

Лазер с оптической накачкой на квантовых точках Cd(Zn)Se/ZnSe и микрочип-конвертер для желто-зеленого диапазона спектра

Е.В.Луценко, А.Г.Войнилович, Н.В.Ржеуцкий, В.Н.Павловский, Г.П.Яблонский, С.В.Сорокин, С.В.Гронин, И.В.Седова, П.С.Копьев, С.В.Иванов, М.Аланзи, А.Хамидалдин, А.Альямани

Получена генерация в лазере на основе гетероструктур с квантовыми точками Cd(Zn)Se/ZnSe в желто-зеленом ($\lambda = 558.5\text{--}566.7$ нм) спектральном диапазоне при оптической накачке излучением импульсного азотного лазера при комнатной температуре. Максимальная длина волны генерации $\lambda = 566.7$ нм была достигнута при длине резонатора лазера 945 мкм. Большие значения выходной импульсной мощности (до 50 Вт) и внешней дифференциальной квантовой эффективности ($\sim 59\%$) получены при длине резонатора 435 мкм. Высокое лазерное качество гетероструктуры и низкий порог генерации (~ 2 кВт/см²) позволили осуществить ее импульсную накачку излучением лазерного InGaN-диода. Созданный на основе данной гетероструктуры лазерный микрочип-конвертер имеет максимальную импульсную мощность ~ 90 мВт при $\lambda = 560$ нм. Вся конструкция микрочипа-конвертера была размещена в стандартном корпусе лазерного диода TO-18 (диаметр 5.6 мм).

Ключевые слова: полупроводниковые лазеры, лазерный конвертер, оптическая накачка, генерация в желто-зеленом спектральном диапазоне.

1. Введение

Интерес к разработке компактных лазеров, излучающих в желто-зеленом спектральном диапазоне ($\lambda = 558.5\text{--}566.7$ нм), вызван потребностью их использования в биологии, медицине, оптической связи, а также в мультимедийных лазерных проекторах для расширения «цветового пространства». В настоящее время максимальная длина волны излучения коммерческих лазерных диодов (ЛД) на основе InGaN/GaN, работающих в непрерывном режиме, составляет ~ 520 нм при комнатной температуре [1,2]. Однако получение стимулированного излучения желто-зеленого диапазона в полупроводниковых структурах на базе нитридов осложнено значительным увеличением порога генерации и уменьшением надежности таких лазеров из-за принципиальных трудностей формирования малодфектных квантовых ям InGaN с большим содержанием индия, необходимых для получения требуемой длины волны излучения [3]. В желто-зеленом спектральном диапазоне работают малогабаритные твердотельные лазеры с удвоением частоты при накачке излучением ИК ЛД. Однако такие лазеры имеют фиксированную длину волны излучения, сравнительно невысокое быстродействие и требуют также использования дорогостоящих нелинейных кристаллов для обеспечения высокого КПД преобразования.

Альтернативным направлением является создание микрочипового полупроводникового лазерного конвертера

на основе A^2B^6/A^3N , в котором лазерная наногетероструктура Cd(Zn)Se/ZnMgSSe накачивается излучением InGaN-ЛД сине-фиолетового спектрального диапазона. Ранее нами была показана возможность создания низкопороговых высокоэффективных лазеров с оптической накачкой на основе гетероструктур Cd(Zn)Se/ZnMgSSe с активной областью, состоящей из одной или нескольких плоскостей самоформирующихся квантовых точек (КТ) Cd(Zn)Se/ZnSe, расположенных в волноводе с плавным изменением показателя преломления [4, 5], и конвертеров A^2B^6/A^3N на основе этих лазеров для зеленого ($\lambda = 520\text{--}550$ нм) диапазона спектра [6, 7]. Возможность серийного производства активных элементов такого конвертера, а также заметное снижение стоимости InGaN-ЛД, выпускаемых промышленно для воспроизведения дисков Blu-ray ($\lambda \sim 405$ нм) и DPL-проекторов ($\lambda \sim 445$ нм), определяют перспективность создания данного устройства. В настоящей работе представлены результаты разработки и реализации низкопороговых высокоэффективных лазеров на КТ Cd(Zn)Se/ZnSe, излучающих в желто-зеленой области спектра, и полупроводникового микрочипа-конвертера на их основе.

