



СТРУКТУРНОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ ЛИТОГРАФИИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ПОСТРОЕНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ

*Гохберг Г.С. Ярославский государственный технический университет,
Рудый А.С. Ярославский государственный университет им. П.Г.Демидова,
Мироненко А.А., Рудаков В.И.*

Ярославский филиал физико-технологического института РАН

Аннотация: На примере электронно-лучевой литографии разработаны правила построения иерархической структуры, формально описывающей технологические процессы нанoeлектроники. Приведено формализованное описание технологических операций и их регламентов, требований к материальному оборудованию, параметрам заготовки и результатам процесса. На основании разработанного подхода определены границы и содержание онтологической модели предметной области.

Abstract: For the case of electron-beam lithography the rules for constructing a hierarchical structure, that formally describes the processes of nanoelectronic technology, are developed. A formal description of manufacturing operations and regulations, the requirements for materials, equipment, workpiece parameters and the results of the process is given. On the basis of the developed approach are defined the boundaries and contents of the ontology and the ontological model of the subject area is formed.

Ключевые слова: Электронно-лучевая литография, технология, онтология, сущность, правило, база знаний.

Keywords: Electron-beam lithography, the technology, ontology, the essence, the rule, the knowledge base.

Развитие нанoeлектроники представляет собой сложный процесс, направленный на создание новых материалов, разработку новых принципов формирования рисунка с топологическими нормами менее 100 нм и совершенствование теоретических представлений о механизмах переноса заряда в наноструктурах. Развитие нанoeлектроники невозможно без создания новых базовых технологий и непрерывного совершенствования существующих технологических процессов. На этапе отработки каждой технологической операции накапливается огромное количество полезной информации, которая должна быть обработана, систематизирована и сохранена таким образом, чтобы доступ к этой информации был по возможности быстрым и эффективным. Другими словами, существует потребность в базах данных по технологиям нанoeлектроники и экспертных системах для работы с этими базами, и с каждым годом эта потребность возрастает.

Создание базы знаний по технологиям нанoeлектроники – чрезвычайно сложный технический и организационный процесс, требующий совместных усилий разработчиков, программистов, когнитологов, дизайнеров и экспертов в области нанoeлектроники. Ввиду многостадийности и сложности технологического процесса создания приборов и устройств интегральной электроники, формирование базы знаний при-

ходит к разбивать на отдельные этапы в соответствии с этапами технологического маршрута. На сегодняшний день наиболее актуальной является проблема литографии, в частности электроннолучевой литографии, поэтому настоящая работа посвящена структурному описанию технологического процесса электроннолучевой литографии для формирования онтологической модели и построения базы знаний.

Технологический процесс электроннолучевой литографии является одним из ключевых процессов нанoeлектроники [1,2]. Он представляет собой процесс нанесения на подложку радиационно чувствительного резиста, экспонирования электронным лучом и проявления резиста. С точки зрения технологии это есть законченный цикл некоторого производства, в результате которого формируется структура с заданными значениями параметров. Эти значения могут быть измерены и зафиксированы, могут быть сравнены с нормативными значениями соответствующих

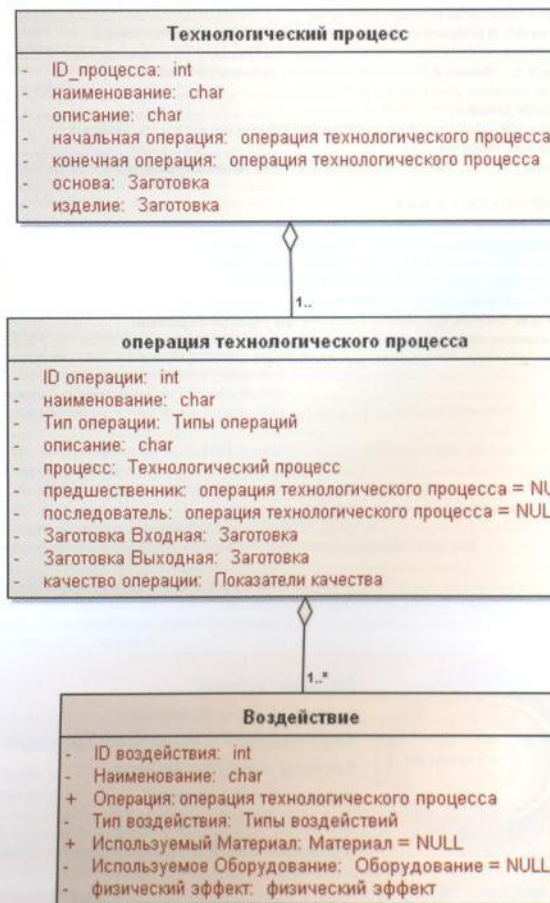


Рис. 1



параметров. В результате сравнения может быть сделан вывод о значении качества процесса [3].

