



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 4. С. 412–417

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2024, vol. 24, iss. 4, pp. 412–417

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-4-412-417>, EDN: MNXTBZ

Научная статья
УДК 53.06



Исследование возможности реализации среднечастотного широкополосного генератора качающейся частоты на структуре полуизолирующего арсенида галлия

А. И. Михайлов[✉], И. О. Кожевников, А. В. Митин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Михайлов Александр Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики твердого тела, mikhailovai13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4158-9195>

Кожевников Илья Олегович, заведующий учебной лабораторией по полупроводниковой электронике, kozhevnikov_io@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8911-3084>

Митин Антон Васильевич, старший преподаватель кафедры физики твердого тела, mitin_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9638-427X>

Аннотация. Показана принципиальная возможность получения качания частоты токовых колебаний в диапазоне низких и средних частот на основе возникающей в сильных электрических полях рекомбинационной неустойчивости тока в полуизолирующем арсениде галлия. В предложенном варианте конструкции экспериментального образца катодным контактом является мезаструктура, а анодным – точечный прижимной контакт. Перестройка частоты выходного сигнала осуществляется изменением интенсивности засветки лазерным диодом межконтактной области образца. Наличие практически линейного участка на зависимости частоты от интенсивности освещения, на котором также сохраняется постоянство амплитуды выходного сигнала, позволяет утверждать о возможности создания первичного генератора в составе генератора качающейся частоты (свип-генератора) на основе предложенного принципа.

Ключевые слова: генератор качающейся частоты, полуизолирующий арсенид галлия, рекомбинационная токовая неустойчивость

Для цитирования: Михайлов А. И., Кожевников И. О., Митин А. В. Исследование возможности реализации среднечастотного широкополосного генератора качающейся частоты на структуре полуизолирующего арсенида галлия // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24, вып. 4. С. 412–417. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-4-412-417>, EDN: MNXTBZ

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Investigation of the possibility of implementing a mid-frequency broadband swept-frequency generator based on the structure of semi-insulating gallium arsenide

A. I. Mikhailov[✉], I. O. Kozhevnikov, A. V. Mitin

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Aleksandr I. Mikhailov, mikhailovai13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4158-9195>

Ilya O. Kozhevnikov, kozhevnikov_io@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8911-3084>

Anton V. Mitin, mitin_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9638-427X>

Abstract. Background and Objectives: In previous works, the authors of the article reported on the prospects of creating the functional microelectronic devices with wide functionality based on the semi-insulating gallium arsenide (GaAs) structures provided that they exhibit Gunn or recombination current instabilities. The aim of the work is to obtain a current oscillation frequency sweep based on the recombination current instability in semi-insulating gallium arsenide that occurs in strong electric fields. **Materials and Methods:** Experimental samples made by the basis of industrial GaAs epitaxial wafers. The cathode contact of the sample is a mesa structure, and the anode contact is a pressure point contact. The output signal of the sample is a voltage oscillation across the load resistor. The current oscillations frequency depends on the value of the power of the incident optical radiation in the visible or infrared ranges of the spectrum. The oscillations were caused by the recombination current instability in semi-insulating gallium arsenide in high electric fields. **Results:** When the current on the laser diode illuminating the surface of the sample has a sawtooth shape, a sweeping of the frequency of the sample's output signal has been observed. The dependence of the frequency versus the lighting intensity contains a linear section within which the frequency change factor reaches 1.6 times, the frequency sweeping band is significantly greater than 1% of the maximum frequency of the operating range, and the amplitude of the generated signal changes by no more than 6%. **Conclusion:** The fundamental possibility of obtaining current oscillation frequency sweeps in the range of low, medium and high



frequencies based on the recombination current instability in semi-insulating GaAs has been demonstrated. Thus, it can be argued that it is possible to create a primary generator as part of a sweep generator based on the proposed principle.

