УДК 621.039.629 + 621.375.8

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ В УСТАНОВКАХ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА (Обзор)

В.В. Безотосный

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

В статье дан анализ применения лазерных диодов (ЛД) и линеек лазерных диодов (ЛЛД) в действующих установках лазерного инерциального термоядерного синтеза (ИТС) и перспектив его расширения с учётом полученных в последние годы актуальных достижений в этой области. В частности, развитие научной, инженерной и технологической базы включает следующие направления: повышение мощности и яркости, сужение диаграммы направленности, сужение спектра излучения с использованием нового метода некогерентного спектрального суммирования, применимого как для одиночных лазерных диодов, так и для монолитных линеек, а также гибридных и монолитных двумерных матриц лазерных диодов. Обсуждается возможность применения в ИТС различных типов лазеров с диодной накачкой: волоконных лазеров, лазеров на парах щелочных металлов, твердотельных лазеров, в том числе на основе оптической керамики, а также непосредственно мощных лазерных диодных систем, построенных на принципах некогерентного суммирования.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез, лазерные диоды, лазерные диодные линейки и матрицы лазерных диодов, лазерная диодная накачка.

PROSPECTS OF LASER DIODES APPLICATIONS TO INERTIAL CONFINEMENT FUSION (Review)

V.V. Bezotosnyi

P.N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

This article presents the analysis of using the laser diodes (LD) and laser diode arrays (LDA) in the operating facilities of the controlled inertial confinement fusion (ICF) and prospects for expanding their use taking into account the outstanding achievements received recently in this area. In particular, development of scientific, engineering and technological basis includes: increase in power and brightness; narrowing of a divergence diagram; narrowing of a radiation spectrum with use of a new method of the incoherent spectral summation applicable both for individual laser diodes, and for monolithic linear arrays as well as for hybrid and monolithic 2D matrixes of laser diodes. Additionally, various types of lasers with a diode pumping are discussed in terms of their application to ICF: fiber lasers, lasers on vapors of alkali metals, solid-state lasers, including lasers at the basis of optical ceramics, and direct power laser diode systems based on principles of incoherent summation.

Key words: inertial confinement fusion (ICF), laser diodes, diode laser bars and 2D array, laser diode pumping.

DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-4-86-98

ВВЕДЕНИЕ. КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Приоритет идеи лазерного инерциального термоядерного синтеза (ИТС) принадлежит выдающимся учёным Физического института им. П.Н. Лебедева Н.Г. Басову и О.Н. Крохину [1]. Первые в мире мощные лазеры на неодимовом стекле с модуляцией добротности были также созданы в ФИАН [2], здесь проведены и первые эксперименты по получению лазерной плазмы при сжатии мишени [3, 4]. Параметры первых лазеров, применённых для нагрева плазмы, по сравнению с современными установками для ИТС были весьма скромные, но в то время впечатляющие — в импульсе длительностью 50 нс была получена энергия 60 Дж [5, 6]. Многие идеи и технические решения, найденные и разработанные в ФИАН в ходе экспериментов на установках «Кальмар» и «Дельфин», составили основу дизайна современных установок лазерного ИТС и конструкции криогенных термоядерных топливных мишеней [5, 6].

Символично, что Нобелевская лекция Н.Г. Басова посвящена полупроводниковым лазерам [7]. Фактически ещё в 1964 г., на заре лазерной физики и техники, Н.Г. Басов смог разглядеть большое будущее этого направления. По словам Ю.М. Попова, одного из изобретателей полупроводниковых лазеров [8—10], «мало кто мог предположить, что они будут работать». За 60-летнюю историю своего развития полупроводниковые лазеры прошли большой эволюционный путь от лабораторной игрушки, работавшей несколько секунд в режиме коротких импульсов при криогенных температурах, до основного активного элемента фотоники, занимающего более 65% всего мирового лазерного рынка. Эволюция наиболее рас-

пространственного типа полупроводниковых лазеров — инжекционных лазеров, инверсия населённости в активной области которых достигается методом инжекции неосновных носителей заряда через p—n-переход, в современной периодической литературе именуемых *laser diodes* (лазерные диоды) или *diode lasers* (диодные лазеры), сокращённо (ЛД), неуклонно продолжается, эти приборы не перестают удивлять своим ещё до конца не реализованным огромным потенциалом.

УСТАНОВКИ ЛАЗЕРНОГО ИТС, ПРИМЕНЕНИЕ В НИХ ЛД И ЛЛД

В настоящее время в мире построен целый каскад мощных лазерных установок для исследований в области ИТС, основные из них перечислены в обзоре [11]. Более подробную информацию о конструкции наиболее мощных действующих установок ИТС можно найти на официальных сайтах [12—15]. Согласно обзору [11] в настоящее время действуют и находятся в стадии строительства следующие установки лазерного ИТС:

- в Лоуренсовской Livermore национальной лаборатории США (LLNL) с 2009 г. действует лазерная установка NIF (National Ignition Facility) [12] с энергией лазера 1,8 МДж, сосредоточенной в 192 пучках лазерного излучения. В США также существует долгосрочная программа LIFE (Laser Inertial Fusion Energy), нацеленная на построение к 2040 г. первой электростанции ИТС. Программа LIFE будет развиваться на основе установки NIF;

- во Франции (г. Бордо) введена в действие мощная установка LMJ (Laser Mega Joule) [13] с энергией лазера 2 МДж в 240 пучках лазерного излучения;

- в Евросоюзе предполагается создать мощную лазерную установку HiPER (High Power laser Energy Research) [14] с энергией лазера 0,3—0,5 МДж, функционирование которой требует производства и доставки топливных мишеней с частотой следования импульсов 1 Гц. Цель этой программы — демонстрация возможности получения энергии термоядерного синтеза в частотном режиме, что требуется для работы инерциальной термоядерной энергетической станции;

- в Лаборатории лазерной энергетики США (LLE) действует лазерная установка OMEGA. Энергия лазера 30 кДж сосредоточена в 60 пучках лазерного излучения;

- в Военно-морской лаборатории (NRL) США построен самый мощный в мире криптон-фторовый лазер NIKE с энергией лазера от 3 до 5 кДж в 56 пучках лазерного излучения. Для отработки реакторных технологий в NRL создана установка ELEKTRA, действующая с частотой 5 Гц при энергии лазера 500—700 Дж. К 2020 г. планируется увеличить энергию лазера в 1000 раз;

- в Японии в Лаборатории лазерной техники (ILE) Университета г. Осака действует многопучковая лазерная установка GEKKO-XII [15]. Энергия лазера 15—30 кДж;

- в Китае создана установка SG-III с энергией лазера 200 кДж в 64 пучках лазерного излучения. Здесь действует программа построения и запуска в 2020 г. лазерной установки реакторного масштаба SG-IV с энергией лазера 1,5 МДж [16];

- в России, в РФЯЦ — ВНИИЭФ (г. Саров), действует установка Искра-5 (12 пучков лазерного излучения). На момент постройки в 1989 г. это была крупнейшая в Европе лазерная система с выходной энергией 30 кДж при длительности импульса 0,25 нс, не уступавшая по мощности излучения самой крупной в мире лазерной установке на неодимовом стекле Nova (США). В отличие от установки Nova Искра-5 базируется на йодном лазере, источником накачки в котором служит электрический разряд. При создании установки был учтён опыт разработки и эксплуатации в СССР установок «Кальмар» и «Дельфин» (ФИАН), а также установок Искра-3 и Искра-4 (Саров).

