

**Отзыв**  
**официального оппонента**  
**на диссертацию Бойко Андрея Александровича**  
**«Исследование двухкаскадных параметрических преобразователей лазерного**  
**излучения в диапазон от 6 до 18 мкм»,**  
**представленную на соискание учёной степени**  
**кандидата физико-математических наук,**  
**специальность 01.04.05 – оптика**

Тема диссертационной работы А.А. Бойко **актуальна**, поскольку в диссертации идёт речь об исследовании параметрических преобразователей лазерного излучения ближнего ИК диапазона в перестраиваемое излучение спектрального диапазона 6-18 мкм, относящегося к среднему инфракрасному (3-20 мкм). В свою очередь, средний ИК диапазон востребован в задачах поиска вредных молекулярных примесей окружающей среды, в медико-биологических исследованиях, в обеспечении безопасности работ по поиску и добыче угля и углеводородов, в дистанционном зондировании атмосферы Земли и в других задачах науки и техники.

Текст диссертационной работы А.А. Бойко состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и включает 125 страниц текста, 109 наименований цитированной литературы, 61 рисунок.

Во **Введении** диссертационной работы А.А. Бойко анализируются проблемы развития параметрических генераторов света (ПГС) среднего ИК диапазона. Речь идёт о поиске и исследовании оптимальных схем ПГС. Важное место отводится также поиску и апробации нелинейных кристаллов, наиболее полно удовлетворяющих целому набору требований. Это прозрачность в широкой области спектра (в идеальном случае от 0,4 до 20 мкм), высокая лучевая стойкость к мощному импульсному излучению накачки ближнего ИК диапазона, высокие коэффициенты нелинейного преобразования, высокая теплопроводность, наличие двулучепреломления и т.п. Многие из этих требований противоречивы, и это одна из причин невозможности простого технического решения для создания источника когерентного излучения, перестраиваемого во всем среднем ИК диапазоне. Проанализированы классы нелинейных кристаллов – сульфидов, селенидов и других – наиболее перспективных для упомянутых ПГС по совокупности параметров, а также класс кристаллов с искусственно созданной периодической структурой доменов (периодически поляризованные нелинейные кристаллы). Во Введении сформулированы **конкретные задачи** поиска и исследования двухкаскадного ПГС с высокой эффективностью преобразования излучения накачки ближнего ИК диапазона в перестраиваемое излучение среднего ИК диапазона, которые **успешно решены** в диссертационной работе. В рамках Введения обозначена также научная новизна работы,

изложены основные защищаемые положения и этапы апробации, а также обоснован личный вклад соискателя.

**Первая глава** диссертации А.А. Бойко представляет собой обзор основ нелинейной оптики, процесса параметрической генерации света, условий фазового синхронизма, схем резонаторов ПГС. Рассмотрены различные типы нелинейных кристаллов, в том числе полупроводниковых; проанализированы методы компенсации сноса луча в условиях фазового синхронизма на основе двулучепреломления, а также метод фазового квазисинхронизма за счёт изменения знака нелинейного коэффициента (периодически поляризованные кристаллы). На основе теоретического анализа показано, что эффективность фазового квазисинхронизма может быть выше в сравнении с фазовым синхронизмом на основе двулучепреломления – при одинаковых значениях эффективной нелинейности. Проанализированы методы выращивания однодоменных нелинейных кристаллов, а также их оптические нелинейные свойства. Основные свойства нелинейных кристаллов, необходимые для параметрической генерации света для разных типов фазового синхронизма в среднем ИК диапазоне, сведены в таблицу, что удобно для их сравнения. В первой главе диссертации сделан также обзор каскадных систем параметрической генерации света, где второй каскад на полупроводниковом нелинейном кристалле использует в качестве накачки излучение сигнальной или же холостой волны, полученной в первом каскаде.

