拥有下列设备：1 台切割机，1 台修剪机，1 台抛光机，1 台造型机，1 台热处理设备，1 台测试机，3 个 WIP 缓冲，2 台运输设备。

不同成品在此晶圆制造系统中有唯一的加工路线：切割 修剪 抛光 成型 热处理 测试。WIP 缓冲 1 用于存储切割机和修剪机的晶圆，WIP 缓冲 2 用于存储抛光机和造型机的晶圆，WIP 缓冲 3 用于存储热处理设备和测试机的晶圆。切割机、修剪机、造型机和测试机抽象为处理机器对象。

图 6 描述了通过继承每个封装的对象子网模型，给出了对象库所 (OP_1 : 切割机; OP_2 : 修剪机; OP_3 : 抛光机; OP_4 : 造型机; OP_5 : 热处理设备; OP_6 : 测试机; OP_7 : 运输设备 1; OP_8 : 运输设备 2; OP_9 : WIP 缓冲 1; OP_{10} : WIP 缓冲 2; OP_{11} : WIP 缓冲 3) 以及活动变迁 G_j ($j=1, 2, \dots, 5$) 之间的信息交互关系的 EOHPN 模型。活动变迁 G_2, G_3, G_4, G_5 的输入为或关系，活动变迁 $G_{11}, G_{12}, G_{13}, G_2, G_3, G_4, G_5$ 的输出为或关系。

限于篇幅，这里就不详细描述构建模型的具体步骤和各活动变迁 G 的含义。

(下转第 254 页)