

11

Сверхширокополосный фазовый модулятор на основе многомодового канального волновода на тонкопленочном ниобате лития

© М.В. Парфенов, А.В. Варламов, И.В. Ильичев, А.А. Усикова, Ю.М. Задиранов,
А.В. Тронеv, П.М. Агзузов, А.В. Шамрай

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

Поступило в Редакцию 1 августа 2024 г.

В окончательной редакции 18 декабря 2024 г.

Принято к публикации 18 декабря 2024 г.

Разработаны и изготовлены экспериментальные образцы интегрально-оптических фазовых СВЧ-модуляторов на тонкопленочном ниобате лития с использованием подхода, в рамках которого оптический волновод модулятора формируется с большей шириной, чем требуется для обеспечения его одномодового режима работы, а возникающие в волноводе высшие моды подавляются при помощи электродов модулятора, расположенных близко к волноводу. Измерены характеристики изготовленных образцов модуляторов, продемонстрировано соответствие между результатами прямого электрооптического измерения рабочей полосы частот модуляторов и ее теоретической оценкой на основе измерений S -параметров электродов. Продemonстрирована эффективная СВЧ-модуляция оптического излучения в полосе частот более 30 GHz при значении параметра $U_{\pi}L$ на уровне $4\text{ В} \cdot \text{см}$.

Ключевые слова: ниобат лития, оптические волноводы, тонкопленочный ниобат лития, модулятор, интегральная оптика, электроды бегущей волны.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.08.60159.20081

Использование волноводов с высокой числовой апертурой, т. е. волноводов с высоким контрастом показателя преломления, является одним из активно развивающихся направлений интегральной оптики [1–3]. В рамках материальной платформы ниобата лития, хорошо зарекомендовавшей себя для изготовления высокочастотных интегрально-оптических СВЧ-модуляторов [4,5], активно исследуются вопросы разработки волноводных модуляторов на основе тонких пленок ниобата лития (thin-film lithium niobate, TFLN) [1,6]. За счет использования высокого контраста показателя преломления поперечный размер оптической волноводной моды может быть значительно уменьшен с $\sim 10\text{ }\mu\text{м}$ [7] (для стандартных градиентных волноводов) до $\sim 1\text{--}2\text{ }\mu\text{м}$ [1] (для волноводов на основе TFLN) на телекоммуникационной длине волны $\lambda = 1.55\text{ }\mu\text{м}$. Сильная локализация света позволяет существенно уменьшить межэлектродный зазор модулятора и за счет этого сократить длину электродов бегущей волны без увеличения управляющего напряжения. В свою очередь сокращение длины электродов снижает требования к согласованию скоростей оптической и СВЧ-волн и тем самым расширяет полосу частот модуляции и позволяет модуляторам на основе TFLN работать в полосе частот вплоть до 100 GHz и выше [1].

Однако одним из существенных препятствий для развития интегрально-оптических устройств на основе волноводов с высокой числовой апертурой, в частности модуляторов на основе TFLN, являются высокие

требования к точности литографии, используемой для их изготовления [7–9]. Для обеспечения одномодовости волноводов в таких устройствах на длине волны $\lambda = 1.55\text{ }\mu\text{м}$ требуются их поперечные размеры на уровне $\leq 1\text{ }\mu\text{м}$ [10], для таких размеров элементов топологии становится недостаточным разрешение стандартной контактной фотолитографии, используемой для изготовления волноводных устройств на объемных подложках ниобата лития. В связи с этим актуален поиск подхода, при помощи которого можно изготавливать волноводные устройства на основе TFLN, не прибегая к более сложной литографической технологии. По данному направлению авторами ранее было предложено решение, в рамках которого волновод формировался с шириной, пригодной для изготовления с помощью стандартной контактной фотолитографии, однако большей, чем требуется для достижения одномодового режима распространения оптического излучения. Авторами было показано [11], что такой изначально многомодовый волновод в модуляторе может использоваться как квазиодномодовый (с точки зрения подавления высших мод и нежелательной межмодовой интерференции на выходе волновода), если металлические электроды модулятора близко придвинуты к краям гребня волновода. При этом, как было ранее показано [11], за счет различия в степени локализации интенсивности оптических мод в тонкой пленке ниобата лития (рис. 1) менее локализованные высшие моды на порядки сильнее поглощаются металлом расположенных на пленке электродов и благодаря

