



## НАДЕЖНОСТЬ ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДНЫХ СБОРОК, РАБОТАЮЩИХ В КВАЗИНЕПРЕРЫВНОМ РЕЖИМЕ С ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫМИ РАБОЧИМИ ЦИКЛАМИ

Х. Киссел, [h.kissel@dilas.de](mailto:h.kissel@dilas.de), В. Фасбендер, Й. Неукам,  
DILAS Diodenlaser, [www.dilas.com](http://www.dilas.com), Майнц;  
П. Крамп, Институт им. Фердинанда-Брауна,  
Институт техники высоких частот им. Лейбница,  
Берлин;  
Т. Топфер, Lastronics, Йена, Германия

Представлены данные о производительности и надежности высокомощных диодных решеток, работающих в квазинепрерывном режиме (QCW). Показано, как можно повысить эффективность работы и выходную мощность при повышенных до 45°C температурах теплоотвода без активного водяного охлаждения и без использования элементов Пельтье.

Исследуемые модули диодныхборок повышенной мощности были разработаны под заказ. Высокая компактность и надежность конструкции позволяет использовать QCW-массивы в условиях длительных рабочих циклов. Основной элемент конструкции массива – периодическая структура (диодная линейка), представляющая сборку из одиночных лазерных диодов. Эти элементы имеют размер 1 см, выполнены с электродами из сплава AuSn. Они расположены между двумя теплоотводами в виде слоев из сплава CuW. Массив из 15 диодных модулей, также как и одиночный бар, размещались на керамических пластинах с различными показателями теплоотвода. Результаты показывают, что выходная мощность лазерного излучения строго зависит от длины волны, на которой излучает диодные сборки,

## RELIABLE HIGH-POWER DIODE LASER ARRAYS FOR QCW OPERATION WITH HIGH DUTY CYCLES

Dr. Heiko Kissel, [h.kissel@dilas.de](mailto:h.kissel@dilas.de),  
Wilhelm Fassbender, Dr. Jörg Neukum,  
DILAS Diodenlaser GmbH, [www.dilas.com](http://www.dilas.com), Mainz;  
Dr. Paul Crump, Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-  
Institut für Höchstfrequenztechnik, Berlin;  
Dr. Thomas Töpfer Lastronics GmbH, Jena, Germany

The performance and reliability data of high-brightness QCW arrays are presented. Operation at increased heat sink temperatures up to 45 °C is possible without active water cooling or conduction cooling with the help of Peltier elements.

We present performance and reliability data of high-brightness QCW arrays with a custom, compact and robust design for an operation with high duty cycles. The general design is based on single diodes consisting of a 1cm laser bar that is AuSn soldered between two CuW submounts. Arrays of up to 15 diodes are connected to ceramic base plates on different heat sinks. The available optical peak power strongly depends on the wavelength and fill factor of the laser bars as well as on the duty cycle, the base plate temperature and the thermal conductivity of the applied ceramic materials. Operation at increased heat sink temperatures up to 45 °C is possible without active water cooling or conduction cooling with the help of Peltier elements. Novel laser diodes allow for more efficient operation and higher optical output powers.

### INTRODUCTION

Quasi-continuous-wave (QCW) operation of a laser diode means that it is switched on only for certain time intervals being short enough to reduce thermal effects significantly, but still long enough that the laser process is close to its steady state, i.e. the laser is optically in the state of continuous-wave operation. Usually the duty cycle (percentage of "on" time) takes only a few percent, thus, strongly reducing heating and all related thermal effects, such as damage due to overheating [1] or thermal lensing [2]. Therefore, the QCW mode allows for the operation with higher optical peak powers at the expense of a lower average power. Thus, the cooling arrangement of usual QCW arrays



плотности упаковки\* диодов в массиве, длительности работы, температуры и теплопроводности керамической подложки. Показано, что эксплуатация при температурах подложки до 45°C возможна и без применения водяного охлаждения или элементов Пельтье. Новая конструкция массива способствует увеличению мощности и более эффективной работе.

## ВВЕДЕНИЕ

Термин "квазинепрерывный режим работы" лазерного диода означает, что лазерный источник накачки находится в состоянии "включено" в течение коротких интервалов времени. Их длительность является настолько короткой, насколько это необходимо для снижения эффектов, связанных с выделением тепла в структуре, но все же достаточно длительными для стабильного излучения, близкого к непрерывному. Обычно коэффициент заполнения\*\* соответствует нескольким процентам, что значительно снижает нагрев и все связанные с этим тепловые эффекты, такие как термическое линзирование [1] и выход из строя в результате перегрева [2]. Поэтому работа в квазинепрерывном режиме приводит к повышению пиковой мощности за счет падения средней мощности. Таким образом, модуль охлаждения QCW-массива обычно разрабатывается для небольших тепловых нагрузок. Источники могут располагаться более близко к модулю охлаждения с целью получения высокой мощности излучения благодаря более компактному расположению. Такое решение оказывается более выгодным в сравнении с массивами, где используется микроканальное охлаждение или CS-корпус [3].

Квазинепрерывные лазерные линейки и массивы широко используются во многих сферах: в промышленности, медицине, науке, космосе, обороне, включая дальнометрию, целеуказание. В зависимости от решаемых задач энергия и длительность импульса могут варьироваться в широком диапазоне, в соответствии с ними меняется и качество луча. Требования к мощности излучения, частоте повторения импульсов и коэффициенту заполнения существенно зависят

\* Плотность упаковки (fill factor) – отношение ширины лазерного элемента к расстоянию между центрами лазерных стержней в массиве (периоду структуры), выраженное в процентах.

\*\* Коэффициент заполнения (duty cycle) – отношение длительности импульса к периоду его следования, выраженное в процентах.

is designed for small heat loads, and the emitters can be more closely packed in order to obtain higher peak power densities resulting in QCW array sizes, i.e. volumes, being much smaller compared to usual stacks of micro-channel coolers or CS mounts [3].

QCW laser bars and arrays have found a wide range of applications in industry (mostly for pumping), in medicine and cosmetics such as surgery or hair removal, in science for the generation of high-energy ultra-short pulses, in space as pumps for light detection and ranging or in the defense area for range finding and target designation. In the last few years, there is an increasing demand for compact and robust QCW stacks operating at higher duty cycles and with longer pulses beyond the classical QCW limit described above. New applications require increased operation temperatures and the option of reduced or no cooling using water or Peltier elements [4, 5]. For this purpose, we have developed a custom, compact and robust laser diode array (LDA) design with large flexibility regarding the number of bars, the size and the ceramic material as well as the cooling concept.

## GENERAL DESIGN OF THE QCW LDA

The general design of our QCW LDA for an operation with high duty cycles is illustrated in Fig. 1 (left part). It is based on a customized number of individual laser bars (marked with blue color) sandwiched between two thermal expansion matched submounts consisting, e.g., of copper tungsten (shown in orange color). A custom number of these sandwiches is arranged on an electrically insulating ceramic base plate (gray color) using a low-melting solder. The base plate can be easily adapted to different active or passive cooling elements (brown color) on the backside. The small elements shown in red color on both sides of the LDA are NTCs (Negative Temperature Coefficient Thermistors) for temperature monitoring during operation. There are several base plate sizes and layouts of the electrical contact structure (yellow color) available at DILAS to meet our customer's demands. The improved cooling via backside cooled ceramic plates is an important benefit of this design. With respect to optimal cooling and mechanical stability, we prefer a solder connection between the base plate and the cooling element. The photo in the right part of Fig. 1 gives an impression of the original size of one identically packaged laser bar sandwich on another custom base plate consisting of the same materials. We have called LDAs with the above described general design C-stacks.

Some important features of this compact and robust LDA design offering scalability and modularity are listed in the following:

от приложения. Появились новые задачи, решения которых требуют более продолжительного времени службы, компактности, повышения длительности импульса, работы при повышенных температурах при наличии слабого охлаждения или даже при его отсутствии [4, 5]. Для этих целей мы разработали специальные QCW-массивы, обладающие компактностью и надежностью, возможностью варьирования числа лазерных линеек в массиве, габаритов, материала подложки, а также ее конфигурации для совмещения с системой охлаждения.

