

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ПРЕДПРОБОЙНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ОБЪЕМЕ МОНОКРИСТАЛЛА ZnGeP_2 ВО ВРЕМЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ
ГЕНЕРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН 3.5–5 мкм
ПРИ НАКАЧКЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ Ho:YAG -ЛАЗЕРА***

Н.Н. Юдин^{1,2,3}, Д.В. Власов², О.Л. Антипов⁴, А.И. Грибенюков⁵,
М.М. Зиновьев^{1,2,3}, С.Н. Подзывалов^{2,3}, Е.С. Слюнько^{2,3}, Н.А. Юдин²,
М.М. Кулеш², В.С. Кузнецов^{3,6}, В.В. Дёмин²

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия*

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

³ *ООО «Лаборатория оптических кристаллов», г. Томск, Россия*

⁴ *Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

⁵ *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия*

⁶ *Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

Проведены исследования энергетических характеристик и результатов визуализации процессов, происходящих в объеме кристалла при помощи цифровой голографической камеры, установлено, что при увеличении плотности энергии излучения накачки свыше 1 Дж/см² наблюдается прекращение роста КПД параметрической генерации и потемнение канала распространения лазерного излучения в объеме кристалла. Показано, что при плотности энергии выше 1 Дж/см² наблюдается уменьшение пропускания лазерного излучения.

Ключевые слова: *оптический пробой, ZnGeP_2 , параметрические генераторы света.*

Введение

Одними из самых эффективных твердотельных источников когерентного излучения в среднем ИК-диапазоне являются параметрические генераторы света (ПГС). Наиболее мощные ПГС в диапазоне длин волн 3.5–5 мкм созданы в настоящее время на основе нелинейно-оптических кристаллов ZnGeP_2 (ZGP) [1]. ПГС на основе ZGP могут генерировать излучение со средней мощностью до 160 Вт или энергией в импульсе до 200 мДж при длительности импульсов 20–40 нс и частоте их следования от единиц герц до ста килогерц [2–4]. Однако время непрерывной работы данных ПГС при представленных выше экстремальных условиях накачки приходится намеренно ограничивать несколькими секундами во избежание оптического пробоя поверхности кристалла, обусловленного эффектами накопления.

Для решения ряда практических и научных задач в настоящее время требуются источники когерентного излучения среднего ИК-диапазона. Данные источники обязательно должны обладать максимально возможными энергетическими параметрами. Для целого ряда практических применений ПГС должен обладать следующими характеристиками генерируемого излучения: средняя мощность ~ 10 Вт, импульсная энергия ~ 0.1–1 мДж при частотах следования импульсов ~ 10–100 кГц и длительности импульсов генерируемого излучения порядка нескольких десятков наносекунд. Однако данные источники должны быть способны работать в непрерывном режиме на протяжении нескольких часов подряд, а общее время работы системы до отказа должно составлять более 1000 ч. Когерентные источники излучения, обладающие данными характеристиками, могут применяться для обработки стекол и керамики, полупроводниковых материалов с помощью технологий термораскола и скрайбирования [5]. Также источники лазерного излучения с дискретным набором длин волн и/или их плавной перестройкой по спектральному диапазону актуальны для зондирования атмосферы и дистанционного определения состава веществ, мониторинга экологической обстановки [6–8], определения размеров мелкодисперсных объектов [9, 10]. Импульсные и импульсно-периодические лазеры среднего ИК-диапазона с энергией в импульсе до 1 мДж и его длительностью 10–100 нс имеют большой потенциал в области медицины, включая резонансную абляцию костных тканей [11–16] и малоинвазивную хирургию глаза [17, 18].

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-12-20035.

Целью данного исследования является изучение процессов, происходящих в ходе параметрической генерации в кристалле ZGP при накачке излучением Ho:YAG -лазера, лимитирующих время работы системы за счет эффектов накопления, приводящих к оптическому пробое кристалла ZGP.

