

Экспериментальные исследования мощных многомодовых лазеров с асимметричным волноводом с длиной волны излучения 1.5–1.6 мкм

О.О.Багаева, А.И.Данилов, А.В.Иванов, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, Ю.В.Курнявко, А.А.Мармалюк, В.И.Романцевич, В.А.Симаков, Р.В.Чернов

Проведено экспериментальное исследование вольт-амперных, ватт-амперных и спектральных характеристик мощных многомодовых полупроводниковых лазеров с длиной волны излучения 1.5–1.6 мкм. Показано, что для лазера с длиной резонатора 2.6 мм и с шириной мезаполоскового контакта 100 мкм, собранного на С-маунте, получена мощность излучения в непрерывном режиме генерации свыше 4 Вт при токе накачки 15 А. В импульсном режиме получена мощность излучения до 20 Вт при длительности импульса 100 нс, частоте следования 5 кГц и токе накачки не более 80 А. Представлены зависимости длины волны и ширины спектров излучения от тока накачки. Проведены расчеты вольт- и ватт-амперных характеристик, а также характеристических температур лазеров.

Ключевые слова: многомодовые лазеры, вольт-амперная, ватт-амперная и спектральная характеристики, длина волны 1.5–1.6 мкм, ширина спектра излучения.

1. Введение

Интерес к мощным многомодовым лазерным диодам (ЛД), излучающим в диапазоне длин волн 1400–1600 нм, обусловлен их применением в открытых линиях связи для передачи информации, в качестве источников накачки волоконно-оптических усилителей, легированных ионами Er^{3+} , а также в медицине, в системах мониторинга окружающей среды и в спектроскопии промышленных газов. Считается, что излучение в указанном диапазоне не опасно для глаза человека.

Максимальная непрерывная выходная мощность излучения лазерного InGaAsP/InP-диода с апертурой 200 мкм и длиной волны $\lambda = 1.5$ мкм, составившая 4.6 Вт, была получена в 1996 г. [1].

Изготовленные в работе [2] методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений лазерные InGaAsP/InP-гетероструктуры (ГС) с двумя напряженными квантовыми ямами ($\lambda = 1.3–1.55$ мкм) обеспечили оптическую мощность излучения 2.4 Вт в непрерывном режиме генерации при 20 °С и ширине полоскового контакта 100 мкм. В работе [3] была достигнута максимальная непрерывная мощность излучения 4.5 Вт при токе накачки 12 А, длине резонатора 2.5 мм, температуре 20 °С и апертуре 95 мкм. Импульсная мощность составила 16.5 Вт при токе накачки 80 А и длине резонатора 2 мм.

В работе [4] показано, что ЛД с одной квантовой ямой может излучать непрерывную оптическую мощность 2.5 Вт при токе накачки 5 А и полосковом контакте размером 0.1×1.5 мм. В диапазоне температур 10–70 °С характе-

ристические температуры для пороговой плотности тока и дифференциальной эффективности составляли 90 и 325 К соответственно. Отмечено отсутствие деградации ЛД при испытаниях продолжительностью более 4000 ч при токе накачки 5 А и температуре 40 °С. Исследования выходной импульсной мощности ЛД, изготовленных из трех AlInGaAs/InP-гетероструктур, которые имели толщину волновода и ширину его запрещенной зоны 0.3 мкм и 1.0 эВ, 1.5 мкм и 1.0 эВ и 1.5 мкм и 1.12 эВ, показали, что мощность излучения ЛД с первой ГС составила 2 Вт, со второй – 6 Вт и с третьей – 9.5 Вт [5]. Следовательно, оптимизация геометрии волноводного слоя ГС оказывает сильное влияние на характеристики ЛД, излучающих в диапазоне 1.5–1.6 мкм.

Мощные многомодовые ЛД на основе квантоворазмерных AlInGaAs/InP-гетероструктур со сверхузким волноводом и полосковым контактом 100 мкм продемонстрировали при комнатной температуре выходную оптическую мощность свыше 4 Вт в непрерывном режиме работы и свыше 20 Вт – в импульсном [6]. Влияние толщин волноводных слоев на выходные характеристики ЛД изучалось в работе [7]. Показано, что в широком волноводе внутренние оптические потери составляют 2.2 см^{-1} , а в узком волноводе – 3.5 см^{-1} . Лазер с узким волноводом позволяет получить выходную импульсную мощность 16 Вт, а лазер с широким волноводом – только 10 Вт. В непрерывном режиме лазер с узким волноводом имел выходную мощность 3.8 Вт при токе накачки 13 А, а лазер с широким волноводом – только 3 Вт при токе 11 А. Показано, что лазеры с широким волноводом имеют большую дифференциальную эффективность η при относительно небольших превышениях порогового тока, тогда как лазеры с узким волноводом сохраняют величину η до более высоких токов накачки и предпочтительны для достижения предельных уровней мощности. Характеристическая температура для пороговой плотности тока в случае лазеров с широким волноводом составляла 45–50 К и была несколько ниже, чем у лазеров с узким волноводом

