



## НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ГЕНЕРАТОРА НА ТУННЕЛЬНОМ ДИОДЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО СВЧ-СИГНАЛА

*А.В. Скрипаль, Д.А. Усанов, А.В. Абрамов*

Построена модель генератора на туннельном диоде, учитывающая изменение вида вольт-амперной характеристики диода при воздействии внешнего СВЧ-сигнала вследствие разогрева свободных носителей заряда и появления протектированного сигнала. Описана динамика перехода от режима автоколебаний через режим асинхронных колебаний к режиму подавления автоколебаний при относительно низких уровнях мощности внешнего СВЧ-сигнала.

Показано, что учет изменения вида вольт-амперной характеристики туннельного диода при воздействии внешнего СВЧ-сигнала позволяет адекватно описать наблюдавшиеся экспериментально уменьшение генерируемой мощности и последующий срыв автоколебаний в генераторе на туннельном диоде с ростом уровня мощности внешнего СВЧ-сигнала.

### Введение

К настоящему времени с помощью твердотельных приборов можно реализовать большинство радиотехнических функций в диапазоне СВЧ. Одной из особенностей микроэлектронных СВЧ-устройств является зависимость характеристик полупроводниковых приборов, входящих в их состав, от уровня мощности воздействующего сигнала [1]. В результате такого воздействия полупроводниковые приборы могут существенным образом изменять режим своей работы вплоть до полного выхода их из строя. В этой связи теоретические и экспериментальные исследования характера нелинейной динамики полупроводниковых СВЧ-приборов при изменении уровня воздействующего сигнала представляют значительный интерес.

Одним из наиболее изученных полупроводниковых СВЧ-приборов является туннельный диод. В том числе известны работы, в которых приведены результаты теоретических исследований нелинейной динамики устройств на туннельных диодах [2]. Одно из предположений, которое обычно принимается при моделировании работы устройств на туннельных диодах, состоит в том, что его вольт-амперная характеристика (ВАХ) содержит участок отрицательного дифференциального сопротивления  $N$ -типа и при увеличении уровня воздействующего на диод внешнего сигнала остается неизменной.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что воздействие СВЧ-излучения на туннельный диод может приводить к изменению его ВАХ от  $N$ -образной до приближающейся к экспоненциальной, характерной для ВАХ обычного невырожденного  $p$ - $n$ -перехода [3,4]. Теоретическое описание явления изменения вида вольт-амперных

характеристик туннельных диодов под действием СВЧ-сигнала высокого уровня [5] показало, что исчезновение участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением связано с уменьшением туннельной и резким увеличением диффузионной компоненты полного тока вследствие разогрева свободных носителей заряда и появления протектированного сигнала.

Экспериментальные исследования показали, что в случае использования туннельного диода в качестве активного элемента СВЧ-генератора при увеличении мощности подводимого внешнего сигнала наблюдается уменьшение генерируемой мощности и последующий срыв автоколебаний [4]. Однако теоретического описания динамики этого процесса проведено не было.

В настоящей работе представлены результаты компьютерного моделирования работы генератора на туннельном диоде при воздействии на него внешнего СВЧ-сигнала с учетом изменения вида ВАХ туннельного диода вследствие разогрева свободных носителей заряда и появления протектированного сигнала.

### Модель, используемая при расчете

Теоретический анализ работы генератора на туннельном диоде основывался на математическом описании процессов в эквивалентной схеме, представленной на рис. 1. Элементы эквивалентной схемы в виде параллельного соединения емкости  $C$ , нелинейного сопротивления  $R$ , зависящего от уровня внешнего СВЧ-сигнала, и последовательного сопротивления  $R_1$  моделируют полупроводниковую структуру. Корпус диода моделировался элементами  $L_K$  и  $C_K$ , генератор тока  $I_\Gamma$  моделирует внешний СВЧ-сигнал. СВЧ-схема генератора на туннельном диоде моделировалась последовательными  $L_1C_1$ ,  $L_2C_2$ ,  $L_3C_3$  и параллельным  $L_fC_fR_f$  колебательными контурами. Эквивалентная схема описывалась системой из двенадцати дифференциальных уравнений, составленных с использованием законов Кирхгофа:

