

07

Генерация СВЧ-импульсов монолитными трехпереходными AlGaAs/GaAs $p-i-n$ фотопреобразователями и модулями без обратного смещения

© В.С. Калиновский, Е.В. Контрош, И.А. Толкачев, К.К. Прудченко, В.С. Юферев, С.В. Иванов

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

Поступило в Редакцию 25 октября 2024 г.

В окончательной редакции 13 января 2025 г.

Принято к публикации 13 января 2025 г.

Продemonстрирована возможность генерации СВЧ-импульсов в фотовольтаическом режиме монолитными трехпереходными $p-i-n$ AlGaAs/GaAs фотопреобразователями (ФП) лазерного излучения, выращенными методом молекулярно-пучковой эпитаксии. В монолитных трехпереходных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФП достигнуто существенное увеличение выходной пиковой импульсной мощности и быстродействия в субнаносекундном диапазоне по сравнению с однопереходным $p-i-n$ ФП. При вводе из оптоволокна импульсного лазерного излучения на длине волны 850 nm с пиковой мощностью < 5 W и длительностью на полувысоте амплитуды $\tau_{0.5} = 140$ ps получены импульсы фотоотвeta с амплитудой $U_{\max} = 2.7$ V, пиковой мощностью $P_{\text{peak}} = 21.6$ dBm и длительностью $\tau_{0.5} \leq 750$ ps. Модуль из двух ФП, включенных последовательно, обеспечил на выходе импульсы с амплитудой $U_{\max} = 3.4$ V, мощностью $P_{\text{peak}} = 23.7$ dBm и длительностью $\tau_{0.5} \leq 420$ ps. Показано, что модуль из четырех монолитных трехпереходных ФП способен формировать биполярный СВЧ-импульс с параметрами $U_{\max} = 6.4$ V, $P_{\text{peak}} = 29.1$ dBm, $\tau_{0.5} \leq 1$ ns с полосой пропускания до 1.4 GHz и основной несущей частотой ~ 0.8 GHz. Проведенное численное моделирование показало достаточно хорошее соответствие между измеренными и расчетными формами импульсов фотоотвeta данных ФП.

Ключевые слова: монолитный трехпереходный фотопреобразователь, $p-i-n$ AlGaAs/GaAs фотопреобразователь, генерация СВЧ-импульсов, молекулярно-пучковая эпитаксия, импульсное лазерное излучение, длительность на полувысоте амплитуды, оптоволокно, пиковая мощность.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.09.60228.20169

В настоящее время на смену традиционной радиоэлектронике приходит новая радиотехнологическая база, где одними из важнейших элементов, например, в радиотехнологических активностях фазированных антенных решетках (РОФАР) [1] являются мощные импульсные фотопреобразователи (ФП). Эффективность РОФАР во многом определяется выходной электрической мощностью ФП, быстродействием, согласованием с нагрузкой (антенной), а также энергонезависимостью, обеспечивающей полную гальваническую развязку между антенной решеткой и основной генерирующей аппаратурой. Для этого ФП должны генерировать СВЧ-импульсы максимальной мощности в фотовольтаическом режиме, т.е. без подачи обратного напряжения смещения. Небольшая (до 1 km) длина волоконно-оптических линий связи радиотехнологических систем позволяет работать без значительных потерь в спектральном диапазоне 700–900 nm, где высоким КПД обладают GaAs/AlGaAs ФП.

В различных типах структур ФП, к которым относятся $p-i-n$ ФП [2], ФП с частично обедненным поглотителем (PD) [3], униполярные ФП (UTC) [4], модифицированные униполярные ФП (MUTC) [5], ключевой особенностью является наличие нелегированного ($p-i-n$, PD и UTC ФП) или слабелегированного (MUTC) i -слоя микронной толщины. Основной массив

