

# Импульсный лазерный модуль спектрального диапазона 1500–1600 нм на основе мощного полупроводникового лазера

Ю.К.Бобрецова, Д.А.Веселов, Н.В.Воронкова, С.О.Слипченко, В.А.Стрелец,  
М.В.Богданович, П.В.Шпак, М.А.Ладугин, А.А.Мармалюк, Н.А.Пихтин

*Представлены результаты разработки и исследований лазерного излучателя, предназначенного для просветления пассивного затвора эрбий-иттербиевого лазера с пассивной модуляцией добротности. Созданный и исследованный компактный импульсный модуль (пиковая мощность более 10 Вт в импульсе длительностью 1 мкс, длина волны вблизи 1550 нм) изготовлен на базе полупроводниковых лазеров со сверхузким волноводом, интегрированных с платой импульсной накачки. Для оптимизации выходных характеристик излучения последовательное сопротивление использовано в цепи накачки лазера. Модули со свободным и волоконным выходами излучения при температуре 25°C имеют мощность на уровне 15 и 12 Вт соответственно при форме импульса, близкой к прямоугольной.*

**Ключевые слова:** коэффициент поглощения, полупроводниковый лазер, внутренние оптические потери, импульсная накачка, энергетический барьер, сверхузкий волновод.

## 1. Введение

Лазерные источники излучения спектрального диапазона 1400–1600 нм востребованы для различных целей, включая научные, медицинские и телекоммуникационные, однако одним из самых важных их применений в настоящее время является дальнометрия [1, 2]. Измерение расстояний, сканирование рельефа, анализ изображения требуются для быстро развивающихся направлений беспилотного наземного транспорта и беспилотной авиации. Мощность излучателей, а соответственно и эффективная дальность действия приборов, сейчас ограничиваются главным образом, требованиями лазерной безопасности [3]. В гражданской сфере и, в частности, в области беспилотного автотранспорта проблема безопасности лазерного излучения для глаз наблюдателей стоит особенно остро. Лазеры спектрального диапазона 1400–1600 нм являются сравнительно безопасными, поскольку излучение с длиной волны более 1400 нм поглощается в роговице глаза и, следовательно, не фокусируется на сетчатку [4]. Для излучателей диапазона 1400–1600 нм допустимы значительно более высокие безопасные уровни мощности, чем для диапазона 800–1100 нм [3]. Кроме того, излуче-

ние с длиной волны более 1100 нм принципиально не регистрируется широко распространенными кремниевыми детекторами и матрицами, а также имеет меньшее рассеяние на мелких частицах, что повышает эксплуатационные возможности излучения в неблагоприятных погодных условиях [5].

Недавние успехи в исследованиях и разработке мощных импульсных и непрерывных лазеров на основе InP, излучающих вблизи  $\lambda = 1550$  нм [6, 7], позволили значительно повысить их выходные оптические характеристики и создать ряд приборов для практических применений. В настоящей работе представлены результаты разработки лазерного излучателя для просветления пассивного затвора эрбий-иттербиевого лазера с пассивной модуляцией добротности. Эрбий-иттербиевые лазеры, обладающие большой пиковой мощностью и высоким пространственным качеством излучения, позволяют создавать дальнометры, рассчитанные на большие расстояния. У лазеров с пассивной модуляцией добротности существует проблема временного джиттера, т. е. неопределенности времени начала лазерного импульса. Решением этой проблемы является принудительное просветление пассивного затвора коротким и мощным импульсом излучения, например полупроводникового лазера.

Цель настоящей работы – создание компактного лазерного модуля, предназначенного для просветления пассивного затвора эрбий-иттербиевого лазера, а также для решения других научных и производственных задач.

