

**Отзыв официального оппонента
на диссертацию Ватника Сергея Марковича
“Высокоэффективные лазерные излучатели на основе кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфрамов, активированных ионами тулия и гольмия”
представленную на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук,
специальность 1.3.19 - лазерная физика**

Актуальность темы диссертационной работы Сергея Марковича Ватника, посвященной высокоэффективным лазерным излучателям на основе кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфрамов, активированных ионами тулия и гольмия, **не вызывает сомнения**. Тема раскрыта в диссертации комплексным подходом фундаментальных аспектов взаимодействия ионов тулия и гольмия в анизотропных кристаллических матрицах, и рядом практических результатов, представляющих значительный интерес для разработки эффективных лазерных источников с высокой средней мощностью генерации в спектральном диапазоне 1.8 – 2.1 мкм. Это направление актуально в мире, и формирование его актуальности является, в том числе, заслугой диссертанта. Отметим также перспективы применения лазеров и систем на их основе: медицина, оптическая локация, противодействие системам ИК наведения и наблюдения, экологический мониторинг, в том числе обнаружение взрывчатых веществ, применение в качестве источников накачки длинноволновых лазеров.

Перейдем к подробному анализу работы.

Введение содержит краткую историю поиска эффективных твердотельных лазерных сред со световой накачкой, обзор специальных конфигурации активных элементов (дисковые модули, мини-слэбы и т.п.), различных режимов генерации, включая быструю перестройку по спектру, модуляцию добротности. Отмечены наиболее интересные твердотельные кристаллические матрицы, в которых ионы-активаторы имеют большие сечения переходов в области длин волн генерации и накачки. Наконец, названа группа моноклинных кристаллов двойных вольфрамов калия со структурной формулой $KRe(WO_4)_2$, где $Re = Gd, Y, Lu$ (в сокращенном варианте $KReW$) в качестве матриц и трехвалентные ионы-активаторы ($Nd^{3+}, Yb^{3+}, Tm^{3+}, Ho^{3+}$ и др.) в качестве легирующих добавок (степень легирования может быть достаточно большой). Во **введении** обсуждаются цели и задачи работы, новизна результатов, теоретическая и практическая значимость работы, наиболее яркие результаты, личный вклад автора, апробация на международных конференциях, а также изложены защищаемые положения.

Первая глава посвящена ряду физических, оптических и термомеханических характеристик кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфрамов. В первом параграфе 1.1. на примере кристаллов двойных калий редкоземельных вольфрамов $KReW$, $Re = Gd, Y, Lu$ рассмотрены синтез и структурные характеристики образцов кристаллов. Сделан анализ факторов, определяющих качество кристалла: колебания температуры в расплаве, вызывающие неоднородности в кристалле, термические напряжения, ввод штока затравки через патрубков, играющий роль "диффузного затвора", а также уменьшение максимальной температуры раствора-расплава. **В результате**

оптимизации условий синтеза и технологии выращивания были получены высококачественные крупногабаритные структурно-совершенные кристаллы двойных калий-редкоземельных вольфраматов. Во втором параграфе приведены основные физические и оптические параметры кристаллов $KRe(WO_4)_2$. Приведены спектр поглощения кристалла KYW и спектр пропускания кристалла KLuW. В силу низкой симметрии (пространственная группа $2/m$) кристаллы KReW являются двулучепреломляющими. Три ортогональных оси оптической индикатрисы (x, y, z) для моноклинных кристаллов традиционно обозначаются как N_p, N_m и N_g , при этом соответствующие показатели преломления отвечают условию $n_p < n_m < n_g$. Взаиморасположение кристаллографических осей a, b, c и осей оптической индикатрисы N_p, N_m и N_g и разметка осей N_m и N_g на фрагменте кристаллической булы $5\%Tm:KLuW$, вырезанной вдоль оси b . Ось N_p совпадает с b и перпендикулярна полированной плоскости булы. Приведены коэффициенты линейного расширения кристаллов KReW. Согласно данным, представленным в Таблице 1.1., коэффициент линейного расширения вдоль оси b (ось симметрии второго порядка $[010]$) существенно меньше аналогичных величин для осей a $[100]$ и c $[001]$. Это может влиять на термомеханические напряжения, в том числе порог разрушения кристалла при его неоднородном нагреве. В Таблице 1.3 приведены базовые физические характеристики кристаллов KReW. В параграфе 1.3. описана схема экспериментальной установки по измерению термо-оптических коэффициентов в кристалле KLuW. В выводах к Главе 1 отмечается возможность существования в кристаллах определенных направлений, при распространении по которым температурные градиенты не влияют на фазовую структуру светового луча с соответствующей длиной волны и поляризацией (**атермальные направления**), такие направления могут быть использованы при оптимизации активных элементов для **лазерных излучателей со сверхстабильным пространственным профилем**.

