

Отзыв

на диссертацию Пестерева А.А. «Оптимальное управление подвижным источником теплового воздействия при легировании заготовок кварцевых оптических волокон», предоставленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

Диссертационная работа изложена на 114 страницах, включая 2 приложения, 35 рисунков, 3 таблицы и библиографический список из 105 наименований. Диссертация содержит: введение, аналитический обзор литературы, четыре раздела, заключение, выводы.

Актуальность. Научное производство специальных оптических волокон (СОВ), без которых невозможны современные технологии, является одной из основных компонентов современной промышленности, показателем уровня ее состояния в стране. Если не упоминать работы Клауда Гаппа по оптической телеграфии и фотофон А. Белла в XIX веке, то, очевидно, первыми световодами следует считать оптические волокна Б.О.Бриена (США) и Н. Капани (Великобритания) в конце 50-х гг. XX века, причем последнему, очевидно, принадлежит термин «волоконная оптика». Появление оптических лазеров в 60-х гг. XIX века (Ч. Таупс, А. Прохоров, Н. Басов, Т. Мейман) с их возможностями для передачи информации создало объективную необходимость в промышленном производстве световодов.

Основы современной технологии производства и систем передачи информации СОВ заложены в работах Ч. Као, Дж. А. Хоккема (Великобритания) в 60-х гг. XIX века, а уже в 1973г. ВМС США внедрили волоконно-оптическую систему передачи информации на эсминце Little Rock.

Качественное COB позволяет производить датчики различных физических величин, лазеры, гироскопы, элементы средств связи и вычислительной техники, систем автоматизации. Без него невозможно развитие авиационно-космической и оборонной промышленности. В силу этих причин количество публикаций в научной литературе, посвященных технологии производства COB, во всем мире увеличивается. Несмотря на повышенное внимание к технологии производства COB, следует отметить, что устойчивой, высокопроизводительной, экономически эффективной технологии к настоящему времени не создано.

Все вышеизложенное в полной мере относится к одному из наиболее эффективных видов технологии получения COB – технологии модифицированного химического парофазового осаждения (Modified chemical vapor deposition – MCVD).

Технология MCVD относится к виду парофазных, которые кроме нее включают в себя внешнее парофазное осаждение (outside vapor deposition – OVD), осевое парофазное осаждение (vapor axial deposition – VAD) и различные плазмохимические методы. При этом технология MCVD в мире является наиболее распространенной к настоящему времени.

Несмотря на фундаментальные результаты в области технологических основ MCVD, проблемы устойчивости и высокой эффективности производства COB не решены в мире и в нашей стране. Проблема заключается в первую очередь в том, что эта технология опирается на большое количество физических эффектов, не отличающихся устойчивостью, трудно поддающихся непосредственному контролю и автоматизации и поэтому для промышленной реализации требуется высококвалифицированный персонал, дорогостоящее оборудование, но даже при этом высокое качество COB обеспечить не всегда удается.

Магистральным путем решения этой проблемы является оптимизация и стабилизация технологических характеристик MCVD путем создания соответствующих систем автоматического управления.

При этом сложность физико-химических процессов, большое количество непосредственно неизмеряемых технологических параметров существенно осложняют решение этой проблемы.

Поэтому тема диссертации А.А. Пестерова, направленная на решение задачи получения стабильного температурного поля в зоне разогрева кварцевой заготовки необходимого для формирования равномерного слоя реагентов, обеспечивающего качество оптических характеристик оптоволокна, кислородно-водородной горелки, является остро актуальной.

Новизна научных результатов. Новизна полученных в диссертации научных результатов состоит в следующих теоретически и экспериментально обоснованных автором положениях.

1. Выявлено количественное влияние параметров теплового источника (кислородно-водородной горелки) на распределение температуры по длине кварцевой заготовки оптоволокна на процессы образования оксидов кремния, термофорез на внутреннюю поверхность кварцевой трубы, качество стеклообразного слоя и как следствие, оптические и геометрические характеристики СОВ.

