

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Сафоновой Елены Сергеевны

«Твердотельные квантроны с диодной накачкой ближнего ИК-диапазона, работающие в широком температурном диапазоне без активной системы термостабилизации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 «Лазерная физика»

Диссертация посвящена, в основном, разработке кванtronов с поперечной диодной накачкой и кондуктивной системой охлаждения со слабо изменяющимися параметрами выходного излучения в температурном диапазоне окружающей среды от – 50 до + 50 °C и созданию математической модели для описания их работы и определения критических параметров. Квантроны данного типа можно использовать для создания усилителей и генераторов наносекундного импульсного лазерного излучения ближнего ИК-диапазона, способных адекватно работать в довольно широком диапазоне температур с существенным преимуществом реализации охлаждения активного элемента посредством теплоотвода через используемую для фокусировки излучения диодов накачки цилиндрическую лейкосапфировую линзу и отсутствия применения дополнительных активных систем термостабилизации.

Автором предложен комплексный математический подход для моделирования работы создаваемых кванtronов, содержащий расчеты распределения инверсной населенности в активной среде, распределения температуры в элементах квантрана, а также, в зависимости от задачи усиления или генерации лазерного излучения, определения параметров активного элемента и лейкосапфировой линзы для формирования однородного или параболического профиля распределения коэффициента усиления в активной среде, который слабо зависит от изменения длины волны накачки лазерных диодов с температурой в рассматриваемом диапазоне. Модельное определение оптимальных параметров резонатора, таких как коэффициенты пропускания выходного зеркала и начального коэффициента пропускания насыщающегося поглотителя, с целью одновременной максимизации энергии генерируемых импульсов и минимизации её изменения с температурой позволяет создавать импульсные лазерные источники с заданными параметрами выходного излучения, которые слабо зависят от температуры в рассматриваемом диапазоне.

Тематика диссертации, конечно, актуальна, её практическая направленность и ценность очевидны. В частности, в работе наряду с результатами экспериментальных исследований спектральных и энергетических параметров излучения лазерных диодных решёток в температурном диапазоне от -50 до $+65$ °C также представлены результаты исследований предложенных схем усилителя и генератора ($\text{Nd}^{3+}\text{:YAG}$ лазер с пассивной модуляцией добротности) импульсного излучения, которые без активной системы охлаждения относительно стабильно работали в температурном диапазоне от -50 до $+50$ °C. С применением пассивного охлаждением активного элемента при помощи цилиндрической лейкосапфировой линзы продемонстрирована возможность стабильной генерации импульсов лазерного излучения длительностью несколько наносекунд с частотой 25 Гц и пиковой мощностью до 40 МВт, в диапазоне температур от -50 до $+50$ °C энергия импульса немонотонно изменялась в пределах от 95 до 140 мДж, достигая максимума при температуре диодных решёток накачки порядка 17 °C (соответствует длине волны 808,9 нм). В рассматриваемом температурном диапазоне без применения жидкостного охлаждения теоретически продемонстрирована возможность реализации стабильного квантрана с импульсной накачкой от десяти лазерных решёток суммарной пиковой мощностью накачки до 20 кВт при длительности и частоте следования импульсов 250 мкс и 50 Гц соответственно.

Одной из наиболее близких к данной диссертации является диссертация П.П. Николаев, «Квантраны твердотельных лазеров с изменяемым распределением коэффициента усиления в активном элементе» (Москва, 2016), на которую автор ссылается. В работе П.П. Николаева был описан способ эффективного управления профилем коэффициента усиления квантрана с водяным охлаждением и изменения расходности выходного излучения за счёт перестройки длины волны накачки посредством изменения температуры диодов накачки. Было показано, что перестройка длины волны накачки в сравнительно узком диапазоне приводит к изменению профиля коэффициента усиления и термооптических неоднородностей в активном элементе и, как следствие, к существенному изменению расходности выходного излучения. Однако важным является тот факт, что возможность стабилизации распределения коэффициента усиления в условиях пассивного охлаждения активного элемента при перестройке длины волны накачки в широком диапазоне не являлось в той работе целью и предметом обсуждения. Тем не менее, с моей точки зрения, в свете близости тематик стоило использовать работу 2016-ого года в качестве своего рода «отправной точки», уделить ей в обзоре больше внимания и провести более

подробное сравнение предложенных моделей кванtronов, подчеркнув общие моменты и отличия используемых подходов.