Во второй главе рассмотрены спектроскопические характеристики кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных ионами туллия и гольмия. В параграфе 2.1. обсуждается структура энергетических уровней трехвалентных ионов туллия и гольмия. Поскольку $5f$ электронные оболочки экранированы от внутрикристаллического поля s -, p - и d внешними оболочками, вид спектров поглощения и люминесценции редкоземельных ионов слабо зависит от типа и структуры кристаллической матрицы. В частности, количество штарковских подуровней определяется симметрией внутрикристаллического поля, совпадающей с локальной симметрией кристалла, и квантовым числом иона J . Приведен ряд экспериментов с ламповой накачкой в двухмикронной области спектра для кристаллов $5\%Ho:KGW$, 3% -, $5\%Ho:KYW$ и $3\%Ho:KLuW$. В параграфе 2.2. обсуждаются спектры поглощения, люминесценции и ненасыщенного усиления. Обсуждается анизотропия поляризационных характеристик люминесценции кристалла и ее влияние на сечение излучательных переходов. В параграфе 2.3. обсуждаются основные особенности взаимодействия ионов туллия и гольмия в лазерных кристаллах. Рассмотрены случай слабого уровня накачки (приближение парного взаимодействия ионов) с учетом кросс-релаксационных процессов и ап-конверсии, случай короткого импульса накачки, импульсно-периодической накачки. В параграфе 2.4. подробно излагается техника измерения, определения кинетических констант и роль кросс-релаксации в кристаллах $Tm:KReW$. Выводы к Главе 2: **для крупногабаритных структурно-совершенных кристаллов семейства KReW,**

допированных трехвалентными ионами тулия и гольмия, найдены сечения лазерных переходов, времена жизни и величины основных кинетических констант парного взаимодействия ионов. Моноклинная симметрия имеет выраженную анизотропию спектроскопических параметров ионов тулия и гольмия в этих кристаллических матрицах. Аномально высокие значения сечений излучательных переходов ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ ионов тулия и ${}^5I_7 \leftrightarrow {}^5I_8$ ионов гольмия в двухмикронной области спектра в несколько раз превышает аналогичные величины для широко распространенных кристаллов YAG, YAP, YLF, и позволяет реализовать режимы импульсной генерации с наносекундной длительностью лазерных импульсов. **Сечения коэффициентов ненасыщенного усиления ионов гольмия и тулия позволяют реализовать непрерывную перестройку длины волны генерации в спектральных диапазонах 2020...2100 нм и 1800...2000 нм, соответственно. Кристаллы Tm:KReW, Ho:KReW, Ho:Tm:KReW являются перспективными оптическими материалами для перестраиваемых лазерных излучателей двухмикронного диапазона.**