1. Параметры исследуемых образцов и экспериментальная установка

Для исследований использовался нелинейный кристалл ZGP (производства ООО «ЛОК», г. Томск) с линейными размерами $20 \times 6 \times 6$ мм, вырезанный под углами $\theta = 54.5^\circ$ и $\phi = 0^\circ$. Поглощение излучения на длине волны 2.097 мкм образца составило 0.029 см^{-1} . Полировка рабочих поверхностей исследуемого образца производилась на полировально-доводочном станке 4-ПД-200. Начальная обработка рабочих поверхностей образца состояла в полировке на батиновом полировальнике с использованием синтетического алмазного порошка ACM 0.5/0 (средний размер зерна 270 нм). При этом сьем материала составлял ~ 50 мкм, что позволяло убрать трещиноватый слой, образующийся в процессе резки кристалла на ориентированные пластинки и их предварительной шлифовки. Далее образцы дополнительно полировались на батиновом полировальнике с использованием синтетического алмазного порошка ACM 0.25/0. После этого образцы полировались на смоляном полировальнике, изготовленном из полировальной смолы с использованием синтетического алмазного порошка ACM 0.25/0. Контроль профиля рабочих поверхностей до нанесения интерференционных покрытий осуществлялся при помощи профилометра ZYGO NewView 7300, работающего на основе интерферометрии белого света (рис. 1). Были выполнены оценки следующих параметров: максимальной разницы высоты и глубины неоднородностей на поверхности ($PV = 31.372$ нм); среднеквадратичной глубины шероховатости ($RMS = 0.442$ нм). С помощью цифровой голографической камеры ДНС-1,064 производства ООО «ЛОК» были получены голограммы внутреннего объема исследуемых образцов. Было проведено восстановление полученных цифровых голограмм с целью характеристики объемных дефектов. Предельное разрешение метода составляло 3 мкм (подробное описание методики цифровой голографии, в том числе применительно к визуализации дефектов в ZGP, и описание используемой голографической камеры приведены в [19–21]). В обоих образцах, используемых в данной работе, не было выявлено объемных дефектов.

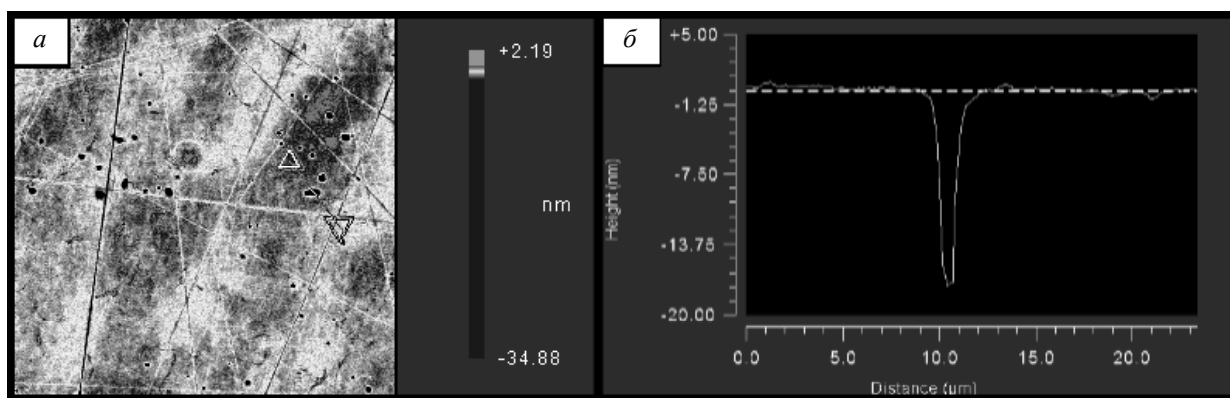


Рис. 1. Профиль поверхности исследуемых образцов ZGP: *a* – диаграмма шероховатости поверхности, *б* – отклонения от среднего профиля шероховатости вдоль линии (выделенной треугольниками на *a*)

На рабочие торцы было нанесено четырехслойное просветляющее покрытие на основе соединений Nb_2O_5 (высокопреломляющий слой) и Al_2O_3 (низкопреломляющий слой) с общей толщиной 2133 нм, спектр отражения покрытия представлен на рис. 2. Напыление диэлектрических слоев производилось на вакуумно-напылительной машине Aspira-200 (производства компании «Izovak», Беларусь). Порог оптического пробоя исследуемого кристалла после процесса напыления составлял 2.35 Дж/см^2 при частоте следования импульсов 10 кГц, длительности импульсов 35 нс и диаметре лазерного пучка 400 мкм по уровню e^{-2} .