## 2. Разработка требований к лазерному модулю

В качестве пассивного затвора эрбий-иттербиевого лазера в большинстве случаев используется легированная ионами кобальта шпинель ( $\text{Co}^{2+} : \text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), имеющая ряд преимуществ по сравнению с другими материалами [8–10]. Полоса поглощения кристалла  $\text{Co}^{2+} : \text{MgAl}_2\text{O}_4$  при-

Ю.К.Бобрецова, Д.А.Веселов, Н.В.Воронкова, С.О.Слипченко, В.А.Стрелец, Н.А.Пихтин. Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Россия, 194021 С.-Петербург, Политехническая ул., 26; e-mail: nike@hpld.ioffe.ru  
М.В.Богданович, П.В.Шпак. Институт физики им. Б.И.Степанова НАНБ, Беларусь, 220072 Минск, просп. Независимости, 68-2  
М.А.Ладугин. АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, кор. 1  
А.А.Мармалюк. АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, кор. 1; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

ходится, в основном, на диапазон длин волн 1300–1600 нм с максимумом в районе 1540–1550 нм [9]. Поэтому для просветления затвора следует использовать лазерный модуль, излучающий на длинах волн, близких к 1550 нм, с возможностью небольшой их перестройки.

Предварительный анализ литературы и опыт работы с лазерами с пассивной модуляцией добротности и просветлением пассивного затвора показал, что для эффективного уменьшения джиттера плотность мощности просветляющего импульса должна быть не менее 25 кВт/см<sup>2</sup> при длительности импульса 1–2 мкс [11], причем дальнейший рост плотности мощности позволяет еще больше снизить джиттер [12]. Помимо этого, увеличение пиковой мощности просветляющего импульса может привести к увеличению энергии импульса лазера с пассивной модуляцией добротности [13]. В работе [13] было показано, что в процессе просветления пассивного затвора длительность лазерного импульса уменьшается, а его форма становится более гладкой из-за временного перекрытия между лазерным и просветляющим импульсами.

В итоге в качестве целевых характеристик для просветления пассивного затвора на основе кристалла  $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  были выбраны следующие параметры лазерного диода: максимальная оптическая мощность не менее 10 Вт (для обеспечения плотности мощности 31.8 кВт/см<sup>2</sup> при использовании выходного волокна с диаметром сердцевины 200 мкм), длительность импульса 1 мкс, максимальная частота следования 1 кГц, длина волны лазерной генерации 1550 нм, ширина апертуры излучателя 150 мкм.

### 3. Полупроводниковые лазеры

Лазеры для разрабатываемого модуля изготавливались на основе двойной гетероструктуры раздельного ограничения с квантоворазмерной активной областью и сверхузким волноводом в системе твердых растворов  $\text{AlGaInAs}/\text{InGaAsP}/\text{InP}$  методом МОС-гидридной эпитаксии. Сверхузкий волновод гетероструктуры [6] позволяет обеспечить как высокую эффективность в импульсном режиме работы, так и низкую (на уровне 30°) расходимость излучения вдоль оси, перпендикулярной слоям гетероструктуры. Эмиттеры из  $\text{InP}$  имеют профильное легирование для обеспечения малых начальных внутренних оптических потерь. На границе волновод–эмиттер выращиваются слои  $\text{AlInAs}$  в качестве энергетических барьеров. В качестве активной области используются две напряженные квантовые ямы, которые находятся в компенсирующих слоях (с механическим напряжением противоположного знака). В целом, конструкция полупроводникового лазера аналогична конструкции, представленной в [6], за исключением профиля легирования эмиттеров.

Лазеры изготавливались по стандартной технологии «мелкая меза» с шириной апертуры 150 мкм, ограниченной протравленными на небольшую глубину мезаканавками. Для исследований использовались лазеры с различными длинами резонаторов и коэффициентами отражения зеркал, образованных естественными сколами. Для конечного модуля были изготовлены лазеры с оптимальной длиной полоскового волновода и коэффициентами отражения зеркал 5% и 95%, полученными при нанесении диэлектрических покрытий. Лазерные кристаллы монтировались на медные теплоотводы.

