

18. Artem'ev V.V., Kruglov A.V., Sorokin I.A. Optimizatsiya struktury soglasovannogo tsifrovogo fil'tra s izmenyaemyimi koeffitsientami pri realizatsii na programmiruemykh logicheskikh integral'nykh skhemakh [Optimization of the structure of a matched digital filter with variable coefficients when implemented on programmable logic integrated circuits], *Vysokie tekhnologii atomnoy otrasli. Molodezh' v innovatsionnom protsesse* [High technologies of the nuclear industry. Youth in the innovation process], 2021, pp. 120-123.
19. Kozlov S.V., Kyong L.V. Algoritmy dlitel'nogo kogherentnogo nakopleniya otrazhennogo signala pri nenulevykh vysshikh proizvodnykh dal'nosti do radiolokatsionnoy tseli v spektral'noy oblasti [Algorithms for long-term coherent accumulation of the reflected signal with non-zero higher derivatives of the range to the radar target in the spectral region], *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki* [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2021, Vol. 19, No. 5, pp. 35-44.
20. Pollakowski M., Ermert H. Chirp signal matching and signal power optimization in pulse-echo mode ultrasonic nondestructive testing, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 1994, Vol. 41, No. 5, pp. 655-659.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.В. Боженюк.

Бахчевников Валентин Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: bahchevnikov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79518289271; ст. преподаватель.

Деркачев Владимир Александрович – e-mail: vderkachev@sfedu.ru; тел.: +79614154733; ассистент.

Бакуменко Алексей Николаевич – e-mail: baku@sfedu.ru; тел.: +79886031853; ассистент.

Bakhchevnikov Valentin Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: bahchevnikov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79518289271; senior lecturer.

Derkachev Vladimir Aleksandrovich – e-mail: vderkachev@sfedu.ru; phone: +79614154733; assistant.

Bakumenko Aleksej Nikolaevich – e-mail: baku@sfedu.ru; phone: +79886031853; assistant.

УДК 53.098

DOI 10.18522/2311-3103-2023-2-165-174

И.В. Малышев, Н.В. Паршина, А.А. Охотникова

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ
ЧАСТОТНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ
АВТОДИННОГО ТИПА**

В рамках дрейфово-диффузионной модели переноса носителей в объёме полупроводников типа $A^{III}B^V$, при внешнем воздействии сильных постоянных электрических и магнитных полей, ортогонально ориентированных относительно друг друга, предложен новый принцип применения обнаруженных эффектов, в которых учитываются нелинейности выходных параметров рабочего чипа, что приводит к возможности создания новых полупроводниковых структур, управляемых магнитным полем (МУПС). Ранее диффузионная компонента плотности выходного тока не учитывалась как отдельный эффект, возникающий при ортогональном воздействии сильных электрических и магнитных компонент, что было впервые рассмотрено в настоящей работе. Показано, что эта компонента входит в состав индукционного поперечного выходного тока и может быть рассмотрена, как самостоятельный эффект. В основе предложенного практического применения лежат классические соотношения, описывающие компонентное пространственное представление энергозависимости эффективной массы и параметров кинетических уравнений дрейфа и разогрева носителей в объёме структуры высокоподвижных полупроводников типа $A^{III}B^V$. (Зависимость от энергии величины обратной эффективной массы получена в предположении утяжеления этого параметра в рамках двухдоллинного представления. Однако, механизм такого увеличения детально не рассматривается, а учиты-

вается как результат разложения в ряд Тейлора.) При этом гипотетически обнаружены также некоторые новые явления: диффузионный детекторный эффект и поперечный индукционный эффект, управляемый магнитным полем, аналогичный по своему проявлению эффекту Ганна в этом направлении. Полученные результаты открывают перспективу для создания принципиально новых частотно-преобразовательных устройств на базе вышеуказанных МУПС, таких как преобразователи (смесители) автодинного типа, одна из конструкций которых так же предложена в данной работе в волноводном исполнении. В случае экспериментального подтверждения обнаруженных эффектов, которые могут быть исследованы по предложенной в работе структурной схеме измерительной установки, можно сделать вывод о перспективных новых применениях магнитоуправляемых полупроводниковых структур. Кроме того, разработчикам будет интересна возможность использования угла ориентации магнитного поля для управления выходными параметрами таких структур в составе преобразователей частоты.

Напряжённость электрического поля; индукция магнитного поля; эффективная масса; дрейфово-диффузионная модель; перенос носителей заряда; квазимпульс; кинетическая энергия горячих электронов; эффект Ганна.