В третьей главе обсуждается эффект фотонной лавины в кристаллах калий-иттриевых и калий-иттербий-иттриевых вольфраматов, активированных тулием. Фотонная лавина — это процесс, при котором поглощение в кристалле одного фотона приводит к испусканию множества других. Этот эффект используется в специализированных лазерах, где поглощение фотонов запускает цепную реакцию, которая в конечном итоге приводит к эффективной генерации излучения. Кроме того, испускаемые фотоны имеют более высокую энергию, чем поглощенные (преобразование с повышением частоты). Для создания фотонной лавины обычно используют лантаноиды. В параграфе 3.1. обсуждаются основные особенности ап-конверсионных схем накачки активных сред. На примере двухкаскадной накачки кристалла Nd:LaF₃ показано, как заселение уровня ${}^4D_{3/2}$ происходит в результате последовательного поглощения квантов накачки с длиной волны 800 и 590 нм, а лазерная генерация происходит с длиной волны 380 нм. Приведены оптические схемы фотонной лавины для кристаллов Pr:LaCl₃ и Er:YALO. Отмечается, что эффективность образования фотонной лавины в кристаллах Pr:LaCl₃ достаточно высокая и достигает 25%, т.е. каждый четвертый квант накачки участвует в образовании фотонной лавины. Параграф 3.2. посвящен роли кросс-релаксации в механизме формирования фотонной лавины. Параграф 3.3. посвящен экспериментальным исследованиям кинетика фотонной лавины в кристалле 7%Tm:50%Yb:KYW. На основании результатов кинетических экспериментов сделан вывод о том, что в режиме фотонной лавины может быть получена весьма большая инверсия заселенностей, вплоть до 90%. Более точные оценки величины инверсии были получены в параграфе 3.4., где исследовались коэффициенты усиления и эффективность образования фотонной лавины. Выводы к Главе 3: Экспериментально показано, что развитие фотонной лавины в кристаллах Tm:KReW и Tm:Yb:KReW при их накачке излучением неодимовых лазеров с длиной волны 1064 нм происходит по следующему механизму. При очень малой начальной заселенности метастабильного уровня 3F_4 (вследствие конечной температуры кристалла или переноса энергии от итербия к тулию) поглощение кванта накачки с энергией $\sim 9400 \text{ cm}^{-1}$ заселяет группу уровней ${}^3F_3, {}^3F_2$, откуда происходит быстрый безызлучательный переход на уровень 3H_4 с последующей кросс-релаксацией на метастабильный уровень 3F_4 . В результате этих процессов поглощение кванта накачки с длиной волны 1064 нм с метастабильного уровня 3F_4 увеличивает заселенность этого уровня, при этом число ионов

на уровне 3F_4 начинает экспоненциально быстро возрастать. Эффект фотонной лавины имеет пороговый характер, поскольку интенсивность кросс-релаксационных процессов должна компенсировать излучательные переходы в основное состояние, $3F_4 \rightarrow 3H_6$. **Согласно полученным результатам, оптимизация состава кристаллов Tm:KReW и параметров импульсной накачки позволяет получить инверсию заселенностей на уровне 70%...90% при квантовой эффективности фотонной лавины на уровне 10...15%.** Спектроскопические параметры кристаллов Yb:Tm:KYW и Tm:KYW, определенные по кинетике развития фотонной лавины и ненасыщенным коэффициентам усиления кристаллов, совпадают в пределах экспериментальной погрешности (10...15%) с аналогичными величинами, измеренными по стандартным спектроскопическим методикам. Данное обстоятельство можно рассматривать как прямое подтверждение достоверности и взаимосогласованности спектроскопических и кинетических параметров лазерных кристаллов Tm:KReW.

Глава 4 посвящена мини-слэб лазеры на основе кристаллов Tm:KLu(WO₄)₂. В параграфе 4.1. представлен набор базовые конфигурации активных элементов мощных твердотельных лазеров с диодной накачкой с уровнем выходной мощности до десятков килоВатт – элементов прямоугольной формы с полированными боковыми поверхностями (слэб) и тонких дисков. В данной главе рассмотрена слэб геометрия приводящая к эффективной компенсации фазовых термо-оптических искажений и соответствующему уменьшению оптической силы термической линзы. Параграф 4.2. посвящен схеме накачки а также измерению тепловой линзы активного слэб-элемента из кристалла 5%Tm:KLuW (срез Nm). Подробно описано просветление, монтаж элемента, накачка. Отмечено, что формирование тепловой линзы цилиндрического типа обусловлено, прежде всего, одномерным распределением градиента температур, т.е. что теплообмен через верхнюю и нижнюю грани слэба незначителен. В параграфе 4.3. измерены параметры генерации и спектры излучения слэб-элементов 5%Tm:KLuW для Nm- и атермальных (АТ) срезов. Для Nm-среза спектр генерации центрирован на длине волны 1910 нм, он достаточно узок (не более 2 нм) и практически не меняется при замене зеркал. Спектр генерации АТ-слэба, напротив, достаточно сильно зависит от коэффициента пропускания выходного зеркала. Эти особенности спектрально-генерационных характеристик обусловлены тем, в силу значительной анизотропии кристаллов Tm:KReW на величину коэффициента ненасыщенного усиления будет влиять не только длина волны, но и ориентация кристалла. Параграф 4.4. посвящен особенностям генерации мини-слэба Nm-cut 5%Tm:KLuW в режиме пассивной модуляции добротности кристаллом Cr²⁺:ZnSe. Отмечено, что выходная мощность и эффективность генерации пассивном режиме накачки могут быть значительно увеличены при оптимизации параметров насыщающегося поглотителя и соответствующей корректировке термических линз, формирующихся в активном элементе и кристалле Cr²⁺:ZnSe. Параграф 4.5. анализирует параметры непрерывной генерации миниатюрных стержневых элементов и пластин из b-cut Tm:KReW. Выводы к Главе 4: Несмотря на сравнительно небольшие значения теплопроводности и микротвердости кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, оптимизированные по геометрии и концентрации **активные элементы Tm:KLuW позволяют получить мультиваттную генерацию в двухмикронной области спектра с полным КПД на уровне 30...40%**, при этом максимальная выходная мощность была получена для мини-слэбов. Такой результат обусловлен, прежде всего,