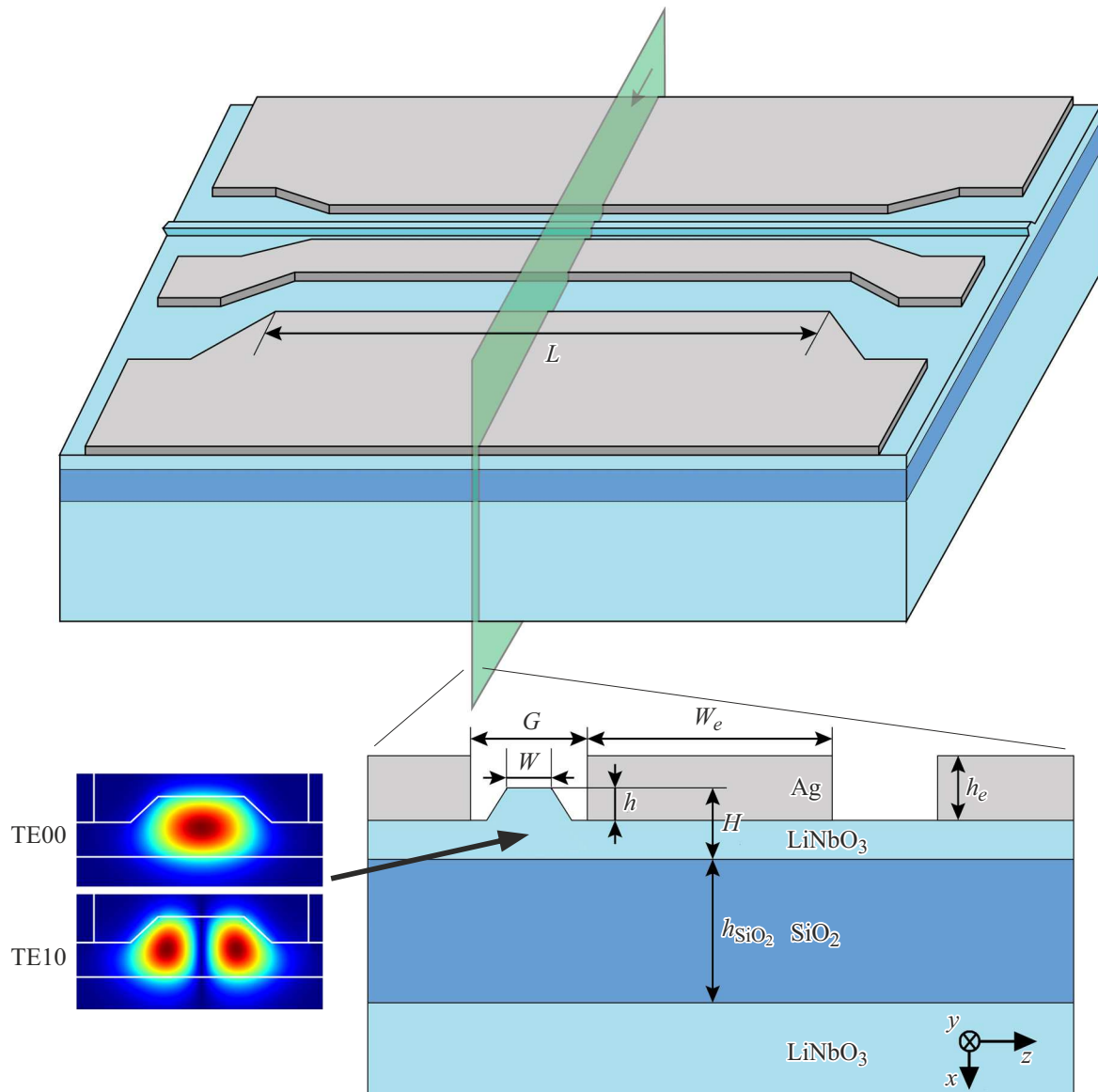


Рис. 1. Конфигурация СВЧ-модулятора. Оптический волновод образован травленным гребнем в тонкой пленке ниобата лития ($W = 2 \mu\text{m}$, $h = 300 \text{ nm}$, $H = 700 \text{ nm}$, $h_{\text{SiO}_2} = 2 \mu\text{m}$, $h_e = 2 \mu\text{m}$, $G = 5 \mu\text{m}$, $W_e = 10 \mu\text{m}$, $L = 10$ и 4.9 mm). На графических вставках приведены распределения абсолютного значения электрического поля фундаментальной (TE_{00}) и первой высшей (TE_{10}) мод оптического волновода.