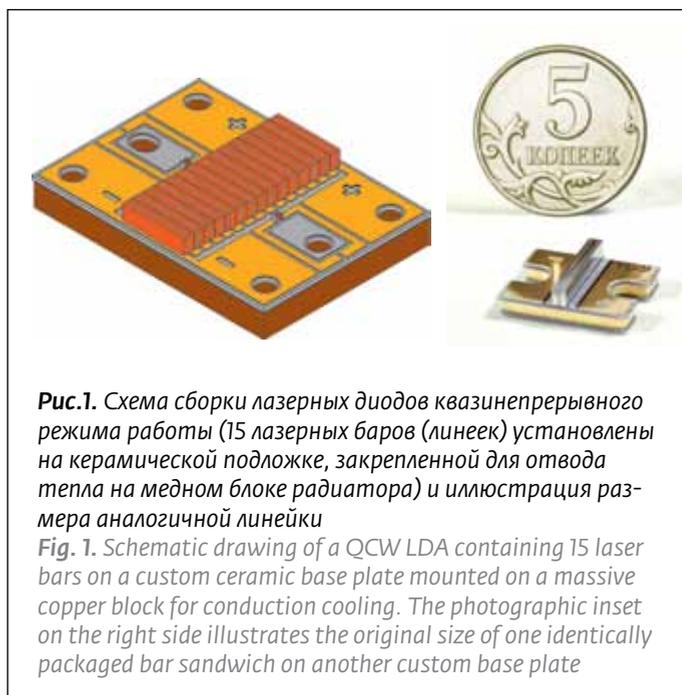
### ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ

На рис.1 слева представлена схема сборки, состоящей из лазерных диодов, излучающих в квазинепрерывном режиме. Ключевая особенность данной конструкции – заданное (по индивидуальному проекту) число лазерных модулей (на схеме отмечены синим цветом), вставленных между двумя слоями сплава CuW (выделены оранжевым цветом), обладающих схожим температурным коэффициентом расширения. Данные модули расположены на электроизолирующей керамической подложке (выделена серым цветом) со специальным контактным слоем (выделен желтым цветом) с использованием легкоплавкого припоя. Заданные размер и форма керамической подложки позволяют легко адаптировать массив под различные активные и пассивные элементы охлаждения (выделены коричневым цветом). Важным преимуществом разработанной конструкции является улучшенное охлаждение через заднюю часть керамической подложки. Миниатюрные элементы, расположенные по бокам упаковки лазерных модулей, являются термисторами\* для контроля изменения температуры во время работы. На фотографии справа (см. рис.1) показан QCW-массив в натуральную величину с одним лазерным стержнем и немного измененной формой подложки, состоящей из аналогичного материала.

Конструкция сборки обеспечивает ее надежную работу в квазиимпульсном режиме при длительной эксплуатации и повышенной температуре подложки. Эти достоинства обеспечены благодаря следующим особенностям сборки:

- Лазерные модули, помещенные внутри слоев из сплава CuW, разделены между собой определенным воздушным промежутком. Это

\* Термистор (Negative Temperature Coefficient Thermistors) – полупроводниковый прибор, у которого при повышении температуры происходит падение сопротивления.



**Рис.1.** Схема сборки лазерных диодов квазинепрерывного режима работы (15 лазерных баров (линеек) установлены на керамической подложке, закрепленной для отвода тепла на медном блоке радиатора) и иллюстрация размера аналогичной линейки

*Fig. 1. Schematic drawing of a QCW LDA containing 15 laser bars on a custom ceramic base plate mounted on a massive copper block for conduction cooling. The photographic inset on the right side illustrates the original size of one identically packaged bar sandwich on another custom base plate*

- The use of laser bar sandwiches leads to a thermal as well as mechanical decoupling of the laser bars, but also to an increased bar-to-bar pitch. Each laser bar sandwich can be measured and selected before it is soldered to a base plate.
- The submounts act as heat spreaders, i. e. each laser bar is thermally connected to the ceramic base plate. Thus, the waste heat can be removed more efficiently because it is spreaded to a larger area resulting in decreased junction temperatures. This allows for reliable laser operation at higher duty cycles and with increased base plate temperatures.
- Ceramic materials with improved thermal conductivity and different heat sinks below the base plate can be used. The improved thermal management and the robust, lightweight design make these arrays especially interesting for portable and mobile applications demanding a minimum of cooling.
- Compared to other QCW stack geometries with poor transition resistances, the individual contacting of each laser bar cares for a minimum contribution of packaging to the electrical resistance and leads to a further reduction of the waste heat in this LDA design.
- The life time of our QCW arrays is not limited by thermo – [6] and electromigration [7] of soft solders.
- Sandwiching each laser bar between two thermal expansion matched submounts (e.g. copper tungsten) reduces the packaging induced

позволяет изолировать их друг от друга и механически, и термически.

- Слой CuW работает как теплоотсеиватель (теплоотвод), при этом каждый модуль термически соединен с керамической подложкой. Выделяемое тепло (в результате движения зарядов в гетероструктуре и безызлучательной рекомбинации) удаляется более эффективно, так как оно рассеивается на большие площади, что приводит к снижению температуры р-п перехода. Как результат - повышение надежности и увеличение времени допустимой длительности работы в более широком интервале температур.
- Отдельные контакты для каждого лазерного модуля спроектированы специально для минимизации электрического сопротивления. Это ведет к снижению выделения тепла по сравнению с другими конструкциями.
- В сравнении с массивами с плотной упаковкой без дополнительных теплоотводных слоев между лазерными излучателями, в данной конструкции каждый модуль, состоящий из лазерного излучателя и двух боковых CuW-слоев, можно отдельно протестировать перед припайванием к контактной площадке.
- Лазерные модули имеют электроды, выполненные из сплава AuSn. Данный материал используется для целей защиты от термо- [6] и электромиграции [7] (известно, что эти явления присущи легкоплавким припоям, таким как индий, что ограничивает срок службы лазерных массивов).
- Каждый лазерный модуль в массиве расположен между двумя слоями CuW, обладающими одинаковой величиной коэффициента теплового расширения (что позволяет снизить эффекты механического напряжения в структуре, а также уменьшить эффект расхождения центров лазерных модулей друг относительно друга\*\*).
- Специальная конструкция массива позволяет просто и эффективно сформировать сечение луча требуемой формы, используя коллиматор быстрой оси для всех баров, а также коллиматор медленной оси\*\*\*, в особенности для стержней

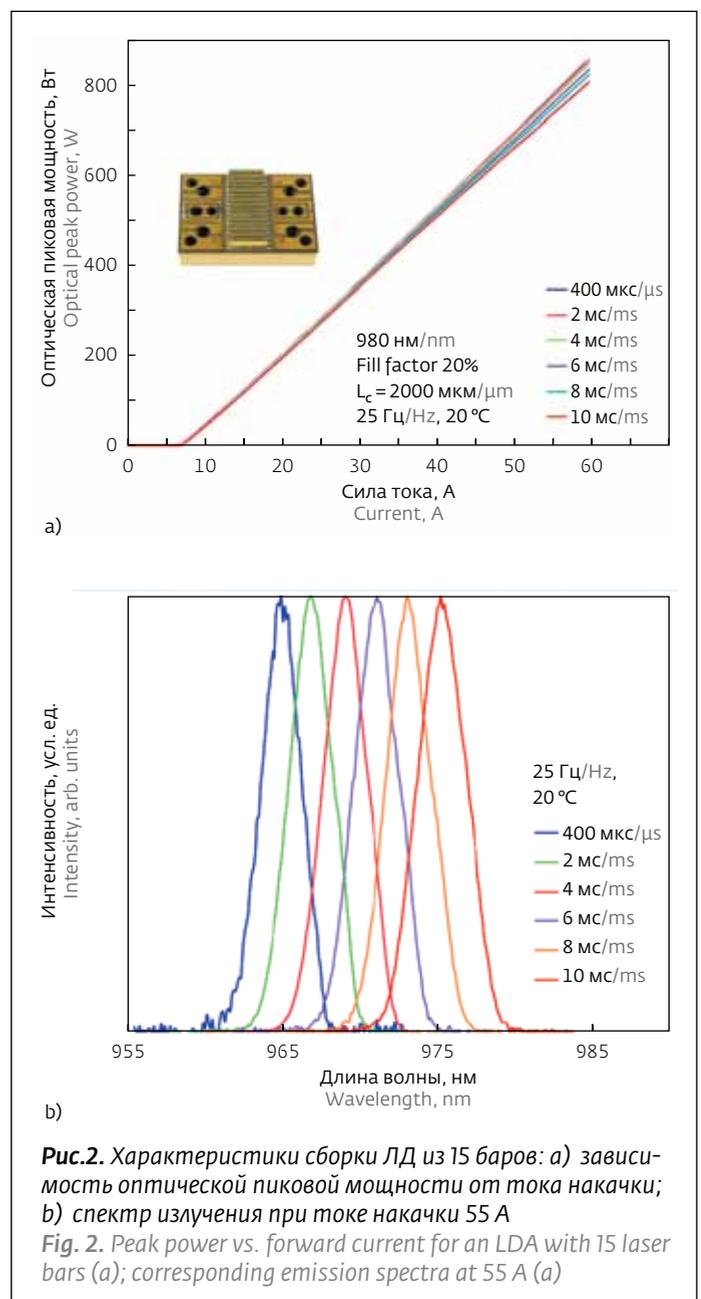
\*\* Эффект расхождения центров лазерных стержней друг относительно друга (smile) влияет на качество луча. Чем больше данный эффект, тем труднее качественно сфокусировать излучение от массива лазерных стержней.