2. Эксперимент

Структуры (Zn,Mg)(S,Se) для лазеров, используемых для оптической накачки, были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) псевдоморфно на подложках GaAs (001) в двухкамерной установке SemiTeq STE 3526 (Россия). Структуры содержат нижний и верхний ограничивающие слои ZnMgSSe ($E_g \sim 2.87\text{--}2.93$ эВ при температуре $T = 295$ К) толщиной 1.2 и 0.02 мкм соответственно, асимметричный волновод с плавным изменением показателя преломления и активную область на основе двух электронно-связанных плоскостей самоформирующихся КТ Cd(Zn)Se/ZnSe с увеличенной номинальной толщиной 2.9–3.1 монослоя (0.85–0.90 нм), разделенных слоем ZnSe толщиной 5 нм. Волновод с

Е.В.Луценко, А.Г.Войнилович, Н.В.Ржеуцкий, В.Н.Павловский, Г.П.Яблонский. Институт физики НАНБ, Белоруссия, 220072 Минск, просп. Независимости, 68; e-mail: e.lutsenko@infanbel.bas-net.by
С.В.Сорокин, С.В.Гронин, И.В.Седова, П.С.Копьев, С.В.Иванов. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, ул. Политехническая, 26; e-mail: irina@beam.ioffe.rssi.ru
М.Аланзи, А.Хамидалдин, А.Альямани. KACST, National Nanotechnology Center P.O. BOX 6086 Riyadh – 11442, Saudi Arabia; e-mail: ayamani@kacst.edu.sa

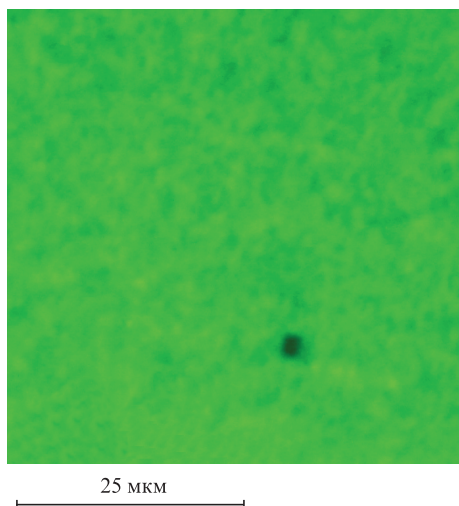


Рис.1. Микрофотография поверхности лазерной гетероструктуры, полученная с помощью флуоресцентного микроскопа.

плавным изменением показателя преломления общей толщиной 0.3–0.4 мкм представляет собой набор короткопериодных сверхрешеток (СР) $Zn_{0.89}Mg_{0.11}S_{0.16}Se_{0.84}/ZnSe$ и $ZnS_{0.15}Se_{0.85}/ZnSe$ ($E_g \sim 2.72\text{--}2.84$ эВ при $T = 295$ К) с изменяемыми периодом и отношением толщин ям и барьеров при неизменной концентрации магния и серы в слоях. Средний период СР $ZnSSe/ZnSe$, ближайшей к активной области, был смещен в область меньших по сравнению с периодом решетки GaAs значений (на 400'' , согласно данным $\Theta\text{-}2\Theta$ кривой качания рентгеновской дифракции), чтобы скомпенсировать сильные упругие напряжения сжатия, индуцируемые большой номинальной толщиной слоев КТ CdSe, и тем самым избежать релаксации упругих напряжений в структуре. Оптимизация начальной стадии формирования гетероинтерфейса ZnSe/GaAs согласно процедуре, разработанной в [5], позволила добиться повышения структурного совершенства лазерных гетероструктур и снизить плотность дефектов упаковки до значений, меньших 10^5 см^{-2} , о чем свидетельствует микрофотография поверхности структуры, полученная с помощью флуоресцентного микроскопа (рис.1). Темная точка представляет собой дефект упаковки. Слабая модуляция интенсивности излучения на фотографии связана, вероятно, с неоднородностью распределения по активной области излучающих КТ, локализующих неравновесные носители заряда.

