

**Резюме проекта,
выполняемого/выполненного в рамках ФЦП
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-
технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы»
по этапу № 2**

Номер Соглашения о предоставлении субсидии: от 23.10.2014 г. № 14.579.21.0066

Тема: «Создание электрооптических градиентных тонкопленочных структур для прецизионной оптики и аналитического приборостроения»

Приоритетное направление: индустрия наносистем и материалы

Критическая технология: технологии наноустройств и микросистемной техники; компьютерное моделирование наноматериалов, наноустройств и нанотехнологий; технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств.

Период выполнения: 23.10.2014 г. – 31.12.2014 г.

Получатель: ООО «НПК Фотрон-Авто»

Индустриальный партнер: ООО «Центр прогрессивных автотранспортных технологий»

Ключевые слова: электрооптические градиентные тонкопленочные структуры, компьютерное моделирование, прецизионная оптика, аналитическое приборостроение, резонаторный абсорбционный спектрометр

1. Цель проекта

Проект направлен на решение актуальной, не решённой в настоящее время проблемы создания многослойных электрооптических градиентных тонкопленочных структур (далее ЭГТС) и технологии их получения, предназначенных для применения в прецизионных оптических приборах с перестраиваемыми (подстраиваемыми) непосредственно в работе, in work, характеристиками под действием внешнего электрического поля.

Целям выполнения прикладных научных исследований (ПНИ) являются создание:

- электрооптических градиентных тонкопленочных структур, в том числе:

- гиперширокоспектральных (ВИД+ИК: $\lambda_k - \lambda_n > 10\lambda_n$);
- широкоугольных ($\Delta\alpha > 0,3$);
- с глубокой модуляцией спектральных характеристик ($R_1 > 99,9\%$; $R_2 < 0,1\%$);
- адаптивных, обеспечивающих расширение функций, повышение надежности, быстродействия

оптических элементов;

- оптико-аналитических приборов с ЭГТС, обеспечивающих:

- увеличение энергетической эффективности на 30 ... 40%;
- повышение чувствительности на 15 ... 20 %;
- снижение массогабаритных характеристик;

и позволяющих достичь

- импортозамещения в области прецизионной оптики и аналитического приборостроения.

В проекте впервые поставлена задача создания «умных» оптических тонкопленочных элементов: зеркал, антиотражателей, светоделителей, поляризаторов, фазокорректоров и др., позволяющих с высокой скоростью изменять структуру оптического элемента in work и, благодаря этому, изменять его функциональные характеристики, чтобы обеспечивать их соответствие изменяющимся условиям работы, в том числе, изменениям в оптической схеме прибора, изменениям эксплуатационных условий и т. д.). Речь идёт о создании по сути новых разделов оптики интерференционных покрытий и трансформационной оптики, элементы которой, оптические «трансформеры», обеспечивая заданную трансформацию оптического излучения не только за счёт их особой конструкции, но и благодаря изменениям in-work этой конструкции.

2 Основные результаты проекта

В рамках 1-го и второго этапов ПНИ последовательно выполнены следующие работы и получены следующие результаты.

2.1 Выполнен прогноз развития прецизионной оптики для приборов различных отраслей промышленности и социальной сферы. Показана высокая актуальность и значительная потребность планируемых к разработке в ПНИ ЭГТС.

2.2 Выполнены теоретические исследования ЭГТС. Разработаны математическая модель ЭГТС и алгоритмы синтеза их структуры по требуемым техническим характеристикам. В задание на синтез введены требования возможности перестройки (подстройки) конструкции ЭГТС в пределах области достижимости изменяемых параметров. Проведённое компьютерное моделирование ЭГТС и их перестройки позволило выбрать оптимальные параметры конструкций ЭГТС.

2.3 Разработана эскизная конструкторская документация (ЭКД) на ЭГТС.

2.4 Разработан проект лабораторного технологического регламента изготовления ЭГТС.

2.5 Изготовлены экспериментальные образцы ЭГТС и проведены их исследования.

2.6 Разработаны конструкции ЭГТС на базе тонких пластин и плёнок ниобата лития, изменяющих свои характеристики при приложении к ним электрического поля и обеспечивающие заданные изменения *in work* функциональных характеристик ЭГТС.

2.7 Разработана лабораторная технология изготовления ЭГТС методом магнетронного распыления с лазерным и ионным асситированием.

2.9 Разработана ЭКД макетов элементов технологического оборудования для изготовления ЭГТС.

