Разработка конструкции гетероструктуры полупроводникового затвора с объемной активной областью для модуляторов интенсивности лазерного излучения, работающих в спектральном диапазоне 1520–1650 нм

© С.О. Слипченко[1], И.С. Шашкин[1], А.Е. Гришин[1], А.А. Подоскин[1], М.И. Кондратов[1], А.Э. Ризаев[1], И.А. Козлов[2], Ф.В. Скляров[2], Н.А. Пихтин[1]

[1] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия
[2] Концерн ≪ЦНИИ „Электроприбор“≫, 197046 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: serghpl@mail.ru

Поступила в Редакцию 24 июня 2026 г.
В окончательной редакции 13 июля 2026 г.
Принята к публикации 21 июля 2026 г.

В рамках одномерного численного моделирования определены области оптимальных значений параметров конструкции гетероструктуры с объемной активной областью на основе тройного твердого раствора InGaAs и чипа модулятора, который используется в качестве полупроводникового оптического затвора. Проведен многопараметрический поиск допустимых наборов параметров (длина модулятора, ширина активного элемента, фактор оптического ограничения в активной области и ее толщина), при которых чип оптического затвора может обеспечивать требуемые значения коэффициента экстинкции и малосигнального усиления. Установлено, что значения коэффициента экстинкции и малосигнального усиления сильно растут при повышении фактора оптического ограничения в активной области, однако оптимальный набор параметров следует выбирать, проводя глобальный поиск. Показано, что увеличение фактора оптического ограничения в активной области до 12% обеспечивает требуемые характеристики оптического затвора при коротких длинах модулятора (1200 мкм) и толщине активной области 80 нм.

Ключевые слова: полупроводниковый оптический затвор, малосигнальное усиление, коэффициент экстинкции, численное моделирование, объемная активная область InGaAs.

DOI: 10.61011/FTP.2026.04.63697.10275

1. Введение

Модуляторы интенсивности лазерного излучения на основе полупроводниковых гетероструктур, обеспечивающие возможность как изменения интенсивности оптического сигнала, так и его усиления, востребованы для широкого спектра практических приложений, что связано с их компактностью, высокой эффективностью и возможностью интеграции. Например, в системах мультиплексирования по длинам волн востребовано решение задачи добавления новых оптических каналов в общий поток и извлечения сигналов из потока [1,2], которая может быть решена с помощью массивов оптических затворов, обеспечивающих высокий коэффициент экстинкции модулятора (интегральная характеристика extinction ratio, определяемая как отношение оптической мощности на выходе в открытом состоянии к мощности в закрытом состоянии) для широкого диапазона длин волн, например, 1520–1650 нм. Другим важным приложением являются дальномеры и лидарные системы для автономных транспортных средств. Использование такого типа модуляторов позволяет реализовать гетеродинный принцип детектирования за счет применения спектрально стабилизированного источника лазерного излучения с узкой линией генерации [3]. Отдельно можно выделить системы передачи информации в свободном пространстве, где требуются модуляторы с высоким коэффициентом экстинкции между включенным и выключенным состояниями для повышения отношения сигнал–шум [4]. В последние годы активно развивается направление, связанное с разработкой оптических логических схем, в том числе построенных на активных компонентах, например оптический усилитель-модулятор лазерного излучения, за счет реализации возможности быстрого переключения между двумя состояниями с высоким коэффициентом экстинкции [5].

Кроме этого в подобных приложениях важно обеспечить как сохранение поляризации, так и сделать систему поляризационно-нечувствительной [6]. Одним из подходов, решающих проблему поляризационной нечувствительности, является использование гетероструктуры с объемной активной областью [7]. Если говорить о количественных характеристиках, то желаемые значения коэффициентов динамической амплитудной экстинкции между включенным и выключенным состояниями (для формирования оптического импульса) должны превышать 40 дБ, при этом и малосигнальное усиление должно быть ≥ 5 дБ. В этом случае актуальной является за-

дача поиска оптимальной конструкции гетероструктуры, обеспечивающей оптимальные рабочие характеристики: максимальное усиление, максимальный коэффициент экстинкции, низкий рабочий ток накачки модулятора. Поиск оптимальных характеристик структуры и чипа модулятора целесообразно проводить в рамках численного моделирования [8].