исследований и разработок посвящен фотодиодам, работающим в диодном режиме (при обратном напряжении смещения), и ориентирован на преобразование лазерного излучения на длине волны $\lambda = 1550$ nm. В работе [6] показано, что в MUTC InGaAsP/InP ФП с диаметром фотоактивной поверхности ≤ 50 μm при напряжениях смещения ≤ 44 V ($\lambda = 1550$ nm) достигнуты значения выходной пиковой мощности ≤ 44.2 dBm с амплитудой $U_{\max} \leq 38$ V и длительностью на полувысоте амплитуды $\tau_{0.5} \sim 30$ ps. В [6] приведены характеристики быстродействующих MUTC GaAs/AlGaAs ФП с чувствительностью ~ 0.5 A/W и квантовой эффективностью до 73 % в гигагерцевом диапазоне на длине волны 850 nm при нулевом смещении, что обеспечило получение выходных электрических импульсов с милливаттной (< 10 dBm) пиковой мощностью.

Настоящая работа посвящена разработке и исследованию характеристик субнаносекундных мощных монолитных трехпереходных $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФП (ТП ФП) лазерного излучения (830–860 nm), работающих в фотовольтаическом режиме.

Указанные ФП были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложке n -GaAs ($N_D \sim 3 \cdot 10^{18}$ cm $^{-3}$). Структура ТП ФП (рис. 1, а) включала в себя три $p-i-n$ GaAs субэлемента с толщинами

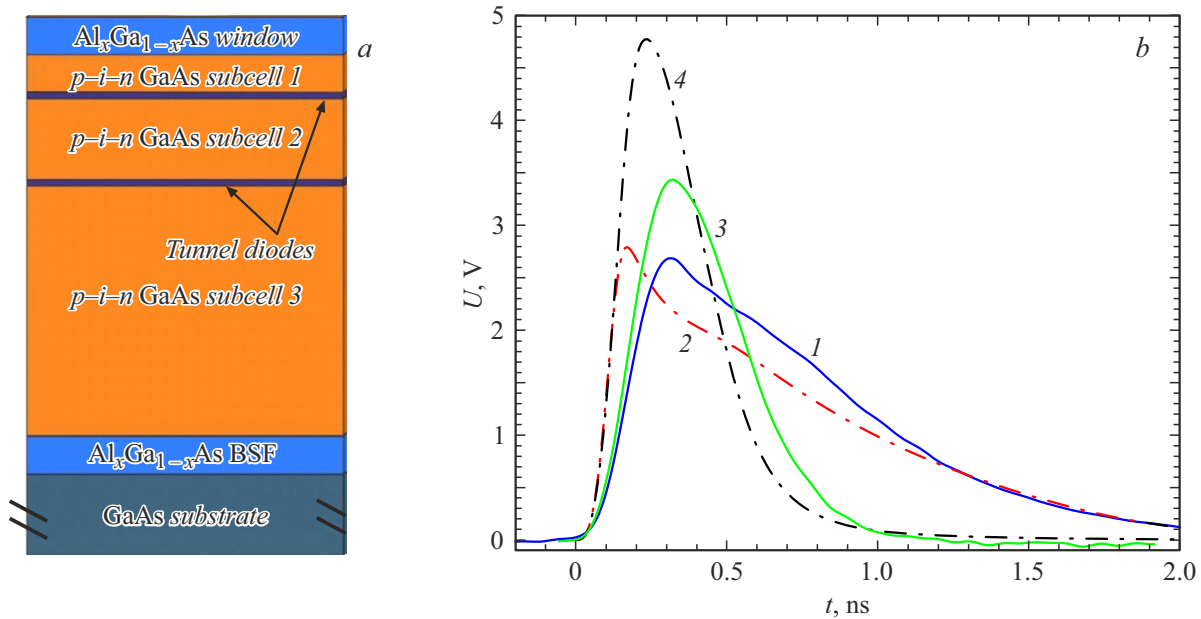


Рис. 1. *a* — структура монолитного трехпереходного $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФП. Цифрами обозначены верхний (1), средний (2) и нижний (3) $p-i-n$ GaAs субэлементы, соединенные $n^{++}-p^{++}$ GaAs туннельными диодами; *b* — импульсы фотоответа монолитного $p-i-n$ ТП ФП (1 — эксперимент, 2 — расчет) и модуля из двух последовательно включенных ТП ФП (3 — эксперимент, 4 — расчет) при мощности лазерного излучения 4.7 W и длительности 140 ps.