**Вторая глава** представляет результаты исследования двухкаскадного ПГС. Второй каскад на полупроводниковом нелинейном кристалле  $\text{AgGaSe}_2$  накачивается сигнальной волной, полученной в первом каскаде на периодически поляризованном кристалле  $\text{Rb:PPKTP}$ . Рассмотрены отдельно проблемы получения и перестройки когерентного излучения в диапазоне длин волн от 5,8 до 8,3 мкм (во втором каскаде использован первый тип синхронизма) и в диапазоне длин волн от 8 до 18 мкм (синхронизм второго типа  $e\text{-}oe$  во втором каскаде). Экспериментальные результаты многочисленны, большинство из них сопоставлены с расчетами. Подробно исследовалось распределение энергии холостой волны по объему кристалла  $\text{Rb:PPKTP}$  и распределение длин волн сигнальной волны по апертуре кристалла. Исследована зависимость энергии холостой волны первого каскада для различных конфигураций резонатора (подбор сферичности зеркала в резонаторе второго каскада). Исследована угловая перестройка длины волны излучения второго каскада. Исследованы временные формы импульсных сигналов накачки (лазер  $\text{Nd:YAG}$ ), вторичной накачки (холостая волна после первого каскада), вторичной холостой волны ( $\lambda=7,3$  мкм), а также спектры всех волн, формируемых ПГС. В конце второй главы сделаны выводы о преимуществе синхронизма второго рода в

кристалле  $\text{AgGaSe}_2$  для продвижения параметрического преобразования в длинноволновую часть спектра.

**Третья глава** посвящена исследованию генерации в кристалле селеногаллат серебра  $\text{AgGaSe}_2$  разностной частоты, которая попадает в средний ИК диапазон, из сигналов сигнальной и холостой волн, полученных в первом каскаде ПГС. В начале главы подчеркнута преимущество метода генерации разностной частоты (ГРЧ), обусловленное, очевидно, его безынерционностью, по сравнению с ПГС из параметрических шумов, в получении стабильного перестраиваемого по частоте когерентного излучения среднего ИК диапазона. Исследованы энергетические характеристики холостой и сигнальной волны в зависимости от энергии накачки. Исследована зависимость энергии импульсов излучения разностной частоты на длине волны 7 мкм из кристалла  $\text{AgGaSe}_2$  от энергии внешней накачки. Проведено исследование температурной перестройки длины волны ПГС первого каскада на основе кристалла  $\text{Rb:PPKTP}$  и связанное с этим изменение энергии и длины волны разностной частоты (перестройка в диапазоне 7-8,5 мкм при изменении температуры от 20 до 70 градусов Цельсия). Экспериментально показано, что в области длин волн от 6 до 8 мкм энергия импульсов излучения разностной частоты практически постоянна при постоянном уровне энергии накачки. Исследованы временные формы импульсов накачки на длине волны 1,064 мкм, сигнальной волны на длине волны 1,85 мкм и импульса излучения разностной частоты на длине волны 7 мкм. Для излучения разностной частоты исследовано поперечное распределение интенсивности пучка. В заключенном подразделе Главы 3 отмечается, что для исследованного генератора разностной частоты с внутриврезонаторной накачкой получена энергия импульсов излучения разностной частоты, сравнивая с лучшими результатами, полученными для внерезонаторной схемы накачки ГРЧ.

**Четвертая глава** излагает результаты генерации разностной частоты во втором каскаде в другом кристалле – селеногаллата бария  $\text{BaGa}_4\text{Se}_7$ , имеющем преимущества по сравнению с кристаллом  $\text{AgGaSe}_2$  по лучевой прочности, по ширине спектрального диапазона прозрачности и по химической стабильности поверхности, однако, с более низким коэффициентом нелинейности. Аргументы по выбору этого кристалла следующие. Утверждается, что при внутриврезонаторном преобразовании энергии накачки, когда высокая эффективность процесса увеличивает величину преобразования сигнальной и холостой волн первого каскада, эффективная нелинейность становится менее важным параметром, чем величина порога разрушения, особенно в системах, предназначенных для генерации высоких выходных мощностей в среднем ИК диапазоне. Это утверждение подтверждено экспериментально. Показано, что замена кристалла  $\text{AgGaSe}_2$  на кристалл

$BaGa_4Se_7$  в качестве нелинейного элемента второго каскада при одинаковых условиях накачки не приводит к уменьшению энергии разностной частоты, несмотря на то, что кристалл  $BaGa_4Se_7$  обладает меньшей нелинейностью.