Рассматривая технологический процесс, как упорядоченную совокупность отдельных технологических операций, можно построить иерархическую структуру, формально описывающую технологический процесс и его параметры. Такой подход позволяет формализовать описание технологических операций и их регламентов, требований к материалам, оборудованию, параметрам заготовки и готового результата процесса.

Каждая технологическая операция, в свою очередь, представляет собой некоторый шаг технологического процесса, представляющий собой законченный набор воздействий с идентифицируемым изменением параметров заготовки. Технологическая операция является транзакционным объектом, то есть не может быть выполнена частично.

В рассматриваемом подходе, построенном на классическом описании бизнес-процессов, технологическая операция представляет собой элементарный бизнес-процесс (ЕВР) [4], объединяющий в упорядоченную, функционально законченную последовательность воздействий, манипуляций с заготовкой, обладающей набором характеристик и имеющей измеримый результат.

На рис. 1 представлена структурная схема иерархии бизнес процессов при электроннолучевой литографии.

С целью формализации описания введем классификацию технологических операций по типам операций:

Основная – операция, которая меняет хотя бы одну характеристику исходного объекта. В результате получается целевой объект операции, который обладает хотя бы одним новым значением хотя бы одной характеристики.

Контрольная – операция, результатом которой является измерение (получение значения) одной или нескольких характеристик исходного объекта. Характеристики исходного объекта при этой операции не меняются. (Целевой объект операции = исходному объекту операции).

Вспомогательная – операция, не связанная с объектом. Она связана с подготовкой оборудования или материала для следующих операций (например, нагрев печи до заданной температуры). Характеристики исходного объекта не меняются. (Целевой объект операции = исходному объекту операции).

Прочая – операция, не подходящая ни под одну из других категорий.

Введенная схема представляет собой классификатор, то есть каждая операция

принадлежит к одному и только к одному типу.

Целью процесса электроннолучевой литографии является получение минимальных размеров линейной резистивной маски в виде полосы с шириной менее 100 нм, нанесенной на кремниевую пластину.

Дизайн структуры, получаемой на пластине, представляет собой серию полос из резиста, создаваемых сфокусированным пучком электронов, при облучении полиметил-метакрилатной (РММА) пленки. В результате, РММА приобретает свойства негативного резиста (РММА-n).

При проведении технологического процесса должны быть достигнуты определенные значения параметров получаемой пластины:

- размер ширины полосы, получаемой при прямом экспонировании электронным лучом должен быть менее 100 нм;
- неравномерность толщины слоя электроннорезиста должна быть не более 10% от номинала толщины;
- неровность края полосы не должна превышать 10% от номинала ширины;

• вертикальность стенки электроннорезиста должна быть в пределах 80-90°.

В соответствии с этими технологическими параметрами процесса можно задать следующий набор характеристик качества:

- качество по ширине;
- качество по толщине;
- качество по краю полосы;
- качество по вертикальности.

Кроме указанных критериев качества итогового образца технологического процесса, при анализе отдельных технологических операций возникают дополнительные требования, явно не входящие в рассмотренные критерии, но отражающие взаимосвязь технологических операций. Например, невозможность осуществления следующей технологической операции при некоторых значениях параметров предыдущей операции. Такие требования можно обобщенно рассмотреть как критерий «Качество промежуточное», смысл и величина которого зависит от конкретной технологической операции.

Заданные критерии принимают следующие значения (табл. 1):

Таблица 1

Критерий	Возможные значения	Примечание
Качество по ширине	Норма Отклонение от нормы	Ширина полосы менее 100 нм
Качество по толщине	Норма Отклонение от нормы	Отклонения по толщине не превышают 10%
Качество по краю полосы	Норма Отклонение от нормы	Отклонения края полосы от номинала не превышают 10%
Качество по вертикальности	Норма Меньше нормы Больше нормы	Вертикальность стенки в диапазоне [80° - 90°] Меньше 80° Больше 90°
Качество промежуточное	Норма Отклонение от нормы	Зависит от конкретной технологической операции

Таблица 2

Объект	Атрибут	Описание возможного значения
Заготовка	материал	Ссылка на материал
	толщина	
	размер	Стандарт или ТУ изготовления
	Качество	
Материал	Название	
	Единица измерения	
	Качество	Стандарт или ТУ изготовления
Оборудование	Название	
	Параметры управления	Тип Vocabulary: список параметров управления и диапазон возможных значений для каждого
	Производитель	



Кроме того, для формализации описания технологического процесса как некоторого маршрута, введем такой критерий технологической операции, как «предшественник». Для каждой операции, кроме первой, есть предыдущая технологическая операция, а для первой операции процесса это есть NULL значение.