О.О.Багаева, А.И.Данилов, А.В.Иванов, В.Д.Курносков, К.В.Курносков, Ю.В.Курнявко, А.А.Мармалюк, В.И.Романцевич, В.А.Симаков, Р.В.Чернов. АО «НИИ “Полус” им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3, корп. 1; e-mail: webeks@mail.ru

Поступила в редакцию 28 декабря 2018 г.

(60–65 К). Характеристическая температура для дифференциальной квантовой эффективности в случае лазеров с широким волноводом составляла 120–140 К и была несколько ниже, чем у лазеров с узким волноводом (180–200 К). Обзор работ по мощным ЛД представлен в [8].

В настоящей работе проведены экспериментальные и теоретические исследования мощных многомодовых ЛД с резко асимметричным волноводом и длиной волны излучения 1.5–1.6 мкм. Лазеры изготавливались из той же гетероструктуры, что и одномодовые лазеры в работе [9]. Отличие заключалось в ширине мезаполоскового контакта (100 мкм вместо 3 мкм) и в использовании для его изоляции диэлектрика (Si_3N_4 вместо ZnSe).

2. Характеристики многомодовых лазеров

Исследовались лазеры с длиной резонатора $L_c = 2.2$ и 2.6 мм. На грани резонатора наносились отражающие ($\sim 100\%$) и просветляющие (5%) покрытия. Характеристики излучения ЛД измерялись со стороны резонатора с 5%-ным покрытием. Монтаж ЛД осуществлялся в медные С-маунты ($5.5 \times 6 \times 7$ мм), диоды спаивались на индий активной областью вниз. Температура С-маунта T с помощью электронной схемы стабилизации поддерживалась постоянной в диапазоне 20–60 °С ($T = T_0 + \Delta T$, где $T_0 = 20$ °С и $\Delta T = 0, 10, 20, 30, 40$ °С). При этих фиксированных температурах и постоянном токе накачки осуществлялось измерение вольт-амперных (ВАХ) и ватт-амперных (ВтАХ) характеристик. При измерении импульсных ВтАХ С-маунты монтировались на радиаторе диаметром 40 мм и толщиной 5 мм. Измерения проводились при комнатной температуре, длительности электрического импульса 100 нс и частоте следования 5 кГц, также измерялась длительность оптического импульса, которая использовалась при расчете импульсной мощности излучения.

2.1. Вольт и ватт-амперные характеристики ЛД

ЛД с длиной резонатора $L_c = 2.6$ мм имели мощность излучения свыше 4.2 Вт при температуре 20 °С и токах накачки, больших или равных 15 А. При этом ЛД с $L_c = 2.2$ и 2.6 мм при $T_0 = 20$ °С имели приблизительно одинаковые ВАХ и ВтАХ. Однако у ЛД с $L_c = 2.2$ мм при $T = 60$ °С насыщение наклона ВтАХ происходило при токах 13–13.5 А, тогда как у ЛД с $L_c = 2.6$ мм насыщение ВтАХ не наблюдалось до токов, превышающих 15 А. В связи с этим дальнейшие результаты представлены для ЛД с длиной резонатора 2.6 мм. На рис.1 представлены ВАХ и ВтАХ для ЛД с $L_c = 2.6$ мм, работающего в непрерывном режиме при различных температурах радиатора.