Keywords: swept-frequency generator, semi-insulating gallium arsenide, recombination current instability

For citation: Mikhailov A. I., Kozhevnikov I. O., Mitin A. V. Investigation of the possibility of implementing a mid-frequency broadband swept-frequency generator based on the structure of semi-insulating gallium arsenide. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2024, vol. 24, iss. 4, pp. 412–417 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2024-24-4-412-417>, EDN: MHXTBZ

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Ганновская и рекомбинационная неустойчивости тока в полупроводниках – перспективные физические механизмы для твердотельной функциональной микроэлектроники [1–8]. В теоретических и экспериментальных работах авторов статьи (см., например, [9–11]) сообщалось о перспективности создания функциональных микроэлектронных устройств на структурах полуизолирующего арсенида галлия (GaAs) в условиях проявления ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока с широкими функциональными возможностями и управлением (в том числе оперативным) параметрами и характеристиками в диапазоне частот от десятков и сотен кГц (рекомбинационная неустойчивость) до долей, единиц и даже десятков GHz (ганновская неустойчивость).

Арсенид галлия известен как перспективный полупроводниковый материал с высокой подвижностью электронов, в котором в сильных электрических полях вследствие междолинного переноса электронов наблюдается известный эффект Ганна, сопровождающийся токовыми СВЧ колебаниями, а также и более низкочастотная рекомбинационная неустойчивость тока, связанная с возрастающим в сильных электрических полях захватом электронов проводимости примесными центрами с глубокими уровнями [2–8]. Полуизолирующий (высокоомный) GaAs, на практике используемый чаще всего в качестве монокристаллических подложек для наращивания тонких эпитаксиальных рабочих слоев, представляет собой компенсированный полупроводник, содержащий компенсирующие примеси. Наличие компенсирующих примесей с достаточно высокими значениями концентрации приводит не только к снижению концентрации носителей заряда в зоне проводимости и в валентной зоне до значений 10^{13} см^{-3} и менее, и обеспечивающих таким образом высокое значение удельного сопротивления материала, но и к созданию уровней ловушек в запрещенной зоне, которые оказывают значительное влияние на динамику электронных процессов, протекающих в полупроводнике.

Исследования показали, что в образцах полуизолирующего GaAs с контактами на основе планарно-эпитаксиальных меза-структур при подаче постоянного напряжения выше некоторого порогового значения возникают колебания (осцилляции) тока [9–11]. Частота этих колебаний в большей степени зависит от мощности падающего оптического излучения в видимом или инфракрасном диапазонах спектра и в меньшей – от величины питающего напряжения [9–11]. Таким образом, использование полуизолирующего GaAs позволяет получить комбинированное действие двух физических явлений – неустойчивости тока и внутреннего фотоэффекта.

1. Материалы и методы

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования возможности получения на основе возникающей в сильных электрических полях рекомбинационной неустойчивости тока в полуизолирующем GaAs качания (сви́пирования) частоты токовых колебаний в диапазоне низких и средних частот, управляемого светом. Экспериментальные образцы изготовлены из эпитаксиальных пластин GaAs марки САГ-2БК методом фотолитографии. Схематическое изображение образца показано на рис. 1, а, где анодным является точечный прижимной контакт в виде вольфрамового зонда на поверхности высокоомной пластины, а катодным – контакт, выполненный на основе планарно-эпитаксиальной меза-структуры. Расстояние между контактами составляет порядка $50 \pm 10 \text{ мкм}$, и определяет длину активной области структуры. Омический катодный контакт имеет размер порядка $100 \times 200 \text{ мкм}$. Диаметр острия зонда анодного точечного контакта порядка 10 мкм . Между контактами подается постоянное напряжение питания U_S , а на нагрузочном резисторе R_{L1} фиксируется напряжение, пропорциональное протекающему через образец току. Установлено, что, в отличие от варианта экспериментального образца, описанного в предыдущих работах авторов [10, 11], данный



вариант (см. рис. 1, а) позволяет получать колебания с большей амплитудой.

GaAs обладает высокой фоточувствительностью в широком диапазоне и видимой, и ИК частей спектра, но с целью удобства позиционирования освещаемой области при проведении исследований межконтактное пространство образцов облучалось лазером с длиной волны в видимом диапазоне ($\lambda = 680$ нм).

