

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 535.241.63

РЕЗОНАТОРНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ЛАЗЕРА НА ЭФФЕКТЕ ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ НА МОНОКРИСТАЛЛЕ АЛМАЗА

© 2021 г. М. С. Андреева^а, Н. В. Артюшкин^б, К. М. Крымский^с, А. И. Лаптев^б,
Н. И. Полушин^б, В. Е. Рогалин^{д,*}, С. А. Филин^д

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Российская Федерация

^бНациональный исследовательский технологический университет “МИСиС”,
Ленинский просп., 4, Москва, 119049 Российская Федерация

^сМосковский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный Московской обл., 141700 Российская Федерация

^дИнститут электрофизики и электроэнергетики РАН,
Дворцовая наб., 18, Санкт-Петербург, 191186 Российская Федерация

*E-mail: v-rogalin@mail.ru

Поступила в редакцию 22.09.2020 г.

После доработки 22.09.2020 г.

Принята к публикации 05.10.2020 г.

Описаны конструктивные особенности резонаторного модуля лазера на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) на монокристалле алмаза, выращенном методом CVD (chemical vapor deposition) с накачкой наносекундным Nd:YAG-лазером. Проверена работоспособность разработанной конструкции на CVD-алмазе и на тестовом ВКР-кристалле кальцита (CaCO_3); для накачки ВКР-лазеров на обоих кристаллах использовалось излучение с $\lambda = 532$ нм. Получена ВКР-генерация, измерены длины волн стоксовых компонент и коэффициенты ВКР-усиления CVD-алмаза и кальцита.

DOI: 10.31857/S0033849421020017

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на обилие лазерных источников, излучающих во многих диапазонах электромагнитного спектра, весьма часто возникает необходимость использования лазерного излучения с длиной волны, отличной от традиционно применяемых. Этим вызван интерес к лазерам, работающим благодаря использованию нелинейного эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Фактически ВКР-лазеры являются “насадкой” на лазерной головке источника накачки и не потребляют энергию от внешнего источника. Активный элемент ВКР-среды, помещенный в резонатор, после облучения интенсивным лазером накачки преобразует длину волны излучения, причем при этом могут изменяться и пространственно-временные характеристики [1, 2].

Величина изменения частоты (частотный сдвиг) света определяется только свойствами среды. Доля преобразованного излучения (эффективность преобразования) зависит от характеристик излучения накачки и организации взаимодействия света со средой. Все ВКР-активные среды обычно срав-

ниваются между собой при помощи двух характеристик — частотного сдвига в среде и коэффициента ВКР-усиления [3, 4]. Хотя КПД преобразования может составлять до 70% [1], для ВКР-преобразователей крайне важной характеристикой материала является теплопроводность, так как непреобразованное (остаточное) излучение накачки частично выделяется в ВКР-среде в виде тепла.

Еще в первых работах по исследованию ВКР в природных кристаллах алмаза выяснилось, что кристаллы алмаза являются наиболее эффективными ВКР-средами [4–8]. К тому же уникальная теплопроводность алмаза (в пять раз выше, чем у меди [9]) ставит этот материал вне конкуренции среди остальных ВКР-сред. Однако эти работы не получили дальнейшего развития вследствие дороговизны природных алмазов и неконтролируемого содержания в них примесей.

Искусственные монокристаллы алмаза, выращиваемые с середины XX в. при сверхвысоких давлениях и температурах [9], также оказались непригодными для использования в ВКР-лазерах. Причина — использование катализаторов ро-

ста, дающих мелкие, невидимые глазом поглощающие включения [10], резко снижающие оптическую стойкость.

Появление CVD-технологии (chemical vapour deposition) получения [9, 11] первоначально было направлено на выращивание поликристаллических алмазов, нашедших заметное применение в различных областях силовой оптики и электроники [12–14]. Однако вскоре выяснилось, что этот метод позволяет выращивать сравнительно крупные и чистые монокристаллы алмаза [9]. Это вызвало значительный интерес к ВКР-лазерам на кристаллах алмаза [15] ввиду того, что метод позволяет получать технологически воспроизводимые монокристаллы, пригодные для различных высокотехнологичных применений [9, 12, 13].