верхнего, среднего и нижнего переходов, выбранными из условия равенства фототоков, генерируемых в субэлементах [7]. Уровни легирования составляли для p -слоев $N_A \geq 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, для n -слоев $N_D \leq 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и для i -слоев $N_D \sim 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. В качестве соединительных элементов между фотоактивными $p-i-n$ -переходами использовались встречно включенные наноразмерные GaAs $p^{++}-n^{++}$ туннельные диоды, каждый с суммарной толщиной $\leq 30 \text{ nm}$. Структура также включала широкозонное окно $p\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ($N_A \sim 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ — $0.3 \mu\text{m}$) и тыльный потенциальный барьер $n\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ($N_D \sim 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ — $0.2 \mu\text{m}$). Постростовым процессированием с использованием планарной технологии были сформированы чипы ФП с фоточувствительной поверхностью диаметром $250 \mu\text{m}$, кольцевым сетчатым фронтальным контактом (Ag(Mn)/Ni/Au) толщиной $h \sim 3600 \text{ \AA}$ и тыльным контактом (Au(Ge)/Ni/Au) толщиной $h \sim 2000 \text{ \AA}$. Пассивация боковой поверхности меза-структуры выполнялась слоем диэлектрика Si_3N_4 .

Исследованные ТП ФП имели максимумы внешней квантовой эффективности $Q_{\text{ext}} \geq 21\%$ на длинах волн 850–860 nm (без учета затенения фронтальной контактной сеткой и коэффициента отражения $< 10\%$).

Для согласования с 50Ω нагрузкой и улучшения теплоотвода ФП монтировались методом вакуумной пайки на симметричную микрополосковую линию на основе AlN. Разварка контактов осуществлялась $50 \mu\text{m}$ золотой проволокой с минимизацией значения индуктивности. Были изготовлены СВЧ-модули, состоящие из двух и четырех ТП ФП, смонтированных на микрополосковых теплоотводящих основаниях AlN. Импульсное лазерное

возбуждение как отдельных ТП ФП, так и в модуле осуществлялось соответственно многомодовым оптоволоконном и разветвителями 1/2 с выходными диаметрами $50 \mu\text{m}$.

Исследования характеристик быстродействия для отдельных монолитных ТП ФП и модулей на их основе проводились при возбуждении импульсным лазером на длине волны 850 nm с длительностью на полувысоте амплитуды $\tau_{0.5} = 140 \text{ ps}$, частотой следования 1 kHz и выходной пиковой мощностью до 5 W. Для расчета фотоотклика ФП использовались нестационарные диффузионно-дрейфовые уравнения переноса носителей заряда совместно с уравнением Пуассона для потенциала. Рассматривался процесс межзонного туннелирования, который учитывался посредством введения дополнительного рекомбинационного члена в уравнения переноса при использовании нелокальной модели [7]. Учитывались рекомбинация Шокли–Рида–Холла и излучательная рекомбинация. Процессы перепоглощения фотонов не рассматривались. Расчет форм выходных электрических импульсов (кривые 2 и 4 на рис. 1, *b*) был выполнен для условия идеального включения ФП в электрическую цепь.

На рис. 1, *b* представлены результаты измерения и расчета формы импульсов фотоответа отдельного $p-i-n$ ТП ФП и модуля из двух подобных ТП ФП, соединенных последовательно. Кривые 1 (эксперимент) и 2 (расчет) относятся к $p-i-n$ ТП ФП, а кривые 3 и 4 (эксперимент и расчет соответственно) — к модулю из двух ТП ФП при импульсной мощности лазерного излучения 4.7 W. Расчет выполнялся в соответствии с равенством