I.V. Malyshev, N.V. Parshina, A.A. Okhotnikova

APPLICATION OF ORTHOGONAL ORIENTED STRONG ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS TO CREATE FREQUENCY-CONVERTING DEVICES OF AUTODYNE TYPE

In the framework of the drift-diffusion model of carrier transport in the bulk of III–V type semiconductors, under external action of strong constant electric and magnetic fields orthogonally oriented relative to each other, a new principle for applying the discovered effects is proposed, which take into account the nonlinearities of the output parameters of the working chip, which leads to the possibility creation of new semiconductor structures controlled by a magnetic field (SSCMF). Previously, the diffusion component of the output current density was not taken into account as a separate effect arising under the orthogonal action of strong electric and magnetic components, which was at first time considered in this paper. It is shown that this component is a part of the inductive transverse output current and can be considered as an independent effect. The proposed practical application is based on the classical relations that describe the component spatial representation of the effective mass energy dependence and the parameters of the kinetic equations for the carriers drift and heating in the bulk of highly mobile III–V type semiconductors structures. (The energy dependence of the reciprocal effective mass value was obtained under the assumption that this parameter becomes heavier in the framework of the two-valley representation. However, the mechanism of such increasing is not considered in detail, but is taken into account as a result of expansion in a Taylor series.) At the same time, some new phenomena were also hypothetically discovered: a diffusion detector effect and a transverse induction effect controlled by a magnetic field, similar in its manifestation to the Gunn effect observed in this direction. The results obtained open the prospect for creating fundamentally new frequency-converting devices based on the above SSCMF, such as autodyne-type converters (mixers), one of the designs of which is also proposed in this work in a waveguide version. In the case of experimental confirmation of the discovered effects, which can be investigated using the block diagram of the measuring setup proposed in the work, we can conclude that there are promising new applications of magnetically controlled semiconductor structures. In addition, equipment developers will be interested in the possibility of using the magnetic field orientation angle to control the output parameters of such structures as part of converters.

Electric field strength; magnetic field induction; effective mass; drift-diffusion model; charge carrier transfer; quasi-pulse; kinetic energy of hot electrons; Gunn effect.

Введение. При разработке смесительных устройств необходимо учитывать вопросы согласования смесительного (частотно-преобразовательного) узла с гетеродинным устройством [1–3]. Для этого необходимо использовать дополнительные внешние цепи. Избежать этих усложнений в схеме устройства позволит исключение из полной схемы смесителя узла гетеродина, что является путём создания смесителей автодинного типа, когда часть разрабатываемого смесителя содержит

гетеродинный блок в своём составе, т.е. используется в составе двух блоков: гетеродинном и смесительном. Это, конечно, требует дополнительных согласующих включений [3, 4]. Известно, что такие устройства ограничены частотными диапазонами их применения, но практическое удобство и достоинства применения таких упрощающих схематических решений является стимулом для разработки смесителей данного типа. Особую актуальность разработкам автодинных частотно-преобразовательных элементов микроволнового диапазона определяет освоение микро- и наноразмерных технологий, что также является благоприятным фактором.

Компонентная дрейфово-диффузионная модель. В основе работы предложенных смесительных узлов этих устройств лежит использование силы Лоренца, которая проявляет себя при одновременном ортогональном воздействии сильного постоянного электрического (с напряженностью \mathbf{E}) и магнитного (с индукцией \mathbf{B}) полей [5, 6]. На практике это проявляется в виде эффекта Холла, который широко используется в различных технических устройствах.

Напряженность внешнего электрического поля обуславливает проявление дрейфово-диффузионных процессов при перемещении горячих электронов [7], что приводит к формированию из них пространственных сгустков, проявляющих себя в виде «солитонов», имеющих большую скорость дрейфа [3, 8]. Известно также, что возможность реализации эффекта Ганна в объёме полупроводникового чипа с примесной концентрацией n и его физическими размерами определяется выполнением критерия Кремера [6, 9].

При рассмотрении кинетических эффектов, проявляемых при воздействии на электроны внешнего поля, важно знать каким образом происходит увеличение эффективной массы m с ростом кинетической энергии [10]. Так же известен эффект отрицательной эффективной массы при торможении носителей заряда во внешнем поле. В общем случае величина обратной эффективной массы $1/m = d^2W/dp^2$ выступает в качестве коэффициента в дисперсионной зависимости $W(p) = p^2/m$. В дальнейших преобразованиях будем применять известное соотношение, описывающее энергозависимость $1/m = f(W)$, которое записывается как результирующее соотношение разложения этой функции в ряд Тейлора (ограничение двумя первыми членами ряда) [11–13]:

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{m_0} \left[1 - p_m \frac{W - W_0}{W_0} \right], \quad (1)$$

(m_0 – величина эффективной массы электрона на дне зоны проводимости при $T = 300\text{K}$ (при энергии $W = W_0$ – средняя его энергия при комнатной температуре, которую, в ряде случаев, можно полагать равной энергии акустического фонона), p_m – безразмерная постоянная величина, соответствующая типу конкретной полупроводниковой структуры и определяемая из дрейфовой характеристики $v(E)$ (в случае GaAs $p_m = 0,1$)) [12, 13].