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. В качестве источника накачки ПГС на основе монокристалла ZGP использовался импульсно-периодический Ho:YAG -лазер. Оптическая развязка между резонатором параметрического генератора и резонатором Ho:YAG -лазера осуществлялась оптическим изолятором (ОИ).

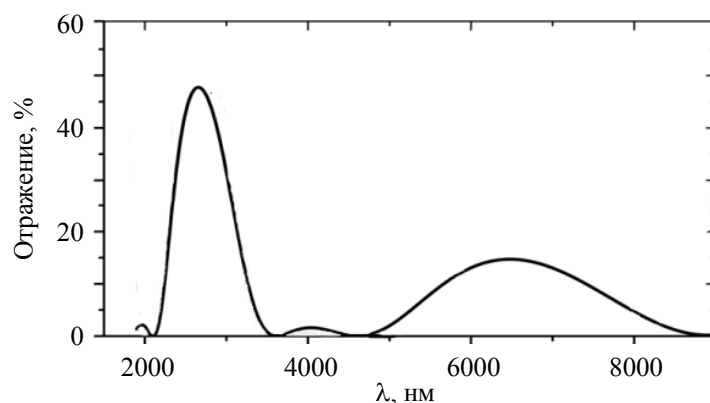


Рис. 2. Спектр отражения рабочих граней образца с нанесенным интерференционным покрытием

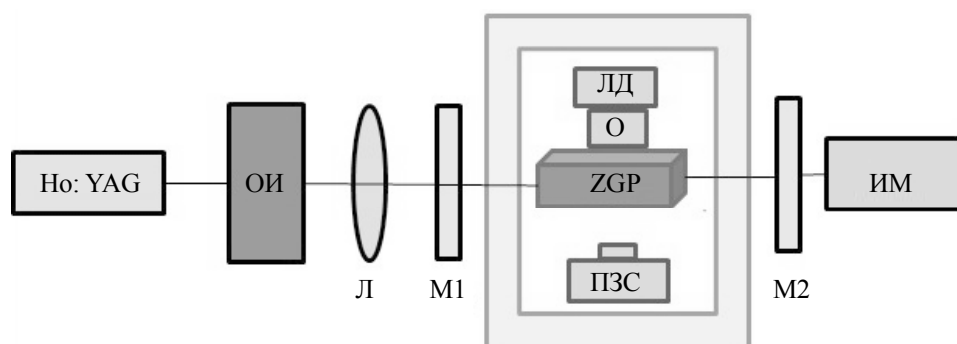


Рис. 3. Схема установки параметрического генератора на базе монокристалла ZnGeP_2 с оптической накачкой Ho:YAG-лазером: Ho:YAG-лазер; ОИ – оптический изолятор; Л – линза; M1 – входное зеркало резонатора; M2 – выходное зеркало резонатора; монокристалл ZnGeP_2 ; ЛД – лазерный диод; О – объектив; ИМ – измеритель мощности

Ho:YAG-лазер, используемый для проведения экспериментов, обладал следующими энергетическими характеристиками: максимальная средняя мощность излучения в импульсном режиме – 15 Вт, частота следования импульсов – 10 кГц, длительность импульсов по полувысоте – 26 нс. Резонатор параметрического генератора был образован плоскопараллельным зеркалом M1 с пропусканием $\sim 99\%$ на длине волны излучения накачки и отражением $\sim 99\%$ на длине волны генерируемого излучения. Плоскопараллельное зеркало M2 имело просветляющее покрытие с пропусканием $\sim 99\%$ на длине волны накачки со светоделительным покрытием с 50%-м отражением на длине волны генерации, что позволяло реализовать однократную накачку. В резонатор, образованный зеркалами M1 и M2, помещался монокристалл ZGP длиной 20 мм с нанесенными на рабочие торцы просветляющими покрытиями на длинах волн $\lambda = 2.097$ и 3.5–5 мкм (производство фирмы ООО «ЛОК» г. Томск, Россия). Боковые грани кристалла ZGP также были отполированы. Через боковые полированные поверхности кристалла ZGP производилась запись голограмм внутреннего объема монокристалла (в направлении, перпендикулярном направлению воздействующего излучения) при помощи цифровой голографической камеры.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 4–6 представлены результаты, полученные при измерении энергетических характеристик ПГС на базе кристалла ZGP с накачкой излучением Ho:YAG-лазера (рис. 3).