В 2012 г. начато строительство новой установки УФЛ-2М с энергией лазера 4,6 МДж, обеспечивающей в 192 пучках суммарную энергию на мишени 2,8 МДж. Ожидается, что эта установка станет самой мощной в мире.

Среди наиболее мощных и продвинутых (в том числе с точки зрения применения в них полупроводниковых лазеров) установок прежде всего следует упомянуть NIF. Установка имеет сложную многокаскадную структуру, в которой достаточно широко применяются лазерные диоды. Первый каскад установки представляет собой высокостабильный задающий генератор (ЗГ), выполненный на основе компактного иттербиевого одномодового волоконного лазера с накачкой ЛД. Генератор излучает импульсы энергией несколько нДж при диаметре пучка, выходящего из активного волокна, несколько микрон.

Отметим, что в задающем генераторе принципиально возможно непосредственное применение ЛД. В частности, в ФИАН были разработаны оригинальные конструкции одномодовых и одночастотных лазеров типа *buried heterostucture* с боковым оптическим ограничением, которые были внедрены в производство в СССР. Эти изделия по сей день выпускаются отечественной промышленностью и широко применяются в России и за рубежом в системах волоконно-оптической связи на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм [17—20]. Современные гетероструктуры с квантовыми ямами и квантовыми точками, внедрёнными в квантовые ямы, позволяют получать высокую эффективность и выходную мощность на длине волны 1064 нм [21, 22], являющуюся основной для силовых каскадов установок ИТС. Существенным преимуществом лазеров типа *buried heterostucture* и их более продвинутых модификаций *planar buried heterostucture* является наличие так называемого «реального» волновода, обусловленное положительным скачком показателя преломления в поперечном направлении, который позволяет получить симметричную диаграмму направленности в режиме фундаментальной пространственной моды TE_{00} с расходимостью излучения, близкой к дифракционной.

Одномодовые ЛД, излучающие на длине волны 1064 нм, с осесимметричным пучком, по нашему мнению, могут претендовать на роль задающего генератора для мощных лазерных систем. Возможность получения в лазерах такого типа отрицательного скачка показателя преломления в поперечном направлении обусловило создание новой разновидности ЛД, работающих в режиме «вытекающей моды» [23]. Такой режим позволяет существенно увеличить мощность при сохранении достаточно хороших пространственных характеристик излучения.

В установке NIF на основе импульса от задающего генератора формируются 48 импульсов с использованием волоконных разветвителей, объединителей и волоконных усилителей. В волоконных усилителях ЛД используются как источники накачки. Следует заметить, что в данном каскаде вместо волоконных усилителей принципиально возможно непосредственное использование ЛД. В качестве задающего генератора и интегрированного с ним усилителя могут быть применены монолитные тандемы типа МОРА (*master oscillator—power amplifier*), состоящие из задающего генератора — пространственно-одномодового одночастотного ЛД, сопряжённого через оптическую развязку с усилительной секцией, имеющей форму расширяющегося конуса.

Усиленные волоконными усилителями импульсы в установке NIF далее направляются с помощью волоконных световодов на 48 модулей предусилителей (ПУ), в которых, кроме усиления, также осуществляется формирование пучков. Модули предусилителей осуществляют две стадии усиления. На первой стадии регенеративный усилитель усиливает энергию пучка, поступающую от ЗГ и равную 750 пДж, до 15 мДж. На этом каскаде для накачки стержней из легированного неодимом стекла используется излучение монолитных линеек лазерных диодов (ЛЛД), собранных в гибридные матрицы мощностью 4 кВт. В усиливающем стержне ПУ используется многопроходная схема: излучение проходит через активный элемент 116 раз. Излучение диодной матрицы в модуле ПУ направляется на один из торцов стеклянного стержня с помощью концентратора, представляющего собой полую линзу с геометрией сходящегося конуса. Накачка последующих каскадов усилителей в установке NIF осуществляется импульсными лампами накачки.

Заметим, что первое предложение о возможности использования двумерных матриц ЛД для накачки мощных лазерных систем в установках ИТС было сделано в работе [24]. В то время параметры первых монолитных ЛЛД были весьма скромными [25], пиковая импульсная выходная мощность 150 Вт в квазинепрерывном режиме считалась рекордной. В настоящее время пиковая мощность выпускаемых промышленностью ЛЛД в квазинепрерывном режиме находится на уровне 400 Вт (фирма Quantel, модель QD-Q1901-A1) и неуклонно из года в год растёт.

Указанные достижения стали возможными благодаря повышению полного к.п.д. лазерных гетероструктур, достигающего 65—70%, а также благодаря более продвинутому методу монтажа лазерного кристалла, обеспечивающим эффективный отвод от активной области лазерной гетероструктуры тепловых потоков экстремально высокой плотности. Решению тепловой проблемы и повышению к.п.д. посвящён цикл наших работ [26—31]. С учётом полученных расчётных результатов были изготовлены ЛД спектральных диапазонов 808 и 980 нм с рекордной на момент публикации непрерывной мощностью излучения более 25 Вт при ширине полоскового контакта 100 мкм и пиковой мощностью в импульсном режиме до 150 Вт [32—38]. Фотографии процесса сборки разработанных ЛД и тестирования их парамет-

ров в «чистой зоне» ФИАН представлены на рис. 1, а, б. Принципиальная конструкция ЛД и микрофотографии собранных в чистой зоне ФИАН образцов лазера на длине волны 808 нм показаны на рис. 2—4. Фотография разработанной ЛЛД, излучающей на длине волны 808 нм, в корпусе международного стандарта C—S-маунт показана на рис. 5.

Рис. 1. Монтаж лазерного кристалла (а). Тестирование изготовленных мощных ЛД в чистой зоне ФИАН (б)

Рис. 2. Общий вид ЛД, смонтированного на теплоотводящем элементе типа C—маунт (1); 2 — чип ЛД; 3 — верхний электрод; 4 — цилиндрическая микролинза для фокусировки излучения по «быстрой оси»

Рис. 3. Микрофотография смонтированного чипа ЛД (вид сверху), на чипе золотая металлизация, длина резонатора 4 мм, ширина чипа 0,5 мм, выходное зеркало резонатора справа, заднее глухое зеркало слева, верхний электрод чипа присоединён приваренными ультразвуком 20 золотыми проводниками диаметром 25 мкм к контактной площадке изолятора

Рис. 4. Микрофотография выходного зеркала ЛД, смонтированного на C—S-маунте. Голубой цвет выходного зеркала резонатора обусловлен нанесённым диэлектрическим просветляющим покрытием с коэффициентом отражения 5%

Рис. 5. Фото ЛЛД, излучающей на длине волны 808 нм в корпусе C—S-маунт. Разработка ФИАН совместно с НПП «Инжект»

Продолжим рассмотрение работы установки NIF. На следующем каскаде лазерный импульс усиливается максимально до 10 000 раз с помощью четырёхпроходного усилителя, выполненного на основе стержня из неодимового стекла, накачиваемого с помощью 12 импульсных ламп накачки.