Заметим, что уравнение (1) подразумевает в неявном виде эффект утяжеления эффективной массы который происходит при переходе электрона в боковую верхнюю долину [11, 12]. Также не учитывались и другие наиболее известные механизмы, описывающие данную зависимость в конкретных условиях (классическое и Кейновское отклонение дисперсии от квадратичного закона и др.)

Для рассмотрения кинетических процессов будем использовать феноменологический подход. Он предполагает использование систем дифференциальных уравнений сохранения (разогрева и дрейфа) [13, 14]:

$$\frac{dW}{dt} = eE p/m - (W - W_0) / \tau; \quad (2)$$

$$\frac{dp}{dt} = eE - \frac{p}{\tau}, \quad (3)$$

(где τ и τ_3 – времена релаксации квазиимпульса p и энергии W соответственно; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона). В дальнейшем будем использовать стационарный случай этих уравнений.

После подстановки соотношения (2) в (1) (с учётом того, что $E_{\text{п}} = m_0 W_0 / e^2 p_m \tau \tau_3$ – напряжённость порогового электрического поля эффекта Ганна) можно получить:

$$\frac{E}{E_{\text{п}}} = \sqrt{\frac{m}{m_0} p_m \left(\frac{W}{W_0} - 1 \right)}. \quad (4)$$

Рассмотрим структуру полупроводникового чипа на основе материала типа $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ с длиной рабочего участка L и площадью поперечного сечения S (рис.1), в условиях воздействия постоянного электрического поля с напряжённостью E_0 и направленного вдоль оси x . В рамках данной модели будем определять это направление как ориентированное параллельно направлению перемещения носителей заряда дрейфующих под действием этого поля $|E_0| = E_{0x}$. Кроме того на этот образец также воздействует постоянное магнитное поле с индукцией B , приложенной под углом α по отношению к оси z , что определяет $B_z = |B| \cos \alpha$ (проекция B на ось z). Такая конструкция может рассматриваться как магнитоуправляемая полупроводниковая структура (МУПС) [13, 14].

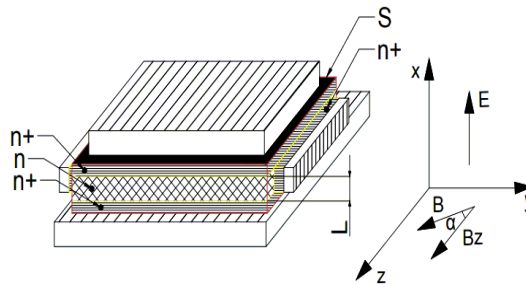


Рис. 1. Топология размещения слоёв чипа МУПС

Расчёт и анализ. В рамках предложенной дрейфово-диффузионной модели рассмотрим влияние сильного магнитного поля на значение коэффициента диффузии и дрейфовые параметры МУПС.

Известно [15], что дрейфовая скорость носителей заряда в полупроводнике, при воздействии магнитного поля, приобретает Холловскую (поперечную) составляющую. Тогда уравнения для средней электронной кинетической энергии W , и для эффективной массы (1), будут иметь осевые (x и y) составляющие, т.е. [12]:

$$\frac{1}{m_x} = \frac{1}{m_0} \left[1 - p_m \frac{W_x - W_0}{W_0} \right]; \quad \frac{1}{m_y} = \frac{1}{m_0} \left[1 - p_m \frac{W_y - W_0}{W_0} \right]. \quad (5)$$

Уравнения дрейфа и разогрева (2) и (3) в компонентной форме будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= \frac{eE_{0x}}{m_x} - \frac{v_x}{\tau}; & \frac{dv_y}{dt} &= \frac{eE_B}{m_y} - \frac{v_y}{\tau}; & \frac{dW_x}{dt} &= eE_{0x}v_x - \frac{W_x - W_0}{\tau}; \\ & & & & \frac{dW_y}{dt} &= eE_B v_y - \frac{W_y - W_0}{\tau}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $eE_B = ev_x B_z$ - сила Лоренца, направленная вдоль оси y .