этому происходит эффективное подавление высших мод. Однако СВЧ-модуляция в таком модуляторе еще не была продемонстрирована. Настоящая работа ставила целью исследовать возможность изготовления на основе выбранного подхода эффективного интегрально-оптического СВЧ-модулятора с топологией, адаптированной под разрешение стандартной контактной фотолитографии.

За основу для СВЧ-топологии разрабатываемого модулятора были взяты конфигурация оптического волновода, а также размер межэлектродного зазора ($5 \mu\text{m}$), использовавшиеся ранее в его низкочастотном прототипе [11]. Оптический волновод изготавливался на основе гребня шириной $W = 2 \mu\text{m}$, сформированного

травлением тонкой пленки ниобата лития толщины $H = 700 \text{ nm}$ на глубину $h = 300 \text{ nm}$ (рис. 1). Между пленкой монокристаллического ниобата лития и подложкой находится диэлектрический буферный слой из диоксида кремния толщиной $h_{\text{SiO}_2} = 2 \mu\text{m}$, обеспечивающий высокий контраст показателя преломления и локализацию света в области вытравленного гребня без утечек в подложку. Использовался TFLN в ориентации x -среза, когда кристаллографическая ось x монокристаллической пленки перпендикулярна ее поверхности. В данной ориентации для модуляции предполагалось использовать горизонтально поляризованную ТЕ-моду оптического волновода, для которой наиболее выражен эффект Поккельса (электрооптический коэффици-