Наряду с основным объектом рассматриваемой онтологии – технологической операцией, необходимо рассмотреть и другие, связанные с процессом сущности. К таким базовым сущностям отнесем:

- заготовка;
- материал;
- оборудование;
- воздействие.

В соответствии с требованиями LOM стандарта описания терминов (IEET-1484.12.1-2002) [5], объекты предметной области представляются в виде упорядоченной тройки (<объект><атрибут><значение>). Важным является то обстоятельство, что значениями атрибутов могут являться не только числовые или текстовые значения, они могут быть списками (Vocabulary в терминологии LOM), а также принимать НФ-значения [6], расширяющие LOM описания предметной области. В нашем случае, для каждого рассматриваемого объекта получаем следующий набор атрибутов (табл. 2):

Критерии качества, заданные в таблице 1 для всего технологического процесса, должны быть детализированы для каждой технологической операции. Однако, задание их в явном виде для конкретной технологической операции встречает трудности, связанные с неточностью и нечеткостью представлений о значении того или иного критерия качества, в результате конкретной операции. В этой связи, рассматриваемые критерии представляют собой нечеткие знания, которые могут быть формализованно описаны через НФ факторы, учитывающие субъективные мнения экспертов.

Очевидно, что наиболее сложным является структурное описание объекта «Технологическая операция» (табл. 3).

Если температура сушки будет ниже необходимой, то это приведет к наибольшему ослаблению связей в полимерных цепях, в результате чего, области вблизи облученного резиста, за счет рассеяния электронов, также имеют достаточное количество нарушенных связей и растворяются в проявителе. Размер воспроизводимой полосы будет сильно (до нескольких раз) отличаться от требуемой 100 нм

Если температура сушки будет выше необходимой, то при достижении верхнего температурного предела возможно искажение размеров резиста, в частности может

нарушиться равномерность края полосы.

Если время будет меньше требуемого, то это приводит к потере адгезии, ухудшению разрешения и утоньшению резиста при проявлении. Если время будет больше требуемого, то снижается растворимость резиста и затрудняется его снятие на последующих этапах.

Нетрудно заметить, что часть слотов для объекта «технологическая операция» являются агрегатными и сами представляют собой концепты рассматриваемой онтологии.

Теперь, опираясь на описанную структурную схему, можно формализовать описание технологических операций процесса электроннолучевой литографии с учетом знаний экспертов. Рассмотрим, например, одну из операций технологического процесса – **сушка электронорезиста**. В свободном описании эта технологическая операция выглядит примерно следующим образом:

Структурированное описание этой операции может быть сформулировано следующим образом:

- название операции = «сушка электронорезиста»;
- тип операции = «основная»;
- предшественник = название предшествующей технологической операции;
- заготовка входная = заготовка целевая с предшествующей операции;

- название = модель WX062;
- параметр 1 = температура;
- единица измерения = градус °С значение =180;
- параметр 2 = время единица измерения = мин значение = 30;
- качество по ширине – зависит от параметров операции;
- качество по толщине – зависит от параметров операции;
- качество по краю полосы зависит от параметров операции;
- качество по вертикальности = НОРМА;
- качество промежуточное – зависит от параметров операции.

Для рассматриваемой технологической операции критерий «Качество промежуточное» представляет собой возможность снятия резиста на последующих операциях процесса, как это оговаривается в описании технологического процесса.

Из структурного представления технологической операции видно, что параметры рассматриваемой операции влияют на такие характеристики: «качество по ширине», «качество по толщине» и не влияют, например, на «качество по вертикальности».