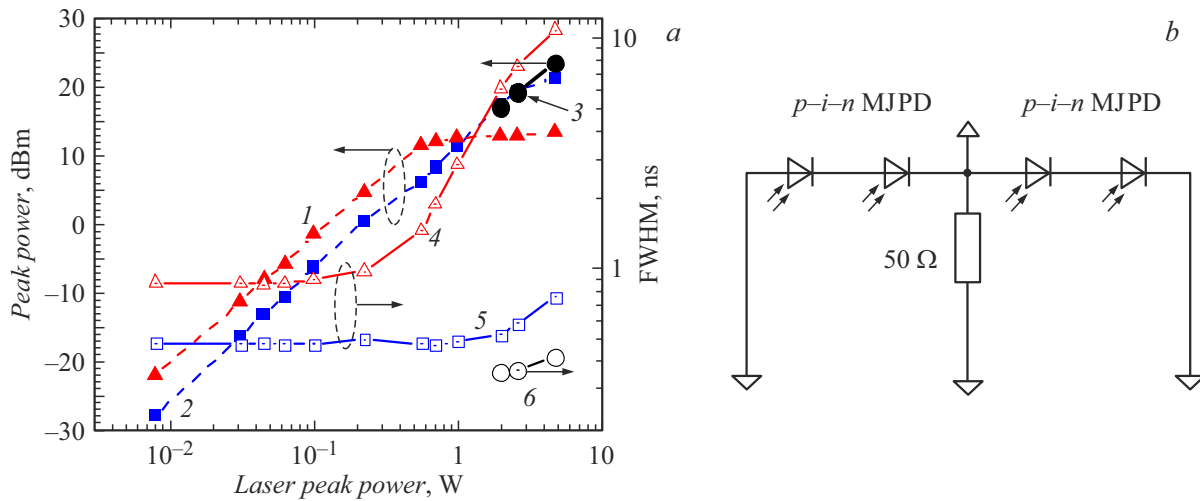


Рис. 2. *a* — зависимости выходной пиковой импульсной мощности (1–3) и длительностей импульсов на полувысоте амплитуды (4–6) для однопереходного $p-i-n$ ФП (1, 4), монолитного $p-i-n$ ТП ФП (2, 5) и модуля из двух $p-i-n$ ТП ФП (3, 6) от импульсной мощности лазерного излучения ($\lambda = 850$ nm); *b* — электрическая схема модуля из четырех $p-i-n$ ТП ФП.

фотогенерируемых токов в каждом из фотоактивных $p-i-n$ -переходах [8]. Все измерения были выполнены на нагрузке 50Ω осциллографом TDS7704B (Tektronix). Для $p-i-n$ ТП ФП получено хорошее согласование форм экспериментальных и расчетных кривых импульсов фотоответа. Различия во временных параметрах и амплитуде импульса (рис. 1, *b*) для модуля из двух последовательно включенных ТП ФП можно объяснить неоднородностью плотности лазерного излучения на фронтальной поверхности ТП ФП, а также паразитными индуктивностями и емкостями монтажа $p-i-n$ ТП ФП на микрополосковую линию.

Согласно полученным результатам, максимальная амплитуда фотоответа ($U_{\max}$), времена нарастания (τ_{rise}) и спада (τ_{fall}) на уровнях от 0.1 до 0.9 амплитуды и длительности электрического импульса на полувысоте амплитуды ($\tau_{0.5}$) составили соответственно: $U_{\max} = 2.7$ V, $\tau_{\text{rise}} = 173$ ps, $\tau_{\text{fall}} = 1.28$ ns, $\tau_{0.5} = 750$ ps для одиночного ТП ФП и $U_{\max} = 3.4$ V, $\tau_{\text{rise}} = 179$ ps, $\tau_{\text{fall}} = 430$ ps, $\tau_{0.5} = 420$ ps для модуля из двух последовательно включенных ТП ФП.

На рис. 2, *a* представлены экспериментальные зависимости выходной пиковой мощности (кривые 1–3) и длительности импульса фотоответа (кривые 4–6) для ТП ФП (кривые 2, 5) и модуля из двух ТП ФП (кривые 3, 6). Там же для сравнения приведены характеристики однопереходных ФП (ОП ФП) с диаметром мезы $250 \mu\text{m}$, полученных в том же МПЭ-режиме с аналогичным постростовым процессированием, при идентичном лазерном возбуждении ($\lambda = 850$ nm) из оптоволокна (кривые 1, 4). Длительность импульса фотоответа на полувысоте амплитуды ТП ФП (кривая 5) при максимальной мощности лазерного излучения более чем на порядок меньше, чем у ОП ФП (кривая 4). Пиковая мощность ТП ФП (кривая 2) линейно растет в диапазоне