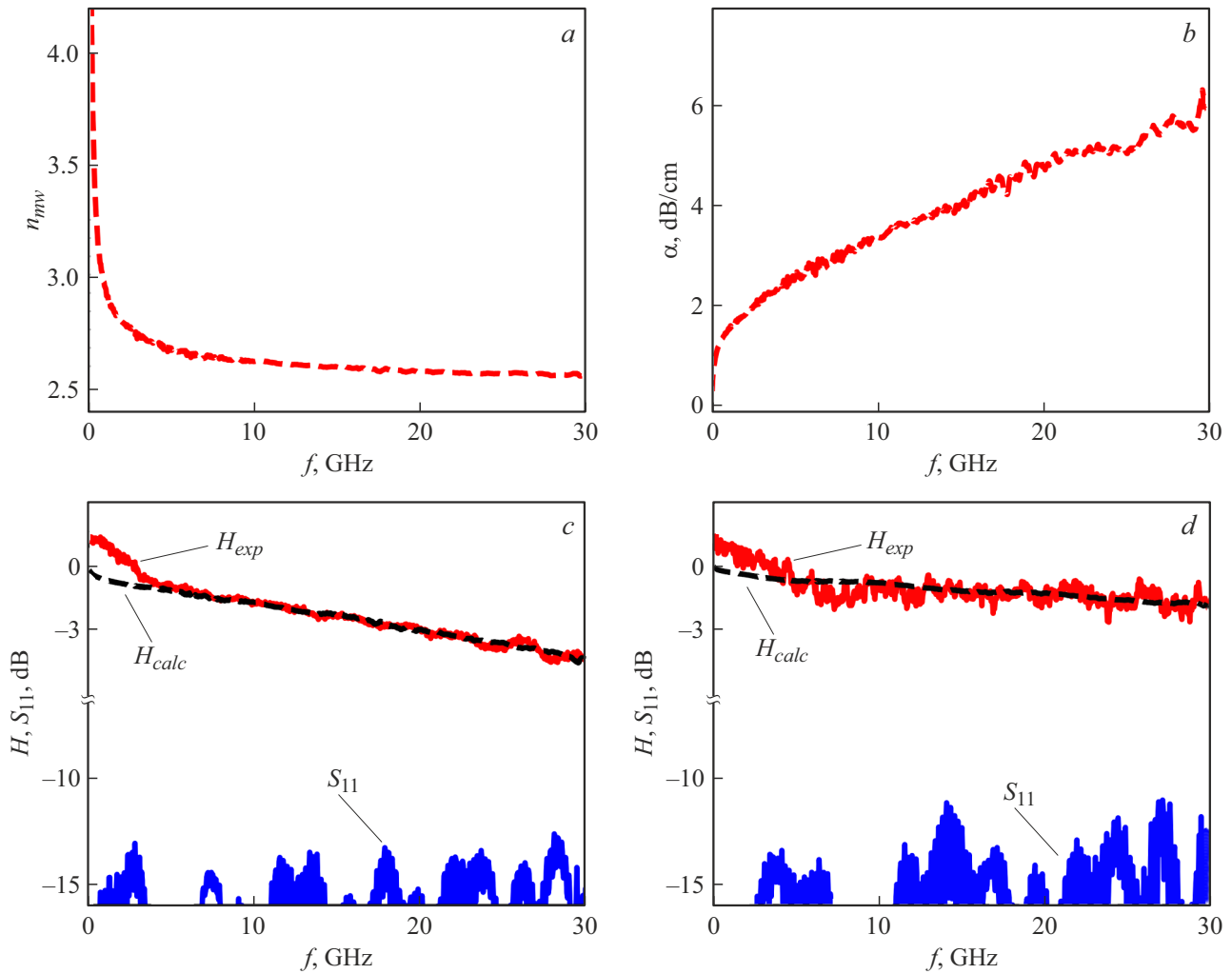


Рис. 2. Частотные характеристики изготовленных модуляторов. *a* — эффективный показатель СВЧ-волны (n_{mw}), *b* — погонные потери СВЧ-волны (α), *c*, *d* — электрооптический отклик (H_{calc} — рассчитанный на основе погонных параметров СВЧ-волны, H_{exp} — измеренный экспериментально) и уровень обратных отражений (S_{11} -параметр) модуляторов длиной $L = 10$ и 4.9 mm соответственно.

ент составляет $r_{33} \approx 30$ pm/V) [1]. Для изготовления модулятора в такой конфигурации была использована коммерческая подложка тонкопленочного ниобата лития фирмы NanoLN. Травление волноводов производилось в установке ионно-лучевого травления NQII CAIBE (Intelvac) коллимированными ионами аргона через маску из фоторезиста.

Для обеспечения электрооптической модуляции вдоль оптического волновода были сформированы СВЧ-электроды бегущей волны копланарной конфигурации (рис. 1). Они были изготовлены по гальваническому процессу из серебра толщиной $h_e = 2 \mu\text{m}$ с межэлектродным зазором $G = 5 \mu\text{m}$ и шириной центральной полоска $W_e = 10 \mu\text{m}$. Для ввода СВЧ-излучения в начале и в конце копланарных электродов были сформированы площадки для стыковки исследуемого модулятора с электрическими зондами.

По данной конфигурации были изготовлены экспериментальные образцы модуляторов двух длин: $L = 10$ и 4.9 mm. При помощи электрических зондов были измерены S -параметры электродов, а затем матричными методами из данных результатов для образцов модуляторов двух длин извлечены частотные зависимости погонных потерь α и эффективного показателя преломления n_{mw} [12] (рис. 2, *a*, *b*). На их основе была сделана оценка электрооптического отклика изготовленных модуляторов, которая определялась с помощью известной формулы [13]:

$$H_{calc}(f) = \sqrt{(1 - k(f)) \frac{1 - 2e^{-\alpha(f)L} \cos(\xi(f)L) + e^{-2\alpha(f)L}}{(\alpha(f)L)^2 + (\xi(f)L)^2}}, \quad (1)$$

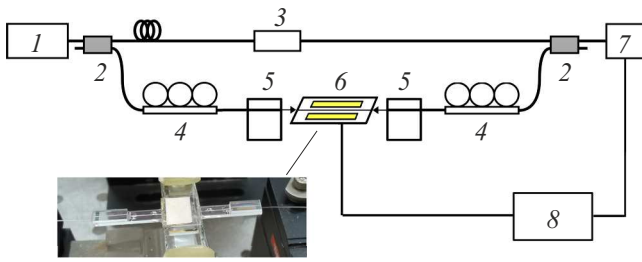


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для измерения характеристик изготовленных образцов модуляторов (1 — лазер, 2 — волоконный разветвитель, 3 — аттенуатор, 4 — контроллер поляризации, 5 — пьезоподвижка, 6 — модулятор, 7 — фотоприемник, 8 — векторный анализатор). На вставке приведена фотография изготовленного чипа, состыкованного с оптическими волокнами.