Оптическая накачка структур со «сколотыми» резонаторами осуществлялась излучением азотного лазера ($\lambda = 337$ нм, $f = 1$ кГц, $\tau = 10$ нс), сфокусированным в полосу шириной 200 мкм, в поперечной геометрии при комнатной температуре. Для создания конвертера использовался коммерческий InGaN-ЛД с номинальной мощностью 1 Вт, работающий в импульсном режиме ($\lambda = 437$ нм, $f = 1$ кГц, $\tau = 200$ нс).

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Оптическая накачка гетероструктур излучением N_2 -лазера

Лазерное излучение в исследуемой гетероструктуре было получено при поперечной оптической накачке излучением импульсного N_2 -лазера образцов с различной

длиной резонатора при комнатной температуре. С увеличением длины резонатора от ~ 150 до ~ 1000 мкм длина волны излучения увеличивалась от 558.5 до 566.7 нм, что обусловлено длинноволновым смещением максимума спектра усиления при уменьшении порога генерации от ~ 4 до ~ 2 кВт/см². Указанный интервал длин волн соответствует желто-зеленому участку спектра.

На рис.2 представлены спектры излучения, зарегистрированные при $T = 295$ К с торца лазера с длиной резонатора 945 мкм, и интегральная интенсивность этого излучения в зависимости от интенсивности излучения накачки I_p . Видно, что при $I_p \sim 2.2$ кВт/см² на фоне широкой полосы фотолуминесценции возникает узкий пик лазерного излучения с $\lambda = 566.7$ нм. Диаграмма направленности лазерного излучения с ТЕ-поляризацией содержит один лепесток с максимумом в направлении оси резонатора и шириной на полувысоте 30° , что соответствует генерации на фундаментальной моде оптического волновода. Порог генерации, определенный из зависимости интегральной интенсивности излучения от интенсивности излучения накачки (рис.2, б), составил 2.16 кВт/см².

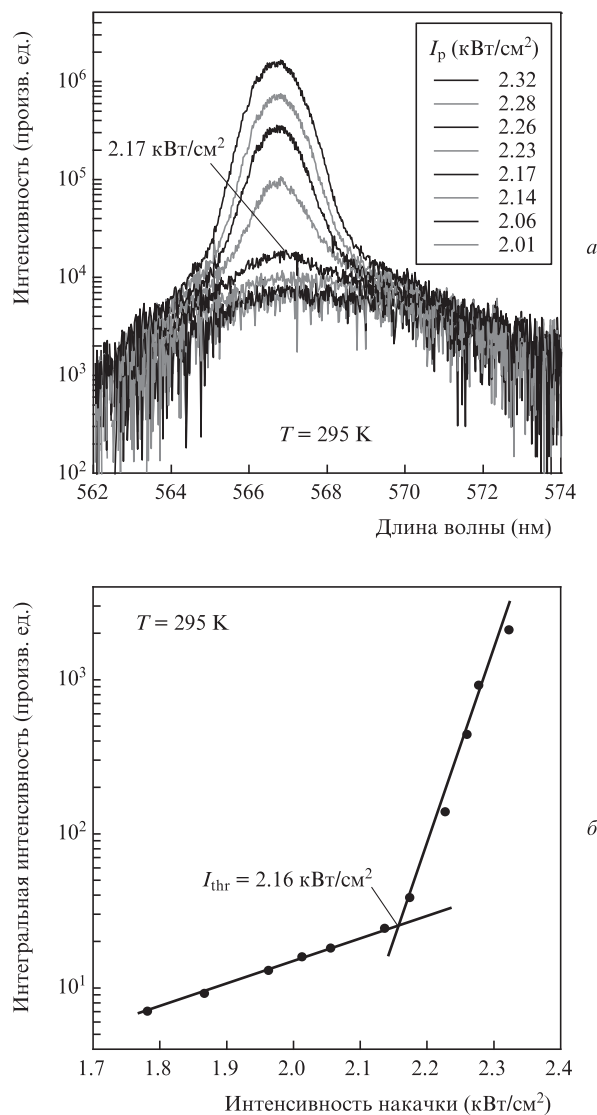


Рис.2. Спектры излучения лазера с длиной резонатора 945 мкм, зарегистрированные с его торца, при различных интенсивностях I_p излучения накачки (а) и интегральная интенсивность этого излучения в зависимости от интенсивности накачки (б).