существенным увеличением площади боковых поверхностей активного слэб-элемента по сравнению со стандартными конфигурациями, что обеспечило эффективный теплоотвод и минимальный перегрев лазерного кристалла.

В главе 5 рассмотрены спектрально-генерационные характеристики тулиевых дисковых лазеров на основе кристаллов двойных калий-лютециевых вольфраматов. В параграфе 5.1 показаны основные конфигурации накачки дисковых лазеров и их накачки. Отмечено основное достоинство тонких дисков является - практически неограниченная площадь активной области. Это важно для получения высокой выходной мощности (значительной энергии) лазерных импульсов. В параграфе 5.2. дан краткий обзор теории тонких дисков (поля температур и напряжений, усиленное спонтанное излучение, предельная мощность генерации). Отмечено, зависимость температуры и фазового набега от толщины диска имеет квадратичный характер, в то время как величина напряжений (пропорциональная градиенту температур) меняется с толщиной диска практически линейно. В параграфе 5.3. представлена технология изготовления активных элементов, описаны первые эксперименты с дисковыми лазерами 15%Tm:KYW. В параграфе 5.4. исследованы спектрально-генерационные характеристики дисковых лазеров на основе эпитаксиальных структур 5...15% Tm:KLuW/KLuW. Отмечено, что использование эпитаксиальных и композитных структур типа Tm:KLuW/KLuW также существенно улучшает параметры генерации. Отмечена возможность создания миниатюрных одночастотных микрочип-лазеров с монолитным резонатором. Параграф 5.5. исследует параметры генерации композитных активных элементов 5%Tm:KLuW/KLuW, изготовленных методом диффузионной сварки. Дифференциальная эффективность композитных структур несколько выше эпитаксиальных (в среднем на 10-15%), что, по всей вероятности, обусловлено тщательным контролем качества на предварительном этапе отбраковки кристаллического материала для диффузионного сращивания. Выводы к Главе 5:

Проведенные комплексные спектрально-генерационные эксперименты со всеми типами дисковых структур на основе двойных калий-редкоземельных вольфраматов, легированных тулием, показали благоприятные перспективы их использования для создания мультиваттных лазерных источников, перестраиваемых в широком спектральном диапазоне, ~1.8-2.0 мкм. В целом, дисковые элементы на основе тонких кристаллических пленок наиболее просты в изготовлении и обладают сравнительно высокой дифференциальной эффективностью на уровне 35%...50%, плотность энергосъема генерируемой оптической мощности составляет ~ 300 Вт/см². Целевое использование таких излучателей – перестраиваемые источники излучения для оптической связи, скрытого целеуказания и т.п. Дисковые элементы на основе эпитаксиальных и композитных структур более сложны в изготовлении, но обеспечивают значительно лучший энергосъем, до ~ 1 кВт/см². Их генерационные параметры приблизительно одинаковы, с небольшим преимуществом композитов по дифференциальной эффективности, составляющей при оптимизации параметров резонатора до 56% по отношению к поглощенной мощности накачки. **В силу большой оптической плотности и высокой эффективности генерации как эпитаксиальные, так и композитные структуры Tm:KLuW/KLuW являются перспективными лазерными материалами для компактных дисковых излучателей двухмикронного диапазона (1850...1950 нм) с выходной мощностью на уровне 10...100 Вт.** Для композитных структур обоснован и экспериментально подтвержден новый эффект

уширения спектральной полосы генерации, обусловленный наличием внутренних напряжений, а также продемонстрирован лабораторный прототип излучателя с собственной шириной спектра более 200 нм.