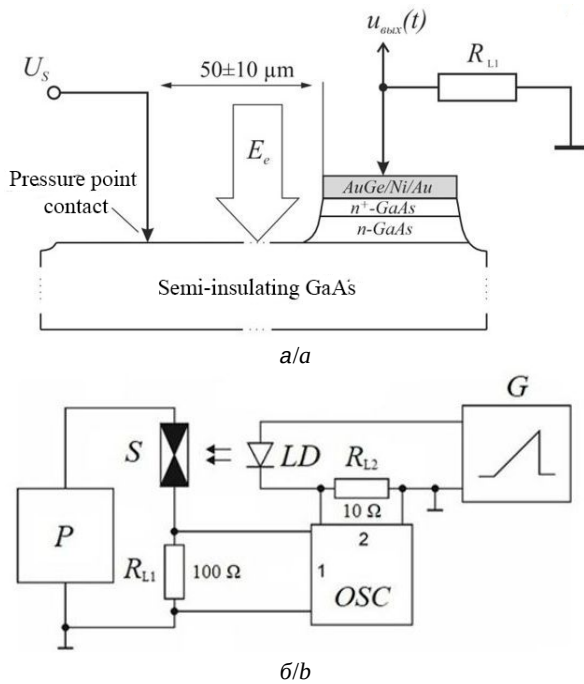


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментального образца (а) и структурная схема установки для исследования возможности получения качания частоты (сви́пирования) токовых колебаний (б)

Fig. 1. Schematic illustration of the prototype (a) and a block diagram of the setup for studying the possibility of obtaining frequency swing (sweeping) of current oscillations (b)

При подаче на образец напряжения U_S , превышающего некоторое пороговое значение, возникают колебания напряжения $u_{\text{вых}}(t)$ на нагрузке R_{L1} (см. рис. 1, а), регистрируемые с помощью осциллографа. При увеличении интенсивности освещения E_e межконтактной области образца лазером частота токовых колебаний в цепи увеличивается относительно темнового значения. Частота токовых колебаний, регистрируемых с помощью осциллографа, для исследуемых образцов находится, как правило, в диапазоне от 5 кГц до 1 МГц и для каждого конкретного образца определяется совокупностью технологических и физических факторов (например, топология мезаструктуры, величина приложенного напряжения, локализация и интенсивность

оптического воздействия), поэтому диапазон перестройки частоты от освещения для каждого отдельно взятого образца ввиду указанных факторов также носит индивидуальный характер. Для исследования возможности получения качания частоты (сви́пирования) возникающих токовых колебаний была использована схема, приведенная на рис. 1, б. Схема включает исследуемый образец S , подключенный к источнику питания P последовательно с нагрузочным резистором R_{L1} с сопротивлением 100Ω ; лазерный диод LD ($\lambda = 680$ нм, $P_{\text{max}} = 3$ мВт), подключенный к питающему его генератору пилообразных импульсов тока G последовательно с нагрузочным резистором R_{L2} с сопротивлением 10Ω . Для одновременного наблюдения управляющего и генерируемого сигналов напряжение с резистора R_{L1} подается на канал 1, а с резистора R_{L2} – на канал 2 осциллографа OSC .

2. Результаты и их обсуждение

Для исследуемого образца экспериментально установлен диапазон значений освещенности, в пределах которого зависимости частоты и амплитуды генерируемых колебаний тока носят практически линейный характер. На рис. 2 представлены участки указанных зависимостей частоты основной гармоники f и амплитуды колебаний напряжения $u_{\text{вых}}(t)$ на нагрузке R_{L1} в пределах установленного диапазона значений освещенности для образца описанной конструкции.

Основными требованиями к генераторам качающейся частоты (ГКЧ) являются линейность модуляционной характеристики и постоянство уровня генерируемого выходного сигнала [12]. Как указано на приведенных на рис. 2 экспериментальных зависимостях для исследуемого образца, кратность изменения частоты $f_{\text{max}}/f_{\text{min}}$ генерируемых колебаний во всем использованном в экспериментах интервале изменения интенсивности освещения ($E_e = 0\text{--}30$ мВт/см²) достигает 108, а в интервале, в пределах которого обеспечивается линейность ватт-амперной характеристики лазера ($E_e = 10\text{--}30$ мВт/см²) и зависимости частоты от интенсивности освещения, кратность изменения частоты достигает 1.6 раза. При этом в последнем случае амплитуда генерируемого сигнала изменяется не более чем на 6%. Кроме того, поскольку полоса качания частоты токовых колебаний $\Delta f = f_{\text{max}} - f_{\text{min}}$ в этом последнем случае получается существенно больше



1% от максимальной частоты f_{\max} рабочего диапазона в полосе качания, то речь может идти о возможности создания на описанном эффекте широкополосного ГКЧ [12]. Таким образом, диапазон свипирования, в котором обеспечивается постоянство амплитуды сигнала генератора на основе предложенного принципа, будет ограничен в области низких частот пороговым значением интенсивности освещения, соответствующим пороговому току лазерного диода, а в области высоких частот – пороговым значением интенсивности освещения, при котором происходит резкий спад амплитуды и дальнейший срыв генерации токовых колебаний [10, 11].