плотности мощности лазерного излучения ($\lambda = 850$ nm) до 9.5 kW/cm^2 , в то время как для ОП ФП уже при плотности оптической мощности $\geq 1.0 \text{ kW/cm}^2$ наступает насыщение (кривые 1) и значение выходной пиковой мощности практически не изменяется. При мощности лазерного излучения 4.7 W значения выходной максимальной пиковой мощности P_{peak} составили 13.4 dBm для ОП ФП, 21.6 dBm для ТП ФП и 23.7 dBm для модуля из двух последовательно включенных ТП ФП.

Для эффективной работы РОФАР необходима генерация мощных биполярных импульсов. Показано, что СВЧ-модуль, состоящий из четырех $p-i-n$ ТП ФП (рис. 2, *b*), при возбуждении лазерным излучением с пиковой мощностью до 10 W и задержкой между лазерными импульсами ~ 500 ps [8–10] на сопротивлении нагрузки 50Ω обеспечивает на выходе биполярный импульс с амплитудой 6.4 V (29.1 dBm) и длительностью $\tau_{0.5} \leq 1$ ns (рис. 3, *a*). Частотная характеристика биполярного импульса по уровню -3 dB имеет полосу пропускания до 1.4 GHz с основной несущей частотой $\sim 0.8 \text{ GHz}$ (рис. 3, *b*).

Таким образом, в результате проведенных исследований впервые продемонстрирована в фотовольтаическом режиме генерация мощных субнаносекундных СВЧ-импульсов монолитными трехпереходными $p-i-n$ AlGaAs/GaAs ФП и СВЧ-модулями на их основе.

Показано, что в трехпереходных $p-i-n$ ФП по сравнению с однопереходными $p-i-n$ ФП получено лучшее быстродействие с существенным увеличением выходной пиковой импульсной мощности:

— импульс фотоответа ТП ФП на нагрузке 50Ω при пиковой мощности лазерного излучения 4.7 W ($\lambda = 850$ nm, $\tau_{0.5} = 140$ ps) составил $U_{\max} = 2.7$ V, $\tau_{0.5} = 750$ ps, $P_{\text{peak}} = 21.6$ dBm и $U_{\max} = 3.4$ V,

