

07

Прямая токовая модуляция мощных полупроводниковых лазеров с помощью высокочастотных автоколебаний в арсенид-галлиевых лавинных диодах

© А.В. Рожков, П.Б. Родин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: rozh@hv.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 2 июля 2025 г.

В окончательной редакции 1 сентября 2025 г.

Принято к публикации 1 сентября 2025 г.

Показано, что высокочастотные автоколебания, спонтанно возникающие в обратносмещенных высоковольтных лавинных диодах в простейшей электрической схеме, могут быть применены для прямой токовой модуляции мощных полупроводниковых лазеров. Частота автоколебаний примененного в эксперименте лавинного диода составляла 2.4 GHz. Лавинный диод был подключен последовательно с гетеролазером с тремя туннельно-связанными излучателями и нагрузкой 50Ω с помощью полосковой линии. Экспериментально показано, что колебания сигнала фотоприемника, регистрирующего излучение лазера, следовали за колебаниями тока через лазер и происходили с частотой 2.4 GHz. Пиковая мощность оптического сигнала при максимальном токе через лазер ~ 2.0 А составила ~ 5.5 W при длительности оптического импульса на полувысоте амплитуды ~ 180 ps, энергия единичного импульса около 1 nJ.

Ключевые слова: прямая токовая модуляция, ударно-ионизационная неустойчивость, лавинные диоды.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.01.61919.20424

Формирование коротких мощных импульсов лазерного излучения с высокой частотой следования представляет собой актуальную научно-техническую задачу [1–16]. Одним из способов формирования коротких импульсов излучения является прямая токовая модуляция лазера [2] нано- или субнаносекундным импульсом тока. В отличие от методов синхронизации фаз и модуляции добротности [3–7] метод прямой токовой модуляции короткими импульсами [8–12] позволяет использовать коммерчески доступные лазеры, а не специально сконструированные лазерные структуры. Однако этот метод предъявляет высокие требования к полупроводниковому драйверу, формирующему короткие импульсы тока с высокой частотой повторения [10–12]. В настоящей работе экспериментально показана возможность прямой высокочастотной модуляции лазерного излучения с помощью нового физического явления в лавинных диодах — спонтанных высокочастотных автоколебаний тока в гигагерцевом частотном диапазоне [17]. При использовании работающего в режиме таких автоколебаний лавинного диода в качестве драйвера и коммерчески доступного лазера было получено лазерное излучение, глубоко модулированное по амплитуде на частоте 2.4 GHz. Полуширина единичного импульса $t_{\text{FWHM}} = 180$ ps, длительность цуга периодических импульсов квазигармонической формы с частотой повторения $f_{\text{PRF}} = 2.4$ GHz варьировалась в интервале от 20 до 200 ns.

Автоколебания тока в диоде, применяемом в качестве высокочастотного драйвера, возникают спонтанно вследствие мягкой осцилляционной неустойчивости стационарного состояния на обратной „лавинной“ ветви вольт-

амперной характеристики (ВАХ) и соответствуют нелинейному лавинно-пролетному режиму генерации [17]. Аналогичный механизм имеют автоколебания в мощных кремниевых диодах [18]. В отличие от классических лавинно-пролетных диодов [19] автоколебания [17,18] происходят в простейшей электрической схеме без резонатора, включающей только диод и последовательную омическую нагрузку.

Для экспериментов применялись GaAs $p^+ - p - i - n - n^+$ -диоды с частотой колебаний 2–2.4 GHz, диаметром $d = 500 \mu\text{m}$ и напряжением пробоя около $U_b \approx 380$ V. Подробное описание диодов дано в недавней работе [20]. Приборы изготовлены Рожковым с соавторами в начале 2000-х годов [21]. Диод был включен последовательно с коммерчески доступным лазером SPLPL90_3 с тремя туннельно-связанными излучателями (максимум излучения на длине волны 905 nm, апертура $200 \times 10 \mu\text{m}$) и 50Ω нагрузкой с помощью копланарной полосковой СВЧ-линии (рис. 1). На вход линии подавался квазипрямоугольный импульс обратной полярности амплитудой U_1 , длительностью от 20 до 200 ns и частотой повторения 1–10 kHz, а также постоянное обратное смещение U_2 . Экспериментальная установка позволяла изменять величины U_1 и U_2 . В соответствии с результатами [17] для самовозбуждения колебаний в диоде требуется выполнение условия $U_1 + U_2 > U_b$. Для двух разных запускающих генераторов передний фронт импульса U_1 имел длительность 200 ps или 10 ps. Согласование импедансов 50Ω коаксиальной полосковой линии, в которую включены высоковольтный GaAs-диод и