В рамках настоящей работы проведен поиск оптимальных характеристик полупроводникового оптического модулятора с гетероструктурой на основе объемной активной области InGaAs с помощью численной модели, включающей систему трех стационарных уравнений вдоль распространения света в модуляторе [9]: уравнения для концентрации носителей заряда и двух уравнений для концентраций фотонов, распространяющихся навстречу друг другу.

2. Описание модели

Модель полупроводникового оптического модулятора описана в работе [9] и включает систему трех стационарных уравнений:

$$\frac{dn}{dt} = 0 = \frac{I}{qV} - (An + R_{\text{sp}} + Cn^3) - \frac{R_{\text{st}}}{1 + \varepsilon S_\Sigma},$$

$$\frac{dS_+}{dz} = \left(\frac{\Gamma g}{1 + \varepsilon S_\Sigma} - \alpha_1\right) S_+ + \frac{1}{2v_g}\Gamma\beta_{\text{sp}} r_{\text{sp}},$$

$$-\frac{dS_-}{dz} = \left(\frac{\Gamma g}{1 + \varepsilon S_\Sigma} - \alpha_1\right) S_- + \frac{1}{2v_g}\Gamma\beta_{\text{sp}} r_{\text{sp}}$$

с граничными условиями:

$$S_+(0) = S_0 + R_1 S_-(0),$$

$$S_-(L) = R_2 S_+(L),$$

где n — концентрация носителей заряда, S_+ — концентрация фотонов, распространяющихся вправо от зеркала с коэффициентом отражения R_1 и координатой $z = 0$ к зеркалу с коэффициентом отражения R_2 и координатой $z = L$, S_- — концентрация фотонов, распространяющихся влево от зеркала с коэффициентом отражения R_2 и координатой $z = L$ к зеркалу с коэффициентом отражения R_1 и координатой $z = 0$, S_0 — источник поступающей в модулятор концентрации фотонов (координата источника $z = 0$), определяемой через уровень входной оптической мощности, S_Σ — суммарная концентрация фотонов $(S_+ + S_-)$, I — ток, протекающий через модулятор, q — элементарный заряд, L — длина модулятора, w — ширина активного элемента, d — толщина активного элемента, толщина объемной активной области, V — объем активной области, равный произведению трех параметров: длины модулятора L, ширины активного элемента w, общей толщины активного элемента d, n_{gr} — групповой показатель преломления в волноводе модулятора, v_{gr} — групповая скорость, ε — фактор компрессии усиления, Γ — фактор оптического ограничения в активной области, α_i — внутренние оптические потери, A — коэффициент безызлучательной рекомбинации Шокли–Рида–Холла, B — коэффициент излучательной рекомбинации, C — коэффициент безызлучательной оже-рекомбинации. Скорость спонтанной рекомбинации R_{sp} определялась через произведение коэффициента излучательной рекомбинации B на квадрат концентрации носителей заряда, а скорость стимулированной рекомбинации R_{st} — через произведение групповой скорости v_{gr} на материальное усиление g и суммарную концентрацию фотонов S_Σ. В рамках рассматриваемой модели внутренние оптические потери приняты $\alpha_i = 4\,\text{см}^{-1}$, коэффициенты отражения R_1 и R_2 — 0 и 0.001 соответственно. Предположено, что затвор работает на фиксированной длине волны, поэтому спектральная неравномерность усиления, которая могла бы проявиться при входном широкополосном сигнале, в рамках модели не учитывается.

Материальное усиление g определяется из трехпараметрической модели усиления [10]:

$$g(n) = g_0 \cdot \log\big((n + N_s)/(N_{\text{tr}} + N_s)\big),$$

где N_{tr} — концентрация прозрачности, $N_{\text{tr}} = 1.1 \cdot 10^{18}\,\text{см}^{-3}$ для объемной активной области [10], g_0 — материальное усиление в случае, когда концентрация носителей заряда n равна концентрации прозрачности N_{tr}, $g_0 = 3000\,\text{см}^{-1}$ [10], N_s — параметр для случая, когда концентрация носителей заряда n равна нулю, обеспечивающий равенство усиления поглощения из-за переходов зона–зона, $N_s = 5 \cdot 10^{18}\,\text{см}^{-3}$ [10].