Масштабные исследования ВКР в CVD-алмазе начались в XXI в. после появления работ [16, 17] и были активно развиты группой Милдрена [18–26]. Эффективность применения CVD-алмазов для ВКР может быть увеличена благодаря использованию моноизотопных кристаллов [27], теплопроводность которых может быть увеличена в ~1.5 раза по сравнению с кристаллами природного состава.

К сожалению, пока размеры выращиваемых пластин монокристаллов CVD-алмаза весьма малы: 5...10 мм при толщине обычно 0.5...1 мм. То есть реально используемый объем активной среды алмазного ВКР-лазера равен $(0.5...1) \times (5...10) \text{ мм}^3$. Тем не менее это оказывается достаточным для ряда практических применений [26].

Для накачки ВКР-лазеров на CVD-алмазе часто используется твердотельный лазер второй гармоники наносекундного Nd:YAG-лазера ($\lambda = 532 \text{ нм}$), поскольку длина волны ВКР-излучения CVD-алмаза 573 нм весьма перспективна для применения в разных областях науки и техники, в частности в медицине [9, 26, 28]. Однако малые размеры активного элемента и короткий импульс накачки вызывают необходимость минимизировать длину резонатора, дабы увеличить число проходов ВКР-излучения через кристалл в течение лазерного импульса. Это ограничение вызывает особые требования к конструкции юстировочных устройств лазера.

В данной работе рассмотрена разработанная “универсальная” конструкция классического резонаторного модуля ВКР-лазера, способного работать как с компактной ВКР-средой, а именно CVD-алмазом, так и (при необходимости) с традиционными (длинными) ВКР-кристаллами.

Основная цель работы — создание удобной установки для сопоставления свойств кристаллов алмаза, полученных в разных технологических процессах, позволяющей при этом использовать другие ВКР-среды для ее тестирования.

1. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ РЕЗОНАТОРНОГО МОДУЛЯ

В качестве базовой конструкции резонатора был выбран простейший резонатор с двумя плоскими зеркалами (высокоотражающим и оптимальным светоделительным) на рабочих длинах волн исследуемых ВКР-кристаллов (CVD-алмаза — 573 нм, кальцита — 565 нм). Требования к резонатору ВКР-лазера на компактных средах практически совпадают с требованиями к резонатору наносекундного параметрического генератора света (ПГС) на основе периодических структур MgO:PPLN и PPLN, размеры которых также малы по сравнению с традиционными нелинейными кристаллами ПГС. В работе [29] для этих структур был разработан монокристалльный резонатор. Несмотря на отличие в физике используемых явлений ВКР и ПГС, требования к механическим узлам резонатора во многом совпадают. Однако в нашей разработке имеются значительные конструктивные отличия от резонатора [29].

При накачке ВКР-кристалла алмаза наносекундными лазерными импульсами требуется минимизировать расстояние между зеркалами резонатора (~10 мм). Это необходимо для увеличения числа проходов генерируемого ВКР-излучения в резонаторе за время длительности лазерного импульса, так как длина активной среды на одном проходе мала, что резко снижает эффективность ВКР-генерации. При этом необходима очень точная юстировка положения активного элемента ВКР-лазера и зеркал резонатора относительно друг друга и оптической оси задающего генератора.

Основная задача при создании ВКР-лазера — достижение максимальной эффективности преобразования, поэтому при разработке оптической схемы резонатора, как и в работе [29], требуется учет следующих факторов:

- апертура рабочего кристалла (~0.5 мм в CVD-алмазе) должна быть достаточна для свободного прохода через него излучения накачки (в этом случае диаметр пучка должен быть $\leq 320 \text{ мкм}$, чтобы минимизировать дифракционные потери);
- путем оптимальной фокусировки накачки в активной среде необходимо обеспечить равенство конфокального параметра накачки внутри кристалла его длине, что особенно актуально при многомодовой накачке с M^2 порядка 10;
- высокодобротный резонатор для ВКР-волны должен быть стабильным.

Поэтому была разработана конструкция юстировочных узлов каждого из элементов резонатора, позволяющая плавно регулировать их положение относительно лазерного луча накачки и друг друга.