Описание зависимости требуемых характеристик качества рассматриваемой технологической операции от входных характеристик этой операции может быть сформулировано в виде производственных правил

Таблица 3

Атрибут	Описание значения
Название	
Предшественник	Ссылка на другую технологическую операцию (или NULL)
Тип операции	Ссылка на перечисление типов
Заготовка входная	Ссылка на объект «заготовка»
Заготовка целевая	Ссылка на объект «заготовка»
Используемый материал	Тип Vocabulary: список материалов и их количество, используемых в технологической операции
Используемое оборудование	Тип Vocabulary: список используемого оборудования и значения каждого параметра управления, используемого в технологической операции
Качество по ширине	НФ фактор
Качество по толщине	НФ фактор
Качество по краю полосы	НФ фактор
Качество по вертикальности	НФ фактор
Качество промежуточное	НФ фактор

- заготовка целевая = пластина с высохшим слоем электронорезиста;
- используемый материал = НЕТ;
- используемое оборудование = тип = установка для сушки электронорезиста;

[6, 7], на основании которых может быть проведен анализ. С целью обобщения понятия качественных характеристик, введем понятие «Качество операции», которое формально определим, как конъюнкцию все

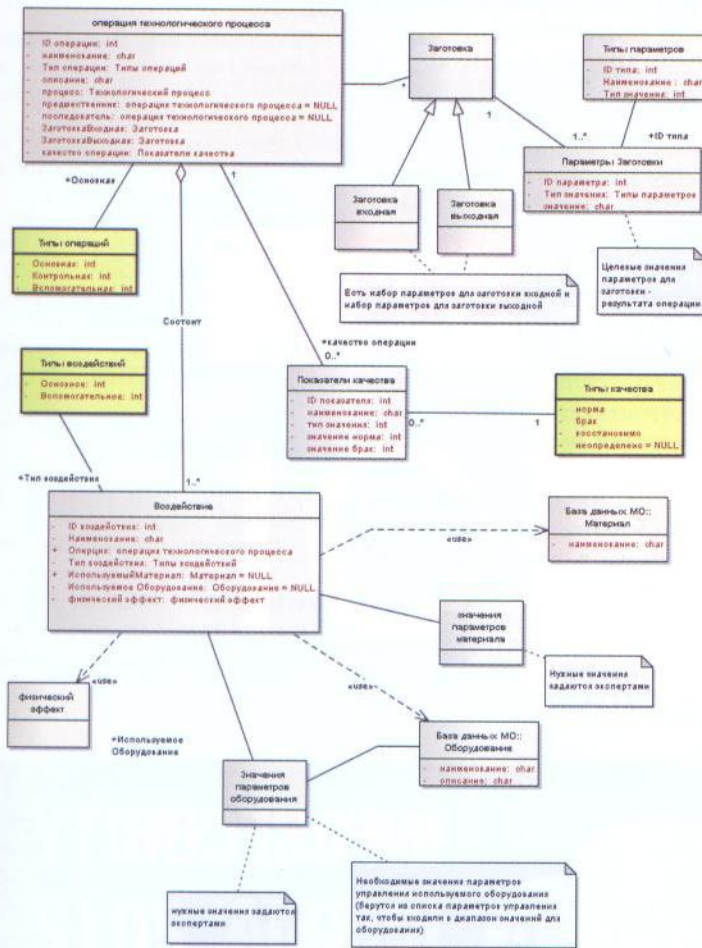


Рис. 2. Пластина с пленкой резиста помещается в установку сушки и выдерживается 30 минут при температуре 180°C. В результате резист высыхает и образует прочную пленку на поверхности пластины

критериев качества следующим образом:
 Качество операции = НОРМА, если выполнены условия:

- качество по ширине = НОРМА &;
- качество по толщине = НОРМА&;
- качество по краю полосы = НОРМА&;
- качество по вертикальности = НОРМА&;
- качество промежуточное = НОРМА;
- качество операции = БРАК, в противном случае.

Теперь можем сформулировать набор правил, описывающих технологическую операцию «сушка электронорезиста».

Правило 1.

Если
 Предшествующая операция.
 Качество операции<>НОРМА
 ТО
 Операция. Качество операции<>НОРМА

Если результат предшествующей операции не соответствует норме, то текущая операция не может дать требуемое качество.

Задание технологических параметров оборудования и их влияние на качество

результата является, как уже отмечалось, НЕ – фактором и должно быть описано, именно, как НФ с учетом мнений экспертов.

С этой целью введем следующее определение нечеткого задания параметров процесса, в соответствии с рекомендациями [6].

Температура сушки (параметр 1)

Меньше нормы	150 250 5 (150 1; 160 0.8; 170 0.4; 180 0.1; 250 0.0)
Норма	150 250 5(150 0.0; 160 0.1; 170 0.6; 180 1.0; 250 0.0)
Больше нормы	150 250 5(150 0.0; 180 0.2; 190 0.7; 200 0.9; 250 1.0)

Время сушки (параметр 2)

Меньше нормы	15 45 4 (15 1.0; 25 0.9; 30 0.0; 45 0.0)
Норма	15 45 4(15 0.0; 25 0.5; 30 1.0; 45 0.0)
Больше нормы	15 45 4(15 0.0; 25 0.0; 30 0.1; 45 1.0)

Теперь можно сформулировать и другие правила, используя сформулированные нечеткие определения

Правило 2.