\*\*\* Толкование понятий "быстрая" и "медленная" оси (FAC/SAC) состоит в следующем: на выходе из резонатора ЛД сече-

deformation stresses and leads to a bar smile less than 1µm (peak-to-valley).

- Our LDA design allows for wavelength stabilization using volume Bragg gratings (VBGs) as well as for an easy and efficient optional beam shaping using fast-axis collimation (FAC) for all bars as well as slow-axis collimation (SAC) especially for bars with low fill factor. In the latter case, fiber coupling becomes possible.

DILAS offers a broad variety of C-stacks with custom base plate sizes for 1 to 15 laser bars with cavity lengths up to 2.0 mm (standard), in the wavelength range between 766 and 1550 nm, with a minimum bar-to-bar



**Рис.2.** Характеристики сборки ЛД из 15 баров: а) зависимость оптической пиковой мощности от тока накачки; б) спектр излучения при токе накачки 55 А

**Fig. 2.** Peak power vs. forward current for an LDA with 15 laser bars (a); corresponding emission spectra at 55 A (a)

с малой плотностью упаковки. Далее становится возможным заведение луча в оптоволокно.

Диодным сборкам с описанными выше характеристиками, было дано название С-массивы. Компания DILAS Diodenlaser GmbH предлагает широкий выбор С-массивов для подложек со специальными размерами, которые изготавливаются под заказ. Массивы могут включать в себя от 1 до 15 лазерных модулей, длина резонатора может достигать 2 мм. Существует возможность варьировать длину волны выходного излучения – диапазон от 766 до 1550 нм. Можно изготавливать многоволновые (многочастотные) стеки, с минимальным шагом между резонаторами в 1,7 мм, с различным типом охлаждения: к примеру, если при эксплуатации отсутствует вода или не применяется термоэлектрический метод. Возможна разработка многоволновых массивов по индивидуальному техническому заданию.

### ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ С-МАССИВОВ

Ниже представлены данные относительно производительности и надежности С-массивов с числом лазерных баров до 15 единиц для различных приложений. При сборке массива, располагая излучатели последовательно с шагом 500 мкм, удобно выполнить их сопряжение с оптоволокном. Это позволяет получить на выходе высокую мощность излучения. Выходная мощность зависит от длины волны излучения, плотности упаковки лазерных модулей, а также от продолжительности работы, температуры и теплопроводности керамической подложки.

### Массивы с 15 лазерными линейками

В данном разделе рассмотрим производительность QCW-массивов, охлаждаемых за счет теплопроводности. Конструкция состоит из 15 лазерных линеек с плотностью упаковки 20%, длиной резонатора 2000 мкм. Длина волны излучения данного типа массива составляет 980 нм. Массив установлен на специальную алюмонитридную керамическую подложку, изготовленную под заказ.

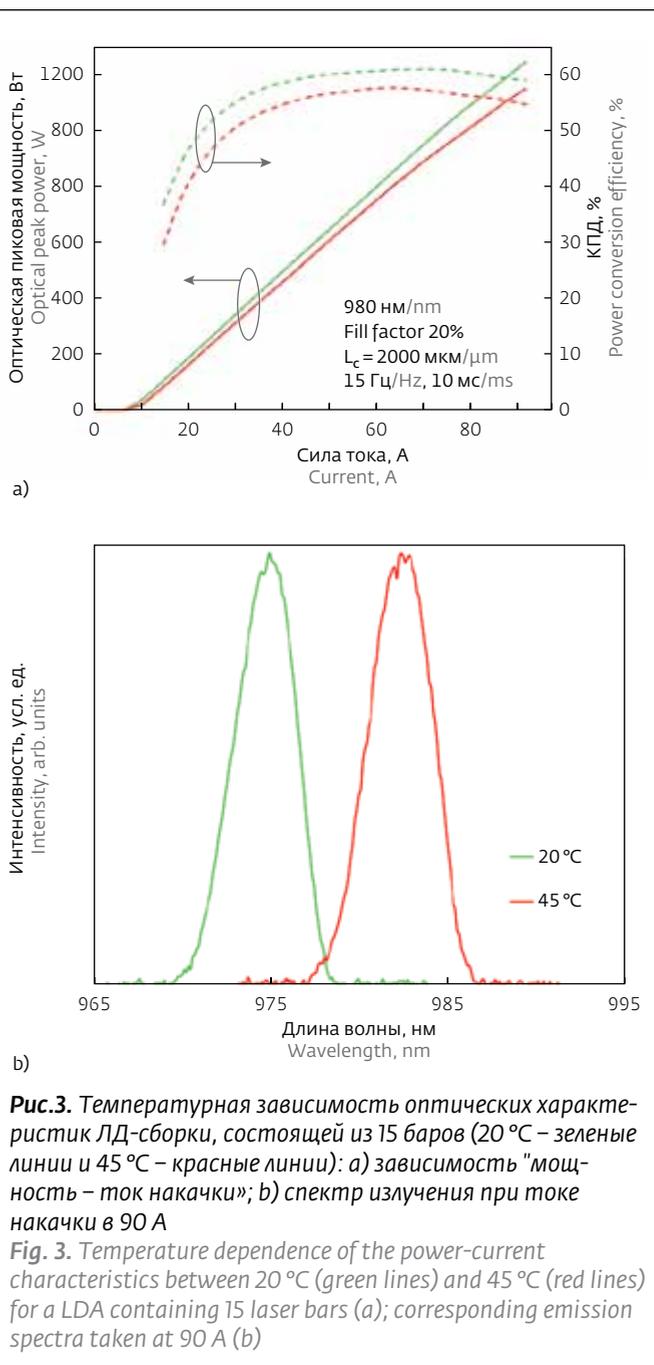
На рис.2 показано влияние роста коэффициента заполнения (и, соответственно, длительности импульса) на мощность излучения. Увеличение длительности импульса от 400 мкс до 10 мс приводит к падению мощности излучения на 6,5% при

ние луча становится эллиптическим, при этом луч быстро (на больший угол) расходится в направлении вертикальной оси, и медленно (на малый угол) в направлении горизонтальной оси.

pitch of 1.7 mm and different cooling concepts up to the absence of water or thermo-electrical cooling. So-called rainbow stacks with multiple wavelengths due to customer's requirements are also possible.

### C-STACK PERFORMANCE

In the following, we present performance and reliability data of selected C-stacks with up to 15 laser bars for different applications. Using bars with an emitter pitch of 500 μm provides the opportunity for building small fiber coupled modules with high QCW



**Рис.3.** Температурная зависимость оптических характеристик ЛД-сборки, состоящей из 15 баров (20 °С – зеленые линии и 45 °С – красные линии): а) зависимость «мощность – ток накачки»; б) спектр излучения при токе накачки в 90 А

**Fig. 3.** Temperature dependence of the power-current characteristics between 20 °C (green lines) and 45 °C (red lines) for a LDA containing 15 laser bars (a); corresponding emission spectra taken at 90 A (b)

токе возбуждения (токе накачки) 60 А. На рис.26 показан спектр при токе возбуждения 55 А. Увеличение коэффициента заполнения приводит к увеличению средней мощности и нагреванию массива. Наблюдаемое смещение в "красную" область вместе с увеличением коэффициента заполнения является мерой роста температуры р-п перехода в лазерных стержнях; температура увеличивается примерно на 32°C. Тем не менее, на кривой слева для длительности импульса в 10 мс сохраняется рост мощности до 807 Вт (ток накачки - 60 А), что положительно характеризует лазерный модуль при эксплуатации в условиях повышенного коэффициента заполнения.

На рис.3 приведены зависимости выходной мощности от тока накачки и спектры излучения при частоте следования импульсов в 15 Гц, коэффициенте заполнения 15%, в случае с температурой подложки 20 °C и 45 °C. При токе накачки в 90 А, мощность излучения падает с 1252 Вт до 1155 Вт, в то время как КПД остается на уровне выше 55%. Длинноволновое смещение, показанное на рис.3б, обусловлено ожидаемым сужением запрещенной зоны при перепаде температур в 25°C.

Дальнейшее улучшение производительности работы лазерной сборки наблюдалось при использовании альтернативных керамических материалов с более высокой теплопроводностью (в 1,8 раз, чем у стандартной алюмонитридной керамической подложки). Оказалось, что значения выходной мощности излучения и КПД при температуре поверхности новой подложки 45°C сопоставимы с результатами, соответствующими температуре 20°C у стандартной структуры с алюмонитридной керамической подложкой (см. [8] для более детальной информации).