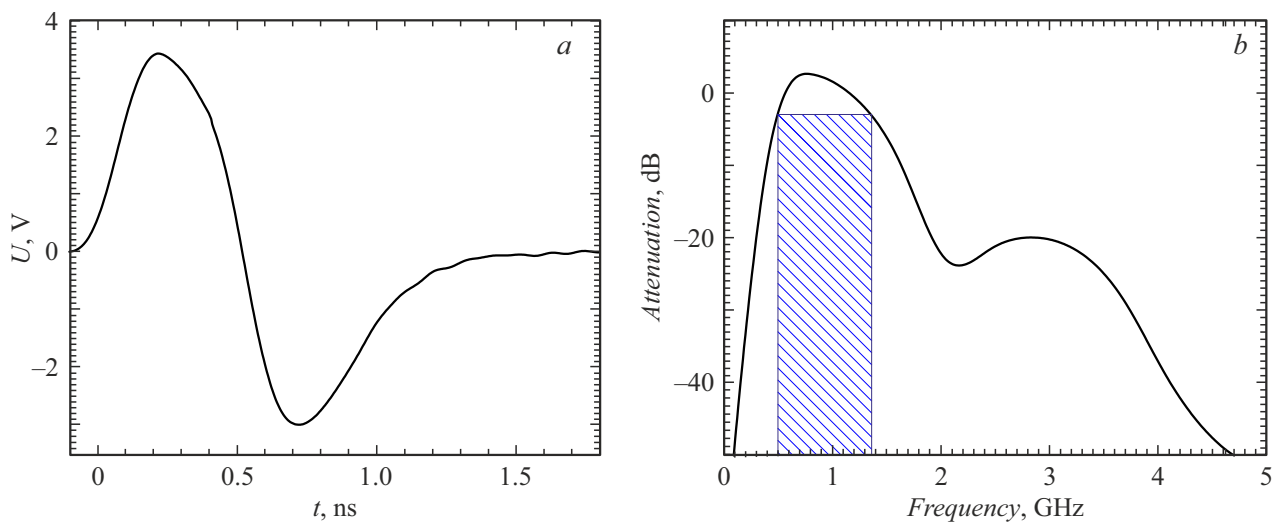


Рис. 3. *a* — биполярный импульс фотответа оптоволоконного модуля из четырех $p-i-n$ ТП ФП ($\varnothing 250 \mu\text{m}$) на нагрузке $R_{load} = 50 \Omega$ при возбуждении импульсным лазерным излучением ($\lambda = 850 \text{ nm}$, $\tau_{0.5} \sim 140 \text{ ps}$); *b* — частотная характеристика биполярного импульса фотответа с выделенной полосой частот на уровне -3 dB .

$\tau_{0.5} = 420 \text{ ps}$, $P_{peak} = 23.7 \text{ dBm}$ для модуля из двух ТП ФП;

— модуль из четырех ТП ФП в фотовольтаическом режиме способен генерировать СВЧ-импульсы с амплитудой 6.4 V (29.1 dBm), длительностью $\tau_{0.5} \leq 1 \text{ ns}$, полосой пропускания на уровне -3 dB до 1.4 GHz и основной несущей частотой $\sim 0.8 \text{ GHz}$.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Г.В. Климко и С.В. Сорокину за изготовление эпитаксиальных структур методом МПЭ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Д.Ф. Зайцев, В.М. Андреев, И.А. Биленко, А.А. Березовский, П.Ю. Владиславский, Ю.Б. Гурфинкель, Л.И. Цветкова, В.С. Калиновский, Н.М. Кондратьев, В.Н. Косолюбов, В.Ф. Курочкин, С.О. Слипенченко, Н.В. Смирнов, Б.В. Яковлев, *Радиотехника*, **85** (4), 153 (2021). DOI: 10.18127/j00338486-202104-17
- [2] A. Rawat, M. Saif Islam, *Proc. SPIE*, **12880**, 128800Q (2024). DOI: 10.1117/12.3003413
- [3] T. Long, Z. Xie, L. Li, L. Wang, X. Zou, H. Ji, J. Lu, B. Chen, *J. Lightwave Technol.*, **42**, 2042 (2024). DOI: 10.1109/JLT.2023.3328899
- [4] D. Maes, S. Lemey, G. Roelkens, M. Zaknoune, V. Avramovic, E. Okada, P. Szriftgiser, E. Peytavit, G. Ducournau, B. Kuyken, *APL Photon.*, **8**, 016104 (2023). DOI: 10.1063/5.0119244

- [5] Z. Xie, Z. Zhou, L. Li, Z. Deng, H. Ji, B. Chen, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **28**, 3801007 (2022). DOI: 10.1109/JSTQE.2021.3095470
- [6] Y. Peng, K. Sun, Y. Shen, A. Beling, J. C. Campbell, *Opt. Express*, **28** (19), 28563 (2020). DOI: 10.1364/OE.399102
- [7] *Atlas User's Manual Device Simulation Software* (Silvaco, 2015).
- [8] V.S. Kalinovskiy, E.V. Kontrosh, G.A. Gusev, A.N. Sumarokov, G.V. Klimko, S.V. Ivanov, V.S. Yuferev, T.S. Tabarov, V.M. Andreev, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **993**, 012029 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/993/1/01202
- [9] I.A. Tolkahev, E.V. Kontrosh, V.S. Kalinovskiy, K.K. Prudchenko, G.V. Klimko, in *Proc. of 2024 Systems of signal synchronization, generating and processing in telecommunications (SYNCHROINFO)* (IEEE, 2024), p. 1–4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO61835.2024.10617448
- [10] V.S. Kalinovskiy, E.V. Kontrosh, V.M. Andreev, A.V. Shamray, V.V. Lebedev, P.M. Arguzov, patent RU2789005C1 (2023).