$$\begin{aligned}
 dV_{ab}/dt &= (I_d - I(V_{ab}))/C, & dI_0/dt &= (E_0 - V_{cd} - I_0R_0)/L_0, \\
 dV_{cd}/dt &= (I_0 - I_d - I_1 - I_2 - I_3 - I_\Gamma)/C_K, & dI_d/dt &= (V_{cd} - V_{ab} - I_dR_1)/L_K, \\
 dV_{df}/dt &= (I_1 + I_2 + I_3 - I_f - V_{df}/R_f)/C_f, & dI_f/dt &= V_{df}/L_f, \\
 dV_{C_1}/dt &= I_1/C_1, & dI_1/dt &= (V_{cd} - V_{df} - V_{C_1})/L_1, \\
 dV_{C_2}/dt &= I_2/C_2, & dI_2/dt &= (V_{cd} - V_{df} - V_{C_2})/L_2, \\
 dV_{C_3}/dt &= I_3/C_3, & dI_3/dt &= (V_{cd} - V_{df} - V_{C_3})/L_3.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Ток  $I_\Gamma$ , наведенный внешним СВЧ-сигналом мощностью  $P_0$ , задавался в виде

$$I_\Gamma = I_{\Gamma 0} \sin \omega t,$$

где  $I_{\Gamma 0} = (2P_0 Y_0)^{1/2}$ ,  $Y_0$  – входная проводимость в плоскости включения туннельного диода.

Нелинейное сопротивление  $R$  определялось как среднее сопротивление р-п-перехода по первой гармонике СВЧ-тока

$$R = V/I_\Gamma, \text{ где } I_\Gamma = (A^2 + B^2)^{1/2},$$

$$A = 2/T \int_0^T I(V) \sin \omega t dt, \quad B = 2/T \int_0^T I(V) \cos \omega t dt, \quad V = V_0 + V^- \sin(\omega t + \varphi).$$

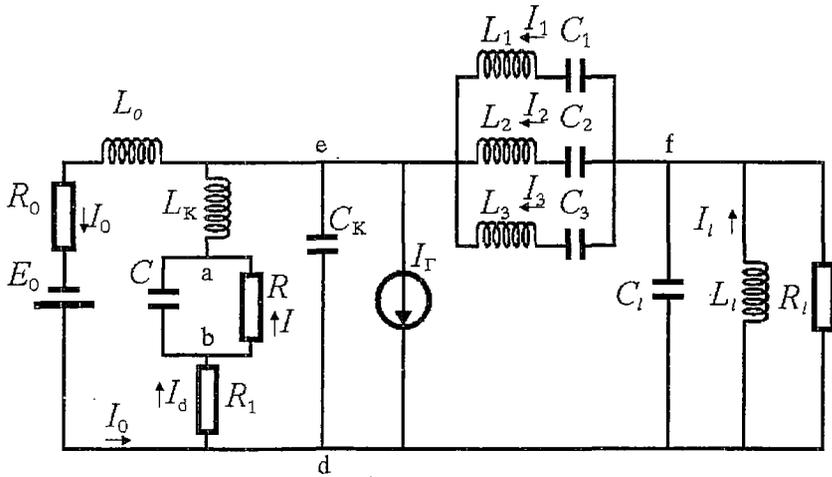


Рис. 1. Эквивалентная схема генератора на туннельном диоде

Здесь  $V_0$  и  $V$  – величина постоянного напряжения и амплитуда переменного напряжения на полупроводниковой структуре,  $I$  – ток через активное сопротивление  $R$ ,  $\varphi$  – фазовый сдвиг между током  $I_T$  и переменным напряжением на полупроводниковой структуре,  $T=2\pi/\omega$  – период СВЧ-колебаний.