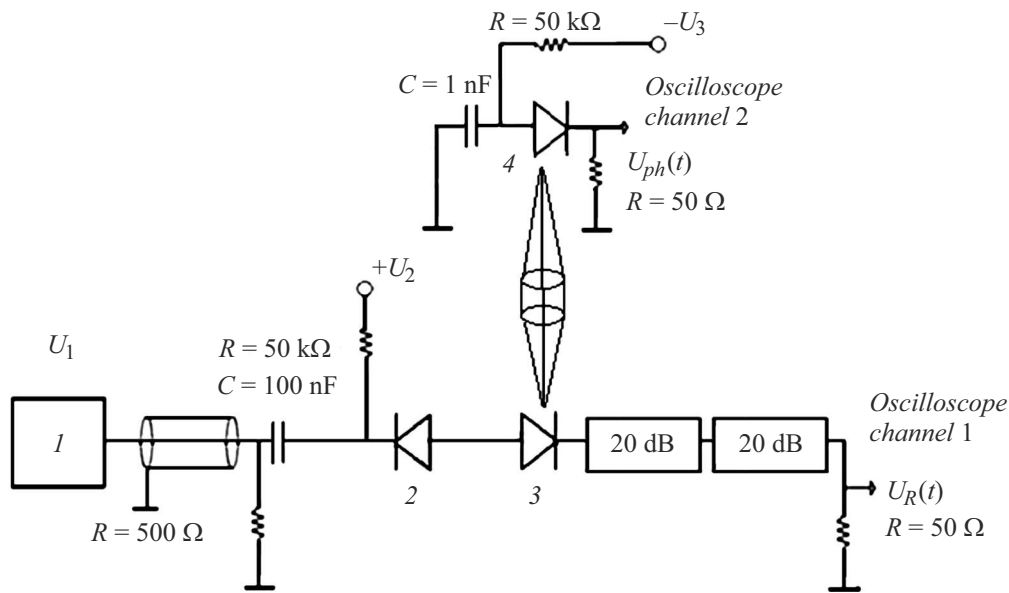


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — импульсный генератор напряжения, 2 — высоковольтный GaAs лавинный диод, 3 — SPLPL90_3 лазерный диод, 4 — фотодиод на основе эпитаксиальной GaAs $p-i-n$ -структуры.

