

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н. Кудряшова Владимира Сергеевича
на диссертационную работу Белоусовой Олеси Владимировны
«Автоматизация технологического процесса нанесения фоторезиста на основе
моделей и методов цифрового управления», представленную на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и
управление технологическими процессами и производствами

Актуальность темы исследований

Данная диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи – разработке установки нанесения фоторезиста на кремниевые подложки, обеспечивающей технологические нормы 90 нм и ниже; а также комплекса алгоритмов работы модулей оборудования и установки в целом, включая разработку пакета программного обеспечения для управления технологическим процессом нанесения фоторезиста.

В работе предложен подход, заключающийся в разработке и использовании новых функциональных связей модулей стабилизации температурных параметров установки и динамического расчета электропривода центрифуги, отличающейся наличием обратной связи по скорости, позволяющей функционально обеспечивать постоянство ускорения за счёт регулирования угла нагрузки путём опережения включения токов в статорной обмотке. Это позволяет управлять толщиной и равномерностью нанесения плёнки фоторезиста, являющихся важнейшими технологическими параметрами. Оригинальными в работе представлены алгоритмы управления отдельными модулями оборудования и комплексные алгоритмы автоматизированной системы управления нанесения фоторезиста. Сложность управления объясняется наличием и характером влияния различных контролируемых возмущающих воздействий, что в свою очередь приводит к отклонению заданных характеристик получаемого фоторезиста.

Решения, предлагаемые в работе, затрагивают задачи управления технологическим процессом. Важнейшие принципы решения таких задач формируются на основе обобщения теоретических и практических результатов в экспериментальных

исследованиях промышленных процессов. Результаты данной работы вносят научный вклад в теорию и практику управления такого рода объектами.

Решение задач управления объектами промышленных технологий находится в постоянной динамике развития. Технологическое совершенствование оборудования и создание систем управления на базе современных технических средств для производства отечественной микроэлектроники является важной государственной задачей.

Диссертационная работа выполнялась в рамках одного из приоритетных научных направлений Программы фундаментальных научных исследований в РФ на долгосрочный период (2021–2030 годы), принятой постановлением Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 3684-р и утверждённой председателем правительства РФ М.В. Мишустинным по направлению фундаментальных и поисковых научных исследований

2.2.1. Автоматизированные системы управления.

В этой связи, диссертационное исследование Белоусовой О.В., посвященное разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом нанесения фоторезиста для обеспечения выпуска продукции микроэлектроники с высоким качеством наносимого фоторезиста за счёт уменьшения толщины и повышения равномерности наносимого слоя путём стабилизации ускорения электропривода центрифуги и температурных параметров технологических модулей и сред, является актуальным.

Структура, объем и содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и содержит 191 страницу основного машинописного текста, 88 рисунков, 21 таблицу, список литературы из 151 наименований и три приложения. Общий объем диссертационной работы с учётом приложений составляет 194 страницы.

Во введении обоснована актуальность диссертационных исследований, изложена цель и основные задачи исследований, их научная новизна и практическая значимость, отмечены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан анализ тенденций развития технологического процесса и оборудования фотолитографии; приведено описание конструкций отдельных модулей и

блоков, входящих в состав кластерных комплексов; рассмотрен технологический процесс нанесения фоторезиста.

Указаны основные недостатки отечественного оборудования и перечислены главные проблемы технического и технологического исполнения подобного рода установок. Перечислены основные параметры технологического процесса нанесения фоторезиста такие, как параметры управляющего воздействия, параметры внешнего воздействия, а также контролируемые параметры. Предложены законы управления температурным и динамическим режимами установки нанесения фоторезиста.

Во второй главе рассмотрены параметры, влияющие на технологический процесс нанесения фоторезиста, и приведены практические рекомендации по проектированию. Например, такие основные параметры, как ускорение, угловая скорость, дозировка подачи фоторезиста, температурные и другие параметры рабочих сред, могут быть оптимизированы так, что обеспечивается возможность получения слоя фоторезиста требуемой толщины необходимого качества.

В третьей главе приведена методика формирования адаптивного управления разгоном привода центрифуги, обеспечивающая работу привода с постоянным ускорением и поддержание установившейся скорости вращения, представлена модель автоматической системы управления электропривода центрифуги, а также выполнен анализ динамических характеристик центрифуги.