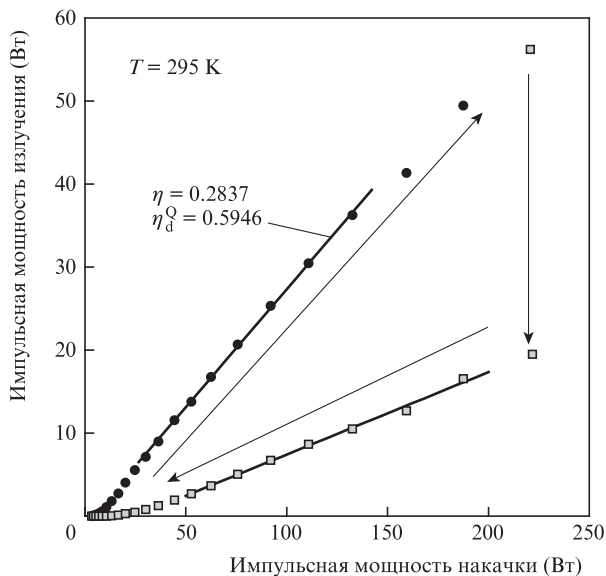


Рис.3. Зависимость выходной импульсной мощности генерации лазера с длиной резонатора 435 мкм от импульсной мощности излучения накачки. Квадраты – мощность в процессе и после деградации.

На рис.3 представлена зависимость выходной импульсной мощности лазера с длиной резонатора 435 мкм от импульсной мощности излучения накачки. Видно, что с ростом мощности накачки выходная мощность линейно возрастает и достигает максимального значения ~ 50 Вт. При этом внешняя дифференциальная эффективность η составляет $\sim 28\%$, что соответствует внешней дифференциальной квантовой эффективности $\eta_d^Q \sim 59\%$. Однако с дальнейшим ростом мощности накачки мощность лазерного излучения резко уменьшается, а длина его волны смещается более чем на 2 нм в коротковолновую область. При этом картина дальнего поля в плоскости гетероструктуры становится сильно неоднородной и значительно расплывается, а порог генерации необратимо возрастает и уменьшается ее эффективность.

Такая катастрофическая оптическая деградация, возникающая под действием собственного лазерного излучения, наблюдалась ранее в подобных структурах [8] и вызвана разрушением областей гетероструктуры, прилегающих к зеркалам резонатора. Следует отметить, что порог катастрофической деградации для исследуемой структуры выше, чем для излучающих в зеленой области спектра структур с неоптимизированным структурным качеством, в которых деградация возникала уже при выходной мощности 12–13 Вт с одного торца резонатора при той же ширине полоски возбуждения. Более высокая деградационная стабильность исследуемых лазеров обусловлена малой плотностью дефектов упаковки в структурах (рис.1) и общим высоким структурным совершенством выращенной гетероструктуры, которого удалось достичь благодаря компенсации механических напряжений в ней и оптимизации начальной стадии гетероэпитаксии согласно [5].

Таким образом, созданные лазеры, излучающие в желто-зеленом диапазоне спектра, по своим характеристикам не уступают лучшим образцам лазеров на основе гетероструктур с КТ Cd(Zn)Se/ZnSe, излучающих в зеленом спектральном диапазоне, и перспективны для создания лазерного микрочип-конвертера на их основе.

3.2. Микрочип-конвертер

Для создания конвертера был использован коммерческий InGaN-ЛД, излучающий на $\lambda = 437$ нм. На рис.4 представлена ватт-амперная характеристика такого ЛД при накачке импульсами тока длительностью 200 нс. Видно, что генерация возникает при токе ~ 0.2 А. Дифференциальная эффективность генерации, определенная по наклону линейного участка ватт-амперной характеристики, составила 1.74 Вт/А. При максимальном токе накачки выходная мощность ЛД была равна 1.96 Вт.