Глава 6 посвящена дисковым Ho:KYW лазерам высокой эффективности. Параграф 6.1. исследует параметры генерации дисковых Ho:KYW лазеров на основе эпитаксиальных пленок с различной концентрацией гольмия. Параграф 6.2. рассматривает термо-оптику дисковых Ho:KYW/KYW лазеров. Параграф 6.3. рассматривает пассивную модуляцию добротности дисковых Ho:KYW лазеров (спектры генерации и параметры световых импульсов). Параграф 6.4. посвящен внутрирезонаторной накачке дискового активного элемента из керамики 1%Ho:YAG. Выводы к главе 6: Проведенные экспериментальные исследования генерационных параметров эпитаксиальных структур Ho:KYW/KYW показали значительную зависимость эффективности генерации от концентрации гольмия. В режиме пассивной модуляции добротности лазерного резонатора полупроводниковым насыщающимся поглотителем (SESAM) был получен стабильный режим импульсно-периодической генерации на длине волны 2056 нм с частотой следования 135 кГц длительностью 200 нс и энергией импульса 4 мкДж. Оптимизация параметров SESAM даст возможность существенно увеличить энергию импульсов и сократить их длительность. **Внутрирезонаторная «резонансная» схема накачки гольмиевых активных элементов позволяет получить когерентное излучение сразу в двух областях спектра: ~ 1.9 мкм (тулий) и ~ 2.1 мкм (гольмий).** Такие излучатели представляют интерес для компактных лидаров, дальномеров и систем экологического мониторинга.

Глава 7 рассматривает энергообмен в со-активированных кристаллах Ho:Tm:KReW в приближении локального термодинамического равновесия. Параграф 7.1. посвящен основным особенностям модели парного взаимодействия ионов и приближения локального термодинамического равновесия для соактивированных кристаллов. Параграф 7.2. посвящен термодинамике энергообмена ионов тулия и гольмия в кристаллах. Параграф 7.3. рассматривает основные особенности лазерной генерации в со-активированных кристаллах Ho:Tm:KReW. Выводы к Главе 7: При условии интенсивного энергообмена в соактивированных тулием и гольмием активных средах квази-равновесное распределение ионов по метастабильным состояниям 3F_4 и 5I_7 можно получить в рамках модели локального термодинамического равновесия. Согласно детальному термодинамическому расчету, число ионов гольмия в состоянии 5I_7 растет пропорционально числу ионов тулия 3F_4 только при малых уровнях возбуждения. При увеличении интенсивности накачки линейная пропорция нарушается в сторону относительного уменьшения заселенности метастабильного уровня 5I_7 до тех пор, пока подавляющая часть ионов не перейдет на метастабильные уровни. Модель локального термодинамического равновесия получила достоверное экспериментальное подтверждение и может быть использована при оптимизации состава соактивированных активных элементов (кристаллов, керамик, стекол) для лазерных излучателей и оптических усилителей. Значительный интерес к со-активированным лазерным средам обусловлен существенным упрощением схемы накачки ионов гольмия за счет прямой передачи энергии от ионов тулия. **В частности, использование со-активированных материалов позволяет отказаться от вспомогательных тулиевых лазеров,**

обеспечивающих инверсию заселенности и генерацию ионов гольмия на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$, $\lambda \sim 2.1$ мкм. Оптимизация состава со-активированных активных сред должна учитывать все основные механизмы энергообмена, к числу которых относятся, прежде всего, кросс-релаксация и ап-конверсия. **Активированные активные среды с тулием и гольмием наиболее целесообразно использовать в компактных маломощных излучателях, предназначенных, например, для систем оптической связи, ИК-спектрометрии, лидаров, экологического мониторинга и малоинвазивной медицины – хирургии, офтальмологии, косметологии.**

В Заключении перечислены результаты комплексного исследования новых лазерных материалов для эффективных излучателей двухмикронного диапазона (моноклинных кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных трехвалентными ионами тулия и гольмия). **Приложение** содержит два акта внедрения.