### 4. Разработка платы накачки

Проблема накачки лазеров короткими ( $\sim 100$  нс) импульсами тока связана с низким последовательным сопротивлением полупроводникового диода  $R_s$  (характерное значение составляет около 50 мОм) и с необходимостью пропускания импульсов тока большой амплитуды. В таком режиме работы основным фактором, лимитирующим характеристики прибора, становится индуктивность в цепи накачки лазера. Эта индуктивность обусловлена паразитной индуктивностью лазера, транзисторов, контактных площадок и дорожек, проводников, соединяющих лазер с платой накачки, и прочих элементов цепи. Индуктивность ограничивает не только минимальную длительность импульса тока, но и его максимальную амплитуду. Энергия магнитного поля, накопленная за время импульса, после его окончания создает выброс обратного напряжения, которое может пробить лазерный диод, а применение в качестве защиты встречно включенного быстродействующего диода помогает не всегда.

Существуют два способа решения проблемы индуктивности. Первый – подавление паразитной индуктивности за счет уменьшения длины всех проводников и размещения лазера вплотную к элементам, формирующим токовый импульс. Второй способ заключается в использовании последовательного сопротивления нагрузки  $R$  в цепи накачки лазера. Увеличение номинального значения этого сопротивления позволяет увеличить быстродействие схемы накачки, однако при этом резко снижается КПД схемы и увеличивается напряжение, необходимое для питания.

При длительности импульса 1 мкс особые требования к длительности фронта включения и выключения не предусмотрены, однако крутые фронты и правильная форма импульса важны для обеспечения как высокой эффективности электрической накачки, так и большой энергии оптического импульса. В настоящей работе использованы оба метода подавления индуктивности: плата элементов накачки предусматривает размещение полупроводникового лазера вплотную к ее основным элементам – конденсаторам и транзисторам. Последовательно с лазером в цепь накачки может включаться сопротивление  $R$ , сформированное из нескольких параллельно включенных SMD-резисторов. В разработанной электрической схеме импульс тока накачки формируют четыре быстродействующих кремниевых транзистора, включенных параллельно. Источником энергии импульса являются две батареи керамических конденсаторов. В схеме используются два быстродействующих защитных диода. Подобное распараллеливание применяется для снижения паразитной индуктивности. Управление амплитудой тока накачки осуществляется без обратной связи по току за счет изменения управляющего напряжения, которое является основным напряжением питания. Для работы платы на нее подаются напряжение питания от 0 до 30 В, вспомогательное напряжение 12 В и запускающий импульс амплитудой 5 В.

Плата накачки размещается внутри корпуса стандарта ННЛ вместе с элементом Пельтье, термистором и лазером (рис. 1). Элемент Пельтье, который отводит тепло на нижнюю сторону корпуса, имеет хороший тепловой контакт не только с лазером, но и с платой, обеспечивая охлаждение ее элементов. Вместе с термистором элемент Пельтье позволяет стабилизировать температуру лазера

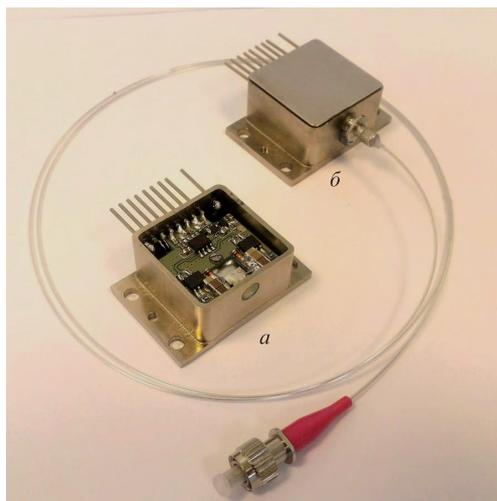


Рис.1. Разработанные лазерные модули со свободным (а) и с волоконным (б) выходами излучения.

в модуле. Габариты корпуса составляют  $45 \times 30 \times 20$  мм без учета контактов.