Данные, представленные выше, показывают, что рассмотренные С-массивы, состоящие из 15 лазерных модулей, могут эксплуатироваться при минимальном охлаждении при повышенных температурах. Вместе с прочностью и компактностью конструкции, а также ввиду простоты формирования требуемого сечения луча благодаря низкой плотности упаковки лазерных стержней, массив лазерных диодов данного типа представляют интерес в качестве накачки лазеров, используемых в оборонной сфере.

### **Массивы с восемью лазерными линейками**

В данном разделе рассмотрим технические характеристики QСW-массива, содержащего в своей структуре восемь лазерных баров, с плотностью упаковки 50% и более, длиной резонатора

1500 мкм. Массив был установлен на алюмоитридную керамическую подложку. На рис.4 изображен массив из восьми квазинепрерывных лазерных диодов, установленный на структуру, состоящую из микроканального охладителя, расположенного между двумя керамическими пластинами. Главными преимуществами этой конструкции являются: эффективное микроканальное охлаждение с использованием обычной водопроводной воды и отсутствие потенциала на поверхности охладителя.

Для зависимости на рис.4а частота повторения импульсов составила 3 Гц, коэффициент заполнения – 15%, что соответствует длительности импульса в 50 мс. При данных параметрах удалось достичь мощности излучения порядка 890 Вт при токе накачки в 120 А. Отклонение от линейной зависимости мощности излучения от тока накачки составило очень незначительную величину.

Для некоторых приложений, таких как эпиляция, требуется увеличение длительности импульса. На рис.4б изображена зависимость выходной мощности от возбуждающего тока с частотой следования импульсов 2 Гц и длительности импульса в 100 мс. При данной конфигурации выходная мощность составила 580 Вт при токе накачки 85 А. Как и в предыдущем случае, отклонение от линейной зависимости "мощность-ток" составило незначительную величину.

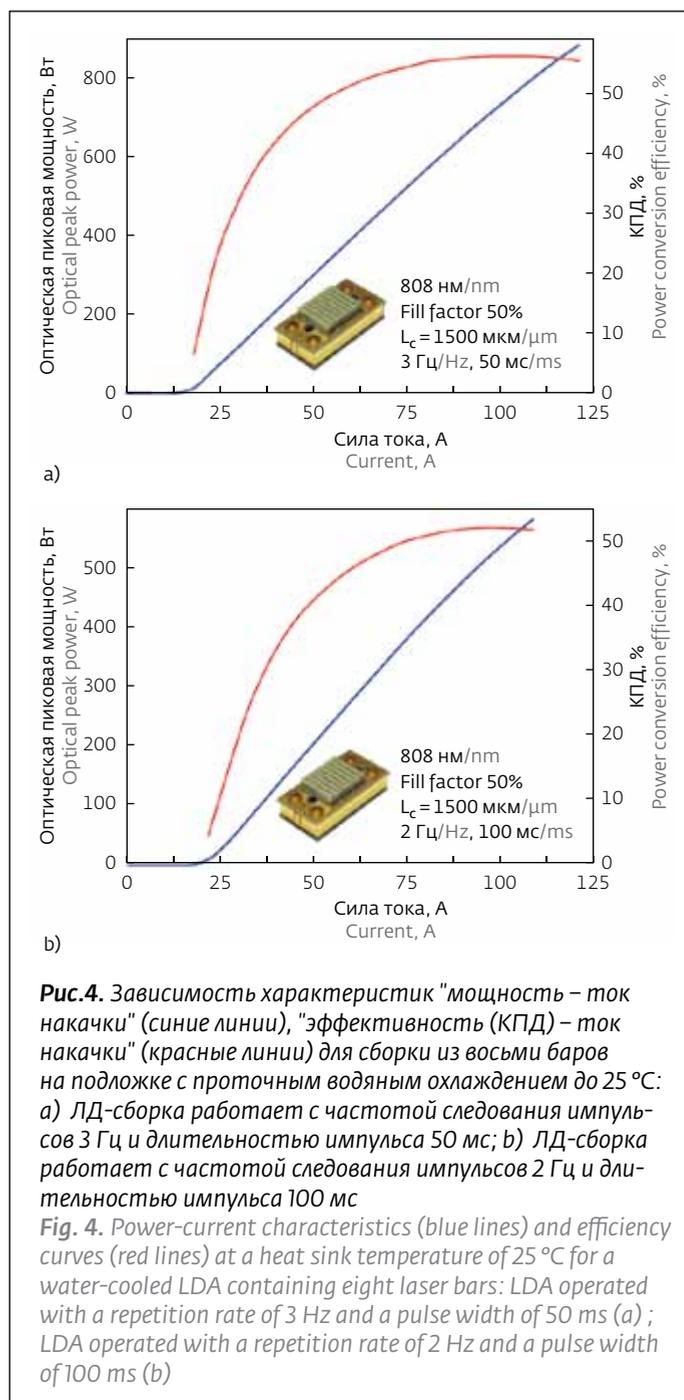
Стоит отметить, что удалось достичь увеличения мощности в диапазоне длин волн 980 нм с лазерными диодами, менее чувствительными к нагреву по сравнению с С-массивами, излучающими на длине волны 808 нм, представленными на рис.4. Принципиальное ограничение по мощности излучения и длительности импульса (или коэффициента заполнения) для QCW-массива связано не только с разрушением при воздействии излучения, а главным образом с максимально допустимой температурой р-п перехода.

Результаты, представленные на рис.5, были получены при постоянной величине тока. Эксперимент проводился при следующих параметрах: массив имел водяное охлаждение, состоял из восьми лазерных баров, излучающих на 808 нм. Частота следования импульсов соответствовала 2 Гц с коэффициентом заполнения 20%, плотность энергии излучения – 42 Дж/см<sup>2</sup>. После испытаний, которые длились 3000 часов, было зарегистрировано снижение мощности на 6%. Наибольшая потеря мощности произошла на временном интервале между 0 и 800 часами, что дает основание полагать, что время работы на отказ составляет

output powers. The available peak power depends on the wavelength and fill factor of the laser bars, but also on the duty cycle, the base plate temperature and the thermal conductivity of the applied ceramic materials.

### Arrays with 15 laser bars

In this section, we show performance data of conduction-cooled LDAs containing 15 laser bars emitting at 980 nm with 20% fill factor and a cavity



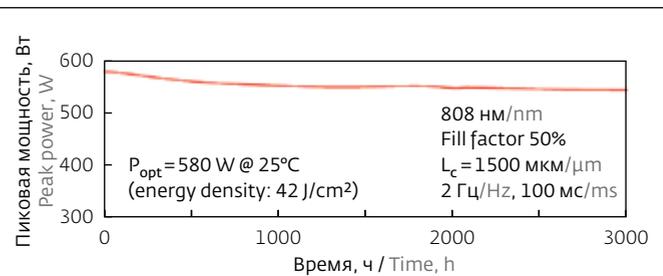
**Рис.4.** Зависимость характеристик "мощность – ток накачки" (синие линии), "эффективность (КПД) – ток накачки" (красные линии) для сборки из восьми баров на подложке с проточным водяным охлаждением до 25 °С: а) ЛД-сборка работает с частотой следования импульсов 3 Гц и длительностью импульса 50 мс; б) ЛД-сборка работает с частотой следования импульсов 2 Гц и длительностью импульса 100 мс

**Fig. 4.** Power-current characteristics (blue lines) and efficiency curves (red lines) at a heat sink temperature of 25 °C for a water-cooled LDA containing eight laser bars: LDA operated with a repetition rate of 3 Hz and a pulse width of 50 ms (a); LDA operated with a repetition rate of 2 Hz and a pulse width of 100 ms (b)

более 10 000 часов. Данный показатель превосходит требования по надежности в области медицины и косметологии.

Другим возможным применением С-массивов с восемью лазерными линейками, охлаждаемыми за счет теплопроводности, является накачка твердотельных лазеров, генерирующих ультракороткие импульсы с умеренной частотой повторения и высокой энергией фотонов. Такие лазеры могут использоваться, к примеру, для инерциального термоядерного синтеза. В связи с длительным временем жизни возбужденного состояния в матрицах, легированных иттербием, требуемая длительность импульса составляет 1 мс.