3. Обсуждение результатов

С использованием описанной модели проводились многопараметрические расчеты коэффициента экстинкции (ER) как отношения выходных оптических мощностей при изменении тока накачки от заданного уровня (в настоящей работе 250 мА) до 0 мА, что соответствует переходу из открытого в закрытое состояние при фиксированном значении мощности входного сигнала 1 мВт. Малосигнальное усиление ($Gain$) определялось при заданном уровне тока накачки (в настоящей работе 250 мА) при входной мощности 0.001 мВт из сравнения оптической мощности на выходе к мощности на входе в модулятор.

Поиск допустимого набора параметров (длина модулятора L, ширина активного элемента w, толщина активной области d, фактор оптического ограничения в активной области (Г-фактор)), характеризующих конструкцию чипа оптического затвора, проводился для условия, при котором коэффициент экстинкции ER окажется не меньше 40 дБ (10 000 раз), а малосигнальное усиление $Gain$ превысит 5 дБ. Для этого многопараметрические расчеты ER и малосигнального усиления $Gain$ проводились для следующих допустимых диапазонов

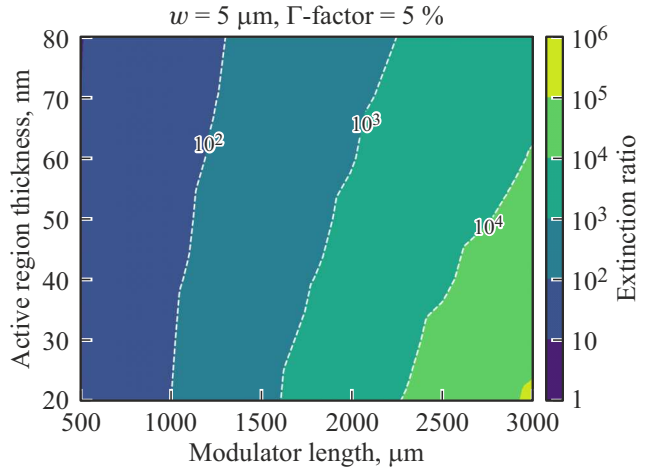


Рис. 1. Коэффициент экстинкции в зависимости от параметров d и L при $w = 5$ мкм, $\Gamma = 5\,\%$.

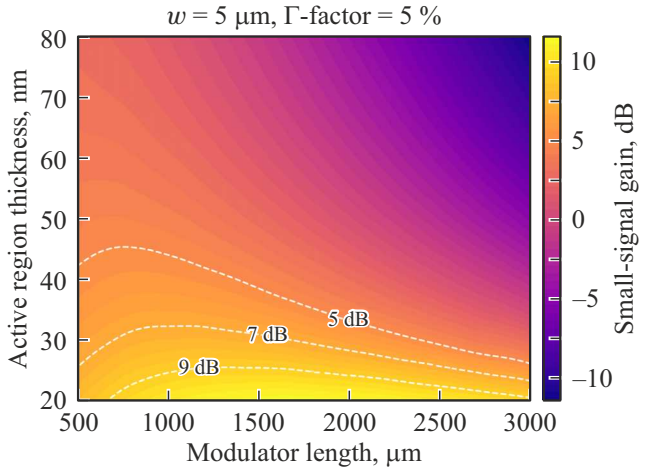


Рис. 2. Малосигнальное усиление в зависимости от параметров d и L при $w = 5$ мкм, $\Gamma = 5\,\%$.

изменения параметров: длина модулятора L в диапазоне от 500 до 3000 мкм, ширина активного элемента w в диапазоне от 1.5 до 8 мкм, толщина активной области d в диапазоне от 20 до 80 нм и фактор оптического ограничения в активной области (Г-фактор) в диапазоне от 5 до 15 %. Диапазоны параметров выбраны по технологическим соображениям как допустимые при практической реализации разрабатываемых конструкций гетероструктур и чипов. Характерные результаты представлены на рис. 1–6.