Нами были разработаны и изготовлены два модуля (рис.1): со свободным выходом лазерного излучения через окно и с волоконным выходом. Волокно имеет диаметр сердцевины 200 мкм и числовую апертуру 0.22. Далее, в основном, будут представлены результаты исследований для модуля со свободным выходом излучения. Характеристики модуля с волоконным выходом полностью им аналогичны при учете коэффициента ввода в оптоволокно, который составляет 80%–85%.

## 5. Исследования лазерного модуля

Полупроводниковые лазеры, работающие в режиме с небольшой частотой следования импульсов, исследовались в ряде работ, однако в большинстве случаев длительность импульса либо составляла 10–300 нс [6, 14–16], либо превышала 10 мкс [16, 17]. Первый из указанных режимов является чисто импульсным, при котором саморазогрев лазера практически не влияет на его характеристики. Второй соответствует квазинепрерывному режиму, когда за время импульса лазер успевает достаточно разогреться, чтобы форма оптического импульса сильно искажилась и мощность в середине импульса была меньше пиковой. Таким образом, длительность импульсов 1 мкс соответствует промежуточному режиму работы лазера, который на сегодняшний момент практически не изучен.

Основная задача исследований состояла не только в описании характеристик лазеров в данном режиме работы, но и в определении оптимального номинала последовательного сопротивления  $R$ , который связан с паразитной индуктивностью схемы, а потому практически не может быть заранее рассчитан.

Для разных значений сопротивления  $R$ , начиная с нулевого, т. е. с короткого замыкания, были измерены зависимости оптической мощности от напряжения питания, а также зарегистрированы фотоответы – осциллограммы оптических импульсов. Измерения проводились по стандартной методике [18]. Полосы частот используемого осциллографа (200 МГц) и фотоприемника (100 МГц) позволяют зарегистрировать фронты длительностью как минимум 5 нс с хорошим разрешением.

Зависимости пиковой оптической мощности от напряжения питания представлены на рис.2,а. Очевидно, что с уменьшением подключенного сопротивления  $R$  растет максимальный ток и, соответственно, мощность лазера. Как видно из рис.2, при коротком замыкании ( $R = 0$ ) удается достичь максимальной мощности 18.6 Вт при напряжении питания всего 7 В. С повышением сопротивления приходится использовать более высокое напряжение питания, зато снижаются требования к точности его установки. Преобразовать зависимости на рис.2,а в привычные ватт-амперные характеристики (ВтАХ) можно, если измерить импульсный ток, протекающий через лазер, измерив, например, напряжение, падающее на последовательно включенном сопротивлении. В данном случае конструкция модуля не позволяла провести такие измерения, поэтому мы определили ВтАХ другим способом. Поскольку ватт-амперная и вольт-амперная (ВАХ) характеристики лазера не зависят от внешней цепи накачки, все построенные на рис.2,а зависимости от тока должны отражаться в одной кривой.

При этом выражение для тока накачки  $I$  можно приближенно представить в следующем виде:

$$I = (U - U_0)/(R + R_s), \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение питания;  $U_0$  – напряжение отсечки лазера;  $R$  – сопротивление, подключенное к лазеру. В данном случае величина  $R_s$  относится не только к лазеру, но