В следующем эксперименте микроканальный охладитель был заменен массивной медной пластиной. Результаты, полученные при таком охлаждении, представлены на рис.6. Показана зависимость мощности излучения от тока накачки для массива с охлаждением за счет теплопроводности, состоящего из восьми лазерных стержней, излучающих на длине волны 940 нм, с плотностью упаковки 80% и длиной резонатора 1500 мкм. Измерения получены при частоте повторения импульсов в 10 Гц, коэффициенте заполнения 1%, что удовлетворяет требованиям по длительности



**Рис.5.** Результаты эксперимента по тестированию надежности лазерного модуля с водяным охлаждением, содержащего восемь лазерных баров (ток накачки 85 А, частота повторения 2 Гц, ширина импульса 100 мс)

**Fig. 5.** Ongoing reliability test at a constant peak current of  $I=85A$  (2 Hz repetition rate, 100ms pulse width) on a water-cooled LDA containing eight laser bars

length of 2000  $\mu\text{m}$  mounted on a custom designed AlN ceramic base plate (see inset of Fig. 2) that are suitable for fiber coupling.

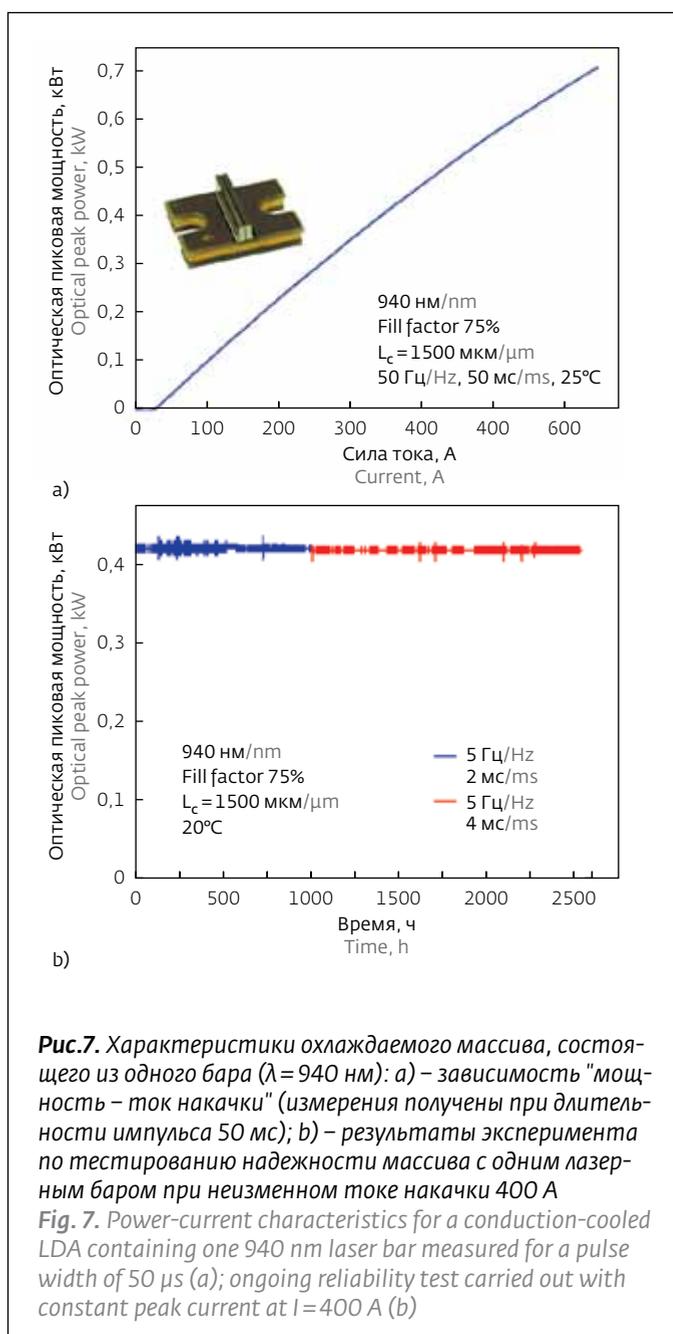
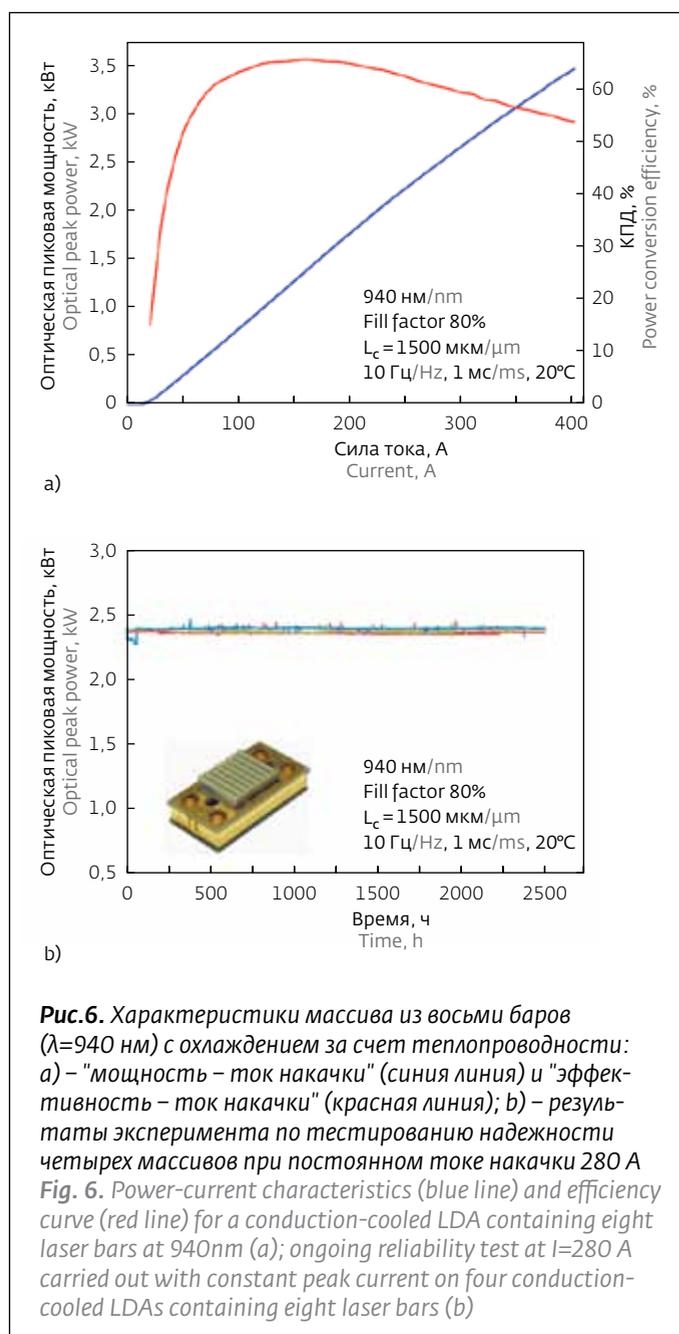
Figure 2 (a) illustrates the influence of an increasing pulse width (and duty cycle as well) on the optical peak power. An extension of the pulse width from 400  $\mu\text{s}$  to 10ms leads to a drop of the optical peak power by 6.5% at a driving current of 60 A. The emission spectra taken at 55 A are shown in Fig. 2 (b). The extension

импульса, упомянутым выше, для накачки активной среды  $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ . Удалось достичь выходной мощности излучения массива в 3500 Вт при токе накачки 390 А (435 Вт в пересчете на один лазерный стержень). На рис.6б показано длинноволновое смещение при токе накачки в 300 А при увеличении коэффициента заполнения от 1% до 2,5%, что соответствует увеличению температуры перехода на 13°C.

На рис. 6б показаны результаты эксперимента по тестированию надежности QCW-массива, охлаждаемого за счет теплопроводности.

of the pulse width causes an increase of the average output power and heat load. The observed redshift with increasing pulse width is a measure for the rising junction temperature of the laser bars; it increases by about 32°C. Nevertheless, the LIV curve for a pulse width of 10ms remains linear up to an optical peak power of 807 W illustrating the potential of our C-stack design for an operation with higher duty cycles.

A comparison of the power-current characteristics and of the emission spectra for a repetition rate of 15 Hz and a pulse width of 10ms at base plate temperatures of 20 °C and 45 °C is





Эксперимент проводился при неизменном токе накачки. Массив состоял из восьми лазерных баров, излучающих на длине волны 940 нм. Частота повторения импульсов соответствовала 10 Гц, длительность импульса – 1 мс. Выходная мощность излучения массива составила 2400 Вт (или 300 Вт на каждый лазерный стержень) в соответствии с требованиями заказчика. После 2500 часов работы, падение мощности не зафиксировалось, что позволяет говорить о надежности массива при заданных уровне мощности, частоте и длительности импульса.

### Массив с одной лазерной линейкой

В данном разделе рассматривается производительность С-массива, охлаждаемого за счет теплопроводности и содержащего только один лазерный бар (рис.1, правая часть).