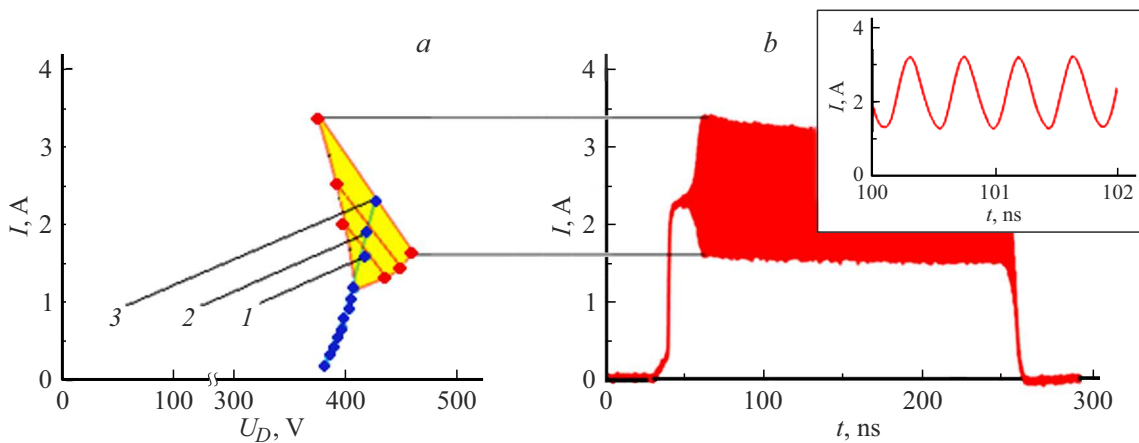


Рис. 2. Экспериментальная ВАХ с „фазовыми траекториями“ (I, U_D) (1–3) (a) и временная зависимость $I(t)$ (b) для „мягкого“ перехода к высокочастотным оцилляциям при медленном (за 10 ns) увеличении напряжения U_1 на GaAs-диоде. В условиях эксперимента для приведенных на части a фазовых траекторий амплитуда импульсов U_1 и напряжение U_2 составляли (в V): 1 — 320, 165; 2 — 320, 175; 3 — 320, 225. На вставке (часть b) колебания показаны в более крупном масштабе. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

лазер, и измерительного канала позволило уменьшить отражение импульса от лазера за счет некоторого уменьшения амплитуды модулируемого тока.

В качестве детектора лазерного излучения применялся GaAs-фотодиод, изготовленный методом жидкофазной эпитаксии (диаметр $150 \mu\text{m}$, размер фоточувствительной области $\sim 5 \cdot 10^{-5} \text{cm}^2$). Детектирование проводилось при обратном смещении $U_3 = 60 \text{V}$. Между лазером и фотодиодом была установлена фокусирующая система линз. Напряжения на нагрузке $U_R(t)$ в цепи питания лазера (канал 1) и $U_{ph}(t)$ в цепи детектирующего фотодиода (канал 2) регистрировались цифровым

двухканальным осциллографом Tektronix DPO 70404C с частотной полосой 4 GHz (рис. 1). Для измерения напряжения $U_R(t)$ (канал 1) дополнительно применялся набор широкополосных аттенюаторов. Измеренные в каналах 1 и 2 осциллограммы определяли временные зависимости тока через лазер $I(t) = U_R(t)/R$ и фотодиод $i(t) = \Delta U_{ph}(t)/R$.

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных измерений высокочастотных колебаний тока $I(t)$ (канал измерения 1) и их зависимость от амплитуды приложенного импульса U_1 и начального смещения U_2 . На рис. 2, a эти колебания показаны на плоскости