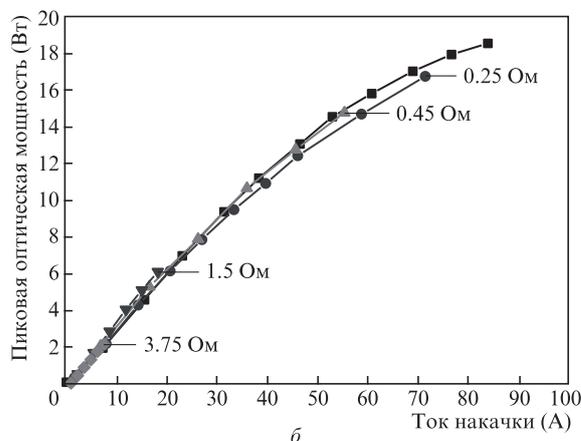
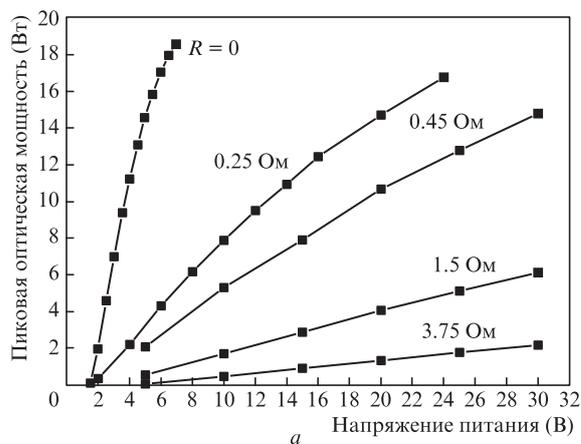


Рис.2. Пиковые оптические мощности импульсного лазерного излучения для различных сопротивлений  $R$  в зависимости от напряжения питания (а) и от рассчитанных при  $U_0 = 1.5$  В и  $R_s = 65$  Ом значений тока (б). Температура 25 °С, частота следования импульсов 1 кГц, модуль со свободным выходом излучения.

и к сопротивлению остальной схемы (транзисторов, конденсаторов, проводников).

Мы подобрали такие значения  $U_0$  и  $R_s$ , чтобы все ВТАХ сводились к одной кривой, при этом значения тока для всех кривых рассчитаны из (1). Полученные ВТАХ представлены на рис.2,б, а полученные параметры для ВАХ лазера составили:  $U_0 = 1.5$  В,  $R_s = 65$  мОм. Эти значения, несмотря на их приблизительный характер, можно использовать для схемотехнических расчетов схем накачки.

В случае короткого замыкания, когда прямое измерение тока принципиально невозможно, данный анализ позволил оценить максимальное значение тока в 80–90 А при напряжении питания 7 В. Дальнейшее повышение напряжения питания, по-видимому, бессмысленно ввиду насыщения ВТАХ.

Исходя из рис.2,а и б можно предположить, что наилучшим решением будет отсутствие резистора  $R$  в цепи накачки. Однако исследование фотоответов лазера показало, что в таком случае сильно искажается форма оптического импульса. Если при большом последовательном сопротивлении  $R$  (1.5 Ом и выше) импульс имеет прямоугольную форму с короткими фронтами (15–20 нс), то в случае короткого замыкания ( $R = 0$ ) пиковая мощность наблюдается в начале импульса, заметно снижаясь к его концу, а передний фронт импульса при этом растягивается примерно до 100 нс. В табл.1 представлены длительности переднего фронта и спада интенсивности за время импульса в зависимости от сопротивления  $R$  и напряжения питания. Осциллограммы оптических импульсов для случая сопротивления  $R = 0.45$  Ом представлены на рис.3.

Из данных таблицы следует, что при уменьшении сопротивления  $R$  возрастает длительность переднего фронта и уменьшается отношение интенсивностей в конце и пике импульса, т. е. искажается его форма. При увеличении напряжения питания длительность фронта либо почти не меняется, либо падает, а форма сигнала постепенно искажается.

Длительность переднего фронта в данном случае связана с эффективностью подавления паразитной индуктивности. При большом сопротивлении  $R$ , когда индуктивность слабо влияет на быстродействие, длительности фронтов определяются уже быстродействием ключей – полевых транзисторов. Как видно из табл.1, фронт вклю-

Табл.1. Параметры оптических импульсов при различных номиналах сопротивления  $R$ , включенного последовательно с лазером, и при различных напряжениях питания.