На основе данного InGaN-ЛД была разработана конструкция микрочип-конвертера и впервые получено лазерное излучение конвертера в желто-зеленом диапазоне спектра при комнатной температуре. Для создания микрочип-конвертера излучение InGaN-ЛД фокусировалось цилиндрической микролинзой в узкую полоску, ориентированную перпендикулярно сколам лазерной гетероструктуры Cd(Zn)Se/ZnMgSSe. Длина резонатора Cd(Zn)Se/ZnMgSSe-лазера ($L_{\text{cav}} = 114$ мкм) и размеры микролинзы выбирались из условия обеспечения минимальных размеров устройства и минимально необходимой пороговой мощности накачки [9]. Фотография микрочип-конвертера в рабочем режиме представлена на рис.5. Видно, что разработанная

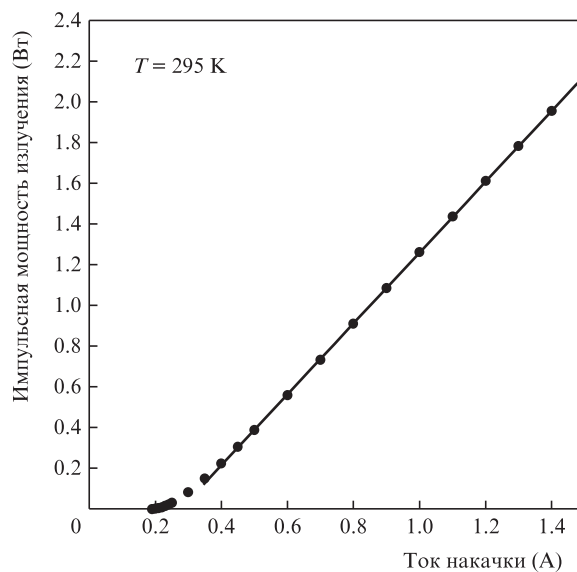


Рис.4. Ватт-амперная характеристика ЛД на основе InGaN при накачке импульсами тока длительностью 200 нс с частотой повторения 300 Гц.

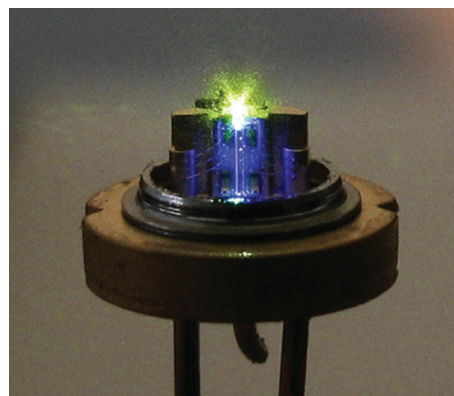


Рис.5. Фотография микрочип-конвертера в рабочем режиме.

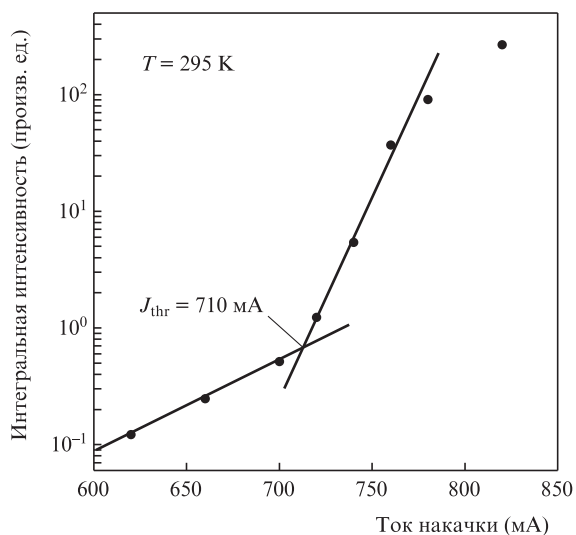
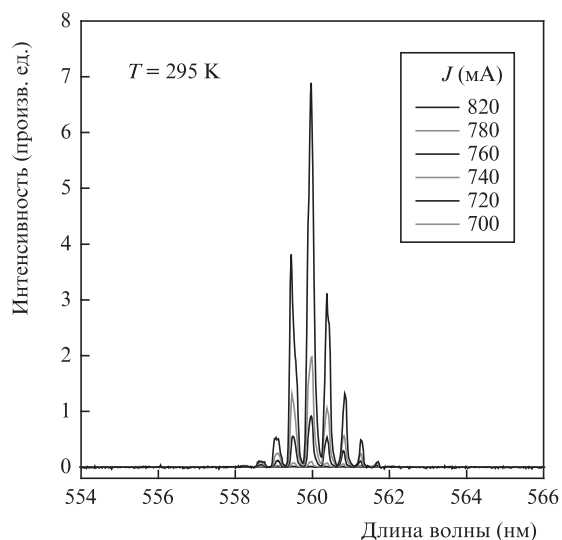