На рис.2 показаны экспериментальные зависимости импульсной мощности и длительности оптического импульса от тока накачки. При импульсном токе накачки $I = 80$ А мощность превышает 19.5 Вт. Из рис.2 видно, что при небольших токах длительность оптического импульса меньше 100 нс, а при $I = 80$ А она увеличивается до 120 нс. Это объясняется тем, что при токах накачки, близких к пороговому, существует задержка между оптическим и электрическим импульсами, обусловленная конечным временем создания пороговой инверсной населенности в ЛД, что приводит к уменьшению длительности оптического импульса. При больших токах накачки увеличение длительности оптического импульса (после окончания элек-

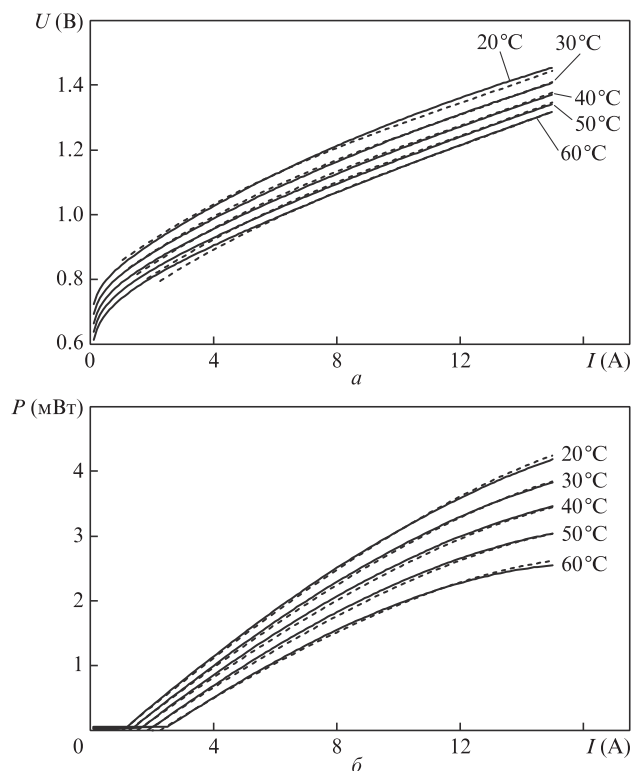


Рис.1. Экспериментально измеренные (сплошные кривые) и расчетные (штриховые кривые) вольт-амперные (а) и ватт-амперные (б) характеристики ЛД с длиной резонатора 2.6 мм при различных температурах ЛД.

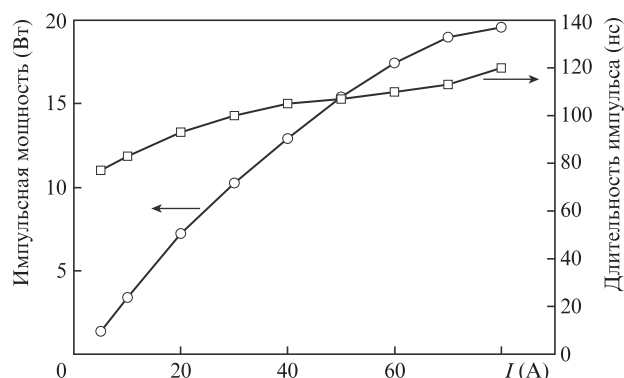


Рис.2. Экспериментально измеренные зависимости мощности и длительности оптического импульса от тока накачки.

трического импульса) обусловлено конечным временем релаксации инверсной населенности [10]. Эксперименты показали, что для ЛД с симметричным широким волноводом длительность оптического импульса, равная 120 нс, наблюдается при $I \approx 20$ А и увеличивается до 150 нс при токах, превышающих 80 А. В нашем случае это обусловлено существенным уменьшением толщины р-волновода и времени транспорта дырок до активной области ЛД. Поэтому при расчете импульсной мощности ЛД нужно использовать длительность оптического импульса, а не электрического.

2.2. Дифференциальное сопротивление и дифференциальная эффективность

В работах [9, 11] указывается, что дифференциальное сопротивление ЛД слабо влияет на порог генерации и его

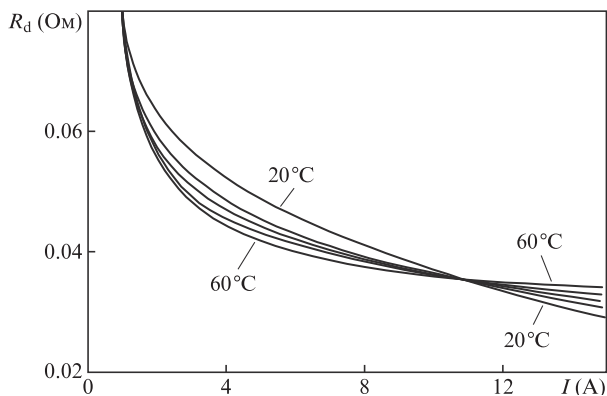


Рис.3. Зависимости динамического сопротивления R_d от непрерывного тока накачки при температурах радиатора 20–60°C. Интервал между кривыми 10°C.