В результате решения стационарного случая уравнений (2) – (3) [12, 16] и учитывая, что эффективная масса носителей представлена в виде (5), получаются соотношения для компонент кинетической энергии:

$$W_x = eE_{0x}v_{x0} + W_0; \quad W_y = eE_B v_{y0} + W_0;$$

$$v_x = \frac{W_x - W_0}{eE_{0x}}; \quad v_y = \frac{W_y - W_0}{eE_B}.$$

Далее определяем: $\frac{W_x}{W_0} = 1 + \frac{z}{p_m(1+z)}$; $\frac{W_y}{W_0} = 1 + \frac{z_B}{p_m(1+z_B)}$, где введены параметры: $z = E_{0x}^2/E_{II}^2$, $z_B = E_B^2/E_{II}^2$.

Поскольку, согласно известному соотношению Эйнштейна: $D_0 = \frac{2}{3} \frac{W_0}{m_0}$ – коэффициент диффузии без воздействия внешних полей [4, 17], можно записать в нормированном виде соотношения для осевых компонент коэффициента диффузии:

$$\frac{D_x}{D_0} = \frac{z + p_m(z+1)}{p_m(z+1)^2}; \quad \frac{D_y}{D_0} = \frac{z_B + p_m(z_B+1)}{p_m(z_B+1)^2}. \quad (7)$$

Эти соотношения в зависимости от E_{0x}/E_{II} и B_z приведены на рис. 2–4.

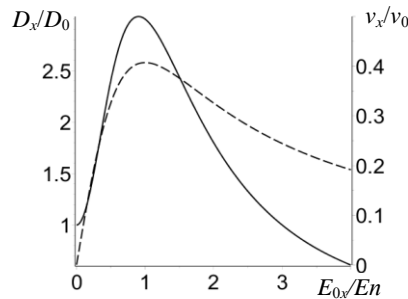


Рис. 2. Нормированные полевые зависимости компонент продольного коэффициента диффузии D_x/D_0 (сплошная линия) и продольной дрейфовой скорости v_x/v_0 (пунктирная линия)

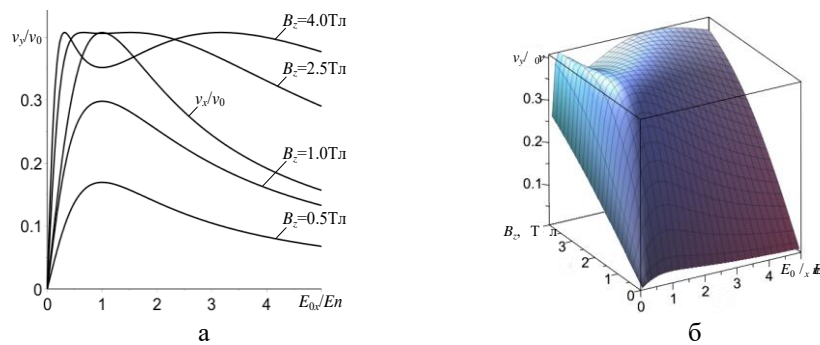


Рис. 3. Полевые поперечные дрейфовые индукционные (ось y) зависимости $v_y/v_0 = f(E_{0x}/E_{II}, B_z)$ и $v_x/v_0 = f(E_{0x}/E_{II})$ (ось x), (а), их трехмерное изображение (б)

Очевидно, что электрическое поле вдоль продольной x оси сильно влияет на вид как дрейфовой скорости, так и коэффициента диффузии, при полном отсутствии какой-либо зависимости этих осевых компонент от поперечного (z) магнитного поля [18].

Построенные на рис. 4 графики электрических и магнитных характеристик (ось y) поперечных компонент индукционного коэффициента диффузии демонстрируют сильную зависимость этого параметра от индукции внешнего магнитного поля [19].

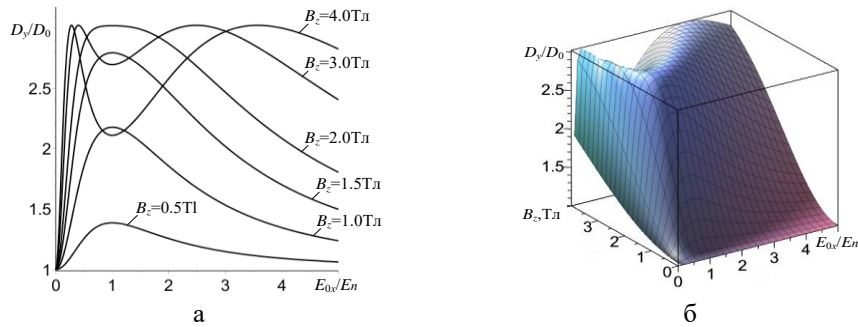


Рис. 4. Электромагнитные характеристики коэффициента поперечного диффузии $D_y/D_0 = f(E_{0x}/E_{П}, B_z)$ (а), их трехмерное изображение (б)

Анализ полученных кривых на рис. 3 и 4 для дрейфовых и диффузионных компонент $v_y/v_0 = f(E_{0x}/E_{П}, B_z)$ и $D_y/D_0 = f(E_{0x}/E_{П})$ показывает, что диффузионные процессы в условиях сильных магнитных полей с индукцией $B_z = 3$ Тл и выше демонстрируют появление ещё одного максимума. При этом графики приобретают более нелинейный вид.