Если
 Операция.
 Используемое оборудование.
 Параметр 1 = Меньше нормы
 ТО

Операция. Качество по ширине<>НОРМА

Если температура меньше нормы, то возникают отклонения по ширине.

Правило 3.

Если
 Операция.
 Используемое оборудование.
 Параметр 1 = Больше нормы
 ТО

Операция. Качество по краю<>НОРМА

ИЛИ

Операция. Качество по ширине<>НОРМА

Если температура выше нормы, то возникают отклонения по размерам: по ширине или по краю полосы резиста.

Правило 4.

Если
 Операция. Используемое оборудование.
 Параметр 2 = Меньше нормы
 ТО

Операция. Качество по толщине<>НОРМА

Если время сушки ниже нормы, то возникают отклонения по толщине слоя резиста.

Правило 5.

Если
 Операция. Используемое оборудование.
 Параметр 2 = Больше нормы
 ТО

Операция. Качество промежуточное<>НОРМА

Если время сушки выше нормы, то возникают проблемы снятия на последующих технологических операциях.

Сформулированный набор производственных правил, описывающих именно технологические аспекты операции, необходимо дополнить правилами, описывающими требования к другим сущностям, участвующим в описании операции.

Для рассматриваемой операции сушки материалы не используются, поэтому правила на материал отсутствуют.



Дополнительным правилом здесь может являться следующее:

Правило 6.

Если

Операция.
Заготовка. Входная<>НОРМА

ТО

Операция. Качество.
Операции<>НОРМА

Из некачественной заготовки невозможно получить качественный результат операции при любых параметрах.

Применение описанной схемы рассуждений к каждой технологической операции приводит к формальному структурному описанию всего технологического процесса и является логической производной моделью базы знаний по технологии электроннолучевой литографии. В целом, рассмотренный подход к формированию структурной схемы технологического процесса позволяет:

- построить модель онтологии технологического процесса;

- определить основные концепты модели и их логические взаимосвязи;
- сформулировать требования экспертов к процессу в целом и к отдельным технологическим операциям процесса;
- задать набор производственных правил, описывающих технологические параметры, параметры качества процесса и оценки экспертов, выраженные в формализованном представлении.

Все это позволяет получить логическую модель базы знаний, на основе которой можно реализовать экспертную систему. Использование рассмотренного подхода позволяет построить структурную модель, а затем и базу знаний, не только для технологического процесса электроннолучевой литографии, но и для других процессов, используемых в нанoeлектронике.

Работа выполнена в центре коллективного пользования научным оборудованием «Диагностика микро- и наноструктур» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. Технология СБИС. Под редакцией С. З. «Мир», 1986
2. Шука А.А. Нанoeлектроника. Физматкнига, 2007
3. У. Моро. Микрoлитoграфия. М., «Мир»
4. К. Ларман. Применение UML и шаблон проектирования. 2-е изд. Пер. с англ. Издательский дом Вильямс, 2002
5. IEEE-1484.12.1-2002. Draft Standard Learning Object Metadata. 2002 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. York, NY 10016-5997 USA, 2002
6. Рыбина Г.В. Основы построения интеллектуальных систем, М., Финансы и статистика, 2010
7. П. Джексон Введение в экспертные системы. М. Изд. дом Вильямс, 2001

Центр коллективного пользования научным оборудованием
ДИАГНОСТИКА МИКРО И НАНОСТРУКТУР
 Тел. +7 (4852) 24-65-52, +7 (4852) 79-77
 E-mail: rudy@uniyar.ac.ru; nano@yar.ru

expo.itsec.ru



INFOSECURITY RUSSIA' 2012

Сети, Облака и Мобильность 2012

IT Support & Help Desk Контактный центр 2012

Выставка InfoSecurity Russia. StorageExpo. Documentation 2012

обеспечивает максимальную полезность визита для заказчика и наивысший в России ROI для экспонента.

Приём заявок на участие открыт:

www.infosecurityrussia.ru

Событие №1 для IT директоров и руководителей служб информационной безопасности, государственных и коммерческих заказчиков.

26-28 Сентября 2012

Москва, Крокус ЭКСПО, павильон 8

infosecurity RUSSIA

STORAGE EXPO

DOCUMENTATION

Groteck Business Media

Товарный знак INFOSECURITY принадлежит Reed Exhibitions Limited и используется по лицензии.

На правах рекламы