дифференциальную эффективность, но сильно влияет на мощность излучения, т.е. чем ниже дифференциальное сопротивление, тем выше максимальная мощность.

На рис.3 представлены расчетные зависимости дифференциального сопротивления R_d от постоянного тока накачки I для ЛД с длиной резонатора 2.6 мм в диапазоне температур 20–60°C. Видно, что значение R_d зависит от температуры и при $T = 20^\circ\text{C}$ и токе 15 А (плотность тока накачки 5.8 кА/см²) составляет ~0.03 Ом, при этом выходная мощность излучения превышает 4 Вт. Отметим, что для ЛД с полосковым контактом шириной 3 мкм при токе накачки 1.2 А R_d было ~0.6 Ом при $T = 20^\circ\text{C}$, при этом выходная мощность излучения превышала 0.3 Вт [9].

Величина R_d уменьшается с ростом мощности излучения (тока накачки) [12], причем скорость изменения дифференциального сопротивления зависит от температуры. Из анализа кривых, представленных на рис.3, следует, что при токах накачки менее 11 А кривая $R_d(I)$ для $T = 60^\circ\text{C}$ лежит ниже, чем для температуры 20°C, а при токах накачки, превышающих 11 А, – наоборот, т.е. скорость изменения дифференциального сопротивления ЛД с ростом накачки по абсолютной величине уменьшается с ростом температуры. При этом напряжение на ЛД при $T = 60^\circ\text{C}$ ниже, чем при $T = 20^\circ\text{C}$.

На рис.4 показаны расчетные зависимости дифференциальной эффективности η Вт/АХ от постоянного тока накачки в диапазоне температур 20–60°C. Из сравнения приведенных зависимостей с аналогичными из работы [9] видно, что значения η не сильно отличаются друг от друга.

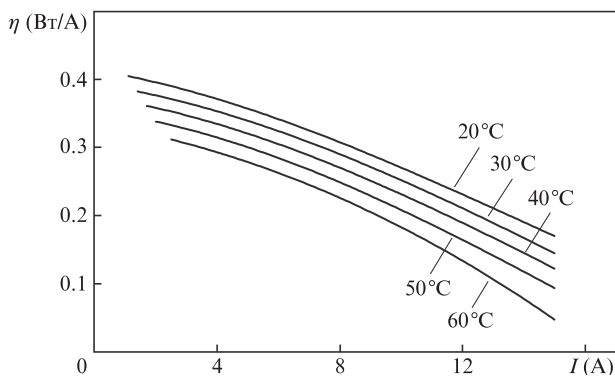


Рис.4. Зависимости дифференциальной эффективности Вт/АХ η от тока накачки при температурах радиатора 20–60°C. Интервал между кривыми 10°C.

2.3. Спектральные характеристики ЛД

На рис.5 представлены экспериментальные спектры излучения ЛД, работающего в импульсном режиме накачки, при токах накачки 5 и 80 А и температуре радиатора 25°C. Как и в случае непрерывной токовой накачки ЛД [9], при большем токе ширина спектра излучения существенно больше (в обоих случаях нагревом активной области ЛД можно пренебречь). Как показано в работе [13], причиной увеличения ширины спектра излучения являются нелинейные потери.

На рис.6 показаны измеренные зависимости длины волны генерации и полной ширины спектра излучения по уровню половинной мощности от импульсного тока накачки. И длина волны, и ширина спектра излучения увеличиваются с ростом тока, причем длина волны генерации увеличивается практически линейно и составляет