На установке GEKKO-XII, действующей в Японии, используется концепция «быстрого поджига» мишени импульсом пикосекундной длительности. Детали, касающиеся конструкции мишеней для концепций «центрального поджига» и «быстрого поджига», приведены в обзоре [11]. Применение конуса из материала с тяжёлым Z, встроенного в сферическую топливную капсулу с криогенным DT-слоем, позволяет лазерному лучу

подойти близко к сжатому плотному ядру, в результате чего DT-топливо нагревается до температуры зажигания. В установке GEKKO-XII применяются современные схемы фокусировки лазерных пучков, борьбы с абберациями и компрессии лазерных импульсов, позволяющие получать длительности импульсов менее 1 пс. В настоящее время на упомянутых установках NIF, LMJ и GEKKO-XII ведутся исследовательские работы по изучению возможности применения матриц ЛД для накачки усилителей мощности и энергии.

Рассмотрим полученные в последние годы результаты, которые открывают новые горизонты в практическом применении полупроводниковых лазеров в мощных лазерных системах, в том числе в установках ИТС. Эти достижения являются основой для устранения недостатков и повышения параметров излучения ЛД и ЛЛД, в том числе повышения яркости излучения, снижения расходимости излучения в плоскости, перпендикулярной р—п-переходу, и сужения спектра излучения.

ОДИНОЧНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДЫ, ЛИНЕЙКИ И МАТРИЦЫ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ В СИСТЕМАХ ИТС

Среди различных видов полупроводниковых лазеров, классифицируемых по типу накачки, несомненная победа досталась инжекционным лазерам, которые со временем стали называть лазерными диодами. В настоящее время существует множество различных типов приборов, подпадающих под определение «лазерных диодов», включая приборы с торцевым выводом излучения и приборы с поверхностным выводом излучения, в том числе VCSEL (vertical cavity surface emitting laser). Наиболее распространенными и мощными в настоящее время являются приборы с торцевым выводом излучения. Они подразделяются на одиночные ЛД, монокристаллические и гибридные ЛЛД, монокристаллические и гибридные двумерные матрицы, а также модули ЛД, состоящие из наборов двумерных матриц. В силу геометрии вывода излучения монокристаллические матрицы ЛД изготавливаются на основе приборов типа VCSEL либо на основе лазеров с торцевым выводом излучения с интегрированными 45-градусными монокристаллическими зеркалами, а гибридные матрицы — на основе ЛД с торцевым выводом излучения. Лучшие современные образцы монокристаллических матриц ЛД на основе VCSEL по плотности мощности практически не уступают гибридным матрицам на основе линеек с торцевым выводом излучения. Фирма Princeton Optronics разработала и выпускает такие приборы на длине волны 976 нм с плотностью мощности до $4,2 \text{ кВт/см}^2$. В настоящее время активная излучающая площадь таких приборов невелика, по этой причине они имеют мощность не более 900 Вт. В то же время потенциал, заложенный в концепцию матриц VCSEL, заключается в возможности отказа от дорогостоящих операций гибридной сборки двумерных матриц и в переходе на технологию планарных групповых операций, благодаря чему может быть повышено качество, достигнуты большие объемы производства при снижении стоимости.

Мощные одиночные ЛД, выпускаемые в промышленном масштабе, в зависимости от спектрального диапазона и ширины полоскового контакта перекрывают диапазон непрерывной мощности до 15 Вт, монокристаллические ЛЛД имеют непрерывные мощности до 100—200 Вт, квазинепрерывные ЛЛД — до 300—1000 Вт при длительности импульса 0,2 мс, модули на основе ЛЛД — до $0,2—0,5 \text{ кВт/см}^2$ в непрерывном режиме и до 5—10 кВт в квазинепрерывном режиме. Параметры одиночных ЛД и приборов на их основе постоянно совершенствуются, а гарантированная в ресурсном режиме мощность излучения продолжает увеличиваться благодаря повышению эффективности эпитаксиальных гетероструктур и внедрению новых технологий изготовления приборов. Существует несколько концепций применения мощных ЛД, а также ЛЛД, матриц и модулей на их основе для накачки твердотельных лазеров и усилителей. **Основные из них:**

- волоконные лазеры;
- твердотельные, в том числе дисковые лазеры;
- лазеры и усилители на основе стержней и плит из оптического стекла, так называемых «слэбов».

Важное значение для применения в установках ИТС имеют лазеры, работающие на второй и третьей гармонике, которые позволяют сфокусировать энергию в пятно меньших размеров и повысить коэффициент поглощения лазерного излучения плазмой, поэтому аспект получения второй и третьей гармоник от мощных лазеров с применением ЛД, ЛЛД и двумерных матриц ЛЛД весьма важен.

Достоинства лазерных диодов для практических применений. ЛД имеют существенные достоинства, к которым следует отнести компактность, высокий к.п.д. от розетки (до 70%), а также возможность реализации следующих операций: монолитного интегрирования методами планарной технологии, интегрирования гибридными методами, некогерентного суммирования мощности, повышения яркости, снижения расходимости, сужения спектра излучения, повышения надёжности и срока службы, перспективы снижения стоимости при массовом производстве. Кроме того, при широкомасштабном производстве могут быть принципиально решены проблемы контроля качества и проведения дорогостоящих долговременных ресурсных испытаний.