Рис.6. Спектры излучения микрочип-конвертера при различных токах накачки J ЛД на основе InGaN (*a*) и зависимость интегральной интенсивности этого излучения от тока накачки (*б*). На рис.6,*a* спектры расположены снизу вверх в порядке возрастания тока J .

интегральная конструкция целиком уместается в стандартном (диаметром 5.6 мм) корпусе ЛД ТО-18.

На рис.6,*a* приведены спектры излучения микрочип-конвертера при различных токах накачки InGaN-ЛД. При токе более 710 мА в спектре излучения на фоне широкой огибающей спектра усиленной фотолюминесценции развивается узкая полоса генерации, что соответствует резкому увеличению интегральной интенсивности излучения (рис.6,*б*). Максимум полосы генерации соответствует длине волны $\lambda = 560$ нм. Модовая структура спектра генерации обусловлена продольными модами резонатора Фабри–Перо, образованного плоскопараллельными сколами гетероструктуры.

На рис.7 представлена зависимость выходной мощности излучения микрочип-конвертера от тока, протекающего через InGaN-ЛД. Видно, что при токе, превышающем 1 А, выходная мощность конвертера линейно возрастает с ростом тока через диод. При максимальном токе накачки 1.4 А выходная мощность достигает 89 мВт, что соответствует эффективности преобразования «синего» излучения в «желто-зеленое» $\sim 4.5\%$. Низкая эф-

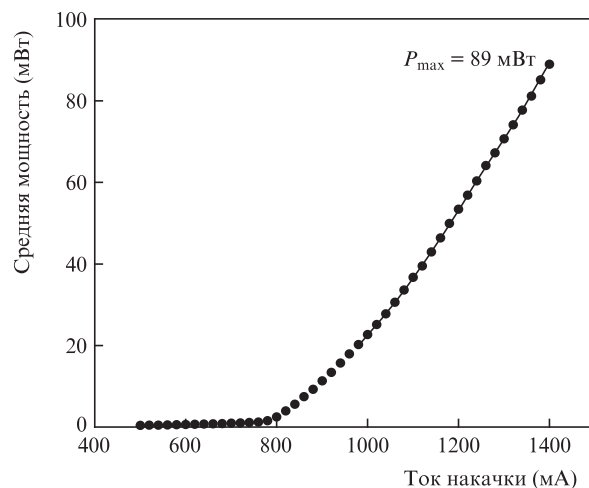


Рис.7. Зависимость выходной мощности излучения микрочип-конвертера от тока накачки InGaN-ЛД.

фективность конвертера (в сравнении с эффективностью при накачке излучением N_2 -лазера) обусловлена в первую очередь тем, что интенсивность накачки при использовании ЛД лишь незначительно превышает порог генерации лазерной гетероструктуры на основе ZnSe. Существенное увеличение эффективности конвертера может быть достигнуто путем уменьшения ширины возбуждаемой полосы и улучшения ее однородности за счет оптимизации фокусировки излучения ЛД и применения широкополосных ЛД специальной конструкции с увеличенной мощностью излучения.

Кроме того, увеличение эффективности конвертера может быть достигнуто путем нанесения просветляющего оптического покрытия на рабочую поверхность и полностью отражающего покрытия зеркала на одну из выходных граней Cd(Zn)Se/ZnMgSSe-лазера, а также за счет оптимизации конструкции гетероструктуры для заданной длины волны оптической накачки ЛД. Таким образом, ожидается, что в дальнейшем удастся значительно увеличить эффективность и мощность микрочип-лазера.

