

Задачи планирования и оперативного управления процессом изготовления интегральных схем с микронными и субмикронными топологическими нормами

Л.Г. Афраимович, В.С. Власов, М.С. Куликов, М.Х. Прилуцкий, Д.В. Седаков, Н.В. Старостин, А.В. Филимонов (Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского)

Рассматриваются задачи планирования и оперативного управления процессом изготовления интегральных схем с микронными и субмикронными топологическими нормами. Строится математическая модель, в рамках которой ставятся оптимизационные задачи планирования и оперативного управления. Предлагаются алгоритмы решения поставленных задач, на основе которых созданы программные средства, позволяющие решать задачи планирования и оперативного управления. Приводятся результаты решения рассматриваемых задач для конкретной производственной системы.

Ключевые слова: планирование и оперативное управление, производство интегральных схем, оптимизационная модель, канонический фронтальный алгоритм, фронтальный алгоритм с рангами, программные средства решения задач планирования и оперативного управления.

Введение

Объектом автоматизации является процесс производства интегральных схем (большие интегральные схемы, сверхбольшие интегральные схемы и гибридные интегральные схемы), который обеспечивает решение задач выпуска широкой номенклатуры продукции малыми сериями или единичными партиями, а также изготовление пластин с заказными элементами [1–3]. Для таких производств, как и для большинства других производственных систем, актуальными являются оптимизационные задачи планирования и оперативного управления.

Большинство задач планирования и оперативного управления являются NP трудными, что определяет необходимость использования для их решения различных эвристических алгоритмов [4–6] и специального ПО. К такому ПО можно отнести такие известные продукты, как Microsoft Project, Project Libre, PRIMAVERA, продукты 1С и др. Однако, несмотря на это, целый ряд особенностей конкретных производственных систем могут быть учтены только в специализированных приложениях. Например, при производстве интегральных схем с микронными и субмикронными топологическими нормами необходимо учитывать такие особенности, как групповые операции, использование оборудования, требующего предварительного разогрева, проведение проверок по точности технологического процесса, наличие межоперационного времени, возможность объединения партий для совместного выполнения и т. д. Поэтому при решении актуальных для производства интегральных схем задач планирования и оперативного управления использование указанных программных продуктов невозможно. Необходимо разрабатывать специализированное ПО, учитывающее особенности производственной системы.

Содержательное описание процессов планирования и оперативного управления производством интегральных схем с микронными и субмикронными топологическими нормами

Оптимальное планирование будем рассматривать как некоторую обобщенную задачу формирования

портфеля заказов предприятия, которая заключается как в определении заказов, рекомендованных к выполнению, так и в определении некоторой обобщенной информации, связанной с ресурсными затратами на их производство (требуемый фонд времени работы оборудования, требуемые затраты материально-технологических ресурсов, и др.). При этом изделия заказов могут быть как из группы уже выпускаемых, по которым уже есть полное описание технологического процесса, так и новые, информация по которым должна формироваться либо экспертным путем, либо на основе наиболее «близких» к ним изделий, о которых у предприятия уже есть определенная информация. Таким образом, для решения задачи планирования требуется на заданный период определить программу производства для подразделений предприятия в объемных показателях (нормо-часы, рубли), обеспечивающую эффективное функционирование подразделений и удовлетворяющую ограничениям возможных объемов работы. Критериями оптимальности для задачи планирования могут выступать как показатели плана, характеризующие отклонения выполняемых объемов работ от заданных величин загрузки подразделений, так и отклонения плановых показателей изготовления заказов от директивных сроков их выполнения.

При решении задачи оперативного управления учитываются результаты решения задачи планирования: сформированный портфель заказов с указанием для каждого заказа сроков начала и окончания его выполнения. Результатом решения задачи оперативного управления является расписание выполнения заказов, в котором определены сроки начала и окончания выполнения каждой операции, каждого изделия, каждого заказа. Критериями оптимальности для задачи оперативного управления могут выступать как максимизация числа выполненных за планируемый период операций, так и минимизация времени на выпуск приоритетных партий изделий.

При изготовлении интегральных схем микронного и субмикронного производства используется позакказная система планирования. Каждый заказ включа-

Кто планирует будущее, всегда старается спланировать его в свою пользу.