Качество параметров и энергетическая ёмкость современного производства ЛД. Для применения в силовых каскадах установок ИТС требуются значительные количества ЛД с гарантированными высокими параметрами качества. Лазерные гетероструктуры являются основой и вершиной технологического развития направления. Высокие излучательные параметры лазерных гетероструктур обеспечиваются преобладающей в промышленных фирмах МОС-гидридной и молекулярно-пучковой эпитаксией (МПЭ), причём в последние годы наблюдается тенденция к переходу от МОС-гидридной эпитаксии к МПЭ, поскольку она обеспечивает более высокие параметры. Наряду с эпитаксиальными методами качество ЛД также обеспечивается операциями планарного цикла, скрайбирования, пассивации и защиты зеркал резонаторов, монтажа лазерных кристаллов на теплоотводящие элементы. Технологии и методы создания ЛД и ЛЛД разрабатывались и совершенствовались несколько десятилетий, сегодня их называют «технологиями на уровне искусства» (state of the art technology). Современный уровень таких технологий гарантирует:

- получение бездефектных высокоэффективных и ресурсных пластин квантоворазмерных наногетероструктур на основе полупроводников A_3B_5 , излучающих на длинах волн 808, 915, 940, 976 нм диаметром 3—4 дюйма, имеющих полный к.п.д. не менее 60%;
- получение из таких эпитаксиальных пластин надёжных и долговечных чипов ЛД и ЛЛД со сколотыми зеркалами, имеющими пассивацию и защитно-просветляющие и отражающие покрытия и выдерживающими в течение гарантированного срока службы плотность оптической мощности на уровне не менее 20—30 МВт/см², с металлизацией контактов слоями покрытий Ti—Pt—Au;
- упаковку должным образом подготовленных к монтажу на теплоотводящие элементы чипов ЛД и ЛЛД в технологическую тару с гелевым удержанием кристалла (Gel Pak);
- прецизионный автоматизированный монтаж чипов ЛД и ЛЛД на теплоотводящие элементы с точностью на уровне менее 1 мкм;
- автоматизированный прецизионный монтаж гибких и сильноточных электродов;
- автоматическое тестирование, отбор годных и сертификацию комплекса выходных параметров, собранных на теплоотводящие элементы чипов ЛД и ЛЛД.

Все указанные базовые технологии высокопродуктивны, в частности, только одна установка МОС-гидридной эпитаксии фирмы AIXTRON типа AIX2800 при круглосуточной работе (три процесса в день) позволяет вырастить 45 пластин диаметром 4 дюйма. В пересчёте на одиночные ЛД непрерывной мощностью 10 Вт при длине резонатора 4 мм и ширине кристалла 0,4—0,5 мм, за вычетом краевых областей пластин, являющихся отходами, одна пластина обеспечивает не менее 3,5 тыс. одиночных чипов ЛД, а 45 пластин дают суммарную мощность ЛД 1,5 МВт.

Близкие оценки значения суммарной мощности получаются для монолитных ЛЛД при длине резонатора 3 мм и ширине 10 мм. На крупных фирмах, таких как Samsung, круглосуточно работают десятки высокопродуктивных промышленных установок, они способны обеспечить уровень производства в пересчёте на непрерывную выходную мощность 20—100 МВт в день. Для квазинепрерывного режима полученная оценка возрастает не менее чем в 5 раз, т.е. составляет около 500 МВт в день. Современные операции планарного цикла, скалывания, защиты зеркал, монтажа, отбора и тестирования также автоматизированы и высокопроизводительны. Самым длительным этапом всей цепочки являются ресурсные испытания, однако эта проблема решается высоким качеством всего цикла производства (processing cycle), т.е. на ведущих фирмах внедрена концепция «качество гарантируется технологией». Проводится только выборочный текущий контроль, а полный контроль применяется только при сбоях технологического цикла.

Прорывом с точки зрения перспектив повышения мощности можно назвать публикацию [39], в которой сообщается о получении максимальной непрерывной мощности 880 Вт от одной лазерной линейки с шириной излучающей апертуры 10 мм. Уровень мощности в квазинепрерывном режиме 0,8—1 кВт от одной лазерной линейки в ближайшие годы может стать промышленным стандартом, соответственно для гибридных двумерных матриц может быть получен уровень плотности мощности до 20 кВт/см².

Приведённые данные позволяют надеяться, что уже в ближайшие годы ЛД и ЛЛД как при непосредственном применении, так и в качестве источника накачки в составе мощных лазерных систем по доступной суммарной энергетике по плечу решение задач не только резки, сварки, но и более масштабной задачи лазерного ИТС.

СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ ДЛЯ ИТС

Перспективы применения ЛД и ЛЛД для ИТС становятся реальными, если преодолеть технологические недостатки, обусловленные фундаментальными свойствами полупроводниковой среды: зонной структурой, температурными характеристиками полупроводников A_3B_5 и геометрией лазерных наногетероструктур. Поэтому в настоящее время разрабатываются комплексные программы по формированию требуемых фундаментальных параметров лазерных диодов. В ряду наиболее существенных достижений следует отметить четыре основных направления.

Первое, наиболее перспективное, но в то же время наиболее сложное направление для достижения максимально возможного к.п.д. и минимальных габаритов установок — это исследования в области прямого (непосредственного) использования лазерных диодов для обработки материалов и замены ими твердотельных лазеров и волоконных лазеров с диодной накачкой. Основные успехи в данном направлении достигнуты при разработке лазерных диодов с максимально возможным к.п.д., а также в части использования объёмной дифракционной оптики — объёмных голографических дифракционных решёток для решения следующих фундаментальных задач: снижение расходимости излучения, сужение спектра излучения, суммирование мощности и повышение яркости излучения.

Значительный вклад в развитие направления был внесён Л.В. Глебовым [40], которому в результате многолетних исследований и технологических работ удалось осуществить давнюю мечту — найти подходящий фоторефрактивный материал для создания объёмной дифракционной оптики. На основе силикатного стекла с базовым составом $Na_2O-ZnO-Al_2O_3-NaF-KBr-SiO_2$, легированным Се и Ag, были получены фазовые объёмные голограммы с комплексом рекордных характеристик: объёмные голографические решётки могут обладать эффективностью до 99%, высокой фоточувствительностью, спектральным диапазоном фоточувствительности от 280 до 350 нм, возможностью записи дифракционных решёток с помощью He—Cd-, N_2 -, и Ag-лазеров с количеством периодов модуляции показателя преломления до 10 000 на мм, низким уровнем шумов, нестираемым профилем показателя преломления, термостабильностью вплоть до температуры размягчения стекла (400 °С), стабильные до плотности лазерной оптической мощности 100 кВт/см², при этом со стоимостью, типичной для обычных оптических стёкол.

В отличие от плоских дифракционных решёток объёмные имеют значительно более высокую эффективность. Кроме того, при простой и компактной схеме воздушного охлаждения потоком воздуха от компрессора они устойчиво работают при принципиально более высоких уровнях оптической мощности по сравнению с плоскими решётками.

Создание объёмной дифракционной оптики на основе указанного материала позволило совершить настоящий прорыв в области параметров лазерных диодов, в частности, показана возможность снижения расходимости излучения лазерного диода в плоскости р—п-перехода в 5 раз, при этом получена дифракционная расходимость при мощности 2 Вт, показана возможность уменьшения ширины спектра в лазерах на 940 нм — с 15 нм до 65 пм (например, фирма Opti Grade выпускает систему на основе лазерных диодов на длине волны 780 нм с шириной спектра 2 пм мощностью 1 кВт), реализованы спектральное суммирование и повышение яркости лазерных диодов максимально в 300 раз для систем небольшой мощности и не менее чем в 100 раз для систем мощностью несколько киловатт.

Фирмой Terra Diode продемонстрированы лазерные диодные системы со спектральным суммированием мощностью до 4,6 кВт [41], имеются сообщения о повышении мощности до 6 кВт.