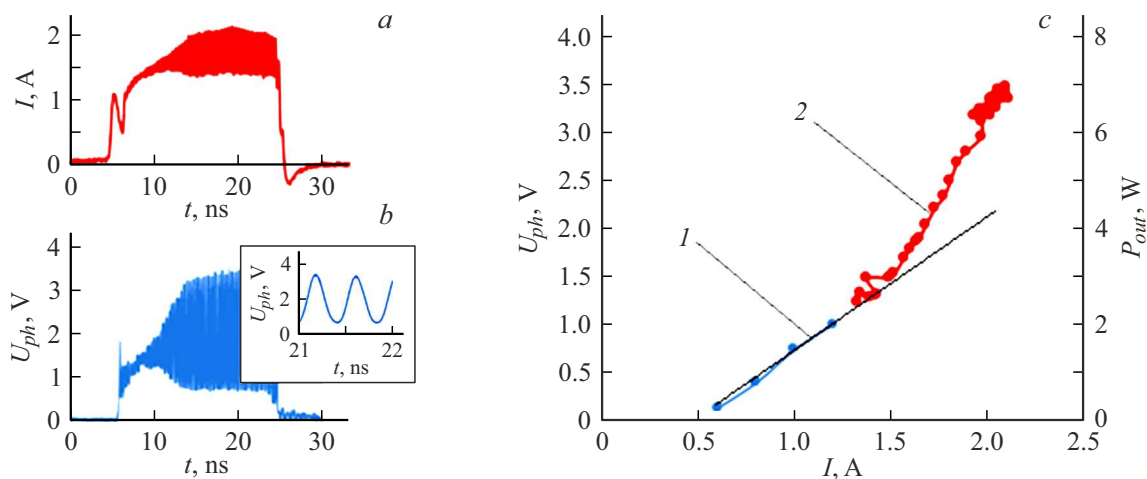


Рис. 3. Осциллограммы тока модуляции лазера (а) и фотоотклика GaAs $p-i-n$ -фотодиода (b) для квазистационарного тока 2.0 А, а также амплитудные и ватт-амперные калибровочная (1) и выходная высокочастотная (2) зависимости режима токовой модуляции TO-packaged SPLPL90_3 лазера (c). На вставке (часть b) колебания фотоотклика показаны в более крупном масштабе.

ток–напряжение на диоде (I , U_D) вместе с обратной ВАХ диода. При величине лавинного тока менее 1 А стационарные состояния на обратной ветви ВАХ устойчивы (синие точки на рис. 2, а). При увеличении тока выше этой величины спонтанно начинаются автоколебания. На плоскости (I , U_D) автоколебаниям отвечают красные отрезки (кривые 1–3 на рис. 2, а), наклон которых определяется нагрузочной линией. Автоколебания возникают в результате „мягкой“ неустойчивости стационарного состояния, как это показано на рис. 2, b на примере колебаний, отвечающих фазовой траектории 3 (рис. 2, а). Этой траектории отвечает неустойчивое стационарное состояние с током 2.5 А, которое отвечает пересечению неустойчивой части обратной ветви ВАХ и нагрузочной линии. Для краткости назовем это состояние „рабочей точкой“. Траекториям 1 и 2 на рис. 2, а отвечают рабочие токи 1.5 и 2 А соответственно. Ток через диод и лазер задавались амплитудой запускающего импульса U_1 и начальным обратным смещением диода U_2 . Как следует из рис. 2, а, амплитуда колебаний и соответственно глубина модуляции тока лазера возрастают при увеличении обратного напряжения. При дальнейшем увеличении напряжений U_1 и U_2 имели место случаи необратимой деградации диода.

На рис. 3, а, b осциллограмма тока модуляции лазера $I(t)$ показана вместе с откликом детектирующего фото диода $U_{ph}(t) = Ri(t)$ для импульса длительностью 20 ns. Достигнута глубокая высокочастотная модуляция лазерного излучения. Измерения были проведены в интервале значений U_1 и U_2 , отвечающих изменению стационарного (неустойчивого) лавинного тока через лазер от 1 до 2.5 А. Частота модуляции f_{PRF} и длительность сигнала на полувывоте амплитуды t_{FWHM} в этих режимах составляли 2.4 GHz и 180 ps соответственно. Отметим, что минимальная длительность сигнала t_{FWHM} , заявлен-

ная производителем применяемого лазера SPLPL90_3, составляет 1 ns.

В условиях фиксированного положения лазера, фокусирующих линз и фотоприемника были определены амплитудные и ватт-амперные зависимости для режимов импульсной (калибровочная зависимость 1) и периодической (выходная высокочастотная зависимость 2) токовой накачки лазера (рис. 3, c). Для оценки абсолютных значений импульсной мощности использовались относительные значения сигналов фотоотклика и паспортная ватт-амперная характеристика лазера SPLPL90_3. Пиковая мощность оптического сигнала P_{peak} при токе через лазер ~ 2.0 А составила ~ 5.5 W. Обнаружено заметное увеличение мощности излучения при высокочастотной токовой накачке. Это явление может быть связано с хорошо известным резонансным увеличением интенсивности лазерного излучения при частоте токовой накачки, близкой к частоте релаксационных колебаний в лазере [22].