Сопротивление (Ом)	Напряжение питания (В)	Длительность переднего фронта по уровню 10%–90% (нс)	Отношение амплитуды в конце импульса к пиковой (%)
3.75	30	15	100
1.5	30	19	100
0.45	10	21	100
0.45	20	22	97
0.45	30	25	91
0.25	16	28	96
0.25	20	27	90
0.25	24	24	86
0	5	109	78
0	6	91	73
0	7	80	70

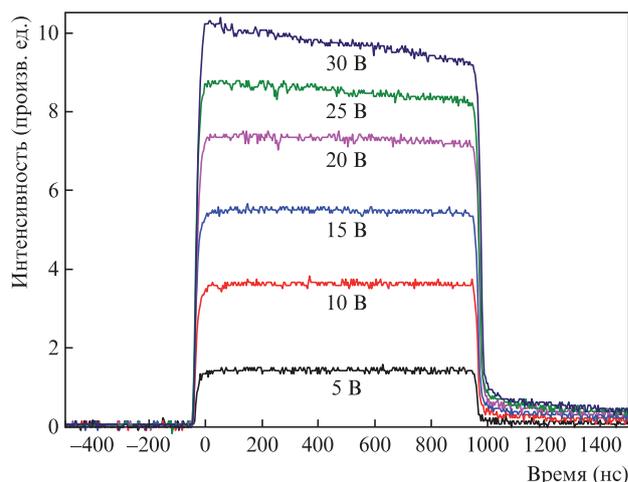


Рис.3. Осциллограммы оптических импульсов лазерного модуля при различных (5–30 В) напряжениях питания. Температура 25°C,  $R = 0.45$  Ом, частота следования импульсов 1 кГц, модуль со свободным выходом излучения.

чения, обеспечиваемый полевыми транзисторами, составляет 15–20 нс.

На форму импульса влияют два основных фактора: саморазогрев лазера за время импульса тока и разрядка батареи конденсаторов. Первый фактор позволяет объяснить постепенное изменение формы импульса при увеличении тока накачки. Из рис.3 и табл.1 следует, что вплоть до напряжения питания 20 В форма оптического импульса остается прямоугольной. С дальнейшим повышением тока накачки наблюдается заметное искажение формы импульса, притом что емкость батареи конденсаторов с ростом напряжения снижается менее чем на 10%. Это говорит о снижении эффективности лазерной генерации за время токового импульса.

При уменьшении включенного сопротивления  $R$  уменьшается постоянная времени цепи накачки, что приводит к искажению формы импульса тока и, следовательно, оптического импульса, что и наблюдается в табл.1 для  $R = 0$  и 0.25 Ом. Исходя из полученных данных, мы выбрали оптимальное значение сопротивления, равное 0.45 Ом.

На рис.4 показаны зависимости оптической мощности лазерного модуля от тока накачки при различных температурах и напряжениях питания при частоте следования импульсов 1 кГц. Измеренные и представленные на рис.4 значения оптической мощности определялись в середине оптического импульса на выходе из окна лазерного модуля. Также на рис.4 показаны соответствующие спектры лазерной генерации. Как видно из рисунка, поддерживая нужную температуру, можно управлять положением спектра генерации, а подстраивая напряжение питания – получать при этом одинаковую оптическую мощность.

Максимальная достигнутая импульсная оптическая мощность составляла 15 Вт, а возможность управления спектром генерации (с поддержанием постоянной мощности) сохранилась при уровне оптической мощности 13 Вт. Для лазера с оптоволоконным выходом максимальная оптическая мощность составляла около 12 Вт.