На рис. 4 продемонстрированы зависимости средней мощности излучения, генерируемого в ПГС и КПД генерации в зависимости от частоты следования импульсов излучения накачки.

Во время измерений средняя мощность излучения накачки на длине волны 2.097 мкм оставалась неизменной и составляла 16.3 Вт, в то время как частота следования импульсов изменялась от 10 до 100 кГц. Стоит отметить, что стабильная генерация излучения накачки в Ho:YAG-лазере на-

блюдалась вплоть до частоты следования импульсов 50 кГц, при частоте следования импульсов 100 кГц отмечалась нестабильная работа лазера. Максимальное значение КПД генерации, достигнутое в эксперименте, составило 57.35% (рис. 4, б). Максимальное значение средней мощности генерируемого излучения ПГС составило 9.72 Вт при частоте следования импульсов 10 кГц (рис. 4, а).

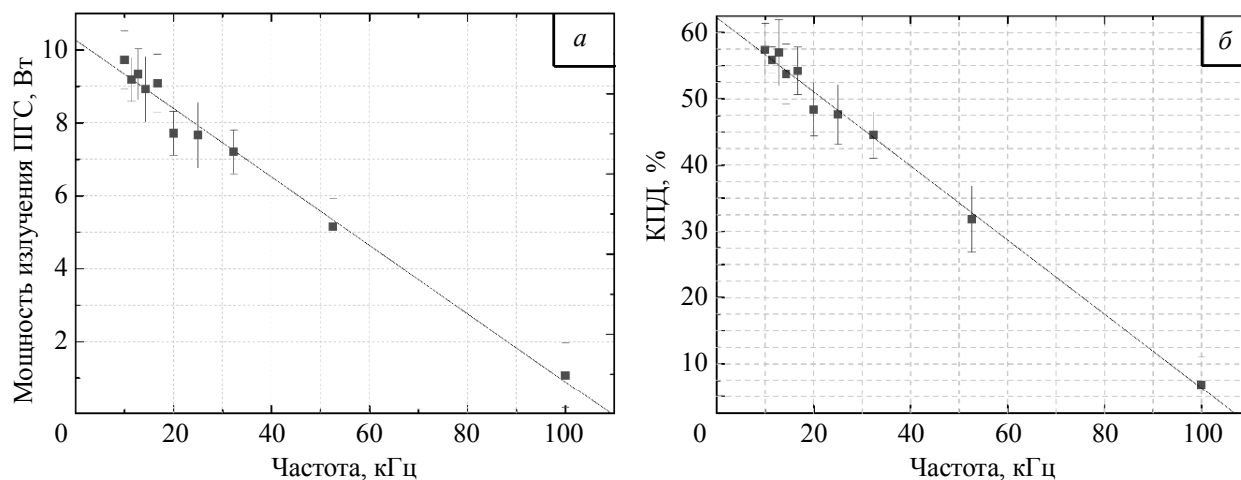


Рис. 4. Зависимости средней мощности генерируемого излучения (а) и КПД параметрической генерации (б) от частоты следования импульсов излучения накачки при средней мощности излучения 16.3 Вт

С использованием имеющихся экспериментальных данных и математического обеспечения ORIGIN LAB была получена зависимость КПД по мощности излучения накачки, поглощенной в кристалле (без учета части излучения накачки, вышедшей из резонатора), от частоты следования импульсов излучения накачки. Максимальное значение КПД по поглощенной мощности составило $\sim 85\%$ (рис. 5).

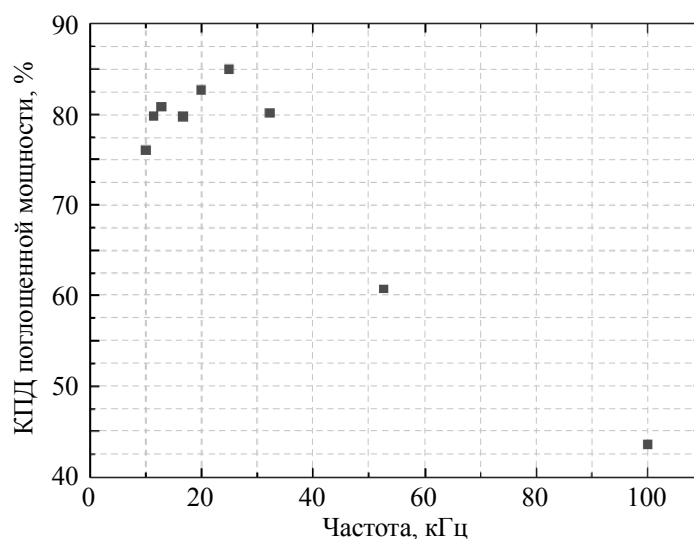


Рис. 5. Зависимость КПД по поглощенной мощности от частоты следования импульсов излучения накачки