Рассмотрим характерные карты значений коэффициента экстинкции (ER) и малосигнального усиления ($Gain$). На рис. 1 и 2 приведены зависимости коэффициента экстинкции (рис. 1) и малосигнального усиления (рис. 2) от длины модулятора и толщины активной области при фиксированных значениях фактора оптического ограничения в активной области и ширины активного элемента: Г-фактор = 5 %, $w = 5$ мкм.

На карте ER (рис. 1) видно, что ER уменьшается с увеличением d при фиксированной L, при этом скорость снижения ER с увеличением d тем выше, чем длиннее модулятор. Резкий рост коэффициента экстинкции ER с увеличением длины модулятора связан с тем, что более длинный чип в выключенном состоянии ($I = 0$) сильнее поглощает свет, а во включенном состоянии ($I = 250$ мА) обеспечивает большее усиление. На карте рис. 2 видно, что $Gain$ уменьшается с увеличением d при фиксированной L, при этом скорость снижения $Gain$ с увеличением d тем выше, чем длиннее модулятор. Также видно, что максимум малосигнального усиления $Gain$ достигается при определенной длине модулятора из-за особенности профиля концентрации носителей заряда n, возникающей вдоль модулятора при накачке. Таким образом, общая закономерность влияния толщины активной области выражается в следующем: чем толще активная область, тем меньше плотность тока при фиксированном значении тока накачки (250 мА), а значит, и ниже концентрация носителей в активной области, которая отвечает за усиление. Дизайны с меньшей толщиной активной области обеспечивают более высокую плотность тока и, как следствие, более высокие значения ER и $Gain$. Например, если Г-фактор составит 5 %, то при ширине активного элемента 5 мкм условие „$ER > 10\,000$ и $Gain > 5$ дБ“ выполнится только при толщине активной области с $d < 35$ нм и длине модулятора $L > 2200$ мкм. Кратко отметим, что толщина активной области сильно связана с фактором оптического ограничения моды в активной области (Г-фактором), который не может принимать большие значения при малых значениях толщины активной области. Одновременно с этим преимущество конструкции модулятора с активной областью на основе объемного слоя состоит в том, что при ее использовании обеспечивается низкая величина поляризационной зависимости усиления благодаря возможности достижения очень высокого Г-фактора в активной области [11].

Как было показано выше, параметры кристалла, оказывающие влияние на плотность тока при фиксированном токе накачки, существенно влияют на ER и $Gain$. Поскольку плотность тока накачки модулятора растет с уменьшением объема активной области V, то чем уже активный элемент, тем больше плотность тока при одном и том же токе накачки (250 мА). Поэтому важно оценить, какое влияние на характеристики модулятора оказывает снижение ширины активного элемента. На рис. 3 и 4 показаны карты распределений ER и $Gain$, полученные для уменьшенной до 1.5 мкм ширины активного элемента.

Поскольку в случае $w = 1.5$ мкм имеет место более высокая плотность тока по сравнению с $w = 5$ мкм, то, как следствие, на картах ER и $Gain$ достигают более высоких значений в более широких диапазонах параметров L и d. Например, $ER > 10\,000$ может быть получена для конструкций, обладающих одновременно

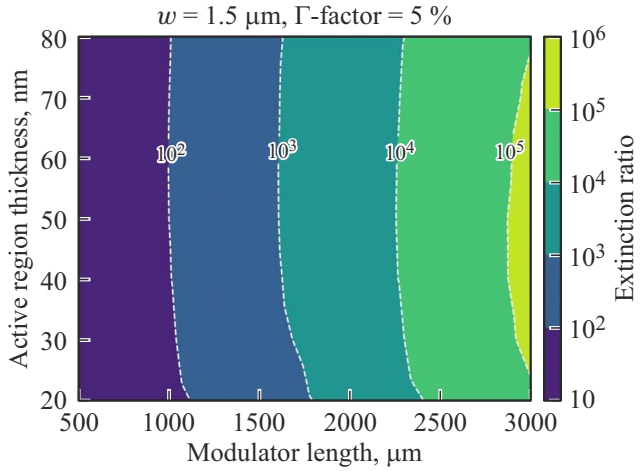


Рис. 3. Коэффициент экстинкции в зависимости от параметров d и L при $w = 1.5$ мкм, $\Gamma = 5\%$.