На рис. 1 представлен внешний вид разработанного резонаторного модуля ВКР-лазера, являющегося практически “насадкой” к лазеру накачки, по-

сколькучку включает в себя, помимо резонатора, еще и оптику, формирующую пучок накачки с необходимыми параметрами, а также устройство селекции ВКР-излучения и “остаточной” накачки. Механическая основа резонаторного модуля имеет жесткую конструкцию. Все узлы прибора связаны между собой тремя инваровыми стержнями, вдоль которых они могут перемещаться.

Узел крепления и юстировки фокусирующей линзы 2 также способен перемещать линзу вдоль оптической оси. Узлы крепления 4, 11 и юстировки 5, 10 зеркал резонатора имеют возможность регулируемого перемещения вдоль луча накачки, что позволило максимально приблизить резонаторные зеркала 6, 9 к поверхностям активного элемента. Узел крепления 7 рабочего кристалла 8 изготовлен из меди, чтобы обеспечить теплоотвод от кристалла. Для изменения (с целью оптимизации) кристаллографической ориентации активного элемента относительно оси лазера накачки он обладает механизмом, позволяющим вращение кристалла относительно оптической оси. Все элементы конструкции размещены на металлической платформе 13, расположенной на оптическом столике 14, что позволяет перемещать устройство по высоте и по нормали к оптической оси лазера.

Работоспособность разработанной конструкции резонаторного модуля была проверена на экспериментальной установке (рис. 2).

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Разработанная “универсальная” конструкция резонаторного модуля тестировалась на двух ВКР-кристаллах, значительно отличающихся по размерам. Использовались монокристаллы алмаза, выращенные методом CVD и монокристаллы кальцита. Размер монокристалла CVD-алмаза $5 \times 5 \times 0.5 \text{ мм}^3$; его торцевые грани $\langle 100 \rangle$ полировали оптически. Таким образом, генерируемое ВКР-излучение алмаза распространялось вдоль “длинной” стороны кристалла — 5 мм. Входные грани кристалла $0.5 \times 5 \text{ мм}^2$ не просветлялись. Для отработки конструкции механических узлов разработанного резонаторного модуля первоначальные исследования проводили на хорошо изученном эталонном монокристалле кальцита. Природный монокристалл кальцита (CaCO_3), ориентированный под углом 90° к нормали, имел размеры $20 \times 20 \times 20 \text{ мм}^3$. После проведения пробных экспериментов на кальците резонаторный модуль перенастраивали под CVD-алмаз и были продолжены исследования ВКР-генерации на монокристаллах CVD-алмаза.

Схема эксперимента по получению ВКР-генерации на этих монокристаллах приведена на рис. 2. Лазер LS-2149 15, имеющий возможность излучать на любой из четырех длин волн — 1064, 532,