Диссертационная работа С.М. Ватника отличается глубиной проработки материала и представляет собой **завершенную научно-квалификационную работу**. В работе изучены свойства моноклинных кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных трехвалентными ионами тулия и гольмия (спектры поглощения и излучения), изучены взаимодействия ионов (получены основные кинетические параметры их взаимодействия), термо-оптические параметры, изучены особенности формирования фотонной лавины. Изучены свойства слэбов, стержней, дисков и композитов; параметры эпитаксиальных дисковых структур с гольмием (реализован режим пассивной модуляции добротности). Модель локального термодинамического равновесия получила достоверное экспериментальное подтверждение. Численное моделирование основных особенностей обмена энергией в анизотропных кристаллах позволило добиться хорошей точности описания экспериментальных результатов и получить достоверные значения физических параметров. Каждая проблема исследована тщательно и доведена до практики.

Результаты диссертационной работы С.М. Ватника **являются новыми** и имеют научный приоритет на момент их опубликования. Из них можно выделить:

- Предложен и реализован новый метод измерения термических коэффициентов оптического пути (ТКОП). Для кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов с различными концентрациями ионов-активаторов впервые определены спектральные зависимости ТКОП в интервале 400...2100 нм, сделан вывод о наличии в кристаллах «атермальных» направлений с нулевым ТКОП;
- Получен и проанализирован полный набор данных по спектроскопическим и кинетическим характеристикам кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, активированных ионами тулия и гольмия, на его основе сформулированы критерии оптимизации состава активных элементов;
- Проведены комплексные исследования эффекта «фотонной лавины» в кристаллах двойных калий-иттриевых и калий-иттербий-иттриевых вольфраматов, активированных

тулием. Экспериментально показано, что в режиме «фотонной лавины» величина инверсии заселенностей тулия может достигать 70...80%;

- Для кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов с тулием впервые проведен сравнительный анализ генерационных характеристик различных форм активных элементов (пластины, диски, слэбы, стержни), получены рекордные для данного класса кристаллов выходная мощность, величина энергосъема и диапазон спектральной перестройки;

- Подробно исследован режим пассивной модуляции тулиевых лазеров с помощью насыщающихся поглотителей, получены световые импульсы с длительностью 7 нс и пиковой мощностью 40 кВт;

- В приближении локального термодинамического равновесия впервые проведен полный расчет заселенности метастабильных уровней тулия и гольмия в со-допированных кристаллах при произвольных уровнях возбуждения. На этой основе были сформулированы критерии оптимизации состава кристаллов для непрерывных и импульсных лазерных излучателей двухмикронного диапазона на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов гольмия;

- Впервые проведены комплексные исследования спектрально-генерационных характеристик дисковых активных элементов $\text{Ho:KY(WO}_4)_2$ с накачкой волоконным тулиевым лазером, получена генерация на длинах волн 2073 нм и 2060 нм с дифференциальной эффективностью до 66%;

- На основании всей совокупности полученных результатов сделан вывод о перспективности использования кристаллов двойных вольфраматов, активированных тулием и гольмием, для разработки компактных источников лазерного излучения с выходной мощностью 50...100 Вт.

Все эксперименты выполнены на современном лабораторном оборудовании, **достоверность результатов** подтверждена сравнением с российскими и зарубежными исследованиями, публикацией в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях, докладами на международных семинарах и конференциях.

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и двух приложений (акты внедрения). Общий объем диссертации составляет 260 страниц, включая 112 рисунков, 11 таблиц по тексту, список литературы из 279 наименований, а также 46 работ по теме диссертации.

К достоинствам диссертация С.М. Ватника, несомненно, относятся логическая стройность изложения материала, подробное обоснование всех положений и выводов, стилистически и грамматически выверенный текст, хорошее оформление иллюстративного материала – рисунков, фотографий и таблиц.

Автореферат вполне отражает основное содержание диссертации.

В качестве замечания отметим применение жаргонных выражений («метастабилья» вместо «метастабильного уровня», стр.222). Сделанные замечания не снижают общего положительного впечатления.

Диссертационное исследование Ватника Сергея Марковича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержатся новые решения актуальных проблем спектроскопии и лазерной генерации анизотропных активных сред, а совокупность ее основных результатов представляет значительный вклад в области разработок нового поколения лазерных источников двухмикронного диапазона.

Работа соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, а ее автор, Ватник Сергей Маркович, заслуживает присуждение ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 «Лазерная физика».

Отзыв составила:

доктор физико-математических наук (специальность оптика 01.04.05),

ведущий научный сотрудник

лаборатории 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

16.05.2024

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.