Далее проводились исследования энергетических характеристик в зависимости от мощности излучения накачки при частоте следования импульсов 10 кГц. Максимальное значение мощности параметрической генерации, полученное в эксперименте, составило 8.46 Вт (рис. 6).

Максимальное значение КПД $\sim 45.74\%$. Из рис. 6, в видно, что при достижении значения мощности накачки ~ 11 Вт и плотности энергии ~ 1.2 Дж/см² КПД перестает расти и достигает точки «насыщения».

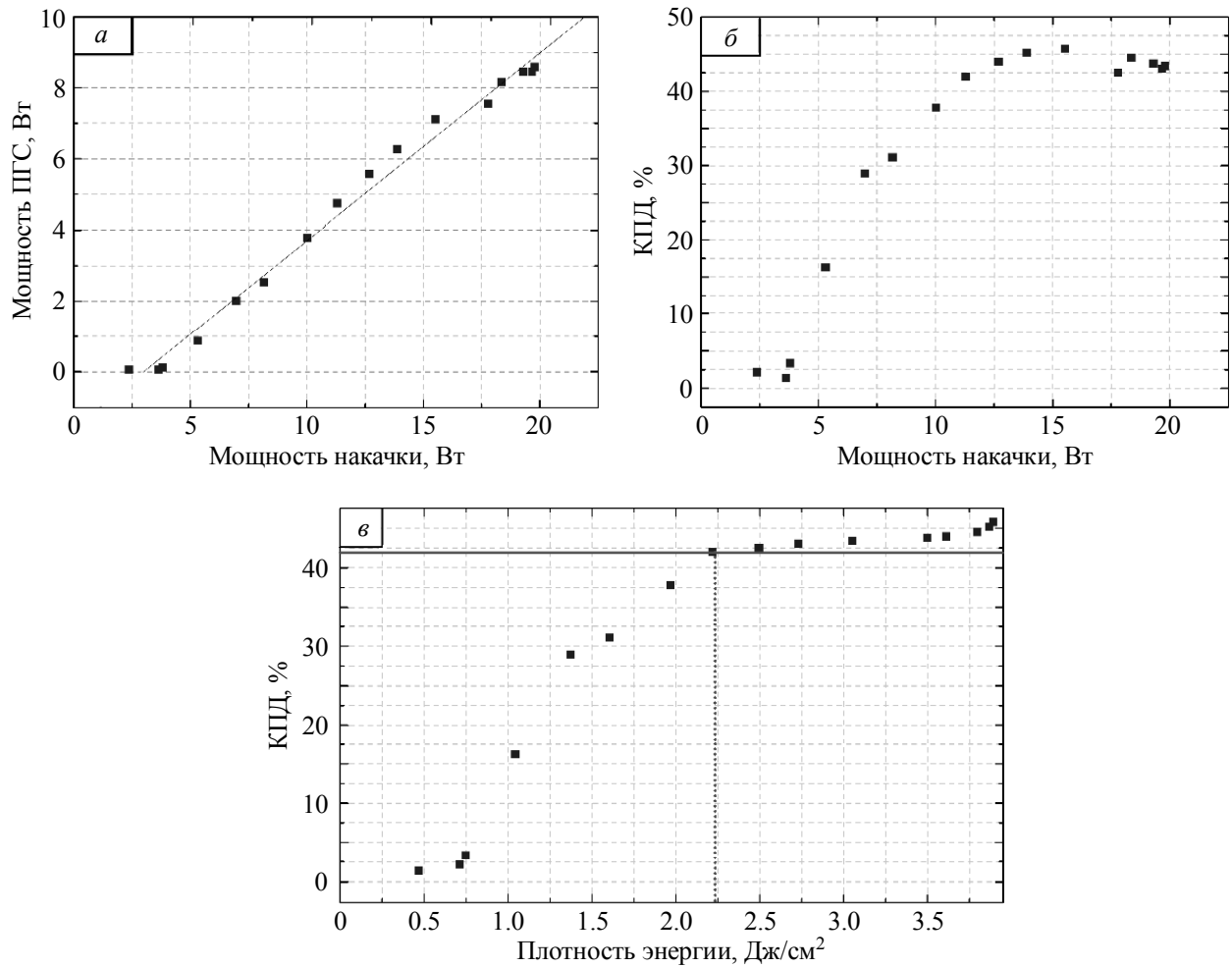


Рис. 6. Зависимости мощности параметрической генерации ($P_{\text{ПГС}}$) (а) и КПД (б) от мощности накачки (P_0); зависимость КПД от плотности энергии (в)

Проведены исследования зависимости пропускания нелинейного кристалла от мощности тестирующего излучения и от плотности энергии падающего на кристалл излучения. Полученные