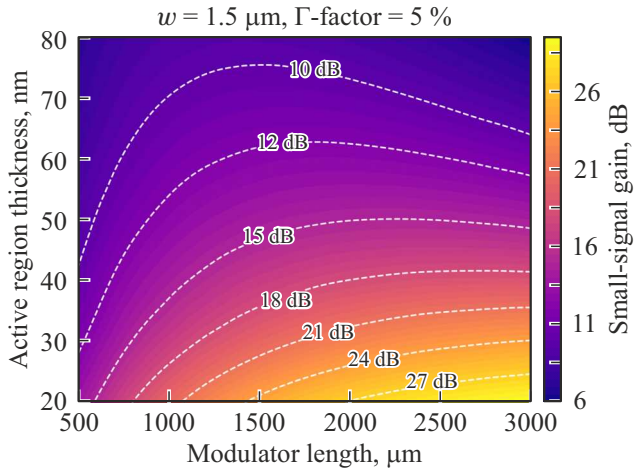


Рис. 4. Малосигнальное усиление в зависимости от параметров d и L при $w = 1.5$ мкм, $\Gamma = 5\%$.

всеми допустимыми значениями толщин активной области (20–80 нм) при длинах кристалла > 2500 мкм, чего не достигалось для ширины активной области 5 мкм, а условие $Gain > 5$ дБ выполняется для всей карты (рис. 4). Однако при выборе дизайна с узкой апертурой излучения необходимо иметь в виду существенно более высокие требования к точности системы юстировки при вводе излучения в оптическое волокно, невыполнение которых может привести к снижению эффективности системы, включающей такой модулятор, из-за возможных оптических потерь. Другой крайностью являются конструкции с широкой излучающей апертурой. Так, например, расширение апертуры активного элемента до 8 мкм при фиксированном Г-факторе 5% приводит к тому, что условие „$ER > 10\,000$ и $Gain > 5$ дБ“ не выполняется для длинных резонаторов и толстых активных областей. Важно отметить, что расширение активного элемента также может быть реализовано за счет растекания тока в латеральном направлении. Это говорит о недопустимости растекания тока, что может быть обеспечено за счет использования конструкции активного элемента с резким токовым ограничением.

Если обеспечить максимальный Г-фактор при минимальной толщине активной области, то может быть достигнуто максимальное усиление, что объясняется возможностью накопления большей концентрации носителей заряда в активной области и, как следствие, достигнуто большее материальное усиление. Например, если Г-фактор составит 7.5%, то при ширине активного элемента 5 мкм условие „$ER > 10\,000$ и $Gain > 5$ дБ“ выполнится при толщине активной области < 40 нм и длине модулятора от 2000 до 2500 мкм, а снижение толщины активной области до 30 нм позволяет расширить допустимый диапазон длин модулятора за счет использования более длинных кристаллов (до 3000 мкм). Видно, что повышение Г-фактора может существенно исправить ситуацию. Так, при ширине активного элемента 8 мкм и повышении Г-фактора с 5 до 7.5% условие „$ER > 10\,000$ и $Gain > 5$ дБ“ уже может быть выполнено, однако для этого толщина активной области должна быть снижена до 20 нм, а допустимые длины составляют от 2000 до 3000 мкм. Дальнейшее увеличение Г-фактора до 15% позволяет сместить конструкции в область более толстых активных областей и выполнить условие „$ER > 10\,000$ и $Gain > 5$ дБ“ при толщине активной области < 80 нм и длине модулятора от 1000 до 1500 мкм. При этом снижение толщины активной области позволяет сместить границу допустимой максимальной длины модулятора в область бóльших длин кристаллов: при толщине активной области < 70 нм допустимые длины модулятора лежат в диапазоне от 1000 до 2000 мкм, при толщине активной области < 60 нм — от 1000 до 2500 мкм, при толщине активной области < 50 нм — от 1000 до 3000 мкм. При ширине активного элемента 8 мкм и толщине активной области от 60 до 80 нм условие „$ER > 10\,000$ и $Gain > 5$ дБ“ выполняется только при длине модулятора 1000 мкм, что позволяет использовать конструкцию активного элемента с менее резким токовым ограничением при номинальной ширине активного элемента 5 мкм, допускающей растекание тока до 8 мкм.