где

$$\xi = \frac{2\pi f |n_{opt} - n_{mw}|}{c},$$

c — скорость света в вакууме, f — частота модуляции, α — погонные потери копланарного волновода, L — длина участка электрооптического взаимодействия, k — коэффициент отражения от входа модулятора, ξ — параметр, определяющий рассогласование в распространении СВЧ-волны и оптической волны с показателями преломления n_{mw} и n_{opt} соответственно. При этом за n_{opt} принят групповой показатель преломления, который был определен из зависимости эффективного показателя преломления (n_{eff}) от длины волны, рассчитанной методом конечных элементов вблизи $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ для фундаментальной моды волновода по формуле

$$n_{opt} = \frac{c}{v_{gr}} = n_{eff} - \lambda \frac{dn_{eff}}{d\lambda},$$

где c — скорость света, v_{gr} — групповая скорость оптической волны. Расчет проводился при показателях преломления ниобата лития (LiNbO_3) ~ 2.14 и диоксида кремния (SiO_2) 1.44 на длине волны $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ в предположении угла при основании стенок травленого гребня 25° . Расчетное значение группового оптического показателя составило $n_{opt} \approx 2.2$. Результаты оценки электрооптического отклика на основе полученных данных представлены на рис. 2, *c, d*.

После зондовых измерений и первичной теоретической оценки полосы модуляции изготовленные образцы были состыкованы с оптическими волокнами. Ввод и вывод излучения осуществлялся торцевой стыковкой при помощи линзированных оптических волокон с диаметром перетяжки $2 \mu\text{m}$. Стыковка производилась при помощи специально собранных модулей, представляющих собой подложки с выпиленными канавками, в которые вкладывались и вклеивались линзированные волокна. После вклейки волокон подложки модулей приклеивались к торцу чипов, обеспечивая тем самым фиксацию линзированных волокон относительно гребенчатого оптического волновода.

Для собранных образцов модуляторов были проведены электрооптические измерения при помощи экспериментальной установки, приведенной на рис. 3. Она представляет собой интерферометр, в одном из плеч которого находится исследуемый образец фазового модулятора, в другом — аттенуатор для балансировки оптической мощности в плечах интерферометра. Ввод и вывод оптического излучения для изготовленных образцов чипов производился с помощью линзированных волокон, не сохраняющих поляризацию, поэтому в интерферометре были использованы два контроллера поляризации. За счет первого обеспечивалась подстройка поляризации на входе исследуемого чипа для обеспечения эффективного ввода излучения в ТЕ-моду волновода, на которой он работает с минимальным управляющим напряжением благодаря наибольшему электрооптическому коэффициенту. Второй контроллер поляризации обеспечивал настройку на максимальный контраст интерференционной картины на выходе интерферометра. На электроды модулятора устанавливались электрические зонды. Измерение электрооптических СВЧ-характеристик модулятора производилось при помощи векторного анализатора цепей R&S ZNB 40. Результаты проведенных измерений представлены на рис. 2 вместе с результатами расчета. Видно, что характер и наклон электрооптического отклика соответствуют расчетным кривым, полученным ранее. При этом полученный для образцов уровень обратных отражений изготовленных образцов ниже уровня -10 dB (приведен как S_{11} -параметр на рис. 2, *c, d*), что достаточно для использования модулятора в СВЧ-линиях и соответствует характеристикам коммерчески изготавливаемых модуляторов на объемных подложках ниобата лития. Отдельно было проведено низкочастотное измерение произведения полуволнового напряжения на длину электродов — параметра $U_\pi L$, который составил $\sim 4 \text{ V} \cdot \text{cm}$ (эквивалентно $2 \text{ V} \cdot \text{cm}$ для модулятора интенсивности в виде интерферометра Маха—Цендера), что соответствует параметрам TFLN-модуляторов, известных из литературных данных [1].