Важный научный и технологический вклад в разработку систем спектрального суммирования был внесён в ходе выполнения исследований по Европейскому проекту BRIDLE (bright diode laser), в котором приняли участие практически все ведущие европейские промышленные компании и университеты [42]. Были созданы монолитные ЛЛД, каждый кластер которых имеет разную длину волны излучения с заданным периодом по ширине излучающей апертуры и представляет собой тандем в виде одномодового задающего генератора и усилителя (МОРА — Master oscillator — Power amplifier). Разработаны схемы спектрального суммирования мощности таких двухкаскадных лазерных линеек и матриц на их основе с использованием дифракционных решёток. Аналогичные работы проводятся в Китае, с помощью схем суммирования [43] получена выходная мощность 579 Вт с шириной спектра 18,8 нм при полном к.п.д. 47%.

В то же время получение в ближайшие годы непосредственно с помощью ЛД и ЛЛД уровней энергии и качества пучка, необходимых для окончательных каскадов ИТС, в настоящее время выглядит проблематично. Для создания таких систем требуется преодолеть ряд проблем, в том числе выбрать оптимальную концепцию и стратегию, наладить массовое производство применяемых материалов и компонентов, а также значительно снизить их стоимость.

Вторым важным направлением является применение объёмных голографических решёток для сужения спектра излучения лазерных диодов с целью эффективной накачки лазеров на парах щелочных металлов. В работе [44] обращено внимание на интерес к таким системам со стороны военных, поскольку прогнозировалось создание достаточно компактных лазеров мощностью более 100 кВт и к.п.д. около 50%. В последние годы публикаций в этой области немного. В работе [45] сообщалось о создании с использованием объёмных голографических решёток монолитных линеек лазерных диодов мощностью 100 Вт, имеющих ширину спектра менее 0,06 нм на длине волны 780 нм для накачки лазеров на парах рубидия.

Третье перспективное направление — волоконные лазеры с ЛД-накачкой. Мировым лидером направления является фирма IPG Photonics, которая производит широкую номенклатуру волоконных лазеров. Диапазон перекрываемой мощности в непрерывном режиме на Yb-лазерах составляет от 1 до 100 кВт, на Er- и Ti-лазерах — 1—5 кВт. Одной из отличительных особенностей фирмы является неизменная в течение многих лет концепция применения для накачки, в том числе мощных лазерных систем уровня 100 кВт, одиночных ЛД. Можно предположить, что данный подход базируется на принципах обеспечения надёжности и высоких ресурсных параметров, а также на конструктивных преимуществах распределённого отвода тепловых потоков высокой плотности от одиночных активных элементов по сравнению с ЛЛД, содержащими сконцентрированные в монолитном полупроводниковом кристалле несколько десятков (обычно от 19 до 67) излучающих кластеров. Фирма выпускает также системы до 2 кВт с суммированием мощности ЛД и водяным охлаждением. Как было отмечено, волоконные лазеры с диодной накачкой широко используются в первичных каскадах действующих установок. Масштабирование таких систем для применения в силовых каскадах ИТС принципиально возможно, но в настоящее время оно ограничено высокой стоимостью грандиозного количества требуемых для накачки мощных одиночных ЛД, активных волоконных световодов и других компонентов, а также отсутствием надёжной концепции архитектуры такой системы. Переход к накачке волоконных лазеров монолитными ЛЛД требует принципиального пересмотра конструкций существующих волоконных систем.

Четвёртое перспективное направление, которое продвигает применение ЛД в мощные системы — это развитие технологии твердотельных лазеров с диодной накачкой, связанное с разработкой и освоением технологии лазерной керамики, которая благодаря своим свойствам существенно расширяет их энергетические возможности, в том числе в области лазеров для ИТС. Технологический прорыв в данном направлении был осуществлён японской фирмой Kanashima. В России в результате совместных работ ФИАН и ИРЭ получены образцы оптической керамики, не уступающие по лазерным параметрам лучшим японским аналогам [46, 47]. В отличие от традиционной геометрии плит из оптических стёкол, так называемых «слэбов», накачиваемых лампами, для активного элемента из кристаллических и керамических материалов значительное развитие получила дисковая геометрия.

Все действующие установки ИТС имеют оконечные каскады, работающие на «слабах» из стекла, накачиваемых лампами. Эти каскады, как и на установке NIF, дают около 99,99% всей энергии и занимают более четверти полезной площади, которая имеет размер 2—3 футбольных полей. Как известно, при поперечной накачке активных элементов большого размера на стекле с помощью ламп очень сложно получить высокий полный к.п.д. преобразования вложенной электроэнергии в лазерное излучение. Применение кристаллических активных элементов могло бы существенно повысить полный к.п.д. и снизить габариты оконечных каскадов, однако выращивание лазерных кристаллов большого объема с требуемыми оптическими параметрами практически невозможно. Оптическая керамика является перспективной альтернативой кристаллическим активным элементам, поскольку она обладает рядом существенных преимуществ:

- возможность изготовления активных элементов больших размеров;
- возможность изготовления композитных активных элементов;
- изотропность оптических параметров;
- возможность изготовления керамики с составами, которые нельзя вырастить в виде качественных монокристаллов.

Кроме того, современные технологии изготовления лазерной керамики делают принципиально возможным изготовление активных элементов значительно больших размеров, чем на основе монокристаллов аналогичного состава. При этом керамические активные элементы имеют более высокую по сравнению со стеклами теплопроводность. Благодаря изотропности оптических свойств керамики можно существенно увеличить качество пучка вследствие симметрии тепловой линзы, кроме того, убрать астигматизм, что весьма существенно для получения пучков с дифракционной расходимостью. Очевидно, что фокусировка большого количества лазерных пучков, имеющих суммарную энергию в импульсе на уровне несколько МДж в строго определенной зоне (в фокальном пятне) вакуумной камеры термоядерного реактора и вложение такой энергии в термоядерную мишень с небольшими размерами, представляет собой сложнейшую задачу, которой в концепциях действующих установок ИТС уделено большое внимание [12—15]. Как пример керамической среды с перспективными параметрами, кристаллический аналог которой получить не удастся, можно привести материал LuYAG, легированный Yb. Эта активная среда накачивается наиболее эффективными и долговечными ЛД на длинах волн 940 или 980 нм, а излучает на длине волны 1029 нм, благодаря чему разница в энергии фотонов накачки и фотонов излучения, так называемый «дефект кванта», очень мала. Кроме того, время жизни в этом материале 1,4 мс, что в 7 раз превышает время жизни в Nd:YAG, составляющее около 0,2 мс. Эти соображения экспериментально подтверждены в работе [43], где сообщается о получении на длине волны генерации 1029 нм рекордной дифференциальной эффективности 90,1% при накачке такой керамики с концентрацией ионов Yb³⁺, равной 10%. В связи с этим следует упомянуть, что в настоящее время на длине волны 980 нм промышленностью (фирмой BWT) выпускаются чипы линеек лазерных диодов с непрерывной мощностью 200 Вт и квазинепрерывной мощностью 700 Вт при длительности импульса около 1 мс и требуемой для ИТС частотой 10 Гц. При частоте следования импульсов 1 Гц от этих лазерных линеек возможно получить мощность в квазинепрерывном ресурсном режиме на уровне не менее 1 кВт, при этом энергия в импульсе, доступная от одной линейки, составит около 1 Дж, соответственно гибридная матрица стандартной геометрии из 20 линеек при эффективном охлаждении сможет обеспечить плотность энергии накачки на уровне не менее 20 Дж с 1 см².