На рис.5 представлены угловые зависимости интенсивности излучения на выходе из окна лазерного модуля вдоль двух направлений: параллельно и перпендикулярно плоскости слоев гетероструктуры. Как и следовало ожи-

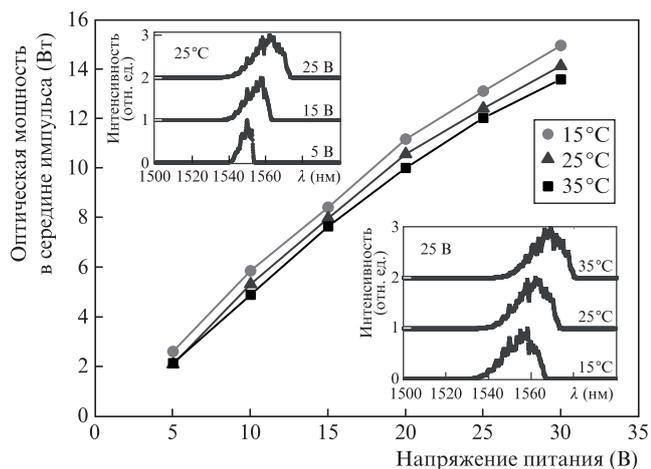


Рис.4. Зависимости мощности и спектров (на вставках) лазерного излучения от напряжения питания (5, 15 и 25 В) и температуры (15°C, 25°C и 35°C) лазера. Частота следования импульсов 1 кГц, модуль со свободным выходом излучения.

дать, в перпендикулярном направлении расходимость на полувысоте интенсивности (FWHM) составляет  $31^\circ$  и практически не зависит от амплитуды тока накачки. Вдоль параллельной оси расходимость излучения определяется многомодовым полосковым волноводом шириной 150 мкм и составляет от  $8.5^\circ$  до  $12^\circ$ , увеличиваясь с ростом амплитуды тока накачки. В целом, такие расходимости типичны для многомодовых полупроводниковых лазеров. Для коллимирования такого излучения желательно использовать асферические линзы с числовой апертурой 0.5–0.6.

Лазерный модуль с оптоволоконным выводом излучения имеет расходимость, соответствующую многомодовому волокну с числовой апертурой 0.22.

## 6. Заключение

Нами изготовлены, исследованы и оптимизированы лазерные модули спектрального диапазона 1500–1600 нм для просветления пассивного затвора эрбий-иттербиевого лазера с пассивной модуляцией добротности. В модулях используются лазеры на основе двойных гетероструктур раздельного ограничения со сверхузким волноводом

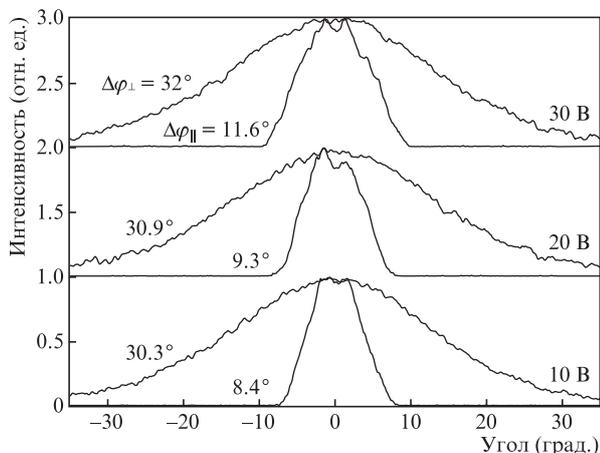


Рис.5. Угловые зависимости интенсивности (FWHM) лазерного излучения в дальней зоне вдоль осей, параллельной (||) и перпендикулярной ( $\perp$ ) слоям гетероструктуры, для напряжений питания 10, 20 и 30 В. Температура 25°C, частота следования импульсов 1 кГц, модуль со свободным выходом излучения.

и квантовыми ямами в активной области. Разработан импульсный источник накачки, встроенный в корпус стандарта ННЛ и интегрированный с лазерным диодом. Получены оптические импульсы мощностью 15 Вт с длительностью 1 мкс и частотой следования до 1 кГц; форма импульса близка к прямоугольной. Установлено, что для данного лазера, платы цепи накачки и режима работы установка последовательно с лазером резисторов общим номиналом 0.45 Ом позволяет получить оптимальные соотношения формы сигнала и мощности. Лазерные модули могут иметь свободный и оптоволоконный выводы излучения, а также возможность регулировки мощности лазера и его температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-52-00022).