2.10 Изготовлены макеты элементов технологического оборудования для изготовления ЭГТС. По разработанным программам и методикам исследовательских испытаний макетов выполнены их испытания. Показана эффективность разработанного оборудования для изготовления ЭГТС.

Для обоснования целей ПНИ и конкретизации направлений исследований выполнен прогноз развития отечественной прецизионной оптики, областей её применения в приборах различных отраслей промышленности и социальной сферы. Показана высокая актуальность и значительная потребность планируемых к разработке в ПНИ ЭГТС. В Российской Федерации разработка ЭГТС и функциональных элементов оптики и фотоники на их основе не ведётся. За рубежом разработки элементов оптики и фотоники на основе прецизионных тонкопленочных структур различного назначения ведутся в крупнейших технологических фирмах, в том числе, Sun coating Inc. (США), INFICON (Германия) HAUSER TECHNO COATING (Нидерланды). Разработку и промышленный выпуск малыми сериями оборудования для изготовления таких структур ведут фирмы «Leybold Optics» (Германия), установка «Helius», и Ulvac (США), установка JSP-800. До настоящего времени за рубежом производства электрооптических градиентных тонкопленочных элементов фотоники, как того требуют очевидные ее применения, не начато. Состояние разработок в этой области за рубежом (см., на пример, материалы 14th International Conference on Plasma Surface Engineering, September 15 - 19, 2014, in Garmisch-Partenkirchen, Germany) позволяет сделать вывод о том, что промышленное производство электрооптических градиентных сред будет, видимо, запущено в 2019 – 2022 г.г. Следовательно, предлагаемый проект является опережающим мировой уровень на 5 – 7 лет.

На основе разработанных в ПНИ математической модели ЭГТС и алгоритмов синтеза их структуры по требуемым техническим характеристикам проведено компьютерное моделирование ЭГТС и способы *in work* перестройки их конструкции. Это позволило выбрать эффективные перестраиваемые конструкции ЭГТС. Примером созданной эффективной конструкции ЭГТС является разработанная в проекте конструкция перестраиваемого интерференционного тонкопленочного фильтра, п. 4.2.1 ТЗ, (ЭГТС ИФ). Фильтр с градиентной зависимостью распределения показателя преломления по толщине (рисунок 1) имеет свойства адиативности, гиперширокоспектральности и широкоугольности (рисунок 2). Основные характеристики ЭГТС ИФ:

- рабочий спектральный диапазон: видимый, ближний ИК, средний ИК;

- ширина интервала перестройки: $\Delta\lambda_{\text{раб}} \geq 0,15\lambda_{\text{раб}} \geq 10$ нм (видимый диапазон);
- спектральная селективность на уровне $0,5T_{\text{max}}$: $\Delta\lambda_{0,5} = 10$ Å;
- максимальный коэффициент передачи: $T > 70\%$;
- диапазон рабочих углов: $\Delta\alpha > 0,2$.
- гиперширокая зона заграждения: $\Delta\lambda_{\text{загр}} \geq 10\lambda_{\text{раб}}$;
- термический уход настройки без систем термостабилизации $\Delta\lambda_t \leq 0,1$ Å/К;
- время жизни без систем вибро- и термостабилизации: $\tau \geq 5$ лет;

Разработанный фильтр (рисунок а) значительно превосходит по интегральному коэффициенту передачи, эксплуатационной устойчивости и массогабаритным характеристикам применяемые в настоящее время голографические фильтры (рисунок б).

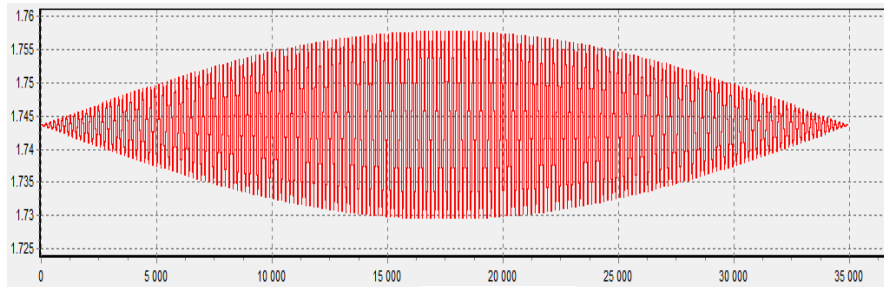
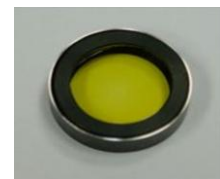
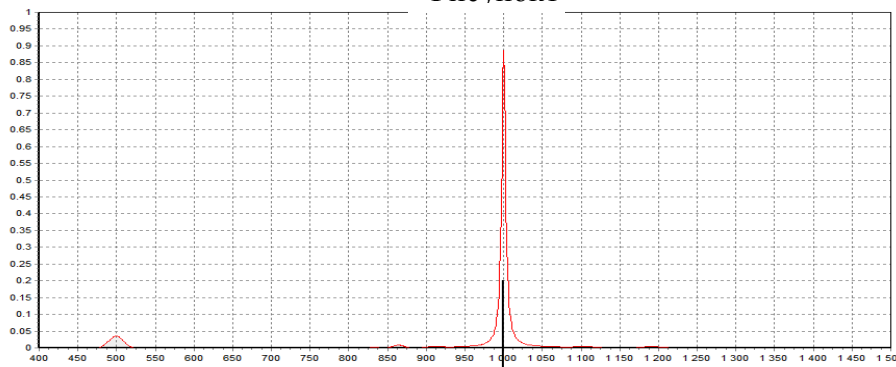