Применение результатов моделирования. Поскольку на поперечных дрейфовых характеристиках рис.3 имеется падающий участок (что будет иметь место и на ВАХ структуры), можно сделать предположение, что этот активный поперечный участок объёма полупроводника будет проявлять свойства структуры, в которой может быть реализован эффект Ганна, а напряженность порогового поля этого эффекта будет зависеть от магнитного поля (МП) [19–21] (рис. 5 и 6). Также из расчётов видно, что при таких сильных полях (при $B_z = 4$ Тл) эта напряжённость будет в 2 раза меньше, чем в его отсутствии. Таким образом понятно, что КПД такого гетеродинного генератора на таком поперечном объёмном диоде будет выше, поскольку в этом случае будет ниже количество выделяемой тепловой мощности. Указанный генераторный узел может быть создан на базе МУПС, входящей в состав схемы генератора (при соблюдении условий баланса амплитуд и фаз).

При этом такой генератор может быть применён в качестве гетеродинного в составе смесителя автодинного типа (автодинного преобразователя частоты) [1, 20], в котором продольный участок объёмной структуры (ось x) представляет собой смесительный нелинейный полупроводниковый элемент (НПЭ). При подаче на этот смесительный НПЭ положительного напряжения смещения (напряжения рабочей точки) и переменного внешнего напряжения сигнала, получается смеситель, у которого контур промежуточной частоты может быть размещён параллельно с образцом структуры при обеспечении ёмкостной развязки по постоянному току [21] (рис. 5).

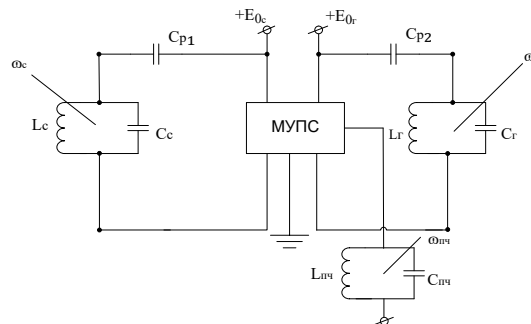


Рис. 5. Обобщённая структурная схема смесителя на МУПС

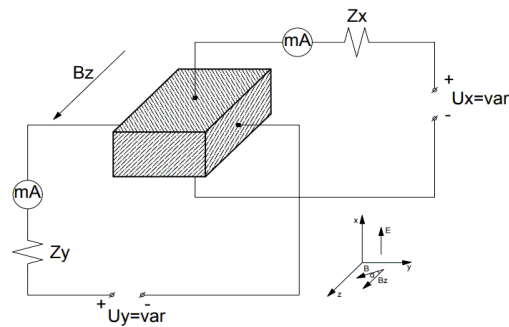


Рис. 6. Эскиз подключений для проведения экспериментальных исследований статических характеристик МУПС

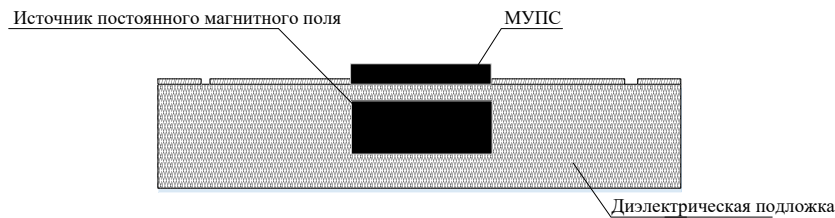


Рис. 7. Структурный эскиз размещения конструкции МУПС на диэлектрической подложке внутри волновода

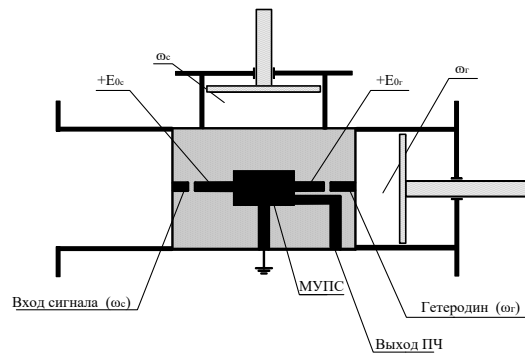


Рис. 8. Двухмерное схематическое представление смесителя волноводного типа

Волноводный вариант предложенного смесителя приведён в эскизном виде на рис. 7 и 8. Его прикладное достоинство заключается в том, что представляется возможность исключить из конструкции автономный гетеродинный генератор, а управление перестройкой частоты внутреннего гетеродина осуществлять как путём изменения величины индукции B , так и вариацией угла её ориентации относительно оси направления дрейфа.