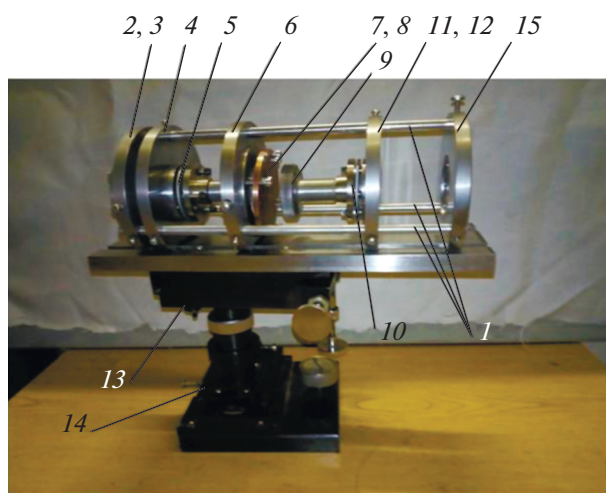


Рис. 1. Внешний вид резонаторного модуля для CVD алмаза: 1 — инваровые стержни, 2 — узел крепления и юстировки фокусирующей линзы, 3 — линза (на рисунке не видна) в оправе, 4 — узел крепления входного зеркала резонатора, 5 — узел юстировки входного зеркала, 6 — входное зеркало в оправе, 7 — вращающийся кристаллодержатель алмаза, в котором расположен узел юстировки и крепления кристалла алмаза, 8 — монокристалл алмаза (на рисунке не виден), 9 — выходное зеркало в оправе, 10 — узел юстировки выходного зеркала, 11 — узел крепления выходного зеркала резонатора, 12 — линза, 13 — металлическая платформа, на которой расположены узлы 4, 5, 7, 10, 11, 14 — оптический столик, на котором расположена вся конструкция, позволяющий перемещать устройство по высоте и нормально к оптической оси лазера, 15 — оправа для размещения устройства селекции излучений ВКР и остаточного излучения накачки (призмы или дифракционной решетки).

355 и 266 нм, был настроен на вывод излучения с $\lambda = 532 \text{ нм}$. Оптический клин 11 отражал известную небольшую долю излучения на измеритель энергии 16, по показаниям которого определялась энергия лазерного импульса на длине волны $\lambda = 532 \text{ нм}$. Далее излучение подавалось на вход резонаторного модуля, включающего в себя линзу 10, ВКР-кристалл 8, резонаторные зеркала 7 и 9, дифракционную решетку 6. Линза 10 фокусировала падающий на нее свет на монокристалл алмаза 8, помещенный между зеркалами 7 и 9, образующих резонатор. Выходящее из резонатора излучение попадало на дифракционную решетку 6, которая пространственно разделяла свет на длинах волн $\lambda = 532$ и 573 нм . Два образовавшихся монохроматических пучка попадали в разные точки экрана. На месте локализации ВКР-излучения на экране размещали делительную пластинку 5, отводящую часть излучения на спектрометр S-100 3, на месте которого затем размещали фотодиод для определения временных характеристик получаемого излучения с помощью цифрового осциллографа TDS 20248 Tektronix. Проходящее излучение попадало на измеритель энергии ВКР-из-

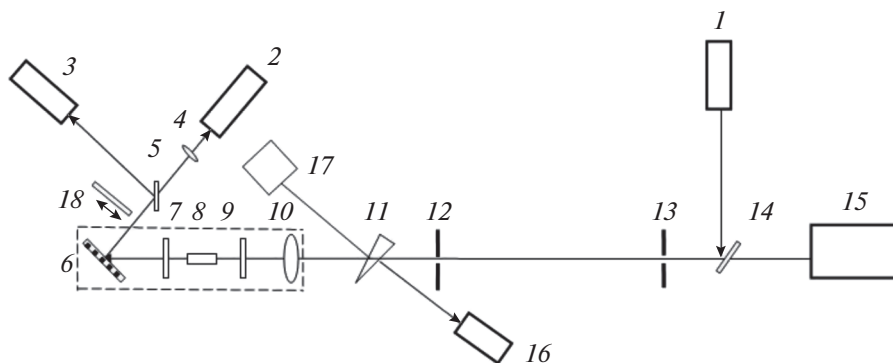


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – юстировочный лазер (лазерный визир 303); 2 – измеритель энергии OphirPD-pJ с дисплеем NOVA; 3 – спектрометр S-100 или фотодиод; 4 – линза из стекла K8, $f = 50$ мм; 5 – светоделительная пластина; 6 – дифракционная решетка 1200 штр./мм; 7 – выходное зеркало резонатора; 8 – ВКР-кристалл (кальцит или алмаз); 9 – входное зеркало резонатора; 10 – линза из стекла K8, $f = 350$ мм; 11 – оптический клин; 12 и 13 – диафрагмы; 14 – светоделительная пластина; 15 – DPSS лазер накачки LS-2149 (лазер с диодной накачкой и модулированной добротностью на основе YAG:Nd, длительность импульса 14 нс); 16 – измеритель энергии OphirPE-10BB с дисплеем VEGA, 17 – видеокамера VSC-541, 18 – экран. Резонаторный модуль, включающий элементы 6–10, показан на схеме штриховой линией.

лучения OPHIR 2. Диафрагмы 11 и 13 использовали для совмещения излучения лазера накачки с излучением юстировочного лазера. Видеокамеру VSC-541 17 применяли для юстировки рабочего кристалла.