Оптимальным Г-фактором с точки зрения технологии может быть значение 12%. На группе зависимостей коэффициента экстинкции (рис. 5) и малосигнального усиления (рис. 6) от длины модулятора и ширины активного элемента при фиксированных значениях фактора оптического ограничения в активной области и толщины активной области (Г-фактор = 12%, $d = 80$ нм) видно, что при длине модулятора 1200 мкм условие „$ER > 10\,000$ и $Gain > 5$ дБ“ выполнится для любой ширины активного элемента < 8 мкм, что позволяет, например, использовать конструкцию активного элемента с менее резким токовым ограничением при номинальной ширине активного элемента 5 мкм. Вместе с этим следует отметить, что в этом случае оптимум достигается

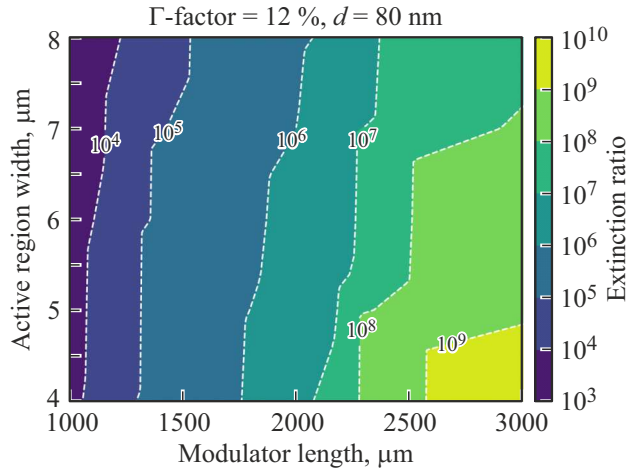


Рис. 5. Коэффициент экстинкции в зависимости от параметров w и L при $d = 80$ нм, $\Gamma = 12\,\%$.

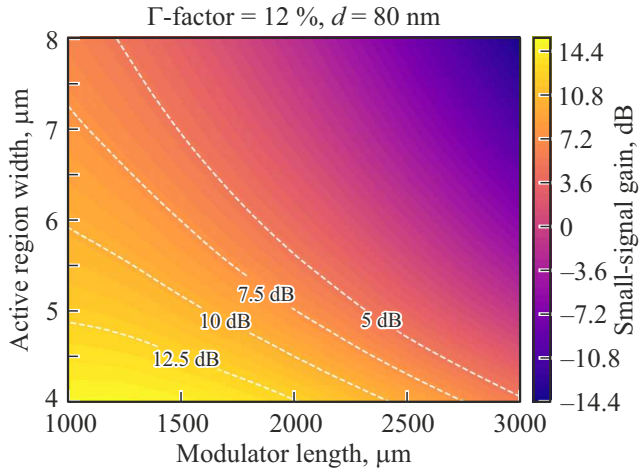


Рис. 6. Малосигнальное усиление в зависимости от параметров w и L при $d = 80$ нм, $\Gamma = 12\,\%$.

при короткой длине модулятора, что должно обеспечить пониженный шум-фактор.