Заключение. В результате проведенных расчётов с предлагаемым компонентным представлением дрейфовой скорости, эффективной массы и коэффициента диффузии от энергии определена практическая целесообразность и простота нахождения выходных параметров рабочего смесительного чипа для приборов микроволнового диапазона. В рамках феноменологического рассмотрения предложен способ определения компонент коэффициента диффузии при воздействии на полупроводник силь-

ных электрических и магнитных полей (и, как частный случай, обнаружение нового диффузионного детекторного эффекта). Полученные результаты позволяют предложить возможность создания нового класса преобразовательных устройств с характеристиками, управляемыми величиной индукции магнитного поля и ориентацией этого поля относительно направления дрейфа носителей заряда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Усанов Д.А.* Эффект автодиного детектирования в генераторе на диоде Ганна с низкочастотным колебательным контуром в цепи питания // Радиотехника и электроника. – 1996. – Т. 46, № 12. – С. 1497-1500.
2. *Malyshev I.V., Fil K. A., Goncharova O.A.* Determination of the Bulk Conductivity of III–V Semiconductors in a Strong Constant Electric Field and under Harmonic Effects // Semiconductors. – 2019. – Vol. 53, No. 15. – P. 1979-1982.
3. *Heinrich H., Keeler W.* Gunn Effect Threshold and Domain Formation in Transverse Magnetic Fields in Indium Antimonide // Applied Physics Letters. – 1972. – No. 4. – P. 171-172.
4. *Peter Y.Yu. Manuel Cardona.* Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. – 793 p.
5. *Levinshtein M.E., Nasledov D.N., Shur M.S.* Magnetic Field Influence on the Gunn Effect // PSS B. – 1969. – No. 2. – P. 897-903.
6. *Мальшиев И.В., Осадчий Е.Н., Гончарова О.А.* Разработка частотных преобразователей, использующих дрейфовые и диффузионные объёмные нелинейности в условиях действия внешних сильных электрических и магнитных полей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 126-142.
7. *Короновский А.А., Храмов А.Е., Москаленко О.И. и др.* Исследование влияния случайных флуктуаций концентрации легирующей примеси на ток в полупроводниковых сверхрешетках // Матер. 22-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2012), Sevastopol, Crimea. – 2012. – P. 183-184.
8. *Мальшиев И.В., Осадчий Е.Н., Филь К.А.* Способы учёта энергозависимости эффективной массы горячих носителей в объёме полупроводников типа АІІІВV для различных случаев дисперсии // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4. – ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4396.
9. *Мальшиев И.В., Гончарова О.А.* Исследование собственной КВЧ проводимости полупроводников // Наука и образование на рубеже тысячелетий: Сб. научно-исследовательских работ. – 2018. – Вып. 1. – С. 168-174.
10. *Malyshev I.V., Fil K.A., Parshina N.V.* Nonlinearity of the Diffusion Coefficient of Hot Carriers in the Bulk of the Semiconductor under the Action of Electric and Magnetic Fields // Russian Physics Journal. – 2017. – Vol. 6, No. 3. – P. 923-927.
11. *Sitangshu Bhattacharya, Kamakhya Prasad Ghatak.* Effective Electron Mass in Low-Dimensional Semiconductors // Series in Materials Science. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. – Vol. 167. – 535 p.
12. *Fischetti M.V., Vandenbergh W.G.* Advanced Physics of Electron Transport in Semiconductors and Nanostructures. – Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – 474 p.
13. *Malyshev I.V., Goncharova O.A., Fedotov A.A.* Comparative Analysis of Charge Carriers Effective Mass Energy Dependences in the Various Semiconductors under Conditions of Strength and Extra Strength Electric External Fields Action // Proceedings of 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW) – 2021, Divnomorskoe, Russia. – P. 125- 128.
14. *Malyshev I.V., Goncharova O.A.* The Possibility of Creating a New Class of Frequency Converting Devices Based on The Bulk of АІІІВV Type Semiconductor Structures with Parameters Controlled by Strong Electric and Magnetic Fields // Proceedings of 2019 International Conference on Radiation Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2019, Divnomorskoye, Krasnodar Region, Russia. – P. 188-191.
15. *Sungjung Joo, Taeyueb Kim, Sang Hoon Shin, et al.* Magnetic-field-controlled Reconfigurable Semiconductor Logic // Nature. – 2013. – Vol. 494. – P. 72-76.
16. *Malyshev I.V., Fil K.A., Parshina N.V.* The Dependence of the Diffusion Coefficient in Semiconductor Materials under the Influence of the External Strong Magnetic and Electric Fields // Materials of 2017 International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications – 2017, Jabalpur, India. – P. 142-143.