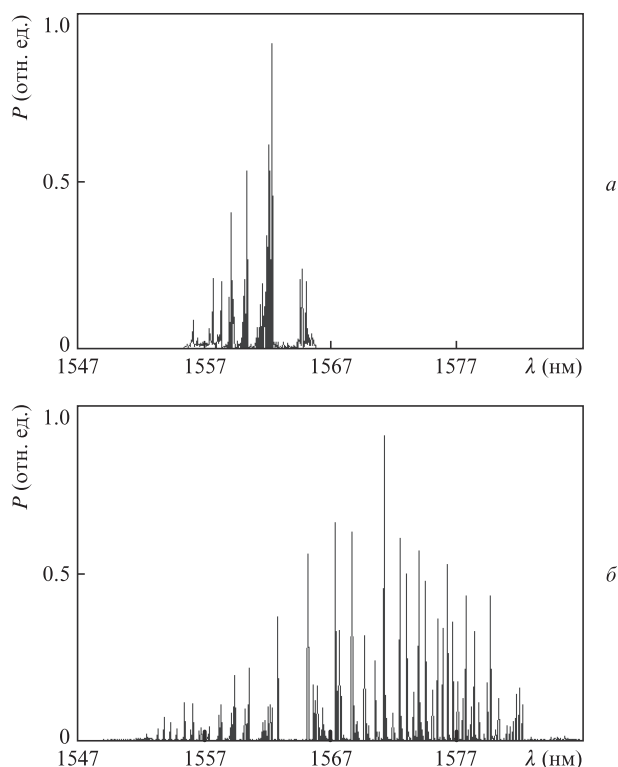


Рис.5. Экспериментально измеренные спектры излучения ЛД в импульсном режиме накачки с длиной резонатора 2.6 мм при токах накачки 5 (а) и 80 А (б) и температуре радиатора 25°C.

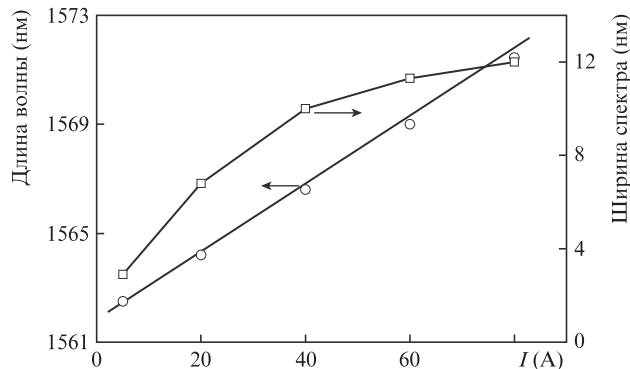


Рис.6. Экспериментально измеренные зависимости длины волны генерации и полной ширины спектра излучения по уровню половинной мощности от импульсного тока накачки.

0.12 нм/А. Характер зависимости полной ширины спектра излучения по уровню половинной мощности от импульсного тока подобен таковому из работы [9].

3. Расчет ВАХ, ВтАХ и характеристических температур ЛД

Для проведения этих расчетов воспользуемся результатами работ [9, 14]. Напряжение на ЛД запишем в следующем виде:

$$U(I, \Delta T_{LD}) = U_{cut}(\Delta T_{LD}) + IR_d(I). \quad (1)$$

Считаем, что сопротивление ЛД $R_d(I)$ зависит только от тока накачки, а напряжение отсечки на ЛД $U_{cut}(\Delta T_{LD})$ – только от нагрева активной области лазера ΔT_{LD} . В отличие от работ [9, 14], в которых диапазон изменения температур был равен 20–40 °С, в настоящей работе этот диапазон составляет 20–60 °С, поэтому в разложении в ряд Тейлора функций $R_d(I)$ и $U_{cut}(\Delta T_{LD})$ мы сохраним вторые производные:

$$R_d(I) = R_{d0}(1 - dR_1 I + 0.5dR_2 I^2), \quad (2)$$

$$U_{cut}(\Delta T_{LD}) = U_{0cut}(1 - dU_1 \Delta T_{LD} + 0.5dU_2 \Delta T_{LD}^2), \quad (3)$$

где U_{0cut} – напряжение отсечки (линейная аппроксимация экспериментальной ВАХ к току накачки, стремящемуся к нулю); R_{d0} – динамическое сопротивление ЛД при $T = T_0$; dR_1, dR_2, dU_1, dU_2 – первые и вторые производные для соответствующих параметров.

Ватт-амперная характеристика рассчитывалась по формуле

$$P = \eta_{th}(I, P, \Delta T)[I - I_{th}(I, P, \Delta T)]. \quad (4)$$

Зависимости порогового тока I_{th} и дифференциальной эффективности на пороге генерации η_{th} от тока накачки, мощности излучения и температуры определяются формулами

$$I_{th}(I, P, \Delta T) = I_{th0} \exp\left(\frac{\Delta T_{LD}(I, P, \Delta T)}{T_I}\right), \quad (5)$$

$$\eta_{th}(I, P, \Delta T) = \eta_{th0} \exp\left(\frac{-\Delta T_{LD}(I, P, \Delta T)}{T_P}\right), \quad (6)$$

где I_{th0}, η_{th0} – пороговый ток и дифференциальная эффективность ВтАХ без учета нагрева активной области ЛД; T_I и T_P – характеристические температуры для порогового тока накачки и эффективности ВтАХ.

Расчетные зависимости ВАХ и ВтАХ от тока накачки при различных температурах радиатора, представленные на рис.1 штриховыми кривыми, удовлетворительно совпадают с экспериментальными.