4. Заключение

В настоящей работе получено низкопороговое (порог генерации ~ 2 кВт/см²) лазерное излучение в желто-зеленом диапазоне спектра ($\lambda = 558.5$ – 566.7 нм) при оптическом возбуждении гетероструктур с активной областью на основе двух электронно-связанных плоскостей самоформирующихся КТ Cd(Zn)Se/ZnSe и со сверхрешеточным волноводом с плавным изменением показателя преломления, полученных методом МПЭ на подложках из GaAs (100). На основе данных гетероструктур впервые создан миниатюрный полупроводниковый микрочип-лазер ($\lambda = 560$ нм) с максимальной импульсной мощностью ~ 90 мВт. Лазерный микрочип-конвертер представляет собой микросборку, состоящую из гетероструктуры Cd(Zn)Se/ZnMgSSe ($L_{\text{cav}} = 114$ мкм), накачиваемой излучением «фиолетового» InGaN-ЛД, сфокусированным цилиндрической микролинзой. Вся конструкция микрочип-лазера уместается в стандартном (диаметром 5.6 мм) корпусе лазерного диода.

1. Nichia Green Laser Diode NDG4216 datasheet (2012); <http://www.nichia.co.jp/specification/en/product/ld/NDG4216-E.pdf>.
2. Osram Opto Semiconductors. Green Single Mode Lasers in TO Package (2012); <http://catalog.osram-os.com/>.

3. Avramescu A., Lermer T., Möller J., Eichler C., Bruederl G., Sabathil M., Lutgen S., Strauss U. *Appl. Phys. Express*, **3**, 061003 (2010); Takagi S., Enya Y., Kyono T., Adachi M., Yoshizumi Y., Sumitomo T., Yamanaka Y., Kumano T., Tokuyama S., Sumiyoshi K., Saga N., Ueno M., Katayama K., Ikegami T., Nakamura T., Yanashima K., Nakajima H., Tasai K., Naganuma K., Fuutagawa N., Takiguchi Y., Hamaguchi T., Ikeda M. *Appl. Phys. Express*, **5**, 082102 (2012).
4. Sedova I.V., Lutsenko E.V., Gronin S.V., Sorokin S.V., Vainilovich A.G., Sitnikova A.A., Yablonskii G.P., Alyamani A., Fedorov D.L., Kop'ev P.S., Ivanov S.V. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 171103 (2011).
5. Gronin S.V., Sedova I.V., Sorokin S.V., Klimko G.V., Belyaev K.G., Lebedev A.V., Sitnikova A.A., Toropov A.A., Ivanov S.V. *Phys. Status Solidi C*, **9**, 1833 (2012).
6. Lutsenko E.V., Vainilovich A.G., Tarasuk N.P., Pavlovskii V.N., Yablonskii G.P., Alyamani A., Sedova I.V., Sorokin S.V., Gronin S.V., Kop'ev P.S., Ivanov S.V. *Phys. Status Solidi C*, **9**, 1837 (2012).
7. Sorokin S.V., Sedova I.V., Gronin S.V., Klimko G.V., Belyaev K.G., Ivanov S.V., Alyamani A., Lutsenko E.V., Vainilovich A.G., Yablonskii G.P. *Electron. Lett.*, **48**, 118 (2012).
8. Зубелевич В.З., Войнилович А.Г., Луценко Е.В., Яблонский Г.П., Шуленков А.С., Сорокин С.В., Седова И.В., Гронин С.В., Иванов С.В., Kalisch Н., Heuken М. *Труды конф. «Полупроводниковые лазеры и системы»* (Минск, 2011, с. 123).
9. Lutsenko E.V., Sorokin S.V., Sedova I.V., Vainilovich A.G., Tarasuk N.P., Pavlovskii V.N., Yablonskii G.P., Gronin S.V., Kop'ev P.S., Ivanov S.V., *Phys. Status Solidi B*, **247**, 1557 (2010).