На рис.7а представлена зависимость мощности излучения от силы тока накачки для массива с охлаждением за счет теплопроводности. Массив был изготовлен с одной лазерной линейкой, излучающим на длине волны 940 нм. Измерения проводились при частоте повторения импульсов 50 Гц и длительности импульса 50 мкс.

shown in Fig. 3 (a). At a driving current of 90 A, the optical peak power drops from 1252 W to 1155 W while the power conversion efficiency stays above 55%. The redshift of the emission spectra shown in Fig. 3 (b) corresponds to the expected band-gap narrowing for a  $\Delta T_{\text{junct}} = 25$  °C.

A further improvement of the stack performance becomes possible when using alternative ceramic materials with higher thermal conductivities compared to standard AlN. When using a ceramic base plate with a better thermal conductivity (factor 1.8 compared to the LDA in Figs. 2 and 3), the power conversion efficiency of the improved stack design at 45 °C becomes comparable to the performance of the standard stack design with AlN ceramic at 20 °C (see Ref. [8] for details).

The data, presented early, shows, that the considered C-stacks can be driven with minimal cooling and at elevated temperatures. Together with their robust and compact design and with the option of an easy beam shaping due to the low fill factor of the implemented laser bars, these stacks are very interesting for pumping applications in the defense area.

Возможное применение для данного типа массива состоит в детонации легковоспламеняющихся веществ. В ходе экспериментов была достигнута выходная мощность в 710 Вт при токе накачки 640 А. При данных уровнях мощности разрушение структуры стержня не наблюдалось.

Другой потенциальной возможностью применения данных массивов является накачка твердотельных лазеров для дальнометрии или стробируемых систем видения, где требуется длительность импульса порядка 1-5 мс. На рис.7б показаны результаты эксперимента по тестированию надежности массива лазерных диодов, охлаждаемого за счет теплопроводности, содержащего один лазерный бар при токе накачки 400 А и частоте следования импульсов 5 Гц. В течение 1000 часов эксперимента длительность импульса была 2 мс, затем эксперимент был продолжен с длительностью импульса 4 мс. В течение всего эксперимента при указанных параметрах импульсов падения мощности не наблюдалось.

Новые образцы с длиной резонатора 1500 мкм и более усовершенствованной конфигурацией массива демонстрируют надежность работы при мощностях до 500 Вт и шириной импульса порядка 1 мс.

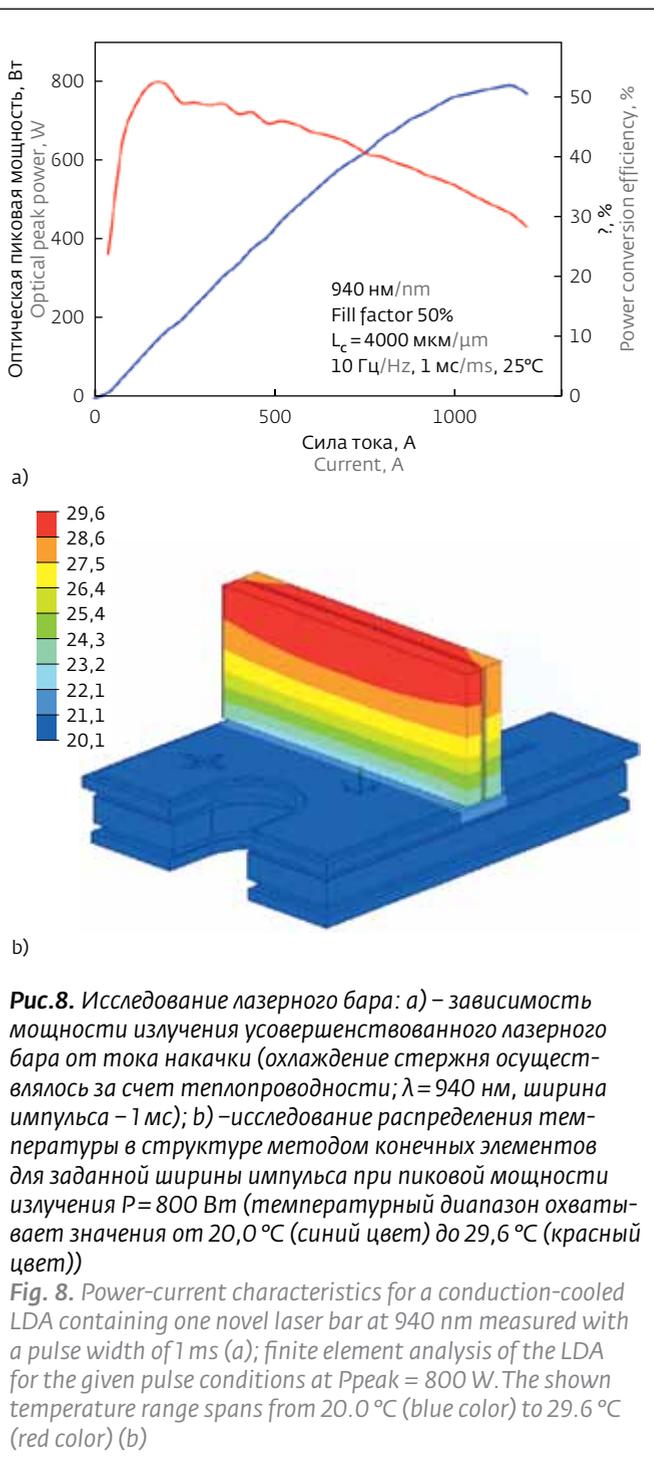
На рис.8а представлена зависимость мощности излучения усовершенствованного лазерного бара, выполненного с пассивированными гранями, от тока накачки. Данный модуль охлаждался за счет теплопроводности. Длина волны излучения модуля составляла 940 нм, плотность упаковки 50%, длина резонатора 4000 мкм. Удалось достичь пиковой мощности излучения в 800 Вт при токе накачки 1150 А. На рис.8б показано распределение температуры в структуре при мощности излучения 800 Вт, температуре подложки 20 °С. Результаты были получены методом конечных элементов. Разница между самой холодной точкой (на подложке) и самой горячей точкой (на лазерном стержне) составила всего 9,65 °С.

### ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ С-МАССИВОВ

Описанные выше С-массивы с улучшенной системой охлаждения в сравнении со стандартными QСW-массивами отличаются надежностью при высоких уровнях мощности излучения с длиной импульса в миллисекундном диапазоне. Данные массивы становятся все более интересными для задач накачки высокоэнергетических твердотельных лазеров (DPSSL) [9]. В целом область применения С-массивов широка – от накачки лазеров с аттосекундной длительностью импульса

### Arrays with 8 laser bars

In this section, we present selected performance data of LDAs containing 8 laser bars with fill factors of 50% and more and with a cavity length of 1500 μm mounted on a smaller custom designed AlN ceramic base plate. The inset of Fig. 4 shows an LDA of eight laser bars with a macro-channel cooler between two ceramic plates. The main benefit of this design is an



**Рис. 8.** Исследование лазерного бара: а) – зависимость мощности излучения усовершенствованного лазерного бара от тока накачки (охлаждение стержня осуществлялось за счет теплопроводности;  $\lambda = 940$  нм, ширина импульса – 1 мс); б) – исследование распределения температуры в структуре методом конечных элементов для заданной ширины импульса при пиковой мощности излучения  $P = 800$  Вт (температурный диапазон охватывает значения от 20,0 °С (синий цвет) до 29,6 °С (красный цвет))

**Fig. 8.** Power-current characteristics for a conduction-cooled LDA containing one novel laser bar at 940 nm measured with a pulse width of 1 ms (a); finite element analysis of the LDA for the given pulse conditions at  $P_{peak} = 800$  W. The shown temperature range spans from 20.0 °C (blue color) to 29.6 °C (red color) (b)



до рентгеновского анализа и физики элементарных частиц. В этих областях ультракороткие высокоэнергетические лазерные импульсы служат источником очень сильных электромагнитных полей, открывающих путь для исследований, давно предсказанных, но до сих пор не изученных эффектов в теории относительности и квантовой физике. Кроме того, мощные твердотельные лазеры в некоторых международных проектах для исследования инерциального термоядерного синтеза должны иметь отличное качество луча и стабильность генерации. При выборе такого рода лазерных систем особое внимание уделяется оценке их КПД и затрат на обслуживание. Два крупномасштабных европейских проекта – HiPER ([www.hiper-laser.org](http://www.hiper-laser.org)) и ELI ([www.extreme-light-infrastructure.eu](http://www.extreme-light-infrastructure.eu)), где используются лазеры с высокими уровнями мощности, в настоящее время проходят свою подготовительную стадию. Последние достижения в технологии изготовления диодных лазеров позволяют конструировать мощные лазеры с диодной накачкой, обладающие высокой надежностью и имеющие приемлемую стоимость.