Расстояние между зеркалами ВКР-резонатора 7 и 9 составляло от 40 мм (для кальцита) до 10...15 мм (для алмаза).

Коэффициенты отражения и пропускания зеркал 6, 9 резонатора измеряли на спектрофотометре Cary-5000 UV-VIS-NIR с приставкой UMA. В табл. 1 приведены параметры зеркал 6, 9 и значения коэффициентов отражения входного и выходного зеркал 6, 9 резонатора на длине волны лазера накачки и стоксовых длинах волн алмаза. Эти же зеркала были использованы для ВКР-генерации в кальците, поскольку ВКР-генерация 1-й стоксовой компоненты происходит в нем на близкой длине волны – 565 нм. Точность измерений коэффициента пропускания T – 0.6%, коэффициента отражения (в угле падения 5.1 от нормали) – 1%.

Таблица 1. Коэффициенты диффузного пропускания T и диффузного отражения R образцов для длин волн $\lambda = 532$ и 573 нм

Зеркало	T , %		R , %	
	532 нм	573 нм	532 нм	573 нм
Входное	67.3	0.7	31.3	98.0
Выходное	0.3	22.5	98.2	76.0

Выходное зеркало, отражающее 98.0% излучения накачки, обеспечивало двойной проход накачки через ВКР-кристалл, увеличивая длину ее взаимодействия с активной средой и, соответственно, эффективность ВКР-генерации.

В эксперименте были измерены основные характеристики ВКР-сред: частотный сдвиг в среде $\Delta\nu_c$ и коэффициент ВКР-усиления g .

Длины волн стоксовых компонент ВКР-генерации регистрировались спектрометром S-100 и были сопоставлены с вычисленными по формуле [4]

$$\lambda_{стn} = (1/\lambda_n + n\Delta\nu_c)^{-1}, \quad (1)$$

где $\lambda_{стn}$ – длина волны n -й стоксовой компоненты (n – номер стоксовой компоненты); λ_n – длина волны накачки; $\Delta\nu_c$ – сдвиг частоты стоксовой компоненты.

Расчетные величины длин волн стоксовых компонент при $\lambda = 532.25$ нм и $\Delta\nu_c = 1332.9$ см $^{-1}$ составляют 572.9 нм. Отличие теоретических и экспериментальных значений лежит в пределах ширины спонтанного комбинационного рассеяния – 2.7 см $^{-1}$.

Измеренные длины волн стоксовых компонент лазера на кальците и расчетные при $\lambda = 532.25$ нм и $\Delta\nu_c = 1084$ составили (в нм): 1-й стокс – 565.1 нм; 2-й стокс – 601.6 нм, 3-й стокс – 643.5 нм. Расчетные величины длин волн стоксовых компонент при $\lambda = 532.25$ нм и $\Delta\nu_c = 1084$ см $^{-1}$ составляют 565.1, 601.7 и 643.7 нм соответственно. Отличие теоретических и экспериментальных значений находится в пределах ширины спонтанного комбинационного рассеяния – 2.3 см $^{-1}$.

Измеренный спектр ВКР-генерации алмаза показан на рис. 3.

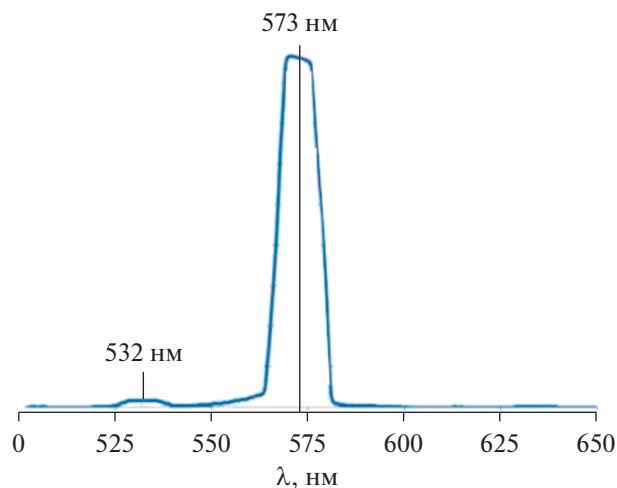


Рис. 3. Измеренный спектр излучения ВКР-лазера на CVD-алмазе.