Рисунок 1



а



б

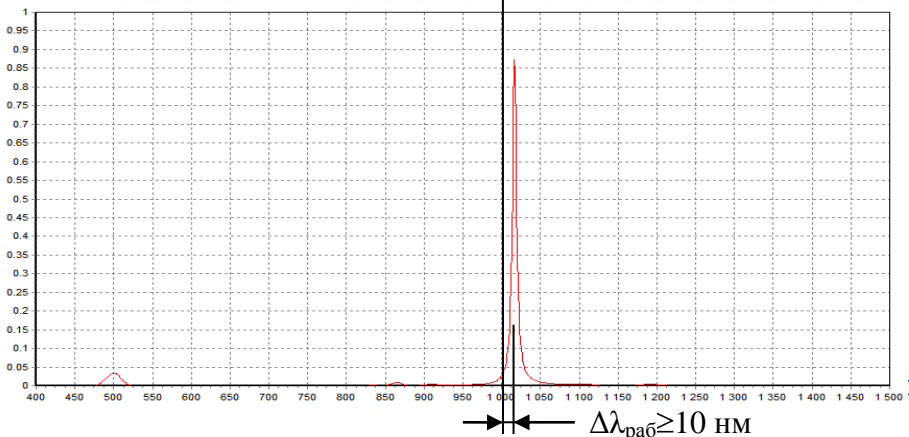


Рисунок 2

Разработанный ЭГТС ИФ наглядно демонстрирует преимущества ЭГТС.

Разработанная лабораторная технология изготовления ЭГТС методом магнетронного распыления с лазерным и ионным асситированием основана на новых возможностях регулирования структуры тонкоплёночных сред при лазерном воздействии. Обнаружен эффект образования поверхностных доменов в пластинах и плёнках ниобата лития при $T = T_k$ (температура Кюри) под действием импульса лазерного излучения с длиной волны 1064 нм, длительностью 10 нсек и энергией импульса 0,050 Дж. Показано, что температурный при $T < T_k$ (1100°C) и лазерный отжиг приводит к росту доменов, которые с течением времени отжига прорастают внутрь, образуя

доменную границу. Использование обнаруженного эффекта позволило улучшить характеристики ЭГТС.

Разработанные технические решения, касающиеся конструкций ЭГТС, способа контроля характеристик ЭГТС ИФ при изготовлении не имеют мировых аналогов и будут оформлены как «ноу хау» предприятия.

Разработанное оборудование для изготовления ЭГТС основано на методе вакуумного магнетронного осаждения материалов с ионно-лазерным ассистированием (рисунок 3).



Он позволяет получать тонкоплёночные композитные структуры с переменной по объёму концентрацией компонентов и наноразмерной структурой путём прецизионного наслаивания толщиной 1 – 5 нм градиентных $[\text{grad}(\epsilon, \mu, \sigma) > 0,15]$ металлических слоёв и их окисления с последовательной ионной и лазерной обработкой, которая обеспечивает инициирование и интенсификацию физико-химические процессов получения требуемого химического и фазового (поликристаллического и др.) состава структур, их высокую механическую, термоклиматическую и лучевую устойчивость.

Совместное лазерное и ионное воздействие для получения градиентных композитных структур является новым технологическим процессом, включающий такие его составляющие как селективно-молекулярное и пространственное травление, светоионное фрезирование и полирование. Созданный технологический процесс и оборудование, его реализующее, обладает значительной новизной и их отличительные черты будут оформлены как «ноу хау» предприятия.