Примером использования активных элементов на основе лазерной керамики являются результаты, приведенные в работе [48], где продемонстрирован твердотельный лазер на керамике Yb:YAG с ЛД-накачкой, построенный по усилительной схеме с выходной энергией 107 Дж и частотой повторения 1 Гц при длительности импульса 10 нс. Накачка осуществлялась лазерными диодами на длине волны 940 нм энергией 507 Дж, оптическая эффективность преобразования «свет-в-свет» составила 21%, что для установки такого уровня энергии является рекордным показателем. Принципиально важными результатами работы явились демонстрация возможности масштабирования примененной схемы, достаточно высокая эффективность применения лазерной керамики в сочетании с ЛД-накачкой и получение частотного режима 1 Гц. Очевидно, что это делает применение таких схем привлекательным для разработки более мощных систем энергией десятки кДж, применяемых, в частности, в Японии для «быстрого» локального

поджига мишеней. В данном контексте следует отметить, что в приведённом примере было применено новое техническое решение — криогенное газовое охлаждение системы накачки при температуре 175 К. По опубликованным данным в настоящее время это самый мощный частотный твердотельный лазер с ЛД-накачкой.

К сожалению, приходится констатировать, что непрерывные лазерные линейки, исследованные в работах [49, 50], наряду с более низкой стоимостью благодаря простой и технологичной конструкции значительно отстают по выходным параметрам от лучших зарубежных аналогов и, как показывают приведённые в этих публикациях результаты, нуждаются в доработке.

Кроме того, необходимо отметить, что для широкого применения линеек лазерных диодов с использованием систем спектрального суммирования на основе объёмных голографических решёток необходимо решить ряд важных технологических проблем, которым посвящены публикации [51—55], а именно обеспечить отсутствие прогиба лазерной линейки (так называемого *smile*), возникающего из-за рассогласования коэффициентов теплового расширения (к.т.р.) лазерного кристалла и теплоотводящего элемента, а также вследствие неоднородного нагрева лазерного кристалла, добиться высокой однородности мощности и спектра излучения всех кластеров лазерных линеек, обеспечить высокую степень поляризации излучения всех кластеров, требуемую для эффективной работы всех элементов оптических систем, поскольку многие из них чувствительны к поляризации, что играет важную роль в силовых каскадах мощных лазерных установок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЛД и ЛЛД уже давно применяются в мощных лазерных системах, в том числе в лазерах для ИТС. На установке NIF они применяются в задающем генераторе для накачки волоконных усилителей и в качестве матриц накачки в предусилителях. Принципиально возможно непосредственное применение одномодовых одночастотных ЛД с осесимметричной формой выходного пучка излучения в качестве задающего генератора, а также конструкций типа МОРА в качестве задающих генераторов и усилителей первого каскада. В силовых оконечных каскадах в качестве источников накачки в настоящее время применяются лампы, ЛД не используются, однако за рубежом интенсивно ведутся разработки мощных модулей накачки на основе матриц ЛЛД. Переход на диодную накачку в силовых каскадах потребует принципиальных изменений в архитектуре систем и значительных дополнительных затрат. В этой связи следует отметить, что разработка объёмных голографических решёток позволила кардинально улучшить параметры ЛД, в том числе уменьшить ширину спектра излучения, снизить расходимость излучения. Применение таких решёток в схемах спектрального суммирования мощности ЛД, ЛЛД и матриц лазерных диодов позволило повысить яркость их излучения на два порядка и достичь уровня яркости твердотельных лазеров. Продemonстрированы полупроводниковые лазеры мощностью 4,5 и 6 кВт [41], показана принципиальная возможность масштабирования таких систем. Непосредственное использование излучения ЛД с применением объёмной дифракционной оптики имеет неплохие перспективы в обозримом будущем обеспечить максимально возможный полный к.п.д. мощных систем и значительно снизить их габариты. В силу ряда технических причин, прежде всего связанных со сложностями получения пучков с дифракционной расходимостью, их фокусировки, генерации второй и третьей гармоник, получения высокой энергии в коротких импульсах в системах суммирования мощности многоэлементных ЛД, их практическое широкое внедрение в силовые установки ИТС потребует значительного времени и вложений.

Волоконные лазеры с ЛД-накачкой продемонстрировали мощность более 100 кВт. По данным официального сайта фирмы IPG Photonics [56] технически возможно изготовление лазеров с уровнем мощности до 500 кВт. Такие лазеры принципиально могут масштабироваться. В то же время переход волоконных лазеров в область энергий, необходимых для задач ИТС, потребует кардинального изменения их архитектуры, связанной с применением интегрированных источников ЛД-накачки, таких как ЛЛД и матрицы ЛЛД.

Разработки новых типов лазерной керамики и мощных надёжных ЛД диапазона 940—980 нм открывают наиболее привлекательные возможности применения ЛД в мощных лазерных установках, в том числе в установках ИТС. Продemonстрирован лазер, работающий в частотном режиме 1 Гц на основе

керамических активных элементов Yb:YAG с накачкой ЛД на длине волны 940 нм с энергией лазера 107 Дж в импульсе длительностью 10 нс [49]. Показана принципиальная возможность масштабирования разработанной схемы для применения в установках ИТС. Переход такого типа лазеров на керамику Yb:LuYAG и другие новые типы керамик, обладающих высокими лазерными параметрами [43], позволит значительно повысить дифференциальную эффективность преобразования «свет-в-свет». Принципиальная возможность изготовления композитных керамических элементов новых составов открывает многообещающие перспективы получения коротких лазерных импульсов пикосекундного диапазона в частотном режиме энергией несколько десятков кДж. В настоящее время для применения в силовых каскадах ИТС наиболее перспективным представляется развитие направления дисковых лазеров на основе новых типов лазерной керамики с накачкой матрицами ЛЛД спектрального диапазона 940—980 нм.

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить О.Н. Крохина, Ю.М. Попова, Ю.В. Сенатского и Е.А. Чешеву за предоставленную информацию, а также В.А. Олещенко за помощь в оформлении статьи. Автор выражает особую благодарность Е.Р. Корешевой за поддержку, ценные сведения и полезные обсуждения.