Коэффициент ВКР-усиления в кристаллах g вычисляли исходя из хорошо известного условия порога ВКР [5]:

$$g = 25/I_{\text{пор}}L_{\text{эф}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{пор}}$ — пороговая интенсивность излучения накачки в ВКР-среде; $L_{\text{эф}}$ — эффективная длина взаимодействия излучения накачки с ВКР-средой.

Порог ВКР-генерации $I_{\text{пор}}$ определялся путем измерения энергии излучения с длиной волны 532 нм, подаваемой на входное зеркало резонатора ВКР-лазера, в момент срыва ВКР-генерации при плавном снижении уровня энергии накачки.

Далее измеренные значения пересчитывали на вход ВКР-кристалла, учитывая коэффициенты пропускания входного зеркала резонатора и линзы.

Измеренный порог генерации ВКР-лазера на алмазе составил 0.52 мДж, что соответствовало плотности мощности излучения накачки 0.033 ГВт/см².

Вычисленный по формуле (2) коэффициент ВКР-усиления лазера на алмазе составил $g = 38$ ГВт/см, что хорошо соответствует величине $g = 40$ ГВт/см, приведенной в обзорной работе [5]. Коэффициент ВКР-усиления лазера на кальците $g = 5.48$ ГВт/см также близок к значению $g = 5.5$ ГВт/см из работы [5].

Визуально на экране (лист бумаги) наблюдалось как ВКР-рассеяние, так и генерация первых двух стоксовых и одной антистоксовой компоненты в кристалле кальцита и генерация одной стоксовой компоненты в кристалле алмаза (рис. 4а, 4б). На экране видно также пятно остаточного зеленого излучения накачки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция “универсального” резонаторного модуля ВКР-лазера, способного работать как с компактной ВКР-средой, а именно CVD-алмазом, так и при необходимости с традиционными (длинными) ВКР-кристаллами. Проведена оценка работоспособности конструкции, получена ВКР-генерация в непросветленном CVD-алмазе с полированными входными гранями и в тестовом монокристалле с хорошо изученными ВКР-параметрами — кальците. Измерены длины волн ВКР-генерации и коэффициенты ВКР-усиления в обоих кристаллах. Полученные результаты близки к приведенным в литературе данным.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Е.Ю. Локтионову за помощь в работе, а также специализированной межкафедральной учебно-испытательной лаборатории полупроводниковых материалов и диэлектриков “Монокристаллы и заготовки на их основе” за измерения коэффициентов отражения и пропускания зеркал.