результаты (рис. 7) были представлены в виде зависимостей пропускания от мощности накачки и пропускания от плотности энергии падающего на кристалл излучения, частота следования импульсов изменялась от 10 до 30 кГц с шагом 10 кГц.

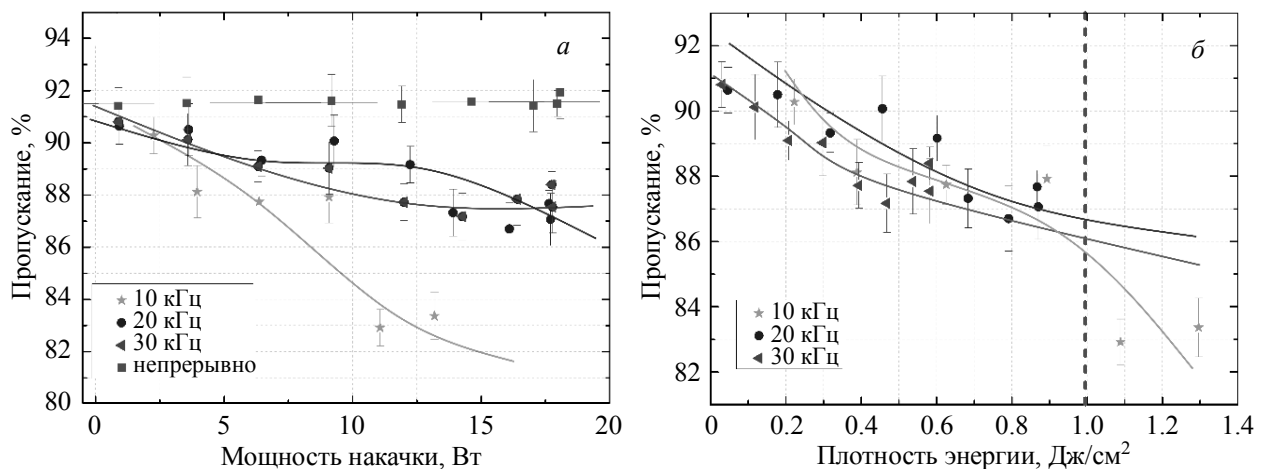


Рис. 7. Зависимости пропускания от мощности накачки (а) и от плотности энергии падающего на кристалл излучения (б)

На рис. 8 приведены восстановленные голограммы. При воздействии с мощностью до 0.7 Дж/см^2 голографическая камера не зафиксировала никаких изменений, с увеличением мощности от $0.7\text{--}0.9 \text{ Дж/см}^2$ можно наблюдать возникновение темной области по всей длине кристалла. С увеличением мощности до 1.2 Дж/см^2 эта область становится темнее, при мощности 1.2 Дж/см^2 и более можно наблюдать возникновение пробойного трека.