При этом автор широко использует экспериментальные и аналитические методы для определения степени этого влияния, достаточно эффективно их сочетая. А.А. Пестеровым также получены линейные зависимости интенсивности теплоисточника $q_{\max}$ и дисперсии H от расхода водорода Q_{H_2} (рис. 2,7, и 2,8).

Правда, на взгляд рецензента, несколько смелым является вывод о наличии линейной зависимости между собой параметров $q_{\max}$ и H (2,15) и (2,16) из-за того, что оба они содержат независимый аргумент Q_{H_2} .

Для исследования параметров подвижного теплоисточника в качестве факторов, оказывающих наибольшее влияние на температурное поле кварцевой заготовки, автор обосновано на основании анализа математической модели и экспериментов считает скорость движения горелки $u(t)$ и расход водорода.

Достаточно хорошая сходимость результатов моделирования с результатами экспериментов позволяет сделать вывод об адекватности математической модели автора.

Подтвержден, и для технологии MCVD экспериментально количественно оценен известный результат о смещении максимальной температуры нагреваемого подвижным теплоисточником тела в сторону противоположную движению теплоисточника. Полученные результаты позволили обосновать, рассчитать и внести поправку в показания неподвижного инфракрасного пирометра, которым обеспечены технологические установки для производства COB методом MCVD, повысить качество контроля важнейшего технологического параметра – максимальной температуры в зоне разогрева кварцевой заготовки без существенных затрат на установку сканирующего пирометра, введя так называемую, эффективную температуру инфракрасного пирометра (2,17), (2,18).

2. Новая методика расчета температурных режимов процесса MCVD, предложенная автором, в значительной степени использует понятие эффективной температуры, контролируемой неподвижным инфракрасным пирометром, связанной с максимальной температурой процесса от которой зависит диаметр кварцевой заготовки (см, стр. 27-28 диссертации). Причем, от градиента температурного поля в зоне разогрева зависит термофоретическая скорость осаждения оксидов на внутренней поверхности заготовки (1.1), а эффективность образования оксидов зависит от температурных условий внутри заготовки в зоне окисления.

Методика, по существу, заключается в предварительной тарировке инфракрасного стационарного пирометра и составлении номограмм, связывающих расход водорода на горелку с мощностью и дисперсией теплоисточника, а затем для максимальной температуры определяется скорость и расход водорода в функции длины заготовки, обеспечивающие

наиболее эффективное распределение температуры по длине заготовки для получения равномерного осаждения оксидов на ее внутреннюю поверхность.

Методика ориентирована на экспериментальные исследования и поэтому не носит универсального характера, и должна опираться на новые априорные исследования всякий раз при смене оборудования, типоразмера, материалов и других производственных условий осуществления технологического процесса MCVD.

Однако, в случае применения в технологическом процессе сканирующего пирометра (например типа Raytek), проблема экспериментального определения $T_{эф}$ и ΔT снимается, хотя при этом становится излишней часть авторской методики.

3. Температурное поле в зонах окисления, движения оксидов и осаждения стабилизируется с помощью предложенного в диссертации алгоритма оптимального управления.

Основа метода оптимизации, на которой базируется алгоритм, заложена работами В.П. Перевадчука и сводится к минимизации квадратичной формы (3.10) отклонения температурного распределения от заданного с включением в нее достаточно малой цены управления.

Полученная таким образом система (3.14) дифференциальных уравнений в отклонениях и сопряженная ей система, дополненные краевыми условиями образуют замкнутую краевую задачу, решение которой позволяет получить поправки к функции управления Δu , в качестве которых автор рассматривает мощность $q(t)$ распределенного по нормальному закону теплоисточника. Эта система представляет собой необходимые условия оптимальности.

4. В предположении свободы вариаций экстремалей получены достаточно эффективные решения, которые, однако, в силу использованного метода оптимизации предполагают недостижимость ограничений на управление и состояние системы и гладкость искомых функций.