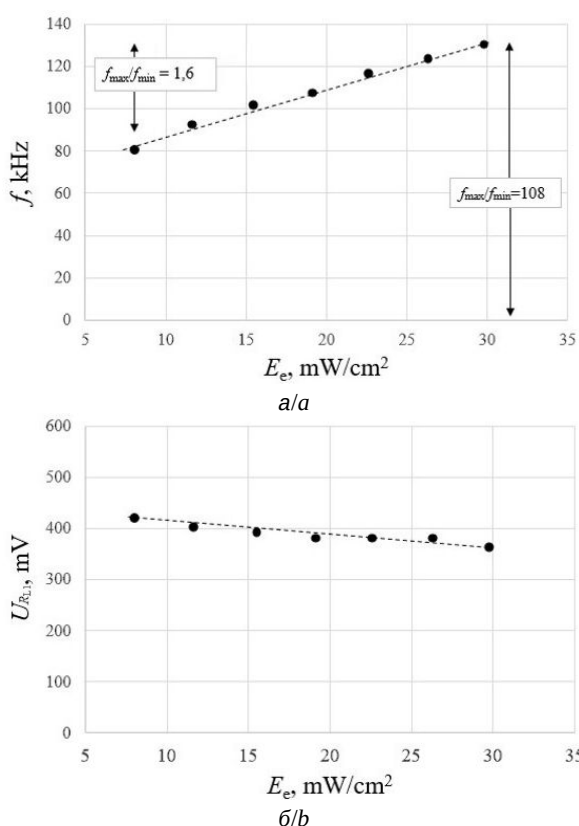


Рис. 2. Зависимость частоты (а) и амплитуды (б) колебаний напряжения на нагрузочном резисторе R_{L1} от интенсивности освещения

Fig. 2. Dependence of the frequency (a) and amplitude (b) of oscillations on load resistor R_{L1} on the intensity of illumination

С помощью схемы, приведенной на рис. 1, б, для исследуемого образца были получены осциллограммы генерируемых колебаний при пилообразной форме сигнала на лазерном диоде, освещающем поверхность образца (см. рис. 1, а). Значения тока накачки лазерного диода задавались в пределах установленного для данного

образца диапазона, соответствующего линейному участку его ватт-амперной характеристики. На рис. 3, а и 3, б сравниваются выходные сигналы со структуры при разных амплитудах пилообразных импульсов тока накачки лазерного диода. Из анализа осциллограмм можно сделать вывод, что управление диапазоном качания частоты (свипирования) токовых колебаний возможно путем изменения амплитуды пилообразных импульсов тока накачки лазерного диода.

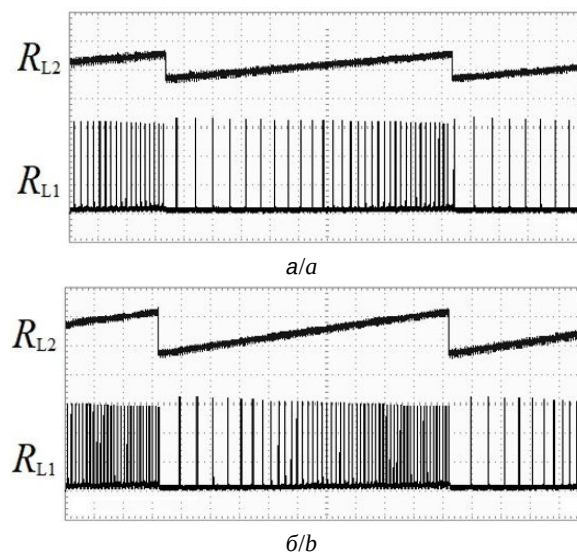


Рис. 3. Свипирование выходного сигнала образца (канал 1) при управляющем пилообразном сигнале на лазерном диоде (канал 2), напряжении $U_S = 21$ В и значениях амплитуды пилообразных импульсов тока накачки лазера: а – 2 мА, б – 4 мА