В заключительном разделе диссертационной работы А.А. Бойко перечислены оригинальные схемы, использованные для параметрического преобразователя частот лазерного излучения в средний ИК диапазон с перестройкой частоты, а также полученные впервые результаты.

Некоторые замечания по диссертации А.А.Бойко:

- 1). На стр. 30 имеется выражение «Зеркала могут быть плоскими или кривыми» – не кривыми, а сферическими, параболическими, с радиусами кривизны и т.п.; там же упоминается «широко сфокусированный» Гауссовский пучок – явно жаргонное выражение.
- 2). На стр. 41 упоминается правило Миллера со ссылкой на работу 6. Правильнее было бы ссылаться на оригинальную работу, которая также имеется в списке литературных ссылок под номером 74.
- 3). На той же стр. 41 имеется список сокращений нелинейных кристаллов. Эти сокращения хотелось бы видеть в общем списке сокращений в конце работы, тем более что многие сокращения употребляются в тексте после стр. 41. Наконец, формула  $CdGeAs_2$  явно написана с ошибкой, это  $CdGeAs_2$ .
- 4). На стр. 48 часть текста расположена, почему-то, по центру и частично перекрыта рисунком 11.
- 5). Глава 1 заканчивается на стр. 60 без каких-либо выводов и рекомендаций, хотелось бы понять логику исследований.
- 6). На стр. 66 упоминается «отверстие в алмазном элементе для фильтрации пучка». Разве алмаз непрозрачен в области ближнего ИК излучения, чтобы из него можно было изготовить диафрагму?
- 7). На стр. 75 расположен Рис. 38 и далее Рис.39. Что за единицы измерения амплитуды сигналов н.е.? В тексте никаких пояснений нет.

### **Заключение**

В результате выполнения диссертационной работы А.А. Бойко найдены оригинальные схемы параметрических преобразователей частоты, использующих в одном резонаторе кристалл с периодической поляризацией доменов (первый каскад), а также полупроводниковый нелинейный кристалл (второй каскад либо параметрической генерации, либо генерации разностной частоты излучений, полученных в первом каскаде). Показано, что замена кристалла  $AgGaSe_2$  на кристалл  $BaGa_4Se_7$  в качестве нелинейного

элемента второго каскада при одинаковых условиях накачки не приводит к уменьшению энергии разностной частоты, несмотря на то, что кристалл  $BaGa_4Se_7$  обладает меньшей нелинейностью.

Следует подчеркнуть большой объем проделанной экспериментальной работы, высокое качество оптических элементов, необходимых для реализации перестраиваемого в широком диапазоне спектра параметрического источника излучения среднего ИК диапазона, а также глубокое понимание физических процессов, продемонстрированное соискателем при написании диссертационной работы. **Научная новизна и практическая значимость работы** не вызывают сомнения.

Диссертационная работа написана ясным, понятным языком. Сделанные замечания и некоторое количество опечаток не снижают общего положительного впечатления. Автореферат вполне отражает основное содержание диссертации.

Представленная диссертация соответствует требованиям ВАК Российской Федерации, и её автор, Бойко Андрей Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Отзыв составила:

Доктор физико-математических наук (специальность 01.04.05 - Оптика),  
заведующая лабораторией

лазерной спектроскопии и лазерных технологий

Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Института физики полупроводников

им. А.В. Ржанова Сибирского отделения

Российской академии наук (ИФП СО РАН)

 — Н.Н. Рубцова

Почтовый адрес:

630090, проспект Академика Лаврентьева, 13, ИФП СО РАН,

тел. +7(383)333-27-69, электронный адрес: rubtsova@isp.nsc.ru

Подпись Н.Н. Рубцовой заверяю,

Учёный секретарь ИФП СО РАН,

к.ф.-м.н.



С.А. Аржанникова