Формулу для нагрева активной области ЛД запишем в следующем виде:

$$\Delta T_{LD}(I, P, \Delta T) = R_{T_0} \left(\frac{T_0 + \Delta T_{LD}(I, P, \Delta T)}{T_0} \right)^k \times (U(I, \Delta T_{LD})I - P) + \Delta T, \quad (7)$$

где k – постоянная величина; R_{T_0} – тепловое сопротивление при температуре радиатора $T_0 = 293$ К и $\Delta T = 0, 10, 20, 30, 40$ К. Расчет показывает, что при температуре радиатора 20 °С и токе накачки 15 А температура активной области ЛД выше температуры радиатора на 37.1 °С, а при температуре радиатора 60 °С – на 42.7 °С, т.е. дополнительный нагрев активной области ЛД за счет увеличения тока накачки при температуре радиатора 60 °С составляет 5.6 °С.

Наилучшее совпадение экспериментальных и расчетных характеристик наблюдается при $R_{T_0} = 1.8$ К·Вт⁻¹, $T_I = 54$ К, $T_P = 180$ К, $I_{th0} = 1$ А, $U_{0cut} = 0.79$ В, $R_{d0} = 0.076$ Ом, $dR_1 = 0.038$ А⁻¹, $dR_2 = 0.0023$ А⁻², $dU_1 = 0.005$ К⁻¹, $dU_2 = 2.6 \cdot 10^{-6}$ К⁻², $\eta_{th0} = 0.4$ Вт·А⁻¹, $k = 1.3$. Таким образом, можно заключить, что значения характеристических температур T_I (54 К) и T_P (180 К) значительно меньше полученных в работе [9] для ЛД с шириной полоскового контакта 3 мкм и резонатора 1.6 мм ($T_I = 80$ К и $T_P = 280$ К). Следовательно увеличение ширины контакта до 100 мкм привело к увеличению практически на порядок тока накачки и к более сильной температурной чувствительности характеристик ЛД.

Итак, показано, что ЛД с длиной резонатора 2.6 мм и шириной мезаполоскового контакта 100 мкм, собранного на С-маунте, позволяет получить в непрерывном режиме генерации мощность излучения более 4 Вт при токе накачки 15 А. В импульсном режиме получена мощность излучения до 20 Вт при длительности импульса 100 нс, частоте следования 5 кГц и токе накачки не выше 80 А. Проведены расчеты ВАХ, ВтАХ и характеристических температур ЛД.

- Garbuzov D., Xu L., Forrest S.R., et al. *Electron. Lett.*, **32**, 1717 (1996).
- Голикова Е.Г., Горбылев В.А., Давидок Н.Ю. и др. *Письма в ЖТФ*, **26**, 5 (2000).
- Boucher J.F., Callaban J.J. *Proc. SPIE*, **8039**, 80390B-1 (2011).
- Garrod T., Olson D., Klaus M., et al. *Proc. SPIE*, **9002**, 90021F-1 (2014).
- Горлачук П.В., Рябоштан Ю.Л., Ладугин М.А. и др. *Квантовая электроника*, **43**, 819 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 819 (2013)].
- Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Горлачук П.В. и др. *Квантовая электроника*, **47**, 272 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 272 (2017)].
- Мармалюк А.А., Рябоштан Ю.Л., Горлачук П.В. и др. *Квантовая электроника*, **48**, 197 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 197 (2018)].
- Тарасов И.С. *Квантовая электроника*, **40**, 661 (2010) [*Quantum Electron.*, **40**, 661 (2010)].
- Горлачук П.В., Иванов А.В., Курносов В.Д. и др. *Квантовая электроника*, **48**, 495 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 495 (2018)].
- Zory P.S. *Quantum Well Lasers* (San Diego, CA: Academic Press Inc., 1993).
- Elenkrig V.B., Smetona S., Simmons J.G., et al. *Appl. Phys.*, **87**, 1 (2000).
- Иванов А.В., Курносов В.Д., Курносов К.В. и др. *Квантовая электроника*, **33**, 425 (2003) [*Quantum Electron.*, **33**, 425 (2003)].
- Курносов В.Д., Курносов К.В. *Квантовая электроника*, **48**, 807 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 807 (2018)].
- Горлачук П.В., Иванов А.В., Курносов В.Д. и др. *Квантовая электроника*, **44**, 149 (2014) [*Quantum Electron.*, **44**, 149 (2014)].