В. Швобель

ет наборы партий пластин, для которых определены директивные сроки выполнения. С учетом процента выхода годной продукции каждая партия пластин определяет число кристаллов, которые поступят на операцию сборки. Перед операцией сборки допускается формирование из одной партии кристаллов нескольких подпартий на сборку, для каждой из которых может быть определен свой перечень технологических операций. Далее под изделием производства здесь понимается заказ (часть заказа), состоящий из партий пластин, которые в свою очередь могут состоять из подпартий, состоящих из подподпартий пластин. Причем число уровней иерархии может быть произвольным. Для каждой партии (подпартии) пластин задан перечень технологических операций, которые выполняются на оборудовании, причем для каждой технологической операции однозначно определен тип оборудования, на котором эта технологическая операция должна выполняться. Для каждой технологической операции определен объем различных материалов, необходимых для ее выполнения, а также время ее выполнения на оборудовании. Оборудование может работать как по общему графику (рабочие дни, число смен, время обеденного перерыва и т. д.), так и по графику, специфичному для данного оборудования. Часть технологических операций объединяются в группы (групповые операции), которые должны выполняться последовательно и без перерывов. Для некоторых технологических операций задано время пролеживания — минимально возможный интервал времени до начала следующей технологической операции (время, меньше которого не должно пройти до выполнения следующей по технологии операции). Для некоторых технологических операций задано межоперационное время — максимально возможный интервал времени до начала следующей технологической операции (время, больше которого не должно пройти до выполнения следующей по технологии операции). Определены завершающие работы для изделий — директивные работы, для которых заданы директивные сроки их выполнения. На отдельных этапах изготовления разные партии пластин в целях экономии времени и ресурсов могут объединяться для совместного выполнения операций над ними. В целях снижения брака при осуществлении ТП на оборудовании должно быть запланировано

выполнение проверок технологического оборудования по точности технологического процесса, которые осуществляются путем выполнения последовательности определенных операций.

При решении задач планирования и оперативного управления производством интегральных схем с субмикронными топологическими нормами рассматривается следующая иерархия: верхний уровень — заказы; второй уровень — изделия, из которых состоят заказы; третий уровень — партии пластин, из которых состоят изделия, четвертый уровень — подпартии партий пластин и т. д. до нижнего уровня — технологические операции, которые выполняются на оборудовании.

Математическая модель и постановка оптимизационных задач планирования и оперативного управления

В качестве исходных параметров математической модели определены следующие параметры: множество тактов планирования; множество технологических операций; множество видов оборудования, на которых могут выполняться операции; множества, определяющие очередность выполнения операции; значения времени выполнения операций на оборудовании; множество видов оборудования, для которых предусмотрен разогрев; временные характеристики, связанные с разогревом оборудования; множество промежутков времени, в которые может осуществляться выполнение работ; множество операций, для которых определено минимальное время пролеживания.

К качестве варьируемых параметров (неизвестных) математической модели выступают векторы, определяющие моменты начала и окончания выполнения операций, а также булева матрица, элементы которой определяют какие операции будут выполняться на каком оборудовании.

Стадия	Подпартия	ID	Название	Длительность	MSI
T3		1028	Хим. Очистка	0,08	0010
T3		1057	Контроль чистоты поверхности. Таз	0,05	0015
T3		1068	Очистление. Параметры: d SiO2=150±1...	4	0020
T3		1030	Контроль d SiO2 (рабочая пластина) ...	0,5	0025
T3		1031	Маркировка	0,58	0030
T3		1126	Формирование глобально знаков ...	0	0031
T3		1045	Хим. Очистка	0,08	0035
T3		1122	Контроль чистоты поверхности. Пар...	0,05	0040
T3		1053	Навешивание ФР	0,1	0045
T3		1124	Экспонирование. Параметры: N карна...	2	0050
T3		1056	Промывание	0,1	0055
T3		1099	Контроль точности совмещения. Пар...	0,5	0060
T3		1058	КРП ФК. Параметры: N/Lop	0,15	0065
T3		1050	Контроль дефектов на поверхности н...	0,05	0070
T3		1220	РИТ SiO2/Si. Параметры: страл. Si ...	1	0075
T3		1063	П/Ч	0,05	0080