В четвертой главе решена задача автоматизации управления процессом нанесения фоторезиста. Рассмотрен вопрос по выбору микропроцессора как базового вычислительного элемента. Для установки нанесения фоторезиста УНФ-200А были разработаны алгоритмы управления, разрядные сетки обработки команд и сигналов с датчиков, а также циклограммы работы всего комплекса технологического оборудования нанесения фоторезиста. Дано описание программного обеспечения для управления технологическим процессом нанесения фоторезиста и разработан пакет программного обеспечения, на который получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В заключении излагаются итоги выполненного исследования, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

В приложениях представлены дополнительные материалы и копии актов об использовании результатов работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Давая оценку диссертации по этим показателям нужно отметить следующее:

- в работе автором произведён анализ современных методов управления для рассматриваемого в диссертации класса объектов. Это позволило сформулировать цель, задачи и методы исследований;
- предложенные в работе основные компоненты системы управления – методика, модели, алгоритмы и программы при проведении испытаний показывают реальную картину процессов, которые происходят в промышленной технологии и позволяют обосновать полезность для науки и практики решенных задач в диссертации;
- материалы, представленные в работе, могут с успехом применяться для построения систем управления электроприводами центрифуг для нанесения тонких плёнок менее 90 нм и равномерной толщиной, так как они апробированы на данном процессе, открыты для дальнейшего перспективного применения и базируются на системном подходе к рассматриваемой задаче при использовании методов математического моделирования.

Теоретическая ценность, результаты экспериментальных исследований и акты об использовании результатов диссертационной работы подтверждают обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна работы проистекает из следующих направлений науки:

- теории систем и системного анализа;
- теории автоматического управления.

На основе применения выше указанных научных направлений, включая теорию электрических цепей, теорию динамических процессов, в работе представлена методика построения регулятора скорости привода центрифуги в условиях постоянства ускорения и стабилизации температурных параметров. Данная методика является

результатом применения современных научных положений о строении систем и взаимосвязи ее компонентов.

В работе можно выделить четыре пункта, обладающие существенной **научной новизной**:

1. Модель системы автоматического управления процессом нанесения фоторезиста, отличающаяся наличием обратной связи по скорости вращения центрифуги, а также обратными связями по температурным параметрам модулей контроля подогрева фоторезиста, термообработки и термостабилизации, определяющих температурные параметры рабочих поверхностей и сред, с целью обеспечения требуемой толщины пленки и её целостности.

2. Методика формирования адаптивного управления разгоном привода центрифуги, обеспечивающего линейный рост её скорости, что позволяет достичь требуемой равномерности плёнки фоторезиста.

3. Модель системы автоматического управления центрифуги, отличающейся наличием обратной связи по скорости, обеспечивающей постоянство ускорения за счёт регулирования угла нагрузки путём опережения включения токов в статорной обмотке бесконтактного двигателя, то есть получение требуемых толщины и равномерности плёнки фоторезиста.

4. Алгоритмы автоматизированной системы управления установкой нанесения фоторезиста и её функциональных модулей, имеющих отличительную черту в виде разработанных разрядных сеток обработки команд управления и сигналов с датчиков температуры и скорости вращения, обеспечивающие толщину пленки фоторезиста в интервале (10÷90) нм.

Значимость для науки и практики выводов, рекомендаций и результатов

Автором разработана автоматизированная система управления технологическим процессом нанесения фоторезиста для обеспечения выпуска продукции микроэлектроники с высоким качеством наносимого фоторезиста за счёт уменьшения толщины и повышения равномерности наносимого слоя путём стабилизации ускорения электропривода центрифуги, а также точности стабилизации температурных параметров технологических модулей и сред.

Теоретическая значимость определяется новыми функциональными связями динамической модели автоматической системы управления, а также модулей стабилизации её температурных параметров, новой моделью динамического расчета электропривода центрифуги, отличающейся наличием обратной связи по скорости и функционально определяющей постоянство ускорения за счёт регулирования угла нагрузки путём опережения включения токов в статорной обмотке, при помощи которой выполнен расчёт режимов работы автоматической системы управления, определяющих толщину и равномерность нанесения плёнки фоторезиста, являющиеся важнейшими технологическими параметрами, а также алгоритмами управления отдельными модулями оборудования и комплексным алгоритмом автоматизированной установки нанесения фоторезиста.

