

**УТВЕРЖДАЮ**

директор Самарского филиала  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Физического института им. П.Н.  
Лебедева Российской академии наук

А.Л. Петров

**ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертационную работу Пихули Дениса Григорьевича  
**«Фотонные кристаллы из изотропного материала для генерации второй  
гармоники»**,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа Пихули Дениса Григорьевича «Фотонные кристаллы из изотропного материала для генерации второй гармоники» посвящена разработке и исследованию удвоителей частоты лазерного излучения на основе фотонных кристаллов, изготовленных из свинцово-фосфатных стекол.

**Актуальность диссертационной работы** определяется тем, что целый ряд важных проблем современной науки связан с эффектами распространения волновых полей в различных средах и взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. Научное и практическое значение указанных эффектов обусловлено возможностью выявления новой информации о веществе, в том числе о созданных при использовании высоких технологий материалов и объектов (фотонно-кристаллических, композиционных, монокристаллических материалов, нано-объектов). Кроме того, подобные эффекты представляют собой основу как перспективных, так и уже внедренных в современную науку, технику и производство, уникальных технологий. Тематика исследований диссертационной работы Д.Г. Пихули связана с исследованием свойств фотонных кристаллов, разработкой методов поиска новых структур, исследованием нелинейно-оптических свойств метаматериалов, таких как фотонные кристаллы с наведенной нелинейностью. Таким образом, актуальность темы исследования не вызывает сомнений.

**Диссертационная работа** Пихули Д.Г. состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации – 125 страниц, включая 34 рисунка. Список цитируемой литературы составляет 157 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, показываются научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены защищаемые положения и дана общая характеристика диссертационной работы. Отмечен личный вклад автора, приведена информация об апробации результатов работы.

**Первая глава диссертации** посвящена исследованию свойств и оптимизации структуры фотонных кристаллов, получаемых методом двухволновой интерференционной литографии. В обзоре литературы рассмотрены как методы расчета свойств фотонных кристаллов, так и

методы их изготовления. Рассматриваются методы поиска новых структур. Особое внимание уделено генетическому алгоритму оптимизации.

Приведены результаты исследования зонной структуры трехмерных фотонных кристаллов, которые могут быть получены при помощи интерференционной литографии при трехкратном экспонировании фоторезиста двумя когерентными пучками. Проведена оптимизация геометрии экспонирования и определены оптимальные условия для получения максимальной ширины запрещенной зоны при различных показателях преломления материала решетки. Значение порога возникновения запрещенной зоны по показателю преломления материала решетки при данном методе синтеза структуры оказалось равным  $n_{th} = 2,14$ , что весьма близко к рекордным значениям (алмазная решетка –  $n_{th} = 1,9$ ). Рассмотрен непрерывный переход между простой кубической, гранецентрированной и объемно-центрированной решетками. Показано, что для всех зон оптимальная симметрия решетки практически не зависит от показателя преломления материала. Показано, что вплоть до  $n_{th} = 3,45$  наблюдается рост размера зоны с ростом показателя преломления. Наиболее устойчивой по отношению к отклонению симметрии решетки от оптимальной является зона 5-б, соответствующая простой кубической решетке. Предложен метод оптимизации структуры фотонных кристаллов с использованием генетического алгоритма. Метод использован для поиска положения диэлектрических шариков в ГЦК ячейке фотонного кристалла, оптимального для максимизации ширины запрещенной зоны. Рассмотрены случаи оптимизации положения 2, 3, 4 и 5 шариков. Во всех случаях получены структуры, обладающие полной запрещенной зоной.

**Во второй главе** изложены результаты экспериментального исследования генерации второй гармоники в свинцово-фосфатных стеклах. Проведен анализ литературы по генерации второй гармоники в стеклах. Рассмотрены результаты исследования влияния температуры на динамические характеристики решеток квадратичной нелинейности. При анализе полученных значений энергий активации носителей заряда установлено, что добавление церия в матрицу свинцово-фосфатного стекла повышает порог пробоя материала, увеличивает эффективность генерации второй гармоники, увеличивает характерное время жизни наведенной нелинейности, усиливает зависимость характерного времени жизни наведенной нелинейности от температуры. Представлены результаты исследования кубической нелинейности в свинцово-фосфатных стеклах, позволяющие выявить роль церия в увеличении эффективности генерации второй гармоники. Измерение кубической оптической нелинейности проводилось методом генерации третьей гармоники на границе раздела воздух-стекло. Установлено, что состав образцов оказывает сложное и неоднозначное влияние на нелинейно-оптические свойства: на изменение кубической нелинейности с одной стороны, и на величину поля насыщения объемного заряда с другой.

**Третья глава** посвящена теоретическому исследованию генерации второй гармоники в одномерном фотонном кристалле, состоящем из четвертьволновых слоев материала, способного к фотоиндуцированной генерации второй гармоники. Проведено моделирование распространения излучения неодимового лазера и его второй гармоники в одномерном фотонном кристалле. Промоделированы запись решетки квадратичной нелинейности и распространение света через структуру фотонного кристалла с наведенной нелинейностью. Получена генерация второй гармоники с эффективностью  $10^{-5}$ .