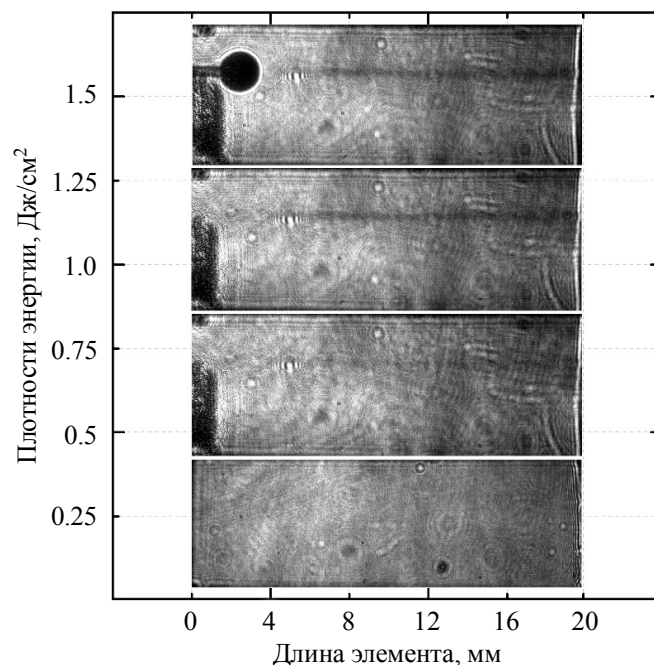


Рис. 8. Восстановленное изображение кристалла ZGP, снятое с помощью голографической камеры при воздействии на нелинейный оптический кристалл ZGP лазерным излучением разной мощности

Заключение

В ходе работы исследовались энергетические характеристики излучения, генерируемого в диапазоне длин волн $3.5\text{--}5 \text{ мкм}$ параметрическим генератором света на базе нелинейного оптического кристалла ZGP при накачке излучением Ho:YAG-лазера.

Анализируя зависимости, представленные на рис. 4–7, можно сделать вывод, что в пределах погрешности измерений при прохождении импульсного излучения через кристалл ZGP наблюдается уменьшение пропускания с ростом средней мощности падающего излучения и соответственно плотности энергии излучения. С уменьшением частоты данная зависимость становится более ярко выраженной. Указанные зависимости показывают, что имеет место нелинейное поглощение, которое растет с ростом импульсной энергии излучения накачки. Установленное нелинейное поглощение может являться инициатором оптического пробоя. В ходе исследования энергетических характеристик и результатов визуализации процессов, происходящих в объеме кристалла при помощи цифровой голографической камеры, удалось установить, что при увеличении плотности энергии излучения накачки свыше 1 Дж/см^2 наблюдаются прекращение роста КПД параметрической генерации и потемнение канала распространения лазерного излучения в объеме кристалла. Также было показано, что при плотности энергии выше 1 Дж/см^2 наблюдается уменьшение пропускания лазерного излучения (при облучении кристалла вне резонатора), что может свидетельствовать о значительном нелинейном поглощении. Проведенные исследования указывают на то, что эти процессы взаимосвязаны и нелинейное поглощение служит причиной уменьшения эффективности преобразования и может являться фактором, инициирующим порог оптического пробоя. Дальнейшие исследования, которые осуществлялись при накачке ПГС на базе ZGP излучения Ho:YAG-лазера при плотности энергии 0.9 Дж/см^2 (что в 2 раза меньше плотности энергии порога оптического пробоя исследуемого кристалла ZGP), позволили получить время непрерывной работы ПГС порядка 6 мин. Причем время работы было ограничено лишь температурным режимом ла-