17. *Trovato M., Reggiani L.* Maximum Entropy Principle within a Total Energy Scheme: Application to Hot-Carrier Transport in Semiconductors // *Physical Review*. – 2000. – Vol. 61, No. 24. – P. 16667-16681.
18. *Fromhold T.M., Krokhin A.A., Wilkinson P.B., et al.* Chaotic Quantum Transport in Superlattices // *UFN*. – 2001. – 44:10 suppl. – P. 24-27.
19. *Fowler D., Hardwick D., Patané A. et al.* Magnetic-Field-Induced Miniband Conduction in Semiconductor Superlattices // *Physical Review*. – 2007. – Vol. 76, No. 24. – P. 245303.
20. *Сельский А.О., Короновский А.А., Москаленко О.И. и др.* Влияние межминизонного тунелирования на генерацию тока в полупроводниковой сверхрешётке // *Журнал технической физики*. – 2015. – Вып. 4. – С. 62-66.
21. *Malyshev I.V., Parshina N.V., Goncharova O.A.* Behavior of Bulk Semiconductor Structures and Superlattices Output Parameters under the Influence of Strong External Constant and Alternative Electric Fields // *Proceedings of 10th Anniversary International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2021–2022) Divnomorsk, Russia, May 23–27, 2022.* – P. 192-193.

REFERENCES

1. *Usanov D.A.* Effekt avtodinnogo detektirovaniya v generatore na diode Ganna s nizko-chastotnym kolebatel'nym konturom v tsepi pitaniya [The effect of autodyne detection in a Gunn diode oscillator with a low-frequency oscillatory circuit in the power circuit], *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics], 1996, Vol. 46, No. 12, pp. 1497-1500.
2. *Malyshev I.V., Fil K. A., Goncharova O.A.* Determination of the Bulk Conductivity of III–V Semiconductors in a Strong Constant Electric Field and under Harmonic Effects, *Semiconductors*, 2019, Vol. 53, No. 15, pp. 1979-1982.
3. *Heinrich H., Keeler W.* Gunn Effect Threshold and Domain Formation in Transverse Magnetic Fields in Indium Antimonide, *Applied Physics Letters*, 1972, No. 4, pp. 171-172.
4. *Peter Y.Yu. Manuel Cardona.* Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, 793 p.
5. *Levinshtein M.E., Nasledov D.N., Shur M.S.* Magnetic Field Influence on the Gunn Effect, *PSS B*, 1969, No. 2, pp. 897-903.
6. *Malyshev I.V., Osadchiy E.N., Goncharova O.A.* Razrabotka chastotnykh preobrazovateley, ispol'zuyushchikh dreyfovye i diffuzionnye ob"emnye nelineynosti v usloviyakh deystviya vneshnikh sil'nykh elektricheskikh i magnitnykh poley [Development of frequency converters using drift and diffusion volumetric nonlinearities under the action of external strong electric and magnetic fields], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 2, pp. 126-142.
7. *Koronovskiy A.A., Khramov A.E., Moskalenko O.I. i dr.* Issledovanie vliyaniya sluchaynykh fluktuatsiy kontsentratsii legiruyushchey primesi na tok v poluprovodnikovykh sverkhreshetkakh [Investigation of the influence of random fluctuations of the dopant concentration on the current in semiconductor superlattices], *Mater. 22-y Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii "SVCh-tekhnika i tele-kommunikatsionnye tekhnologii" (KryMiKo'2012), Sevastopol, Crimea.* [Materials of the 22nd International Crimean Conference "Microwave Engineering and Telecommunication Technologies" (KryMiKo'2012), Sevastopol, Crimea, 2012], pp. 183-184.
8. *Malyshev I.V., Osadchiy E.N., Fil K.A.* Sposoby ucheta energozavisimosti effektivnoy massy goryachikh nositeley v ob"eme poluprovodnikov tipa AIIIbV dlya razlichnykh sluchaev dispersii [Methods for taking into account the energy dependence of the effective mass of hot carriers in the volume of AIIIbV type semiconductors for various cases of dispersion], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2017, No. 4, Available at: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4396.
9. *Malyshev I.V., Goncharova O.A.* Issledovanie sobstvennoy KVCh provodimosti poluprovodnikov [Study of intrinsic EHF conductivity of semiconductors], *Nauka i obrazovanie na rubezhe tysyacheletiy: Sb. nauchno-issledovatel'skikh rabot* [Science and education at the turn of the millennium: Collection of research papers], 2018, Issue 1, pp. 168-174.
10. *Malyshev I.V., Fil K.A., Parshina N.V.* Nonlinearity of the Diffusion Coefficient of Hot Carriers in the Bulk of the Semiconductor under the Action of Electric and Magnetic Fields, *Russian Physics Journal*, 2017, Vol. 6, No. 3, pp. 923-927.