Мощные QCW-модули, описанные выше, могут быть расположены близко друг к другу в одной плоскости. На сегодняшний день разработаны C-массивы с мощностью 2,4 и 3,2 кВт для накачки на длинах волн 939 и 979 нм с шириной импульса порядка 1 мс (для активной среды  $\text{Yb}^{3+}$ : YAG) и 2,8 мс (для активной среды  $\text{Yb}^{3+}$ :  $\text{CaF}_2$ ). В качестве примера на рис. 9 показаны основные параметры системы накачки производства фирмы Lastronics GmbH (город Йена, Германия), которая используется для установок с мощностью излучения порядка  $10^{15}$  Вт. Система накачки серии PM80 содержит 32

efficient and potential-free cooling allowing the usage of tap water. In Fig. 4 (a), the LDA is operated with a repetition rate of 3 Hz and a pulse width of 50 ms. At this operation conditions, we have reached a peak power of 890 W at a driving current of 120 A; there is only a slight deviation from the linear dependence of the peak power on current.

For some applications like hair removal, longer pulses and compact QCW stack designs are required. Figure 4 (b) shows the electro-optical performance for an operation with a repetition rate of 2 Hz and a pulse width of 100 ms. For these pulse conditions, our C-stacks reaches an optical peak power of 580 W at a driving current of 85 A; again there is only a slight deviation from the linear dependence of the peak power on current.

Using this stack design, larger optical peak powers can be achieved in the 980 nm wavelength range with more efficient and less temperature sensitive diode laser structures compared to the results for C-stacks with 808 nm laser bars shown in Fig. 4. The achievable optical peak power and pulse length of QCW stack designs is not only limited by critical optical damage (COD), but mainly by a maximum allowed junction temperature of the applied laser bars.

Figure 5 shows the result of an ongoing reliability test carried out in constant current mode on such a water-cooled LDA containing 8 laser bars at 808 nm. The LDA is operated with a repetition rate of 2 Hz and a pulse width of 100 ms corresponding to an energy density of the LDA emission of  $42 \text{ J/cm}^2$ . After 3.000 hours of operation, we detected a power degradation of 6%. The main power loss occurred in the time interval between 0 and 800 hours giving rise to a life time expectation of about 10.000 hours – more

C-массива, охлаждаемых за счет теплопроводности. При частоте повторения импульсов 10 Гц генерируемая мощность излучения для данной системы накачки составляет 75 кВт для тока накачки 300 А. Ширина спектральной линии составила менее 6 нм (ширина на полувысоте). На рис. 9б изображено сечение луча квадратной формы, обладающего высокой степенью однородности по интенсивности, который идеально подходит для накачки мощных твердотельных лазеров.

### ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В статье были представлены данные о показателях производительности и надежности массивов лазерных квазинепрерывных диодов, генерирующих

than usually demanded for medical or cosmetic laser applications.

In the next example, the macro-channel cooler is replaced by a massive copper heat sink for conduction cooling. A possible application for such water-free C-stacks is pumping of solid-state lasers generating high-energy ultra-short pulses at moderate repetition rates, e.g. for future inertial-confined-fusion facilities. Due to longer upper-state lifetimes in Yb-doped host materials, pump pulse lengths of about 1 ms for Yb<sup>3+</sup>: YAG or 2.8 ms for Yb<sup>3+</sup>: CaF<sub>2</sub> are required.

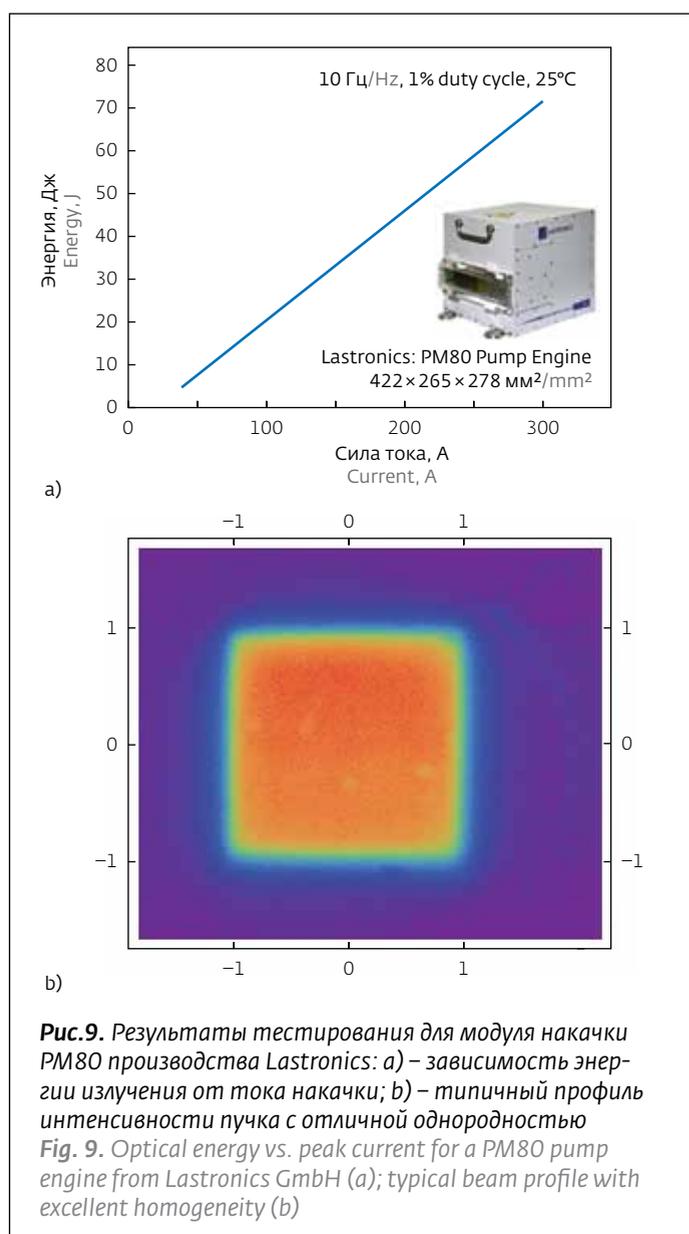
The power-current characteristics for a conduction-cooled LDA containing 8 laser bars at 940 nm with 80% fill factor and a cavity length of 1.500 μm is shown in Fig. 6 (a). The measurement was carried out with a repetition rate of 10 Hz and a pulse width of 1 ms. The C-stack achieved an optical peak power of 3.500 W at a driving current of 390 A, which corresponds to more than 435 W per bar. At a driving current of 300 A, an increase of the pulse width from 1 ms to 2.8 ms leads to a redshift of the emission wavelength that corresponds to an increase of the junction temperature of 13 °C.

The result of an ongoing reliability test carried out with constant peak current on a conduction-cooled LDA containing eight laser bars at 940 nm is shown in Fig. 6 (b). The LDA is operated with a repetition rate of 10 Hz and a pulse width of 1 ms. The test power was chosen to be 2.400 W or 300W per bar regarding customer's requirements. After 2.500 hours of operation we could not detect any degradation of the peak power proving reliable operation of the stacks at this operation conditions. One application of these C-stacks will be described in Sec. 4.

### Single laser bar design

In this section, we consider the performance of a C-stack like conduction-cooled design containing only one single laser bar (as shown in the right part of Fig.1).

Figure 7 (a) shows the power-current characteristics for a conduction-cooled LDA containing one laser bar at 940 nm. The measurement was carried out with a repetition rate of 50 Hz and a pulse width of 50 μs without additional cooling. A possible application is laser ignition of several highly flammable substances. At I=640 A, a peak power of 710 W was achieved. Up to this power level, no COD events occurred. Other potential applications of these devices demanding larger pulse widths in the range of 1 to 5 ms are diode laser pumps for range finding or gated imaging systems. Figure 7 (b) depicts an ongoing reliability test on the same device with a constant peak current of I=400 A and a repetition rate of 5 Hz. After 1.000 hours of operation with a pulse width of 2 ms, the test was continued with a pulse



**Рис.9.** Результаты тестирования для модуля накачки PM80 производства Lastronics: а) – зависимость энергии излучения от тока накачки; б) – типичный профиль интенсивности пучка с отличной однородностью  
**Fig. 9.** Optical energy vs. peak current for a PM80 pump engine from Lastronics GmbH (a); typical beam profile with excellent homogeneity (b)



излучение высокой мощности. Данные массивы, изготовленные по индивидуальным требованиям, отличаются компактностью, надежностью и пригодны для продолжительной работы. Эти так называемые "С-массивы" содержат отдельные лазерные диоды (бары) длиной 1 см с электродами из сплава AuSn, расположенные между двумя теплоотсеивающими слоями из сплава CuW. Массив из 15 линеек был размещен на керамических пластинах с различным теплоотводом в зависимости от приложения и соответствующих требований. Показано, что мощность выходного излучения в сильной степени зависит от длины волны, плотности упаковки лазерных баров, а также от коэффициента заполнения, температуры и теплопроводности подложки.