В заключение обсудим полученные результаты в общем контексте исследований по формированию коротких лазерных импульсов с высокой частотой следования для систем связи, лидаров, радиофотоники [2–16]. Физические способы формирования коротких импульсов включают в себя метод синхронизации мод и модуляции добротности [3–7], метод прямой токовой модуляции короткими (наносекундными) импульсами тока (обычно в режиме gain-switching) [8–12]. Первые два метода позволяют получить в специально сконструированных лазерных структурах рекордно короткие импульсы (до $t_{FWHM} \sim 1$ ps) с высокой частотой повторения f_{PRF} (до 100 GHz), но относительно небольшой энергией импульса ($E \leq 0.1$ nJ) [3–7]. Для метода прямой токовой модуляции ключевую роль начинает играть импульсный полупроводниковый драйвер [8–12].

Сравнение основных параметров импульсов лазерного излучения для разных полупроводниковых драйверов, применяемых для прямой токовой модуляции

Тип формирователя импульсов	P_{peak} , W	t_{FWHM} , ns	f_{PRF} , GHz	E , nJ	M_{eff} , W
Si биполярные транзисторы [10]	43–180	0.8–1.9	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	82–144	$(0.8-3) \cdot 10^{-2}$
GaN HEMT-транзисторы [11]	30	0.5	0.1	15	~ 1
GaAs S-диод [12]	60	1.5	10^{-4}	90	$9 \cdot 10^{-3}$
GaAs/AlGaAs лазер-тиристор [13]	6	0.95	$1.3 \cdot 10^{-4}$	5.7	$7.4 \cdot 10^{-4}$
GaAs/AlGaAs лазер-тиристор [14]	22	0.11	10^{-4}	2.42	$2.4 \cdot 10^{-4}$
GaAs/AlGaAs лазер-тиристор [15]	39.5	0.12	10^{-4}	4.74	$1.1 \cdot 10^{-3}$
„Gain-switching“ лазер с насыщающимся поглотителем [16]	35	0.08	10^{-4}	2.8	$3.2 \cdot 10^{-3}$
GaAs лавинный диод (наст. раб.)	5.5*	0.18*	2.4*	~ 1	2.4*

*Для интервала длительности цуга квазигармонических импульсов ≤ 200 ns.

В качестве драйвера исследовались кремниевые биполярные транзисторы [8,10], GaN HEMT-транзисторы (HEMT — high electron mobility transistor) [11], GaAs S-диоды [12]. Также были созданы GaAs/AlGaAs лазеры-тиристоры [13–15], объединяющие драйвер и оптический излучатель в одном кристалле. Основные параметры импульсов из работ по прямой токовой модуляции [10–15] приведены в таблице. В таблицу включены также результаты работы [16], комбинирующей прямую токовую модуляцию коротким импульсом и метод модуляции добротности. Для оценки эффективности используется параметр $M_{eff} \equiv f_{PRF} P_{peak} t_{FWHM}$, характеризующий среднюю мощность модулируемого оптического сигнала. Из таблицы видно, что энергия импульса составляла $E \sim 10-100$ nJ при длительности импульса $0.1-2$ ns [10–16]. Такая мощность достаточна для применения в лидарах [16], причем меньшая длительность импульса t_{FWHM} на практике и не требуется в силу ограниченного быстродействия $p-i-n$ -диола — детектора излучения. Частота повторения ограничена значением ~ 100 kHz для всех перечисленных драйверов [8,10,12–16], за исключением GaN HEMT-транзисторов [9,11], для которых частота следования составляет 100 MHz. Именно для GaN HEMT-транзисторов достигнуто наибольшее значение параметра модуляционной эффективности $M_{eff} \sim 1$ W. Для всех известных типов драйверов для прямой токовой модуляции [8,10,16] и лазеров-тиристоров [13–15] увеличение частоты повторения является сложной задачей. Для всех методов имеет место высокая скважность последовательности импульсов $t_{FWHM} \ll (f_{PRF})^{-1}$.