Fig. 3. Sweeping of the output signal (channel 1) with a control sawtooth signal on a laser diode (channel 2), at voltage $U_S = 21$ V and a control signal value of 2 mA (a) and 4 mA (b)

Выводы

В работе показана принципиальная возможность получения управляемого светом качания (свипирования) частоты токовых колебаний в низкочастотном и среднечастотном диапазонах на основе возникающей в сильных электрических полях рекомбинационной неустойчивости тока в полуизолирующем арсениде галлия. Для управления частотой колебаний на основе данного принципа ввиду малых размеров функционального элемента в качестве источника освещения лучше всего подходит лазерный диод (либо светодиод) с длиной волны излучения в оптическом и ИК диапазонах. Установлено, что на зависимости частоты от интенсивности освещения имеется линейный участок, в пределах которого кратность изменения частоты достигает



1.6 раза, полоса качания частоты токовых колебаний существенно больше 1% от максимальной частоты рабочего диапазона, а амплитуда генерируемого сигнала изменяется не более чем на 6%. Опираясь на работы авторов статьи [9–11], а также на известные классические работы по эффекту Ганна (см., например, [6, 7]), есть основания полагать, что диапазон управляемого светом качания (сви́пирования) частоты колебаний тока в структуре полуизолирующего GaAs, возникающих вследствие рекомбинационной и ганновской неустойчивостей тока, может быть продвинут и в ВЧ, и даже в СВЧ область спектра. Стоит также подчеркнуть, что продемонстрированное управление сви́пированием частоты токовых колебаний осуществляется с использованием источника оптического излучения с выходной мощностью не более единиц мВт. В предложенном и описанном варианте такой генератор может быть использован как первичный генератор в составе ГКЧ, либо для смешения и синтеза частот, а также в импульсных либо цифровых схемах (см., например, [13]). Кроме того, не вызывает особых сомнений, что за счет дополнительных схемных решений можно добиться необходимого выравнивания амплитуды выходного сигнала во всём рабочем диапазоне сви́пирования частоты и в режиме генерации гармонических колебаний.

Список литературы

1. Шука А. А. *Электроника : учебное пособие / под ред. проф. А. С. Сигова*. СПб. : БХВ-Петербург, 2006. 800 с.
2. Бонч-Бруевич В. Л., Звягин И. П., Миронов А. Г. *Доменная электрическая неустойчивость в полупроводниках*. М. : Наука, 1972. 416 с.
3. Пожела Ю. К. *Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках*. М. : Наука, 1977. 368 с.
4. Федорченко А. М., Коцаренко Н. Я. *Абсолютная и конвективная неустойчивость в плазме и твердых телах*. М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 176 с.
5. Кэрролл Дж. *СВЧ-генераторы на горячих электродах / пер. с англ. М. Е. Левинштейна, М. С. Шура ; под ред. Б. Л. Гельмонта*. М. : Мир, 1972. 382 с.
6. Левинштейн М. Е., Пожела Ю. К., Шур М. С. *Эффект Ганна*. М. : Сов. радио, 1975. 288 с.
7. Шур М. С. *Современные приборы на основе арсенида галлия / пер. с англ. ; под ред. М. Е. Левинштейна*. М. : Мир, 1991. 632 с.
8. Neumann A. Slow domains in semi-insulating GaAs // *J. Appl. Phys.* 2001. Vol. 90, № 1. P. 1–26. <https://doi.org/10.1063/1.1377023>
9. Михайлов А. И., Митин А. В., Терентьева А. И. Особенности проявления ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока в высокоомных полупроводниках в условиях оптического воздействия // *Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии : сборник статей / под общ. ред. А. И. Михайлова*. Саратов : ИЦ «Наука», 2013. С. 130–153.
10. Михайлов А. И., Митин А. В., Кожевников И. О. Функциональный однокристалльный преобразователь свет-частота на основе высокоомного n-GaAs // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2014. Т. 17, № 4. С. 64–69.
11. Михайлов А. И., Митин А. В., Кожевников И. О. Особенности возникновения устойчивых колебаний тока большой амплитуды в длинных высокоомных планарно-эпитаксиальных структурах на основе арсенида галлия // *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2015. Т. 58, № 4. С. 59–64. <https://doi.org/10.20535/S002134701504007X>
12. Винокуров В. И., Каплин С. И., Петелин И. Г. *Электрорадиоизмерения : учебное пособие для радиотехн. спец. вузов / под ред. В. И. Винокурова*. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высшая школа, 1986. 351 с.
13. Zutavern F. J., Glover S. F., Swalby M. E., Cich M. J., Mar A., Loubriel G. M., Roose L. D., White F. E. DC-Charged GaAs PCSSs for Trigger Generators and Other High-Voltage Applications // *Transactions on Plasma Science*. 2010. Vol. 38, iss. 10. P. 2708–2715. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2049663>