зера накачки, порога пробоя не наблюдалось. А при работе ПГС при плотности энергии порядка 1.3 Дж/см^2 в области, где наблюдалось сильное нелинейное поглощение, время непрерывной работы ПГС составило порядка 30 с и ограничилось эффектом оптического пробоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schunemann P.G., Zawilski K.T., Pomeranz L.A., et al. // J. Opt. Soc. Am. B. – 2016. – V. 33. – No. 11. – P. D36–D43.
2. Hemming A., Richards J., Davidson A.A., et al. // Opt. Express. – 2013. – V. 21. – No. 8. – P. 10062–10069.
3. Haakestad M.W., Fonnum H., Lippert E. // Opt. Express. – 2014. – V. 22. – No. 7. – P. 8556–8564.
4. Liu G., Mi S., Yang K., et al. // Opt. Lett. – 2021. – V. 46. – No. 1. – P. 82–85.
5. Парфенов В.А. Лазерная микрообработка материалов. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 59 с.
6. Бобровников С.М., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А. и др. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы. – Томск: ИОА СО РАН, 2014. – 510 с.
7. Romanovskii O.A., Sadovnikov S.A., Kharchenko O.V., et al. // Opt. Laser Technol. – 2019. – V. 116. – P. 43–47.
8. Bochkovskii D.A., Matvienko G.G., Romanovskii O.A., et al. // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2012. – V. 25. – P. 166–170.
9. Шигапов А.Б., Ярхамов Ш.Д. // Изв. вузов. Сер. Авиационная техника. – 2004. – № 3. – С. 58.
10. Дьяченко В.В., Половченко С.В., Роговский В.В. и др. // Научный диалог. – 2012. – № 7. – С. 6–17.
11. Солдатов А.Н., Полунин Ю.П., Шумейко А.С. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 10/2. – С. 39–42.
12. Солдатов А.Н., Полунин Ю.П., Васильева А.В. и др. // Биотехносфера. – 2012. – № 3–4(21–22). – С. 47–51.
13. Edwards G.S., Austin R.H., Carroll F.E., et al. // Rev. Sci. Instrum. – 2003. – V. 74. – No. 7. – P. 3207–3245.
14. Hutson M.S., Edwards G.S. // Proc. 26th Int. Free Electron Laser Conf. and 11th FEL User Workshop. – 2004. – P. 648–653.
15. Joos K.M., Shen J.H., Shetlar D.J., et al. // Lasers Surg. Med. – 2000. – V. 27. – No. 3. – P. 191–205.
16. Mackanos M.A., Simanovskii D., Joos K.M., et al. // Lasers Surg. Med. – 2007. – V. 39. – No. 3. – P. 230–236.
17. Stoeppler G., Thilmann N., Pasiskevicius V., et al. // Opt. Soc. Am. – 2012. – V. 20. – No. 4. – P. 4509–4517.
18. Telfair W.B., Bekker C., Hoffman H.J., et al. // J. Refract. Surg. – 2000. – V. 16. – No. 1. – P. 40–50.
19. Dyomin V.V., Gribenyukov A.V., Davydova A.Yu., et al. // Appl. Opt. – 2021. – V. 60. – No. 4. – P. A296–A305.
20. Gribenyukov A.I., Yudin N.N., Podzyvalov S.N., et al. // Opt. Memory Neural Networks. – 2020. – V. 29. – No. 2. – P. 147–156.
21. Dyomin V.V., Gribenyukov A.I., Podzyvalov S.N., et al. // Appl. Sci. – 2020. – V. 10. – No. 2. – P. 442–1–442–10.

Поступила в редакцию 15.09.2022,
принята в печать 22.11.2022.

Юдин Николай Николаевич, мл. науч. сотр. НИ ТГУ, науч. сотр. ИОА СО РАН, оптик ООО «ЛОК», e-mail: rach3@yandex.ru;

Власов Денис Васильевич, бакалавр НИ ТГУ, e-mail: dv472@mail.ru;

Антипов Олег Леонидович, д.ф.-м. н., ст. науч. сотр. ИПФ РАН, e-mail: antipov@ipfran.ru;

Грибенюков Александр Иванович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. ИМЭС СО РАН, e-mail: alexander.gribenyukov@yandex.ru;

Зиновьев Михаил Михайлович, мл. науч. сотр. НИ ТГУ, науч. сотр. ИОА СО РАН, оптик ООО «ЛОК», e-mail: миха9229@gmail.com;

Подзывалов Сергей Николаевич, аспирант НИ ТГУ, начальник отдела оптических измерений ООО «ЛОК», e-mail: cginen@yandex.ru;

Слюнько Елена Сергеевна, аспирантка НИ ТГУ, начальник ОТК ООО «ЛОК» e-mail: elenohka266@mail.ru;

Юдин Николай Александрович, д.т.н., ст. науч. сотр., профессор НИ ТГУ, e-mail: yudin@tic.tsu.ru;

Кулеш Максим Матвеевич, магистрант НИ ТГУ, e-mail: kyleschMM2000@yandex.ru;

Кузнецов Владимир Сергеевич, мл. науч. сотр. ИСЭ СО РАН, инженер ООО «ЛОК», e-mail: Robert_smith_93@mail.ru;

Дёмин Виктор Валентинович, к.ф.-м.н., первый проректор НИИ ТГУ, e-mail: dyomin@mail.tsu.ru.