Рис. 1. Представление данных, полученных из системы управления производством

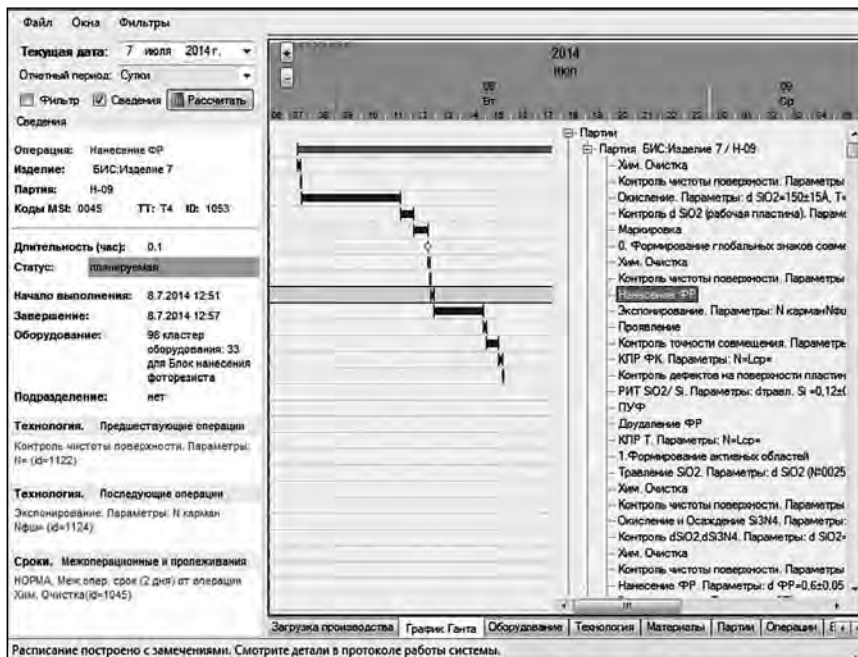


Рис. 2. Представление расписания выполнения операций в виде графика Ганта

Ограничения построенной математической модели включают условия: назначения операций на необходимое оборудование; взаимозависимого выполнения операций; выполнения групповых операций на оборудовании без перерывов; выполнения операций на оборудовании, требующем разогрев; определяющие невозможность одновременного выполнения на одном и том же оборудовании разных операций; определяющие необходимость выполнения операции в допустимое для оборудования время; ограничения для операций с минимальными сроками пролеживания; определяющие необходимость выполнения групповых операций без перерывов; опре-

деляющие необходимость проведения проверок технологического оборудования по точности технологического процесса; определяющие невозможность одновременного выполнения на одном и том же оборудовании операций и проверок технологического оборудования.

В рамках построенной математической модели выделены критерии, определяющие эффективность функционирования рассматриваемой производственной системы. К критериям относятся условия минимизации штрафных санкций, связанных с «отставанием» выполнения операций от заданных для них директивных сроков; условия минимизации штрафных санкций, связанных с заданными приоритетами для партий пластин. Важным фактором производства интегральных схем являются условия предотвращения нарушений межоперационных значений времени. Эти условия также учитываются в виде критериев оптимальности.

Постановки оптимизационных задач для рассматриваемых производственных систем зависят от условий, определяющих эффективность функционирования системы. Обычно при решении задач планирования учитываются все требования. Тогда в качестве критерия задачи оптимального планирования выступает обобщенный функционал — аддитивная свертка частных критериев оптимальности. Решение задачи оперативного управления происходит с учетом результатов решения задачи оптимального планирования. В качестве директивных сроков в этих задачах выступают найденные в результате решения задачи планирования сроки завершения выполнения промежуточных этапов изготовления изделия, а горизонт планирования составляет, как правило, не более недели (декады) с более мелким, чем в задаче планирования тактом (час, минута).

Фронтальные алгоритмы

Программно реализованные алгоритмы основаны на принципе фронтального построения расписаний выполнения операций. Строится «фронт операций» — множество операций, любая из которых может начать выполнение в рассматриваемый такт. На множестве операций, на основании заданной стратегии, устанавливается полный порядок, то есть множество опе-