Основной практической ценностью диссертационной работы Белоусовой О. В. считаю подтверждение теоретических наработок практическими экспериментами, которая заключается в следующем:

- разработана библиотека технологических программ, включающая набор макросов, обеспечивающих автоматическую обработку подложек с заданными характеристиками, а также процедуру записи макросов в двух режимах: в режиме выполнения диагностических команд и в автономном режиме, который представлен в форме табличного задания;

- опираясь на многолетний опыт по разработке, обслуживанию, использованию, ремонту автоматизированных установок нанесения фоторезиста, приведены рекомендации, которые подробно описывают все нюансы при разработке подобного оборудования;

- разработан узел создания вакуума для удержания обрабатываемой пластины на вращающемся роторе центрифуги, отличающейся конструктивным расположением, формой и материалом вакуумного уплотнения.

Все это указывает на соответствие диссертации критериям практической значимости.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендация

Достоверность научных положений, выводов и рекомендация подтверждается корректностью постановки задач исследования, совпадением результатов аналитических и экспериментальных исследований, применением обоснованных математических методов, результатами успешной апробации и внедрения разработанного теоретического подхода и математического аппарата на практике.

Достоверность новизны технических решений подтверждается 1 патентом РФ на изобретение и 1 свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Анализ публикаций автора по теме исследования

Основное содержание диссертации изложено в 15 печатных работах. Из них 4 публикации в научных журналах, входящих в перечень ВАК, 2 публикации в иных изданиях, 1 патент РФ и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Основные результаты и выводы апробированы на 4 научно-технических конференциях международного и всероссийского уровня, а также 3 научно-технических конференциях ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет».

По тексту глав диссертации приводятся сведения о публикациях, в которых отражены ее результаты. На основании этих сведений, а также на основании анализа содержания публикаций можно утверждать, что научная новизна диссертационной работы и все выносимые на защиту положения отражают личный вклад соискателя в проведенные научные исследования.

Замечания по диссертационной работе

Помимо изложенных выше достоинств можно обратить внимание на некоторые недостатки:

1. В первой главе недостаточно подробно рассматриваются вопросы, касающиеся моментов инерции роторов центрифуг, скоростные режимы и потери в динамических режимах работы, определяющие предельные динамические характеристики.

2. Во второй главе параметры, влияющие на технологический процесс нанесения фоторезиста, даны в довольно широких пределах их возможного изменения, что

затрудняет получить представления о конкретных совокупностях их значений, соответствующих конкретным толщинам плёнок фоторезистов, формируемых на кремниевых подложках.

3. В третьей главе недостаточно чётко обоснован выбранный вид управления электроприводом центрифуги и что он конкретно позволяет обеспечить в сравнении с другими, например с модальным управлением.

4. Недостаточно подробно описаны приведённые в графической форме результаты модельно-экспериментальной проверки динамических режимов работы электропривода центрифуги.

5. В четвёртой главе представлены слишком громоздкие таблицы разрядных сеток команд, дублирующие в некоторых случаях приведенное описание, а на циклограммах работы отдельных модулей не показан временной масштаб.

6. Канал регулирования скорости электропривода центрифуги (ЭПЦ) достаточно быстродействующий, отсюда в регуляторе важно использовать Д-составляющую. ПИД-регулятор используется в диссертации только для модуля термообработки, хотя процедура его настройки недостаточно понятна.

7. Желательно было бы провести исследования влияния длительности такта квантования на качество регулирования температурных режимов.

Указанные недостатки не влияют на общую положительную оценку работы и могут быть учтены при дальнейших исследованиях диссертанта.

Заключение

Таким образом, диссертационная работа Белоусовой Олеси Владимировны «Автоматизация технологического процесса нанесения фоторезиста на основе моделей и методов цифрового управления» является законченной, самостоятельной научно-квалификационной работой, отвечающей формуле и пунктам области исследования специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) и соответствующей п. 10, 11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (Положение). В работе изложены новые научно обоснованные результаты, имеющие существенное значение

для развития оборудования для производства отечественной микроэлектроники и большие перспективы для дальнейших исследований, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а Белоусова Олеся Владимировна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматизированных систем
управления процессами и производствами
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет инженерных технологий»

В.С. Кудряшов

Контактная информация:

Кудряшов Владимир Сергеевич,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Официальный сайт: <https://vsuet.ru/>

Адрес: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, д. 19

Тел.: +7 (473) 255-38-75

E-mail: kudryashovvs@mail.ru

«02» марта 2023 г.