3 Охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученные в рамках прикладного научного исследования и экспериментальной разработки

Выполнены патентные исследования по теме ПНИ. В ходе проведения патентных исследований был обработан информационный массив в объеме более 10 000 единиц патентной и научно-технической документации. Проведенный поиск по странам, определенным регламентом поиска, позволил выявить и отобрать для последующего анализа более 19 патентных документов, релевантных объекту поиска. Результаты поиска будут использованы в ПНИ в качестве базы для разработки новых технических решений, касающихся предмета ПНИ.

Оформление охраноспособных РИД будет выполнено на заключительном (пятом) этапе ПНИ.

4 Назначение и область применения результатов проекта

Результаты ПНИ могут быть использованы предприятиями оптической, лазерной и других отраслей отечественной промышленности. Наиболее широко приборы на основе ЭГТС найдут применение в аэрокосмической отрасли, в связи, в аналитическом приборостроении, медицине.

Реализация приоритетных государственных программ Российской Федерации, в том числе государственной программы «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности»,

а также ряда программ развития высокотехнологичных секторов экономики: авиастроения; судостроения; электронной и радиоэлектронной промышленности; космического комплекса, медицинской и фармацевтической промышленности; производство производственно-социальной инфраструктуры предприятий и городского хозяйства (прогноз до 2030 г.) делает необходимым интенсивное развитие прецизионной оптики и аналитического приборостроения. Очевидно, что указанные секторы отечественной промышленности являются главной базой потребительского спроса на приборы и элементы прецизионной оптики. Конкретный спрос на них имеется в ряде направлений указанных секторов.

Для системы ГЛОНАСС потребуется создать около 50 млн. навигационных приборов. При этом необходимо сохранить за отечественным производителем не менее 50 процентов рынка навигационной аппаратуры. В целом объем выпуска изделий микрооптоэлектронной техники для производства такой аппаратуры составит 50-70 млн. долларов в год.

Разрабатываемые в проекте перестраиваемый узкополосный интерференционный фильтр (п. 4.2.1а ТЗ), перестраиваемое тонкоплёночное интерференционное зеркало с коррекцией фазы (4.2.1в ТЗ) предназначены для применения в навигационных приборах ГЛОНАСС.

Для внедрения в стране европейской системы цифрового телевизионного вещания (решение принято Правительством Российской Федерации) необходимо использовать отечественные комплектующие и высокотехнологичное оборудование, чтобы исключить захват российского рынка зарубежными фирмами, как это произошло при внедрении мобильной радиосвязи. Объем рынка аппаратуры цифрового телевидения в стране может к 2015 году составить не менее 25 млрд. долларов, однако уже сегодня не менее 60 процентов необходимого объема может и должно выпускаться отечественными производителями. В целом совокупный объем рынка электронной базы для этого направления может составить 200-300 млн. долларов в год.

Разрабатываемые в проекте перестраиваемый тонкоплёночный интерференционный поляризатор (п. 4.2.1б ТЗ), перестраиваемое тонкоплёночное интерференционное зеркало с коррекцией фазы (4.2.1в ТЗ) предназначены для применения в устройствах цифрового телевизионного вещания.

Таким образом, существует реальная, подкреплённая государственными закупками возможность создания современного отечественного производства прецизионной оптики, в котором будут востребованы разрабатываемые ЭГТС с общим объемом сбыта около 80 – 100 млн. долларов в год.

Результаты ПНИ будут внедрены на промышленных и опытно-промышленных предприятиях, сотрудничающих с ООО «НПК Фотрон-Авто».

Разрабатываемые ЭГТС найдут широкое применение в приборах и устройствах, выпускаемых этими предприятиями.

Предлагаемый проект по техническим решениям в области тонкоплёночной фотоники опережает мировой уровень на 5 – 7 лет. Эти решения будут способствовать созданию новых перспективных приборов для в аэро-космической отрасли (гиперширокополосная аппаратура наблюдения из космоса, высокоинтенсивная (по многим объектам) лазерная локация, высокоточные лазерные системы локации малых объектов на значительных расстояниях, высокоточные малогабаритные элементы бортовой навигации - лазерные и плазменные 3D гироскопы и др.), связи (высокоскоростные помехозащищённые средства мобильной связи и др.), в аналитическом приборостроении (малогабаритные приборы определения малых количеств взрывчатых веществ, наркотиков и др.), медицине (диагностика патологий по выдыхаемым газам и др.), строительстве («умные окна» и др.). Опережающий уровень предлагаемых технических решений в области тонкоплёночной фотоники обеспечивает интерес к ним исследователей из стран – лидеров в этой области (США, Франция, Германия и др.) и создаёт предпосылки международного сотрудничества с ними. На основе результатов проводимой ПНИ наиболее перспективны совместные научно-исследовательские проекты в создании приборов для медицины и строительства.