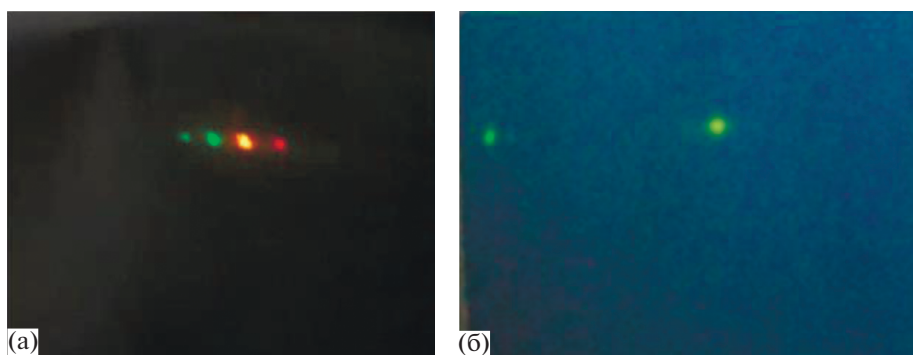


Рис. 4. Фотография экрана: а — две стоксовы и одна антистоксова компонента в кальците, б — одна стоксова компонента в CVD-алмазе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках федерального целевого проекта программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы” по теме “Разработка технологии и аппаратуры для получения сверхчистых монокристаллов алмаза CVD методом и процессов их легирования для использования в фотонике и в микроэлектронике в виде высокотемпературных полупроводников” (Соглашение о предоставлении субсидии № 075-02-2018-210 от 26 ноября 2018 г., уникальный идентификатор RFMEFI57818X0266), а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема — прикладные научные исследования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В.* Прикладная нелинейная оптика. М.: Радио и связь, 1982.
2. *Шен И.Р.* Принципы нелинейной оптики. М.: Наука, 1989.
3. *Басиев Т.Т.* // ФТТ. 2005. Т. 47. № 8. С. 1354.
4. *Бломберген Н.* // Успехи физ. наук. 1969. Т. 97. № 2. С. 307.
5. *Басиев Т.Т.* // Успехи физ. наук. 1999. Т. 169. № 10. С. 1149.
6. *Eckhardt G., Bortfeld D., Geller M.* // Appl. Phys. Lett. 1963. V. 3. № 8. P. 137.
7. *Eckhardt G.* // IEEE J. Quantum Electron. 1966. V. 2. № 1. P. 1.
8. *McQuillan A.K., Clements W.R.L., Stoicheff B.P.* // Phys. Rev. A. 1970. V. 1. № 3. P. 628.
9. Углеродная фотоника / Под ред. В.И. Конова. М.: Наука, 2017.
10. Природные алмазы России / Под ред. В.Б. Кваскова. М.: Полярон, 1997.
11. *Спицын Б.В., Дерягин Б.В.* Способ наращивания граней алмаза. А.с. СССР № 339134. Оpubл. Б.И. 1980. № 17. С. 323.
12. *Рогалин В.Е., Крымский М.И., Крымский К.М.* // РЭ. 2018. 63. № 11. С. 1188.
13. *Рогалин В.Е., Аранчий С.М.* // Интеграл. 2012. № 5(67). С. 80.
14. *Аранчий С.М., Крымский К.М., Крымский М.И., Рогалин В.Е.* // РЭ. 2015. Т. 60. № 3. С. 325.
15. *Lawandy N., Afzal R.* Solid State Raman Laser. U.S. Pat. Application № 20050163169 A1. Publ. 28 Jul. 2005.
16. *Kaminskii A.A., Ralchenko V.G., Konov V.I., Eichler H.J.* // Phys. Stat. Sol. B. 2005. V. 242. № 1. P. R4.
17. *Kaminskii A.A., Hemley R.J., Lai J. et al.* // Laser Phys. Lett. 2007. V. 4. № 5. P. 350.
18. *Granados E., Spence D.J., Mildren R.P.* // Optics Express. 2011. V. 19. № 11. P. 10857.
19. *Mildren R.P., Butler J.E., Rabeau J.R.* // Optics Express. 2008. V. 16. № 23. P. 18950.
20. *Sabella A., Piper J.A., Mildren R.P.* // Optics Express. 2011. V. 19. № 23. P. 23554.
21. *Williams R.J., Kitzler O., McKay A., Mildren R.P.* // Optics Lett. 2014. V. 39. № 14. P. 4152.
22. *Kitzler O., Lin J., Pask H.M. et al.* // Optics Lett. 2017. V. 42. № 7. P. 1229.
23. *Williams R.J., Kitzler O., Bai Z. et al.* // IEEE J. Selected Topics Quantum Electron. 2018. V. 24. № 5. P. 1602214.
24. *Bai Z., Williams R.J., Kitzler O. et al.* // Optics Express. 2018. V. 26. № 16. P. 19797.
25. *Antipov S., Sabella A., Williams R.J. et al.* // Optics Lett. 2019. V. 44. № 10. P. 2506.
26. *Optical Engineering of Diamond* / Eds. R.P. Mildren, J.R. Rabeau. Weinheim: Wiley-VCH, 2013.
27. *Каминский А.А., Ральченко В.Г., Енеда Х. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 104. № 5. С. 356.
28. *Андреева Н.П., Барашков М.С., Евстигнеев В.Л. и др.* // Контенант. 2018. Т. 16. № 1. С. 88.
29. *Колкер Д.Б., Пустовалова Р.В., Старикова М.К. и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 2. С. 124.