- Steinval O., Persson R., Berglund F., Gustafsson O.K.S., Gustafsson F. *Proc. SPIE*, **9080**, 90800W (2014).
- Hecht J. *Opt. Photonics News*, **29** (1), 26 (2018).
- Safety of Laser Products – Part 1: Equipment Classification and Requirements, document IEC 60825-1:2014, International Electrotechnical Commission (2014).
- Bloom S., Korevaar E., Schuster J., Willebrand H. *J. Opt. Net.*, **2** (6), 178 (2003).
- Samman A., Rimai L., McBride J.R., Carter R.O., Weber W.H., in *Proc. 52nd Veh. Technol. Conf. (VTC)* (Boston, USA: 2000, pp. 2084–2089).
- Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Горлачук П.В., Ладугин М.А., Падалица А.А., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Веселов Д.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **47** (3), 272 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (3), 272 (2017)].
- Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Горлачук П.В., Ладугин М.А., Падалица А.А., Слипченко С.О., Лютецкий А.В., Веселов Д.А., Пихтин Н.А. *Квантовая электроника*, **48** (3), 197 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (3), 197 (2018)].
- Karlsson G., Pasiskevicius V., Laurell F., Tellefsen J.A., Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchikov S. *OSA TOPS*, **50**, 72 (2001).
- Mikhailov V.P., Yumashev K.V., Denisov I.A., Prokoshin P.V., Posnov N.N., Moncorge R., Vivien D., Ferrand E., Guyot Y. *OSA TOPS*, **26**, 317 (1999).
- Mlynczak J., Belghachem N., Kopczyński K., Kisielewski J., Stepien R., Wychowaniec M., Galas J., Litwin D., Czyzewski A. *Opt. Quant. Electron.*, **48** (247), 1 (2016).
- Cole B., Lei J., DiLazaro T., Schilling B., Goldberg L. *OSA Appl. Opt.*, **48** (31), 6008 (2009).
- Богданович М.В., Григорьев А.В., Кот А.Н., Ланцов К.И., Лепченков К.В., Рябцев А.Г., Рябцев Г.И., Шпак П.В., Щемелев М.А., Веселов Д.А., Пихтин Н.А. в сб. *Программа и тез. докл., 6-го Российского симпозиума с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология»* (СПб., 2018, с. 85).
- Zhang B., Chen Y., Wang P.Y., Wang Y., Liu J., Hu S., Xia X., Sang Y., Yuan H., Cai X., Liu D., Gai B., Guo J. *OSA Appl. Opt.*, **57** (16), 4595 (2018).
- Веселов Д.А., Пихтин Н.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Шамахов В.В., Шашкин И.С., Капитонов В.А., Тарасов И.С. *Квантовая электроника*, **45** (7), 597 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (7), 597 (2015)].
- Knigge A., Klehr A., Wenzel H., Zeghuzi A., Fricke J., Maaßdorf A., Liero A., Tränkle G. *Phys. Stat. Sol.*, **215** (8), 1700439 (2018).
- Wang X., Crump P., Pietrzak A., Schultz C., Klehr A., Hoffmann T., Liero A., Ginolas A., Einfeldt S., Bugge F., Erbert G., Tränkle G. *Proc. SPIE*, **7198**, 71981 G (2009).
- Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Падалица А.А., Багаев Т.А., Андреев А.Ю., Телегин К.Ю., Лобинцов А.В., Давыдова Е.И., Сапожников С.М., Данилов А.И., Подкопаев А.В., Иванова Е.Б., Симаков В.А. *Квантовая электроника*, **47** (4), 291 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (4), 291 (2017)].
- Веселов Д.А., Капитонов В.А., Пихтин Н.А., Лютецкий А.В., Николаев Д.Н., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Шамахов В.В., Шашкин И.С., Тарасов И.С. *Квантовая электроника*, **44** (11), 993 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (11), 993 (2014)].