**В заключении** перечислены основные результаты работы.

**Научная новизна** диссертационной работы:

- определены условия существования запрещенных зон фотонных кристаллов, получаемых методом двухволновой интерференционной литографии;
- на основе генетического алгоритма предложен и реализован метод для определения оптимального положения диэлектрических сфер в решетке фотонного кристалла;
- экспериментально определена зависимость динамических характеристик свинцово-фосфатных стекол от температуры;
- исследовано влияние кубической оптической нелинейности на генерацию второй гармоники в свинцово-фосфатных стеклах;
- продемонстрирована возможность генерации второй гармоники в одномерном фотонном кристалле, состоящем из четвертьволновых слоев материала, способного на фотоиндуцированную генерацию второй гармоники.

**Практическая значимость диссертации определяется тем, что:**

- работа развивает теоретические методики синтеза фотонных кристаллов с заданными свойствами на основе генетических алгоритмов;
- в работе детально исследован весь спектр фотонных кристаллов, которые могут быть получены методом двухволновой интерференционной литографии при трехкратном экспонировании, что позволяет проектировать установки для получения фотонных кристаллов;
- полученные результаты могут быть использованы для создания нелинейных фотонно-кристаллических структур с фазовым синхронизмом в широком диапазоне длин волн, что открывает возможности построения преобразователей оптических гармоник.

**Рекомендации к использованию результатов работы**

Результаты диссертационной работы Д.Г. Пихули могут представлять интерес в исследованиях наведенных нелинейно-оптических эффектов в стеклах, при разработке пассивных и управляющих интегрально-оптических элементов для оптических систем передачи и хранения информации, синтезе фотонных кристаллов, создании преобразователей частоты лазерного излучения в учреждениях РАН, таких как Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, Институт автоматики и процессов управления, в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники, в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики, Дальневосточном государственном техническом университете, в АО Государственный Оптический Институт им. С.И. Вавилова.

**Достоверность результатов**, представленных в диссертации, обоснована применением в процессе исследований апробированных экспериментальных методик и современного оборудования, а также воспроизводимостью экспериментальных результатов. Достоверность теоретических результатов гарантируется использованием известных методик.

### **Замечания по диссертации:**

1. Непонятно, как применить метод оптимизации структуры фотонных кристаллов с использованием генетического алгоритма для создания фотонных кристаллов методом голографической литографии.
2. Не указана погрешность измерений на экспериментально полученных графиках.
3. В главе 1 упор делается на структуры, изготовленные из кремния (показатель преломления 3.45), однако кремний непрозрачен в области 532 нм – длины волны второй гармоники неодимового лазера, которая используется в расчетах записи решетки квадратичной нелинейности в главе 3.
4. Нет упоминания в тексте диссертации о тестовых расчетах, позволяющих проверить обоснованность использованного аппарата численного моделирования.
5. Имеются погрешности оформительского характера: не приведено название ссылки 89; надпись на рисунке 1.8 и подпись к рисунку отличаются, слово «атом» заключено в кавычки с одной стороны (стр.56, 101).

### **Оценка диссертации в целом**

Указанные недостатки не снижают общей **положительной оценки диссертационной работы**, выполненной на высоком научном уровне и представляющей завершённое научное исследование.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации Д.Г. Пихулей, представляются научно обоснованными и достоверными. Материал диссертации изложен грамотно и логично, работа хорошо оформлена и по прочтении производит благоприятное впечатление.

Результаты диссертационной работы опубликованы в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях. Список публикаций по теме диссертации состоит из 12 работ, в том числе 4 статьи в научных журналах, которые включены в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК России для опубликования основных научных результатов диссертации (из них 1 статья в зарубежном журнале, включенном в библиографическую базу цитирования Web of Science), 7 публикаций в материалах международных и всероссийских научных конференций. Автореферат и имеющиеся публикации достаточно полно отражают основные результаты и выводы диссертации.

Диссертация является целостной научно-квалификационной работой, в которой разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как определённый вклад в физику конденсированного состояния. В соответствии с паспортом заявленной специальности 01.04.07 направление исследований диссертации можно отнести к следующим пунктам: «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления»; «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы и дисперсные системы».

По характеру исследования и полученным результатам диссертационная работа Пихули Д.Г. соответствует специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» и

удовлетворяет критериям, прописанным в пунктах 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а сам автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Отзыв подготовлен

Заведующая лабораторией автоматизации  
и моделирования лазерных систем  
Самарского филиала ФГБУН  
Физического института им. П.Н.  
Лебедева Российской академии наук

С.П. Котова

Котова Светлана Павловна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией автоматизации и моделирования лазерных систем Самарского филиала ФИАН,

Адрес: 443011, Самара,

Телефон: +7 846 335 57 31

Факс: +7 846 335 56 00

Эл. адрес: kotova@fian.smr.ru

Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН)

Адрес: 443011, Самара, ул. Ново-Садовая, 221

Телефон: +7 (846) 334-14-81

Сайт: [www.fian.smr.ru](http://www.fian.smr.ru)

Эл. адрес: [laser@fian.smr.ru](mailto:laser@fian.smr.ru)

Диссертационная работа и отзыв были рассмотрены и одобрены на заседании ученого совета Самарского филиала ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (протокол № 2 от 1 июня 2015 года).

Ученый секретарь СФ ФИАН,  
д.т.н.



С.И. Ярьско