References

1. Shchuka A. A. *Elektronika. Uchebnoe posobie* [Sigov A. S., ed. Electronics. Tutorial]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2006. 800 p. (in Russian).
2. Bonch-Bruevich V. L., Zviagin I. P., Mironov A. G. *Domennaya elektricheskaya neustoichivost' v poluprovodnikakh* [Domain electrical instability in semiconductors]. Moscow, Nauka, 1972. 416 p. (in Russian).
3. Pozhela Yu. K. *Plazma i tokovye neustoichivosti v poluprovodnikakh* [Plasma and current instabilities in semiconductors]. Moscow, Nauka, 1977. 368 p. (in Russian).
4. Fedorchenko A. M., Koczarenko N. Ya. *Absolyutnaya i konvektivnaya neustoichivost' v plazme i tverdykh telakh* [Absolute and convective instability in plasma and solids]. Moscow, Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1981. 176 p. (in Russian).
5. John E. Carroll. *Hot Electron Microwave Generators*. London, Edward Arnold, 1970. 306 p. (Russ. ed.: Moscow, Mir, 1972. 382 p.).
6. Levinshtejn M. E., Pozhela Yu. K., Shur M. S. *Effekt Ganna* [Gunn effect]. Moscow, Sovetskoe radio, 1975. 288 p. (in Russian).
7. Michael Shur. *GaAs Devices and Circuits*. New York, London, Plenum press, 1987. 670 p. (Russ. ed.: Moscow, Mir, 1991. 632 p.). <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1989-2>



8. Neumann A. Slow domains in semi-insulating GaAs. *J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 90, no. 1, pp. 1–26. <https://doi.org/10.1063/1.1377023>
9. Mikhailov A. I., Mitin A. V., Terenteva A. I. Features of the manifestation of Hann and recombination current instabilities in high-resistance semiconductors under optical influence. In: Mikhailov A. I., total ed. *Semiconductor electronics and molecular nanotechnologies: Collection of articles*. Saratov, ITs “Nauka”, 2013, pp. 130–153 (in Russian).
10. Mikhailov A. I., Mitin A. V., Kozhevnikov I. O. Functional single-chip light-frequency converter based on high-resistance n-GaAs. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2014, vol. 17, no. 4, pp. 64–69 (in Russian).
11. Mikhailov A. I., Mitin A. V., Kozhevnikov I. O. Features of the occurrence of stable high-amplitude current oscillations in long high-resistivity planar-epitaxial structures based on gallium arsenide. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika* [News of Universities. Radioelectronics], 2015, vol. 58, no. 4, pp. 59–64 (in Russian). <https://doi.org/10.20535/S002134701504007X>
12. Vinokurov V. I., Kaplin S. I., Petelin I. G. *Elektroradioizmereniya: uchebnoe posobie dlya radiotekhn. spets. vuzov* [Vinokurov V. I., ed. Electrical radio measurements: Textbook, manual for radio engineering special universities]. Moscow, Vysshaya shkola, 1986. 351 p. (in Russian).
13. Zutavern F. J., Glover S. F., Swalby M. E., Cich M. J., Mar A., Loubriel G. M., Roose L. D., White F. E. DC-Charged GaAs PCSSs for Trigger Generators and Other High-Voltage Applications. *Transactions on Plasma Science*, 2010. vol. 38, iss. 10, pp. 2708–2715. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2049663>

Поступила в редакцию 09.04.2024; одобрена после рецензирования 28.08.2024; принята к публикации 20.09.2024
The article was submitted 09.04.2024; approved after reviewing 28.08.2024; accepted for publication 20.09.2024