5 Эффекты от внедрения результатов проекта

ПНИ по проекту обеспечат значительные социально-экономические эффекты.

К ним могут быть отнесены :

- снижение материало- и энергоёмкости производства

Технические характеристики ЭГТС позволяют их использовать при создании стеклянных ограждений зданий типа «умных окон». Заложенные в ЭГТС принципы перестройки спектральных характеристик in work позволяют регулировать тепловой поток через стеклянные ограждения, уменьшая его зимой и увеличивая летом.

Совершенно очевидно, что применение ЭГТС в умных окнах обеспечивает очень значительные объёмы энергосбережения для таких стран как Россия и многих других.

- снижение риска смертности от болезней

Технические характеристики ЭГТС позволяют их использовать в оптических газоаналитических многоспектральных приборах диагностики болезней человека по выдыхаемому им воздуху, в приборах лучевой терапии и др. В этих приборах будут востребованы перестраиваемый интерференционный фильтр (п. 4.2.1а ТЗ), перестраиваемое тонкоплёночное интерференционное зеркало с коррекцией фазы (4.2.1в ТЗ). Применение этих ЭГТС позволит повысить чувствительность газоаналитических измерений, увеличит точность локализации излучения на пораженных участках тканей и органов, тем самым позволит увеличить эффективность указанных приборов.

6 Формы и объёмы коммерциализации результатов проекта

Результаты ПНИ будут внедрены на производстве предприятий на основе договоров о совместном производстве, в том числе:

- с ООО «Центр прогрессивных автотранспортных технологий» (индустриальный партнёр) г. Москва;

Результатами выполнения ПНИ будут:

- ЭГТС, в том числе:

- перестраиваемый узкополосный интерференционный фильтр;
- перестраиваемый тонкоплёночный интерференционный поляризатор;
- перестраиваемое тонкоплёночное интерференционное зеркало с коррекцией фазы.

- технология изготовления ЭГТС, предназначенных для создания оптических прецизионных приборов с перестраиваемыми (подстраиваемыми) характеристиками под действием внешнего электрического поля;

- функциональные элементы оптических прецизионных приборов, в том числе:

• фазокорректоры мобильных оптических приборов измерения малых расстояний и толщин на основе ЭГТС;

• спектральные элементы приборов измерения малых расстояний и толщин на основе ЭГТС.

- прецизионный оптический прибор с функциональными элементами на основе ЭГТС – резонаторный абсорбционный спектрометр для определения концентрации кислорода.

Эта эти оптические элементы и приборы, технология изготовления ЭГТС могут быть выведены на ряд рынков сбыта, в том числе:

- в аэрокосмической отрасли: гиперширокополосная аппаратура наблюдения из космоса, высокоинтенсивная (по многим объектам) лазерная локация, высокоточные лазерные системы локации малых объектов на значительных расстояниях, высокоточные малогабаритные элементы бортовой навигации - лазерные и плазменные 3D гироскопы и др.

Возможная доля рассматриваемого рынка:

- отечественного – 30 ... 40 %;
- международного – 10 ... 15 %;

- в связи: высокоскоростные помехозащищённые средства мобильной связи и др.).

Возможная доля рассматриваемого рынка:

- отечественного – 20 ... 35 %;
- международного – 5 ... 10 %;

- в аналитическом приборостроении: малогабаритные приборы определения малых количеств взрывчатых веществ, наркотиков и др.

Возможная доля рассматриваемого рынка:

- отечественного – 20 ... 30 %;
- международного – 10 ... 15 %;

- в медицине: диагностика патологий по выдыхаемым газам и др.

Возможная доля рассматриваемого рынка:

- отечественного – 20 ... 30 %;
- международного – 10 ... 15 %;

- в строительстве: «умные окна» и др.

Возможная доля рассматриваемого рынка:

- отечественного – 60 ... 65 %;
- международного – 20 ... 35 %;

Прогнозируемый объём сбыта: 80 – 100 млн. долларов в год

7 Наличие соисполнителей

Наличие соисполнителей не предусмотрено.



Генеральный директор
ООО «НПК Фотрон-Авто»
М.П.

Руководитель работ по проекту,
главный научный сотрудник

О. Д. Вольян

А. Б. Шварцбург