Высокочастотная модуляция, реализованная в настоящей работе, напротив, отвечает предельному случаю низкой скважности импульсов $t_{FWHM} \approx (f_{PRF})^{-1}$. Пиковая мощность в импульсе $P_{peak} = 5.5$ W и энергия импульса $E = 1$ nJ несколько меньше, но сравнима с результатами работ [8–16]. Полуширина импульса $t_{FWHM} \approx 0.18$ ns лежит в том же субнаносекундном диапазоне, но частота повторения импульсов f_{PRF} на порядки больше. За счет этого параметр модуляцион-

ной эффективности достигает значения $M_{eff} = 2.4$ W. Однако полученный здесь периодический оптический сигнал квазигармонической формы (рис. 3) не вполне корректно непосредственно сравнивать с импульсными периодическими сигналами с высокой скважностью, реализованными в работах [10–16] с помощью импульсных, а не частотных драйверов.

Полученные предложенным здесь способом наносекундные цуги квазигармонических импульсов в сочетании с детектором, настроенным на „несущую“ гигагерцевую частоту, могут быть применены для задач лазерной дальнометрии и локации, а также для реализации амплитудной, фазовой и частотной модуляции в комбинированных линиях связи „радио-по-волокну“. Однородность автоколебаний по площади диода [17] в принципе дает возможность уменьшить последовательную нагрузку и увеличить диапазон токовой модуляции путем увеличения площади диода. Возможно также применение более высокочастотных лавинных диодов [17]. Отметим также, что работающий в режиме самовозбуждения лавинных автоколебаний диод, как и S-диоды [12], допускает малоиндуктивную сборку вместе с полупроводниковым лазером, что дает возможность исключить полосковую линию в практических применениях.

Таким образом, нами показана возможность токовой модуляции полупроводникового лазера на частоте 2.4 GHz лавинным GaAs-диодом, работающим в режиме самовозбуждения автоколебаний, в простейшей схеме последовательного подключения лазера и диода. Полученные результаты представляют потенциальный интерес для радиофотоники.