Кроме этих границ применимости метода следует отметить, что в диссертации получено решение для средней по толщине заготовки температуры, что также ограничивает сферу применения метода.

Несмотря на это, метод, предложенный А.А. Пестеровым, вполне пригоден для решения поставленных в диссертации задач и демонстрирует свою эффективность на практике.

Проведенный в диссертации анализ устойчивости методом Ляпунова не выявил областей неустойчивости, хотя следует отметить, что исследований по устойчивости в диссертации недостаточно. В частности, динамические показатели качества разработанной замкнутой системы управления не выявлены, а значит, несмотря на принципиальный вывод об устойчивости системы, ее динамика вполне может быть неудовлетворительной.

Практическая значимость. Теоретические положения диссертации позволили автору получить практически значимые результаты.

Среди них следует отметить разработанный автором программно-технический комплекс, который содержит весьма перспективный программный пакет, обеспечивающий взаимодействие программной среды Matlab и SCADA- системы. Этот программный блок имеет широкие перспективы практического применения в различных областях промышленности. На базе полученных решений автором разработан и внедрен со значительным экономическим эффектом на действующем производстве прототип АСУТП, повышающий качество производства СОВ.

Несмотря на высокий научный уровень диссертации, она не свободна от ряда частных недостатков.

1. Следовало бы технически более чётко обосновать математическую постановку задачи оптимального управления, в частности критерий оптимальности (3.10) и выбор в качестве управления мощности теплоисточника $q(t)$, хотя сам автор на стр. 10 в разделе 2.6. указывает, что существенное влияние на температуру заготовки оказывает скорость

движения источника $u(t)$. Это тем более требует объяснения, т.к. автор обоснованно утверждает, что градиент температуры, как основной движущей силы, осаждения частиц зависит от скорости (рампинг) (стр. 30,44,45).

2. Математическая модель объекта управления в отклонениях (3.10), принятая автором путем усреднения по толщине кварцевой трубчатой заготовки смешанной краевой задачи (2.2 - 2.6) требует обоснования. На стр. 13 диссертации автор указывает, что в ходе осаждения слоев внутренний диаметр уменьшается до 2-5 мм, после чего труба «схлопывается». Это означает, что во-первых, следует обосновать можно ли считать теплотехнически тонкими и однородными стенки трубы, а во-вторых можно ли её геометрические размеры считать постоянными в течение технологического процесса.

Кроме того, требует технологического обоснования использование граничных условий в задаче (3.14) первого рода на одном конце трубы ($z=0$) и второго рода - идеальная теплоизоляция - на другом конце труб ($z=L$).

3. Остается неясным смысл введения в методику расчета эффективной температуры $T_{эф}$ по соотношению (2.18), если автор в состав АСУТП включает сканирующий пирометр Raytek (п.4.2.1. стр. 86), способный контролировать максимальную температуру T_{max} , которая непосредственно влияет на качество СОВ (см. рис. 218 стр. 71, стр. 30 и т.п.) Это возможно было бы объяснить сохранением в составе АСУТП инфракрасного неподвижного пирометра с соответствующими поправками, но автор диссертации заменил его в составе АСУТП на сканер.

4. Методы решения задачи оптимального управления следовало бы пояснить более тщательно. В частности, неясно как определяется требуемое распределение температуры на поверхности заготовки в зоне нагрева. Как она связана с температурой внутренней поверхности, как она изменяется во времени и изменяется ли в ходе процесса по мере роста толщины осаждения оксидов. Чем и почему определяется соотношение компонент в критерии оптимальности (3.10). Почему не введены ограничения на температуру

заготовки и мощность теплоисточника и как в этом случае при ограничениях на свободу вариаций будет составлена определяющая система необходимых условий оптимальности (3.14).