REFERENCES

1. **Basov N.G., Krokhin O.N.** Conditions of plasma heating by radiation of optical generator. — ZhETF (JETPh), 1964, vol. 46, pp. 171—175 (in Russian).
2. **Merkul'ev Yu.A.** Miniature critical masses of fusion fuel and fissile elements.: Preprint LPI (FIAN) № 16. M., 2010 (in Russian).
3. **Basov N.G., Zuev V.S., Senatskiy Yu.V.** Optical quantum generator with Q-switching on neodymium glass. — ZhETF (JETPh), 1965, vol. 48, p. 1562 (in Russian).
4. **Ambartsumyan R.V., Basov N.G., Boyko V.A., Zuev V.S., Krokhin O.N., Kryukov P.G., Senatskiy Yu.V., Stoylov Yu.Yu.** Heating of matter at radiation focusing of optical quantum generator. — In the same place, p. 1583 (in Russian).
5. **Senatskiy Yu.V.** Creation and research of a powerful laser on neodymium glass for high-temperature plasma heating. Dissertation for scientific degree of the cand. of phys.-math. sciences. Moscow, LPI RAS (FIAN), 1970 (in Russian).
6. **Basov N.G., Ambartsumyan R.V., Борович Б.Л., Zuev V.S., Kryukov P.G., Letokhov V.S., Morozov V.M., Oraevskiy A.N., Senatskiy Yu.V., Stoylov Yu.Yu., Shcheglov V.A.** The LPI(FIAN) report on research work on the topic «1B». — M.: P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 1966 (in Russian).
7. **Basov N.G.** Nobel lecture. Semiconductor quantum generator. — UFN (APhS), 1965, vol. 85, issue 4 (in Russian).
8. **Basov N.G., Vul B.M., Popov Yu.M.** — ZhETF (JETPh), 1959, vol. 37, № 2, p. 587 (This work is registered by the Committee on inventions and discoveries under the USSR Council of Ministers with priority of 7 July 1958) (in Russian).
9. **Basov N.G., Krokhin O.N., Popov Yu.M.** Generation, amplification and indication of infrared and optical radiations using quantum systems. — UFN (APhS), 1960, vol. LXXII, issue 2, pp. 161—209 (in Russian).
10. **Basov N.G., Krokhin O.N., Popov Yu.M.** Obtaining states with negative temperature in p-n transitions of degenerate semiconductors. — ZhETF (JETPh), 1961, vol. 40, issue 6, pp. 1879—1880 (in Russian).
11. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Krokhin O.N., Osipov I.E.** Cryogenic hydrogen fuel for controlled inertial confinement fusion (review of world results). — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 1, pp. 57—79 (in Russian).
12. **Official site LLNL** <https://lasers.llnl.gov>.
13. **Official site LMJ** <http://www-lmj.cea.fr>.
14. **Official site HiPER** <http://www.hiper-laser.org>.
15. **Official site ILE** <http://www-naweb.iaea.org>.
16. **Zheng W., Wei X., Zhu Q., Jing F., Hu D., Su J. et al.** Laser performance of the SG-III laser. — High Power Laser Science and Engineering, 2016, vol. 4, № 21, pp. 1—8.
17. **Bezotosnyi V.V., Dolginov L.M., Eliseev P.G. et al.** CW buried heterostructure mesa stripe gainpas-inp lasers operating at room-temperature in the wavelength range of 1.24—1.28 μm . — Kvantovaya Elektronika, 1980, vol. 7, Issue 9, pp. 1990—1992.

18. **Bezotosnyi V.V., Dolginov L.M.** The mode structure of the emission from mesastructure gainpas-inp heterostructure lasers buried by inp or gainpas. — Ibid., 1981, vol. 8, Issue 9, pp. 1994—1966.
19. **Bezotosnyi V.V., Duraev V.P., Shepekina, G.V. et al.** Operational lifetime characteristics of gainpas-inp heterostructures. — Ibid., pp. 1985—1987.
20. **Avdeeva V.P., Bezotosnyi V.V., Vasilev M.G. et al.** Low-threshold injection-lasers based on thick GaInPAs/InP (1.2—1.6 mkm) heterostructures. — Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, 1984, vol. 54, Issue 3, pp. 551—557.
21. **Bezotosnyi V.V., Davydova E.I., Zalevskii I.D. et al.** Powerful AlGaAs/InGaAs/GaAs-based diode lasers with a wavelength of 1.06 mkm and a reduced divergence in the plane perpendicular to the p-n junction. — Quantum Electronics, 1999, vol. 29 Issue 4, pp. 283—284.
22. **Zalevsky I.D., Bezotosny V.V., Davidova E.I. et al.** AlGaAs/InGaAs/GaAs high-power 1060 nm diode lasers with reduced fast axis divergence. — Advanced High-Power Lasers, 2000, vol. 3889, pp. 566—571.
23. **Bezotosny V.V., Eliseev P.G., Sverdlov B.N. et al.** High-power leaky-mode operation of quaternary buried-heterostructure gainpas/inp injection-laser. — IEE Proceedings-I Communications Speech and Vision, 1982, vol. 129, Issue 5, pp. 199—200.
24. **Basov N.G., Popov Y.M., Bezotosny V.V. et al.** 2D high power laser diode arrays for solid-state laser driver inertial fusion energy project. — Laser and Particle Beams, 1999, vol. 17, Issue 3, pp. 427—435.
25. **Abazadze A.Y., Bezotosnyi V.V., Gur'eva T.G. et al.** 150-W, 808-nm quasi-cw diode arrays based on AlGaAs/GaAs heterostructures with improved thermal characteristics. — Quantum Electronics, 2001, vol. 31, Issue 8, pp. 659—660.
26. **Bezotosnyi V.V., Kumykov K.K., Markova N.V.** Thermal conditions in high-power monolithic linear injection-laser arrays. — Kvantovaya Elektronika, 1996, vol. 23, Issue 9, pp. 775—778.
27. **Bezotosnyi V.V., Kumykov K.K., Markova N.V.** Ultimate output parameters of laser-diode bars and arrays. — Kvantovaya Elektronika, 1997, vol. 27, Issue 6, pp. 481—484.
28. **Basov N.G., Bezotosny V.V., Kumykov K.K. et al.** Thermal analysis and ultimate characteristics of laser diode arrays. — Physics of Semiconductor Devices, 1998, vol. 1, pp. 113—119.
29. **Bezotosnyi V.V., Kumykov K.K.** Modelling of the thermal parameters of high-power linear laser-diode arrays. Two-dimensional transient model. — Quantum Electronics, 1998, vol. 28, Issue 3, pp. 217—220.
30. **Bezotosnyi V.V., Zalevskii I.D., Kumykov K.K. et al.** Experimental investigation and simulation of the output characteristics of powerful cw diode lasers operating in the spectral range 808 nm with a total efficiency of up to 50%. — Ibid., Issue 7, pp. 594—598.
31. **Bezotosnyi V.V., Bulaev P.V., Gorbylev V.A. et al.** Continuous-wave 1-W injection lasers emitting near 808 nm with a total efficiency up to 50%. — Ibid., Issue 4, pp. 292—293.
32. **Bezotosnyi V.V., Bondarev V.Yu., Krokhn O.N. et al.** Laser diodes emitting up to 25-W at 808 nm. — Ibid., 2009, vol. 39, Issue 3, pp. 241—243.
33. **Bezotosnyi V.V., Bondarev V.Yu., Krivonos M.S. et al.** High-power laser diodes of the spectral region of 808 nm and 980 nm source. — Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2010, vol. 37, Issue 5, pp. 143—144.
34. **Ashkinazi E.E., Bezotosnyi V.V., Bondarev V.Yu. et al.** Increasing the output power of single 808-nm laser diodes using diamond submounts produced by microwave plasma chemical vapour deposition. — Quantum Electronics, 2012, vol. 42, Issue 11, pp. 959—960.
35. **Bezotosnyi V.V., Krokhn O.N., Oleshchenko V.A. et al.** Thermal modelling of high-power laser diodes mounted using various types of submounts. — Ibid., 2014, vol. 44, Issue 10, pp. 899—902.
36. **Bezotosnyi V.V., Bondarev V.Yu., Krokhn O.N. et al.** Limiting parameters of high-power single-stripe laser diodes in the range of 800—808 nm in the pulsed mode. — Semiconductors, 2014, vol. 48, Issue 1, pp. 109—114.
37. **Bezotosnyi V.V., Krokhn O.N., Oleshchenko V.A. et al.** Emission parameters and thermal management of single high-power 980-nm laser diodes. — Quantum Electronics, 2014, vol. 44, Issue 2, pp. 145—148.
38. **Bezotosnyi V.V., Krokhn O.N., Oleshchenko V.A. et al.** Thermal condition of high-power laser diodes. — Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2015, vol. 42, Issue 3, pp. 88—92.
39. **Strohmaier S.G., Erbert G., Meissner-Schenk M., Lommel B., Schmidt T., Kaul M., Karow M.M., Crump P.** KW-class diode laser bars. — In: Proc. of SPIE, 2017, vol. 10086, C-1.
40. **Glebov L.B.** Photosensitive glass for phase hologram recording. — Glass Science and Technology, 1998, vol. 71C, pp. 85—90.
41. **Huang R., Chann B., Burgess J., Lochman B., Zhou W., Cruz M., Cook R., Dugmore D., Shattuck J., Tayebati P.** Teradiode's high brightness semiconductor lasers. — In: Proc. of SPIE, 2015, vol. 9730.