4. Заключение

Показано, что описанные оптимизационные одномерные расчеты позволяют выбирать дизайны гетероструктур для создания полупроводникового оптического затвора с требуемыми характеристиками. Проведенные расчеты показали, что допустимые параметры кристаллов оптических модуляторов могут находиться в достаточно широких диапазонах значений, что позволяет реализовывать такие приборы, ориентируясь на имеющиеся конструкции гетероструктур и снижая требования к точности изготовления конструкций кристаллов. В общем случае повышение плотности тока во включенном состоянии за счет снижения ширины и длины активного элемента или уменьшения толщины активной области не всегда обеспечивает улучшение характеристик модулятора, поэтому численные оптимизационные расчеты необходимы для выбора оптимальных дизайнов. Для определения оптимальных значений толщины активной области и фактора оптического ограничения, связанных между собой, требуется проведение дополнительных исследований волноводных конструкций.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-91-00012).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] R. Zhang, J. Dong2, Zh. Feng, F. Zhou, H.L. Tian, H.Y. Shu, L. Zhao, J. Bian, W. Wang. Opt. Eng., **42** (3), 798 (2003). DOI: 10.1117/1.1539053
[2] A.R. Zali, M. Rombouts, S. Kleijn, L. Augustin, N. Calabretta. Opt. Express, **34** (12), 21765 (2026). DOI: 10.1364/OE.586629
[3] M. Labrecque, J. Campbell, K. McClune, J. Sherman, I. Kudryashov, J. Kotelnikov, A. Katsnelson, L. Johansson, M. Mashanovitch, P. Leisher, G. Morrison. In: *Laser Technology for Defense and Security XX*, Jun. 2025 (Orlando, Florida, USA) p. 5. DOI: 10.1117/12.3055046
[4] A. Maho, S. Lévêque, B. Benazet, F. Duport, F. Van Dijk, J. Edmunds, M. Welch, W. Dorward, A. Sancho, D. Mesquita, L. Stampoulidis, M. Sotom. In: *Int. Conf. on Space Optics — ICSO 2024*, Jul. 2025 (Juan-les-Pins, France) p. 170. DOI: 10.1117/12.3075210
[5] J. Cui, K.E. Zoiros, A. Kotb. Nanomaterials, **16** (3), 202 (2026). DOI: 10.3390/nano16030202
[6] T. Ito, N. Yoshimoto, K. Magari, K. Kishi, Y. Kondo. Electron. Lett., **33** (21), 1791 (1997). DOI: 10.1049/el:19971190
[7] S. Tanaka, S.H. Jeong, S. Yamazaki, S. Tomabechi, A. Uetake, M. Ekawa, K. Morito. In: *OFC/NFOEC 2008 Conf. on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conf.*, Feb. 2008 (San Diego, CA, USA) pp. 1–3. DOI: 10.1109/OFC.2008.4528685
[8] J. Piprek. *Handbook of Optoelectronic Device Modeling and Simulation* (Boca Raton, CRC Press, 2017).
[9] A. Totović, D. Gvozdić. *Traveling-Wave and Reflective Semiconductor Optical Amplifiers*. In: *Handbook of Optoelectronic Device Modeling and Simulation*, ed. by J. Piprek (Boca Raton, CRC Press, 2017) pp. 631–696.
[10] L.A. Coldren, S.W. Corzine, M.L. Mašanović. *Diode lasers and photonic integrated circuits* (John Wiley & Sons, 2012).
[11] M. Itoh, Y. Shibata, T. Kakitsuka, Y. Kadota, Y. Tohmori. IEEE Phot. Techn. Lett., **14** (6), 765 (2002). DOI: 10.1109/LPT.2002.1003086

Редактор Г.А. Оганесян

Development of a semiconductor optical gate heterostructure design with a bulk active region for laser intensity modulators operating in the 1520–1650 nm spectral range

S.O. Slipchenko[1], *I.S. Shashkin*[1], *A.E. Grishin*[1], *A.A. Podoskin*[1], *M.I. Kondratov*[1], *A.E. Rizaev*[1], *I.A. Kozlov*[2], *F.V. Sklyarov*[2], *N.A. Pikhtin*[1]

[1] Ioffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia
[2] State Research Center of the Russian Federation
Concern CSRI Elektropribor, JSC,
197046 St. Petersburg, Russia

Abstract Within the framework of one-dimensional numerical simulation, the regions of optimal design parameter values were determined for a heterostructure with a bulk active region based on an InGaAs ternary solid solution and a modulator chip used as a semiconductor optical gate. A multi-parameter search was performed for acceptable sets of parameters (modulator length, active element width, optical confinement factor in the active region, and its thickness) at which the optical gate chip can provide the required values of extinction ratio and small-signal gain. It was found that the extinction ratio and small-signal gain values increase significantly with an increase in the optical confinement factor in the active region; however, the optimal set of parameters should be identified by conducting a global search. It is shown that increasing the optical confinement factor in the active region up to 12% ensures the required optical gate characteristics at short modulator lengths (1200 μm) and an active region thickness of 80 nm.