Диссертационная работа имеет и ряд недостатков, среди которых можно выделить следующие:

1. В тексте диссертации в нескольких местах присутствуют отсылки к формулам и рисункам с ошибочными номерами, например, на с. 50 к уравнениям (33), (15), (30) вместо (29), (8), (31) соответственно, на с. 56 отсылка к формуле (33) и рисунку 2.6 вместо формулы (35) и рисунка 2.7. Также встречается несогласование частей речи и падежных окончаний (наибольшая плотность в последнем абзаце на с. 61 – в четырёх местах в шести строчках текста). Одной и той же буквой “*T*” обозначены температура (с. 35, формула (4)) и паразитные потери в резонаторе (с. 42, формула (13)), а буквой “*ρ*” обозначается плотность (с. 35, формула (4)) и логарифм отношения инверсных населённостей (с. 51, формула (36)).
2. В формулировке 2-ого пункта научной новизны и 1-ого пункта положений, выносимых на защиту, содержатся фразы: «*Впервые предложен метод математического моделирования лазеров с диодной накачкой, отличающийся использованием множителей Лагранжа для нахождения...*» и «*Модель математического моделирования твердотельных лазеров с диодной накачкой, отличающаяся использованием множителей Лагранжа для нахождения...*». Логично заключить, что такая формулировка предполагает сравнение предлагаемого метода и выделение каких-то *отличий* от соответствующих альтернативных подходов. В работе метод множителей Лагранжа применяется для получения трансцендентного уравнения с целью определения максимальной выходной энергии выходного лазерного импульса при заданном значении пороговой инверсной населенности. Однако сравнение подходов моделирования в диссертации не приводится и какие-либо преимущества использования в модели множителей Лагранжа не обсуждаются.
3. На странице 57 содержится следующее утверждение: «*Сечение поглощения σ(λ) кристаллов легированного ионами Nd³⁺, используемых в качестве активного элемента лазерного генератора, практически не зависит от температуры*». Данное утверждение, на мой взгляд, справедливо в достаточно узком диапазоне изменения температуры активного элемента, а для исследуемого диапазона от -50 до +50 °C оно не является вполне обоснованным, так как спектральные линии сечения поглощения уширяются с

температурой и амплитуда пика $\sigma(\lambda)$ вблизи 808,5 нм при разогреве претерпевает почти двукратное уменьшение (см., например, работу *RenPeng Yan et.al. "Measuring the elevated temperature dependence of up-conversion in Nd:YAG" // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 21(1), 1601208, 2015 (DOI: 10.1109/JSTQE.2014.2336776)*). Кроме того, спектр сечения люминесценции также претерпевает изменения с температурой (см., например, *Y. Sato and T. Taira, "Temperature dependencies of stimulated emission cross section for Nd-doped solid-state laser materials" // Opt. Mat. Exp., Vol. 2(8), p. 1076, 2012 (DOI: 10.1364/OME.2.001076)*). Из того, что про последний факт в диссертации нет никаких упоминаний, можно заключить, что эта зависимость также никак не учитывалась при моделировании. Однако экспериментальные результаты, представленные в работе, довольно хорошо согласуются с результатами расчётов, полученных с использованием предложенной модели. Возможно, учёт изменения температурных зависимостей сечений поглощения и люминесценции и не приведёт к существенным изменениям результатов расчётов, тем не менее, считаю, что учёт и детальный анализ вклада этих зависимостей мог бы существенно усовершенствовать предложенную в работе модель.

4. В продолжение к предыдущему замечанию о влиянии температурных зависимостей сечений поглощения и люминесценции на генерацию и усиление излучения хорошо было бы провести измерения и представить в работе спектры выходного излучения при различных температурах активного элемента. Ясно, что для ряда применений изменение спектра выходного излучения квантрана не является критичным фактором, однако, несомненно, что в рамках диссертационной работы этот анализ был бы более чем уместен.
5. В выводе 2 к Главе 5 содержится утверждение: "...лазер с поперечной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности генерирует импульсное лазерное излучение с практически неизменной модовой структурой и стабильностью выходной энергии не менее 70 % в температурном диапазоне от -50 до +50 °C...". Однако в тексте приводится только одно изображение измеренного профиля интенсивности выходного лазерного излучения, и нет никаких подтверждений постоянства его модовой структуры в рабочем диапазоне температур квантрана. Также в диссертации ничего не говорится о расходимости и качестве выходного излучения, которое в лазерных технологиях описывается параметром M^2 .

В целом диссертация оставляет положительное впечатление. Автором проведён довольно большой объём работ, анализ литературы, получены практически интересные результаты. Указанные замечания не умаляют достоинств работы. Скорее, они в основном подчёркивают уровень сложности поднимаемых в диссертации проблем. Автореферат достаточно полно отражает материалы диссертации. Тема работы соответствует специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Сафонова Елена Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

А.В. Коняшkin

«29» апреля 2022 г.

Фрязинский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук (141190, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского 1, тел.: +7 (496) 565-24-00, <http://fireras.su>)

Тел.: +7 (926) 346-12-11,

e-mail: a.konyashkin@gmail.com

Подпись с.н.с., к.ф.-м.н. А.В. Коняшкина подтверждаю

Ученый секретарь ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

д.ф.-м.н.



Г.В. Чучева