42. **Crump P., Decker J., Winterfeldt M., Maaßdorf A., Erbert G., Tränkle G.** Development of high power diode lasers with beam parameter product below $BPP < 2 \text{ mm} \times \text{mrad}$ within the BRIDLE project. — In: Proc. of SPIE, 2015, vol. 9348.
43. **Meng H., Ruan Xu, Du W., Wang Zhao, Lei F., Yu J., Tan H.** Scaling the spectral beam combining channel by multiple diode laser stacks in an external cavity. — Laser Phys. Lett., 2017, vol. 14, 045811.
44. **Shalagin A.M.** Powerful lasers on alkali metal vapor with diode pumping. — UFN (APhS). Conferences and symposiums, 2011, vol. 181, № 9, p. 1011 (in Russian).
45. **Pandeya R., Merchena D., Stapletona D., Irwina D., Humblea C., Pattersona S., Kisselb H., Biesenbachb J.** Narrow-line, tunable, high-power, diode laser pump for DPAL applications. — In: Proc. of SPIE, 2013, vol. 8733, p. 873307.
46. **Kaminskii A.A., Balashov V.V., Cheshev E.A., Kopylov Yu.L., Koromyslov A.L., Krokhin O.N., Kravchenko V.B., Lopukhin K.V., Shemet V.V., Tupitsyn. I.M.** High quality $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ doped transparent ceramics for laser applications, role of sinte-ring additives. — Optical Materials, 2017, vol. 71, September, pp. 103—108.
47. **Kaminskii A.A., Balashov V.V., Cheshev E.A., Kopylov Yu.L., Koromyslov A.L., Krokhin O.N., Kravchenko V.B., Lopukhin K.V., Shemet V.V., Tupitsyn. I.M.** Laser-quality oxide $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ceramics. Comparative studies of its basic characteristics and laser ceramics of a known manufacturer. — Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2016, vol. 43, № 12, pp. 371—374.
48. **Xie. T., Babin V., Pirri A., Toci G., Li J., Pan Y., Beitlerova A., Nikl M., Vannini M.** High efficiency laser action in mildly doped Yb:LuYAG ceramics. — Optical Materials, 2017, vol. 73, pp. 312—318.
49. **Banerjee S., Mason P.D., Ertel K., Phillips P.J., de Vido M., Chekhlov O., Divoky M., Pilar J., Smith J., Butcher T., Lintern A., Tomlinson S., Shaikh W., Hooker C., Lucianetti A., Hernandez-Gomez C., Mocek T., Edwards C., Collier J.L.** 100 J-level nanosecond pulsed diode pumped solid state laser. — Optics Letters, 2016, vol. 41, № 9, pp. 2089—2093.
50. **Bezotosnyi V.V., Kozyrev A.A., Kondakova N.S. et al.** 60-W continuous wave laser diode arrays emitting at a wavelength of 808 nm. — Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2016, vol. 43, Issue 12, pp. 369—370.
51. **Bezotosnyi V.V., Kozyrev A.A., Kondakova N.S. et al.** Quasi-cw 808-nm 300-W laser diode arrays. — Quantum Electronics, 2017, vol. 47, Issue 1, pp. 5—6.
52. **Haas M., Rauch S., Nagel S., Reißwanger R., Dekorsy T., Zimer H.** Beam quality deterioration in dense wavelength beam-combined broad-area diode lasers. — J. of Quantum Electronics, 2017, vol. 53, № 3.
53. **Meng H., Ruan X., Du W., Wang Z., Lei F., Yu J., Ta H.** Scaling the spectral beam combining channel by multiple diode laser stacks in an external cavity. — Laser Phys. Lett., 2017, vol. 14.
54. **Bezotosnyi V.V., Gordeev V.P., Krokhin O.N., Mikaelyan G.T., Oleshchenko V.A., Pevtsov V.F., Popov Yu.M., Cheshev E.A.** Modelling and experimental study of temperature profiles in cw laser diode bars. — Quantum Electronics, 2018, vol. 48(2), pp. 115—118.
55. **Bezotosnyi V.V., Gordeev V.P., Oleshchenko V.A.** Pumping level impact on optical power and spectra uniformity of CW laser diode bars. — Ibid., vol. 48(6), pp. 502—505.
56. **Official site IPG Photonics** <https://www.ipgphotonics.com/en>.

AUTHORS

Bezotosnyi V.V. P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij Prospekt 53, 119991 Moscow, Russia; victorbe@sci.lebedev.ru

Received 21 June 2018

Revised 21 June 2018

Accepted 27 September 2018

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2018, vol. 41, issue 4, pp. 86—98