Стоит отметить, что разработанные QCW-массивы могут эксплуатироваться при температуре подложки 45°C без дополнительного охлаждения (циркуляция воды или элементы Пельтье). Новая конструкция лазерных диодных сборок позволяет получать более высокие пиковые мощности излучения. Увеличение длины резонатора позволяет уменьшить электрическое сопротивление и случайные изменения температуры массива, что, как правило, приводит к уширению

width of 4 ms. Within the recent test duration, we could not detect any power degradation at the applied pulse conditions.

New research samples with a cavity length of 1500  $\mu\text{m}$  that use more advanced diode laser designs give rise for a reliable operation up to a peak power of 500 W with pulse widths of a few milliseconds.

The power-current characteristics for a conduction-cooled LDA containing another novel laser bar at 940 nm with 50% fill factor, a cavity length of 4000  $\mu\text{m}$  and passivated facets is depicted in Fig. 8 (a). The achieved optical peak power at a driving current of 1.150 A was 800 W. Figure 8 (b) shows the temperature distribution of the measured device for a peak power of 800 W at a backplate temperature of 20 °C received from a finite element analysis. The temperature difference between the backplate and the hottest points is only 9.65 °C.

### SAMPLE FOR C-STACK APPLICATION

Our compact C-stacks with improved thermal management compared to usual QCW stacks allow a reliable operation with high peak powers and longer pulses in the millisecond range. They become more and more interesting for pumping of high-energy class solid-state lasers (DPSSL) [9]. Applications range from pump lasers for attosecond pulse generation



спектральной линии (так называемый тепловой шум, описанный в работе [10]).

Конструкция С-массивов позволяет просто и эффективно сформировать сечение луча требуемой формы, используя коллиматор быстрой оси для всех стержней, а также коллиматор медленной оси, в особенности для стержней с малой плотностью упаковки. Далее становится возможным заведение луча в оптоволокно.

Представленная технология позволяет изменять размеры, а также особенности конструктивных модулей сборок лазерных диодов. Это позволяет изготавливать массивы по индивидуальным требованиям исходя из конкретной задачи заказчика. К примеру, существует возможность использовать различные керамические материалы с более высокой теплопроводностью, а также варьировать тип охладителя исходя из конкретных задач заказчика. Улучшенный теплообмен, прочность, малый вес разработанных массивов способствуют их успешному применению для задач, где требуется портативность и мобильность системы, в особенности в случаях с минимальным охлаждением.

Работы над улучшением конструкции массивов, процесса сборки, а также подбор оптимальных материалов продолжают, и, возможно, в ближайшее время стоит ожидать ещё более успешных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Hempel M., La Mattina F., Tomm J.W., Zeimer U., Broennimann R. and Elsaesser T.** Defect evolution during catastrophic optical damage of diode lasers. - *Semiconductor Science and Technology*, 2011, v.26, p.075020.
2. **Bawamia A. I., Eppich B., Paschke K., Wenzel H., Schnieder F., Erbert G. and Tränkle G.** Experimental determination of the thermal lens parameters in a broad area semiconductor laser amplifier. - *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2009, v.97, p.95-101.
3. **Vacchin G., Fily A., Qiu B., Fraser D., Robertson S., Loyo-Maldonado V., McDougall S.D. and Schmidt B.** High temperature and high peak power 808 nm QCW bars and stacks. - *Proc. SPIE*, 2010, v.7583, p.75830P.
4. **Wilson S., Altshuler G., Erofeev A., Inochkin M., Khloponin L., Khramov V. and Feldchtein, F.** Long pulse compact and high brightness near 1-kW QCW diode laser stack. - *Proc. SPIE*, 2012, v. 8241, p.82410F.

to X-ray and particle physics. In this research area, ultra-short high-energetic laser pulses serve as the unrivaled source for very strong electromagnetic fields opening the door for the investigation of long ago predicted but so far not observable effects in relativity and quantum physics. Moreover, the huge DPSSLs for inertial confined fusion research facilities planned for some projects worldwide have to provide exceptional beam quality and stability. Such laser systems are measured by their maximized wall-plug efficiency and minimized maintenance effort. Two challenging large scale European laser projects, namely HiPER ([www.hiper-laser.org](http://www.hiper-laser.org)) and ELI ([www.extreme-light-infrastructure.eu](http://www.extreme-light-infrastructure.eu)), are currently at their preparatory phase. Recent developments in high-power diode laser technology enable the set-up of a new class of high-energy, diode-pumped lasers with enhanced reliability at acceptable costs.

High-power diode laser stacks as described in Sec. 3.2 can be arranged close to each other in a planar geometry. Today, 2.4 kW and 3.2 kW C-stacks are available for pumping at 939 and 979 nm with pulse widths of 1ms (for Yb<sup>3+</sup>: YAG crystals) and 2.8 ms (for Yb<sup>3+</sup>: CaF<sub>2</sub> crystals). As an example, Figure 9 (a) shows some basic parameters of a pump engine from Lastronics GmbH in Jena/Germany, e.g. used in Peta Watt (10<sup>15</sup> W) systems. In the PM80 pump engine, 32 conduction-cooled C-stacks (as shown in Fig. 6) are combined. At a repetition rate of 10 Hz, this pump engine achieves an optical peak power of 75 kW at 300 A. The line width is smaller than 6.0 nm (FWHM). Figure 9 (b) shows a quadratic ultraflat-top, low-ripple beam profile well-suited for pumping of high-energy class solid state lasers.

#### SUMMARY AND OUTLOOK

We have presented performance and reliability data of high-brightness high-power QCW arrays with a custom, compact, robust and lightweight design. These so-called C-stacks are based on single diodes consisting of a 1cm laser bar that is AuSn soldered between two CuW submounts. The improved thermal management of the C-stack design allows for an operation with high duty cycles and long pulses beyond the classical QCW limit. LDAs of up to 15 diodes were connected to ceramic base plates on different heat sinks fitting to the requirements of various applications. The available optical peak power strongly depends on the wavelength and fill factor of the laser bars as well as on the duty cycle, the base plate temperature and the thermal conductivity of the applied ceramic materials.

Operation at increased heat sink temperatures up to 45°C is possible without additional cooling like active water cooling or thermo-electrical cooling with the help of Peltier



5. **Klumel G., Karni Y., Oppenheim J., Berk Y., Shamay M., Tessler R. and Cohen S.** High duty cycle hard soldered kilowatt laser diode arrays. - Proc. SPIE, 2010, v.7583, p.75830C.
6. **van Gurp G.J., de Waard P.J. and du Chatenier F.J.** Thermomigration in indium and indium alloy films. - J. Appl. Phys., 1985, v. 58, p.728-735.
7. **Reddy K.V. and Prasad J.J.B.** Electromigration in indium thin films. - J. Appl. Phys., 1984, v. 55, p.1546-1550.
8. **Kissel H., Fassbender W., Lotz J., Alegria K., Koenning T., Stapleton D., Patterson S. and Biesenbach J.** Reliable QCW diode laser arrays for operation with high duty cycles. - Proc. SPIE, 2013, v. 8605, p.86050V.
9. **Töpfer Th., Neukum J., Hein J. and Siebold M.** Very-large-scale DPSS lasers are coming. - Laser Focus World, 2010, v. 46 (10), p.64-67.
10. **Pittroff W., Eppich B., Erbert G., Platz R., Tyralla D. and Tränkle G.** Simple design for fiber coupled 9xx nm kW - QCW pump module with high duty cycle based on customized chips and lateral heat removal. - Proc. SPIE, 2014, v. 8965, p. 896515.

elements. Novel laser bars allow for more efficient operation and higher optical peak powers. Longer resonators reduce the electrical resistance and the in-pulse temperature variation usually leading to a broadening of the spectrum (so-called thermal chirp [10]).

The investigated C-stacks allow for an easy and efficient beam shaping using fast-axis collimation (FAC) for all bars as well as slow-axis collimation (SAC) especially for bars with low fill factor. In the latter case, fiber coupling becomes possible.

The presented technology also offers scalability and modularity of the LDA designs allowing custom products with respect to user applications. It allows the use of ceramic materials with improved thermal conductivity and different heat sinks below the ground plate based upon the customer's needs. The improved thermal management and the robust, light weight design make these arrays especially interesting for portable and mobile applications demanding a minimum of cooling.

The work on our C-stack design with respect to materials, processes and structures is continued, and even better results can be expected in the near future.