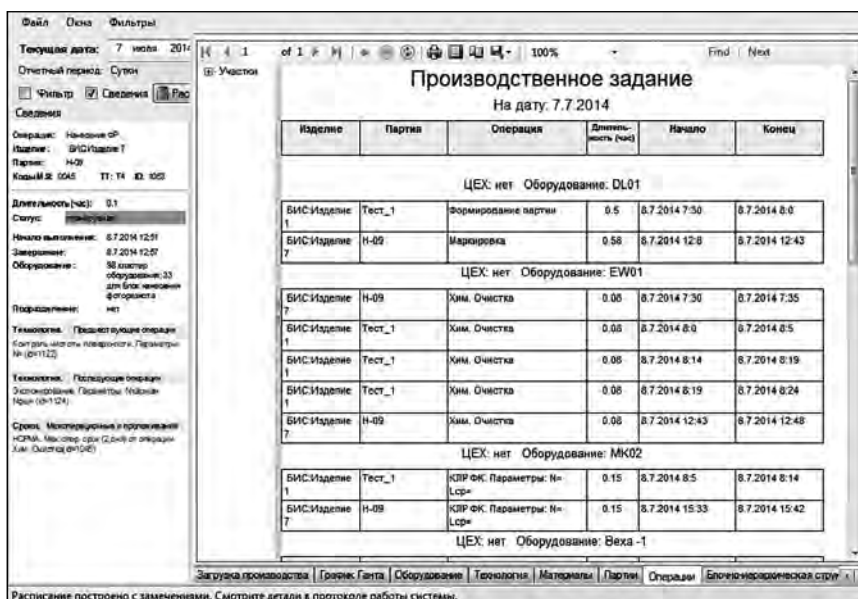


Рис. 3. Автоматическая подготовка отчетных форм документов по составленному расписанию

Таблица 1

1	1248	1178	70	79	1248	222
2	3894	3824	70	79	3894	1224
3	13596	13526	70	79	13596	4898
4	30354	30284	70	79	30354	11244
5	60348	60278	70	79	60348	23528

Таблица 2

1	00:00.07	0	14	44906
2	00:00.08	0	506	12578556
3	00:00.1	2	2731	448101549
4	00:00.08	2145	6483	2132512146
5	00:00.2	12942	14322	37591230452

Таблица 3

1	00:00:01.4	0	10	37947
2	00:01:44.2	0	482	11633595
3	00:09:59.7	2	2728	413204306
4	00:11:49.1	2145	6476	2130113168
5	00:23:16.8	12942	14186	36087581234

Таблица 4

	, %	, %	, %
1	15,5	0	15,5
2	7,5	0	7,5
3	7,8	0	7,8
4	0,1	0,1	0,1
5	4	0	4

раций преобразуется в вектор, который определяет последовательность рассмотрения операций с целью включения их в строящееся расписание. ПО включает как канонический фронтальный алгоритм, ранее используемый на предприятии, так и вновь разработанный фронтальный алгоритм с рангами [7]. Фронтальный алгоритм с рангами позволяет учитывать дополнительные технологические условия благодаря введению рангов выполняемых операций. Критерием оценки решения для каждой итерации алгоритма является суммарный штраф, налагаемый за нарушение дополнительных технологических условий. В алгоритме можно выделить две основные фазы — итерационное изменение рангов операций в соответствии с вызываемыми ими нарушениями дополнительных ограничений, и дополнительная оценка возможностей сдвига предков операций, вызывающих нарушения, которые не могут быть устранены изменением рангов операций.

В основе первой фазы лежит итерационный вызов канонического фронтального алгоритма со стратегией преобразования множества операций в век-

тор путем упорядочивания «по рангам операций», имеющих наибольший приоритет в лексикографическом упорядочивании. Ранги операций вычисляются в зависимости от величины нарушений технологических условий так, чтобы операции с большей величиной штрафа имели больший приоритет при назначении. Критерием окончания первой фазы служит выполнение заданного числа итераций или значительное уменьшение скорости улучшения критерия оценки.

После окончания первой фазы алгоритма, среди построенных расписаний на основе приоритетов, выбирается лучшее расписание и для него запускается вторая фаза.

Во время второй фазы последовательно оцениваются только те операции, которые вызвали нарушение дополнительных технологических условий. Для каждой из этих операций предпринимается попытка построить расписание с лучшим значением критерия оценки, путем сдвига предыдущих операций на величину нарушения дополнительных условий. Изменение принимается, если достигнутое значение критерия

рия оценки улучшает значение критерия, достигнутое на предыдущем шаге. Кроме того, осуществляется попытка произвести объединение партий для выполнения на оборудовании, допускающем объединение партий, при этом время возможного ожидания задается с учетом межоперационных времен.