11. *Sitangshu Bhattacharya, Kamakhya Prasad Ghatak*. Effective Electron Mass in Low-Dimensional Semiconductors, *Series in Materials Science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, Vol. 167, 535 p.
12. *Fischetti M.V., Vandenbergh W.G.* Advanced Physics of Electron Transport in Semiconductors and Nanostructures. Switzerland: Springer International Publishing, 2016, 474 p.
13. *Malyshev I.V., Goncharova O.A., Fedotov A.A.* Comparative Analysis of Charge Carriers Effective Mass Energy Dependences in the Various Semiconductors under Conditions of Strength and Extra Strength Electric External Fields Action, *Proceedings of 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW) – 2021, Divnomorskoe, Russia*, pp. 125-128.
14. *Malyshev I.V., Goncharova O.A.* The Possibility of Creating a New Class of Frequency Converting Devices Based on The Bulk of AIIIbV Type Semiconductor Structures with Parameters Controlled by Strong Electric and Magnetic Fields, *Proceedings of 2019 International Conference on Radiation Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, 2019, Divnomorskoye, Krasnodar Region, Russia, pp. 188-191.
15. *Sungjung Joo, Taeyueb Kim, Sang Hoon Shin, et al.* Magnetic-field-controlled Reconfigurable Semiconductor Logic, *Nature*, 2013, Vol. 494, pp. 72-76.
16. *Malyshev I.V., Fil K.A., Parshina N.V.* The Dependence of the Diffusion Coefficient in Semiconductor Materials under the Influence of the External Strong Magnetic and Electric Fields, *Materials of 2017 International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications – 2017, Jabalpur, India*, pp. 142-143.
17. *Trovato M., Reggiani L.* Maximum Entropy Principle within a Total Energy Scheme: Application to Hot-Carrier Transport in Semiconductors, *Physical Review*, 2000, Vol. 61, No. 24, pp. 16667-16681.
18. *Fromhold T.M., Krokhin A.A., Wilkinson P.B., et al.* Chaotic Quantum Transport in Superlattices, *UFN*, 2001, 44:10 suppl, pp. 24-27.
19. *Fowler D., Hardwick D., Patanè A. et al.* Magnetic-Field-Induced Miniband Conduction in Semiconductor Superlattices, *Physical Review*, 2007, Vol. 76, No. 24, pp. 245303.
20. *Sel'skiy A.O., Koronovskiy A.A., Moskalenko O.I. i dr.* Vliyanie mezhhimnizonnogo tunelirovaniya na generatsiyu toka v poluprovodnikovoy sverkhreshetke [Influence of interminiband tunneling on current generation in a semiconductor superlattice], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2015, Issue 4, pp. 62-66.
21. *Malyshev I.V., Parshina N.V., Goncharova O.A.* Behavior of Bulk Semiconductor Structures and Superlattices Output Parameters under the Influence of Strong External Constant and Alternative Electric Fields, *Proceedings of 10th Anniversary International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications" (PHENMA 2021–2022) Divnomorsk, Russia, May 23–27, 2022*, pp. 192-193.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Ю.А. Кравченко.

Малышев Игорь Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: ivmalyshev@sfned.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79185372656, кафедра РТЭН; к.т.н.; доцент.

Паршина Наталья Валерьевна – e-mail: nparshina@sfned.ru; тел.: +79524146455; кафедра РТЭН; к.т.н.; доцент.

Охотникова Анастасия Александровна – Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева Южного федерального университета; e-mail: ohotnikova@sfned.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79518230823; научный сотрудник.

Malyshev Igor Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: ivmalyshev@sfned.ru; Tadanrog, Russia; phone: +79185372656; the department of RTEN; cand. of eng. sc.; associate professor.

Parshina Natalia Valerievna – e-mail: nparshina@sfned.ru; phone: +79524146455; the department of RTEN; cand. of eng. sc.; associate professor.

Ohotnikova Anastasia Alexandrovna – Research Institute of Multiprocessor Computing Systems named after Academician A.V. Kalyaev, Southern Federal University; e-mail: ohotnikova@sfned.ru; Tadanrog, Russia; phone: +795182308-23; researcher.