По результатам проведенной работы разработана конфигурация фазового СВЧ-модулятора на основе тонкопленочного ниобата лития, доступного для изготовления с использованием стандартной контактной фотолитографии, пригодной для массового производства. Экспериментально продемонстрирована способность модуляторов обеспечивать модуляцию света в полосе частот более 30 GHz . При измерениях не были замечены проявления паразитных эффектов, связанных с преобразованием оптических мод, таких как паразитная амплитудная модуляция и поляризационный фединг, что демонстрирует применимость подхода с подавлением высших мод оптического волновода для изготовления СВЧ-модуляторов на основе TFLN.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G. Chen, N. Li, J.D. Ng, H.-L. Lin, Y. Zhou, Y.H. Fu, L.Y.T. Lee, Y. Yu, A.-Q. Liu, A.J. Danner, *Adv. Photon.*, **4** (3), 034003 (2022). DOI: 10.1117/1.AP.4.3.034003
- [2] D.J. Blumenthal, R. Heideman, D. Geuzebroek, A. Leinse, C. Roeloffzen, *Proc. IEEE*, **106** (12), 2209 (2018). DOI: 10.1109/JPROC.2018.2861576
- [3] S.Y. Siew, B. Li, F. Gao, H.Y. Zheng, W. Zhang, P. Guo, S.W. Xie, A. Song, B. Dong, L.W. Luo, C. Li, X. Luo, G.-Q. Lo, *J. Lightwave Technol.*, **39**, 4374 (2021). DOI: 10.1109/JLT.2021.3066203
- [4] E.L. Wooten, K.M. Kissa, A. Yi-Yan, E.J. Murphy, D.A. Lafaw, P.F. Hallemeier, D. Maack, D.V. Attanasio, D.J. Fritz, G.J. McBrien, D.E. Bossi, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (1), 69 (2000). DOI: 10.1109/2944.826874
- [5] В.М. Петров, П.М. Агрозов, В.В. Лебедев, И.В. Ильичев, А.В. Шамрай, *УФН*, **191** (2), 760 (2021). DOI: 10.3367/UFNr.2020.11.038871 [V.M. Petrov, P.M. Agruzov, V.V. Lebedev, I.V. Il'ichev, A.V. Shamray, *Phys. Usp.*, **64** (2), 722 (2021). DOI: 10.3367/UFNe.2020.11.038871].
- [6] D. Zhu, L. Shao, M. Yu, R. Cheng, B. Desiatov, C.J. Xin, Y. Hu, J. Holzgrafe, S. Ghosh, A. Shams-Ansari, E. Puma, N. Sinclair, C. Reimer, M. Zhang, M. Lončar, *Adv. Opt. Photon.*, **13**, 242 (2021). DOI: 10.1364/AOP.411024
- [7] М.В. Парфенов, А.В. Шамрай, *Письма в ЖТФ*, **46** (16), 39 (2020). DOI: 10.21883/PJTf.2020.16.49853.18344 [M.V. Parfenov, A.V. Shamrai, *Tech. Phys. Lett.*, **46**, 819 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020080258].
- [8] K. Luke, P. Kharel, C. Reimer, L. He, M. Lončar, M. Zhang, *Opt. Express*, **28** (17), 24452 (2020). DOI: 10.1364/OE.401959
- [9] F. Yang, X. Fang, X. Chen, L. Zhu, F. Zhang, Z. Chen, Y. Li, *Chin. Opt. Lett.*, **20** (2), 022502 (2022). DOI: 10.3788/COL202220.022502
- [10] Y. Li, T. Lan, D. Yang, Z. Wang, *Results Phys.*, **30**, 104824 (2021). DOI: 10.1016/j.rinp.2021.104824
- [11] M. Parfenov, P. Agruzov, A. Tronev, I. Ilichev, A. Usikova, Y. Zadiranov, A. Shamrai, *Nanomaterials*, **13** (20), 2755 (2023). DOI: 10.3390/nano13202755
- [12] D. Liu, B. Gaucher, U. Pfeiffer, J. Grzyb, *Advanced, millimeter-wave technologies. Antennas, packaging and circuits* (Wiley, 2009).
- [13] M. Rangaraj, T. Hosoi, M. Kondo, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4** (9), 1020 (1992). DOI: 10.1109/68.157135