Решение задач оптимального планирования и оперативного управления с использованием разработанного ПО

Исходными для ПО являются данные, полученные из системы управления производством. Эти данные могут быть представлены как в виде таблиц в БД (Oracle или MS SQL), так и в виде специально структурированного XML файла. Кроме того, ПО имеет собственный интерфейс пользователя, который обеспечивает отображение списка доступного оборудования; отображение списка планируемых операций по партиям (рис. 1); составление графика Ганта выполнения операций (рис. 2); составление графика расходования ресурсов; выявление «узких» мест по ресурсам; выявление «свободных» ресурсов; подготовку отчетных форм документов; подготовку технологических заданий подразделениям (рис. 3).

Типовой сценарий работы с ПО можно представить как следующую последовательность действий пользователя. Сформировать задание на решение задачи планирования или оперативного управления с использованием системы управления производством; открыть ПО и выбрать источник данных; просмотреть исходные данные и провести их корректировку, задать приоритеты; выбрать алгоритм решения задачи и задать его параметры; выполнить расчет; проанализировать полученное решение, и если оно не удовлетворяет требованиям пользователя, изменить приоритеты и параметры алгоритма и произвести расчет еще раз; подготовить отчеты по построенному плану распределения операций. Для более тонкого редактирования построенного расписания пользователь имеет возможность работать в полуавтоматическом режиме, что позволяет остановить выполнение алгоритма расчета (начать перепланирование) на определенном этапе и назначить операцию из списка доступных для назначения (из фронта работ) на свободное оборудование. После назначения операций или задания новых приоритетов выполнение расчета продолжается в автоматическом режиме.

Разработанное ПО внедрено в постоянную эксплуатацию при автоматизации процесса производства интегральных схем (большие интегральные схемы, сверхбольшие интегральные схемы и гибридные

интегральные схемы) во ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седакова» (г. Н. Новгород) ([7]).

В таблицах приведены результаты решения ряда задач построения расписаний выполнения операций при оперативном управлении производством интегральных схем с субмикронными топологическими нормами.

Отметим, что ранее принятый на предприятии поиск решения, основанный на каноническом фронтальном алгоритме, имеет лучшие временные характеристики, однако фронтальный алгоритм с рангами позволяет более полно учесть технологические условия. Выигрыш в результате использования фронтального алгоритма с рангами может быть достаточно значительным. Учитывая достаточно низкую стоимость вычислительных ресурсов по сравнению с большой стоимостью, связанной с устранением последствий нарушений условий процесса производства интегральных схем (реставрационные работы, простой оборудования, внеурочная работа), применение разработанного и внедренного в практику планирования и оперативного управления фронтального алгоритма с рангами дает существенные преимущества.

Список литературы

1. Прилуцкий М.Х., Власов С.Е. Многокритериальные задачи объемного планирования. Лексикографические схемы // Информационные технологии. 2005. №7. с.61-66.
2. Прилуцкий М.Х., Власов С.Е. Многостадийные задачи теории расписаний с альтернативными вариантами выполнения работ // Системы управления и информационные технологии. 2005. №2. с.44-48.
3. Прилуцкий М.Х., Власов В.С. Оптимизационные задачи распределения ресурсов при планировании производства микроселектронных изделий // Системы управления и информационные технологии. 2009. №1(38). С. 38-43.
4. Костюков В.Е., Прилуцкий М.Х. Распределение ресурсов в иерархических системах. Уч. пособие. Н. Новгород: Изд. НГУ. 2010. 78с.
5. Прилуцкий М.Х. Многокритериальные многоиндексные задачи объемно-календарного планирования // Известия академии наук. Теория и системы управления. 2007. №1. с. 78-82.
6. Афраймович Л.Г., Прилуцкий М.Х. Многоиндексные задачи оптимального планирования производства // Автоматика и телемеханика. 2010. №10. с.148-155.
7. Афраймович Л.Г., Власов В.С., Куликов М.С. и др. Планирование и оперативное управление процессом изготовления сложных изделий // Тр. XII Всероссийского совещания по проблемам управления. М. ИПУ РАН. 2014. с. 5138-5149.

*Афраймович Лев Григорьевич — канд. физ.-мат. наук, доцент,
Власов Валентин Сергеевич — канд. техн. ст. преподаватель, Куликов Михаил Сергеевич — аспирант,
Прилуцкий Михаил Хаимович — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой,
Седаков Денис Владимирович — ст. преподаватель, Старостин Николай Владимирович — канд. техн. наук, доцент,
Филимонов Андрей Викторович — канд. техн. наук, ст. преподаватель
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.
Контактный телефон (831) 465-97-26.
E-mail: pril@iani.unn.ru*