Благодарности

Авторы признательны Г.С. Соколовскому за полезные обсуждения и советы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E.U. Rafailov, E. Avrutin, in *Semiconductor lasers*, ed. by A. Baranov, E. Tournie (Woodhead Publ., Oxford, 2013), p. 149. DOI: 10.1533/9780857096401.1.149
- [2] N.H. Zhu, Z. Shi, Z.K. Zhang, Y.M. Zhen, C.W. Zou, Z.P. Zhao, Y. Liu, W. Li, M. Li, *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, **24** (1), 1500219 (2018). DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2720959
- [3] A.G. Deryagin, D.V. Kuksenkov, V.I. Kuchinskii, E.L. Portnoi, I.Yu. Khrushchev, *Electron. Lett.*, **30** (4), 309 (1994). DOI: 10.1049/el:19940238
- [4] X. Li, H. Wang, Z. Qiao, X. Guo, W. Wang, G.I. Ng, Yu. Zhang, Y. Xu, Z. Niu, C. Tong, C. Liu, *Opt. Express*, **26** (7), 8289 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.008289
- [5] R. Morita, T. Inoue, M.De Zoysa, K. Ishizaki, S. Noda, *Nat. Photon.*, **15**, 311 (2021). DOI: 10.1038/s41566-021-00771-5
- [6] H. Wang, L. Kong, A. Forrest, D. Bajek, S.E. Haggett, X. Wang, B. Cui, J. Pan, Y. Ding, M.A. Catalung, *Opt. Express*, **21** (22), 25940 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.025940
- [7] И.М. Гаджиев, М.С. Буяло, А.С. Паюсов, А.Е. Губенко, С.С. Михрин, В.Н. Неведомский, Е.Л. Портной, *Письма в ЖТФ*, **44** (21), 30 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.21.46853.17440 [I.M. Gadzhiyev, M.S. Buyalo, A.S. Payusov, A.E. Gubenko, S.S. Mikhrin, V.N. Nevedomsky, E.L. Portnoi, *Tech. Phys. Lett.*, **44** (11), 965 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018110068].
- [8] M. Hintikka, J. Kostamovaara, *IEEE Sens. J.*, **18** (3), 1047 (2018). DOI: 10.1109/JSEN.2017.2777501
- [9] В.М. Андреев, Д.Ф. Зайцев, Н.Ю. Новиков, В.С. Калининский, Д.В. Мордасов, С.О. Слипченко, И.С. Тарасов, А.И. Фадеев, *Радиотехника*, **80** (11), 177 (2016).
- [10] S. Vainshtein, V. Zemlyakov, V. Egorkin, A. Maslevtsov, A. Filimonov, *IEEE Trans. Power Electron.*, **34** (4), 3689 (2019). DOI: 10.1109/TPEL.2018.2853563
- [11] A. Liero, A. Klehr, S. Schwertfeger, T. Hoffmann, W. Heinrich, in *2010 Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.* (Anaheim, CA, 2010), p. 1110. DOI: 10.1109/MWSYM.2010.5517952
- [12] S. Vainshtein, I. Prudaev, G. Duan, T. Rahkonen, *Solid State Commun.*, **365** (7), 115111 (2023). DOI: 10.1016/j.ssc.2023.115111
- [13] S.O. Slipchenko, A.A. Podoskin, V.S. Golovin, D.N. Romanovich, V.V. Shamakhov, D.N. Nikolaev, I.S. Shashkin, N.A. Pikhtin, T.A. Bagaev, M.A. Ladugin, A.A. Marmalyuk, V.A. Simakov, *Opt., Express*, **27** (22), 31446 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.031446
- [14] А.А. Подоскин, И.В. Шушканов, В.В. Шамахов, А.Э. Ризаев, М.И. Кондратов, А.А. Климов, С.В. Зазулин, С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, *Квантовая электроника*, **53** (1), 1 (2023). [A.A. Podoskin, I.V. Shushkanov, V.V. Shamakhov, A.E. Rizaev, M.I. Kondratov, A.A. Klimov, S.V. Zazulin, S.O. Slipchenko, N.A. Pikhtin, *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **50** (Suppl. 5), S513 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623170104].
- [15] S. Slipchenko, A. Podoskin, I. Shushkanov, A. Rizaev, M. Kondratov, V. Shamakhov, V. Kapitonov, K. Bakhvalov, A. Grishin, T. Bagaev, M.A. Ladugin, A. Marmalyuk, V. Simakov, N. Pikhtin, *Photonics*, **12**, 130 (2025). DOI: 10.3390/photonics12020130
- [16] B. Rvkin, E. Avrutin, J. Kostamovaara, *J. Semicond. Sci. Technol.*, **32**, 025015 (2017). DOI: 10.1088/1361-6641/32/2/025015
- [17] А.В. Рожков, М.С. Иванов, П.Б. Родин, *Письма в ЖТФ*, **50** (20), 44 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.20.58938.19977 [A.V. Rozhkov, M.S. Ivanov, P.B. Rodin, *Tech. Phys. Lett.*, **50** (10), 91 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.10.60124.19977].
- [18] С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, С.Н. Цыранов, *ФТП* **47** (5), 658 (2013). [S.K. Lyubutin, S.N. Rukin, B.G. Slovikovsky, S.N. Tsyranov, *Semiconductors*, **47** (5), 670 (2013). DOI: 10.1134/S1063782613050151].
- [19] А.С. Тегер, *УФН*, **90** (12), 631 (1966). DOI: 10.3367/UFN.0090.196612d.0631 [A.S. Tager, *Sov. Phys. Usp.*, **9** (6), 892 (1967). DOI: 10.1070/PU1967v009n06ABEH003231].
- [20] А.В. Рожков, М.С. Иванов, П.Б. Родин, *Письма в ЖТФ*, **48** (16), 25 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.16.53203.19271 [A.V. Rozhkov, M.S. Ivanov, P.B. Rodin, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (8), 61 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.08.55065.19271].
- [21] В.И. Корольков, А.В. Рожков, Л.А. Петропавловская, *Письма в ЖТФ*, **27** (17), 46 (2001). [V.I. Korol'kov, A.V. Rozhkov, L.A. Petropavlovskaya, *Tech. Phys. Lett.*, **27** (9), 731 (2001). DOI: 10.1134/1.1405242].
- [22] А.Е. Жуков, М.В. Максимов, *Современные инжекционные лазеры* (Изд-во Политехн. ун-та, СПб., 2009).