4. Для реализации предложенного метода автор разработал алгоритм оптимального стабилизирующего управления, который последовательно с заданным периодом вводит поправки управления, предполагая температурное распределение в конце предыдущего периода начальным условием для последующего периода. При этом автор не исследовал сходимость оптимального управления в сильном и слабом смысле (по функционалу (3.10)). Возможно её следует предполагать исходя из принципа оптимальности Беллмана, хотя здесь могут возникнуть теоретические проблемы в технических приложениях, рассмотренных в диссертации. Следовало бы указать, как априори оценить сильную и слабую (по функционалу (3.10)) сходимость последовательных по циклам приближений.

Проблема сохранения оптимальности и классификация соответствующей последовательности решений, как минимизирующей функционал (3.10), особенно существенна, т.к. в работе В.П. Перевадчука, Д.Б. Владимировой, Д.Н. Дектярева «Оптимальное стабилизирующее управление подвижным тепловым источником в процессе MCVD», Прикладная физика Т.3 №1 2016г. на стр. 85 указано, что в подобных случаях решение оптимальной задачи зависит от шага дискретизации временной области.

5. Неясно как автор использовал теорию размерностей (стр. 53-56) в частности критерии Нуссельта (2.9), Рейнольдса, Грасгофа, Прандтля (табл. 2.1. стр. 54).

6. В работе встречаются стилистические (стр. 31,34,40, стр. 77, стр. 89) и грамматические ошибки, терминологические неточности (стр. 67.) и логические противоречия (стр. 6,19,29, 30, раздел 2.4, стр. 75, стр. 79, 42,46) и математические противоречия (стр. 51, 52 ф. (2.5) и (2.8), стр. 57 ф. (2.15) и 2.16), стр. 77,78, 88).

Замечания носят частный характер и не снижают высокого качества диссертации в целом.

Обоснованность и достоверность Научные положения, выдвинутые в диссертации, обоснованы и достоверны. Они не противоречат фундаментальным физическим закономерностям, подтверждаются многочисленными экспериментальными исследованиями автора и экспериментами других исследователей. Обоснованность и достоверность научных положений подтверждается корректным применением математического аппарата теории автоматического управления, методов математической физики, теории оптимального управления, использованием современных средств вычислительной техники. В экспериментальных исследованиях использованы аттестованные технические средства, что также подтверждает достоверность результатов эксперимента. Справедливость выводов и эффективность результатов, полученных в диссертации, подтверждается их внедрением в технологический процесс производства СОВ на предприятии «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» и в образовательный процесс Пермского национального политехнического университета.

Научная достоверность полученных результатов подтверждается их широкой апробацией и публикациями в рецензируемых изданиях.

Общая характеристика работы. В целом диссертация А.А. Пестерова представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические, технологические и расчетно-проектные решения и разработки в области автоматизации и управления технологическими процессами производства кварцевых оптических волокон, имеющие существенное значение для развития страны.

Диссертация выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне, изложена достаточно ясным технически грамотным языком.

Диссертация написана в форме, позволяющей получить полное и подробное представление о проведенных исследованиях.

Автор проявил эрудицию в современном состоянии решаемых в диссертации вопросов. Автореферат и опубликованные работы отражают все основные положения диссертации. Отражен личный вклад автора в коллективные публикации. При использовании результатов других исследователей в диссертации имеются необходимые ссылки. Диссертационная работа соответствует требованиям, установленным действующим Положением о порядке присуждения ученых степеней, соответствует паспорту специальности 05.13.06-Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность), а ее автор Пестерев Анатолий Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой «Управление
и системный анализ теплоэнергетических
и социотехнических комплексов»
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»,
Почетный работник высшего
профессионального образования РФ,
д.т.н., профессор

Лившиц Михаил Юрьевич

Подпись Лившица М.
Ученый секретарь
ФГБОУ ВО «Самарский
технический универс

ича удостоверяю:

венный

Малиновская Юлия Александровна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Самарский государственный технический
университет»,

Адрес: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус; Факс: +7(84
278-44-00; E-mail: rector@samgtu.ru; Сайт: <https://samgtu.ru>.