При математическом моделировании протекания тока через туннельный диод использовалось выражение для ВАХ, полученное с учетом изменения туннельной  $I_T$ , избыточной  $I_X$  и диффузионной  $I_D$  компонент полного тока  $I$  вследствие разогрева свободных носителей заряда [5,6]

$$I(V) = I_T + I_X + I_D. \quad (2)$$

Здесь

$$I_T = AT_T \int_{\epsilon_c}^{\epsilon_v} [f_{cT}(\epsilon) - f_{vT}(\epsilon)] g_c(\epsilon) g_v(\epsilon) d\epsilon,$$

$$I_X = A_1 D_x \text{Sexp}(-\alpha_x \epsilon_v),$$

$$I_D = \frac{qSD_n n_{p0}}{L_n} \times$$

$$\times \left\{ \frac{kT_n [\zeta_n(T_0) - \epsilon_c]}{[\zeta_n(T_n) - \epsilon_c] kT_0} \exp\left(\frac{qV_k}{kT_0} - \frac{\zeta_n(T_0) - \epsilon_c}{kT_0}\right) \ln\left[1 + \exp\left(\frac{\zeta_n(T_n) - \epsilon_c}{kT_n} - \frac{qV_k}{kT_n} + \frac{qV}{kT_n}\right)\right] - 1 \right\} +$$

$$+ \frac{qSD_p p_{n0}}{L_p} \times$$

$$\times \left\{ \frac{kT_p [\epsilon_v - \zeta_p(T_0)]}{[\epsilon_v - \zeta_p(T_p)] kT_0} \exp\left(\frac{qV_k}{kT_0} - \frac{\epsilon_v - \zeta_p(T_0)}{kT_0}\right) \ln\left[1 + \exp\left(\frac{\epsilon_v - \zeta_p(T_p)}{kT_p} - \frac{qV_k}{kT_p} + \frac{qV}{kT_p}\right)\right] - 1 \right\},$$

где  $f_{cT}(\epsilon)$  и  $f_{vT}(\epsilon)$  – функции распределения Ферми – Дирака электронов в зоне проводимости и в валентной зоне с электронной температурой  $T_n$ ;  $T_p$  – температура дырок;  $T_0$  – температура решетки;  $A$ ,  $A_1$ ,  $\alpha_x$  – константы;  $T_T$  – вероятность туннельного перехода через потенциальный барьер между p- и n-областями;  $g_c(\epsilon)$  и  $g_v(\epsilon)$  – плотности энергетических состояний в зоне проводимости и в валентной зоне;  $\epsilon_c$  и  $\epsilon_v$  – уровни энергии, соответствующие дну зоны проводимости и потолку валентной зоны;  $\epsilon_g$  – ширина запрещенной зоны;  $\zeta_n$  и  $\zeta_p$  – квазиуровни Ферми в полупроводниках n- и p-типа;  $D_x$  – плотность заполненных состояний, расположен-

ных в запрещенной зоне выше потолка валентной зоны на величину  $\epsilon_x$ , определяемую выражением

$$\epsilon_x \approx \epsilon_g - qV + (\zeta_n(T_n) - \epsilon_c) + (\epsilon_v - \zeta_p(T_p)),$$

$D_n$  и  $D_p$  – коэффициенты диффузии электронов и дырок;  $S$  – площадь поперечного сечения р–п–перехода;  $V$  – напряжение, приложенное к диоду;  $V_k$  – контактная разность потенциалов.

Расчет ВАХ диода проводился с учетом детекторного эффекта с использованием соотношения

$$I_c = 1/T \int_0^T I(V) dt. \quad (3)$$

Амплитуда СВЧ–напряжения определялась по величине поглощенной диодом СВЧ–мощности  $P$  из соотношения

$$P = (V^-)^2 / (2R). \quad (4)$$

Величина поглощенной диодом мощности определялась из выражения [7]

$$P = P_0(1 - |N|^2), \quad (5)$$

где  $N = (Y - Y_0) / (Y + Y_0)$  – коэффициент отражения СВЧ–сигнала от диода,  $Y = j\omega C_K + [R / (1 + j\omega RC) + j\omega L_K]^{-1}$  – комплексная проводимость туннельного диода.

В результате численного решения системы дифференциальных уравнений (1) методом Рунге – Кутты четвертого порядка определялась зависимость мгновенных значений тока  $i_i(t)$  в ряд Фурье были рассчитаны гармонические составляющие тока, определены их амплитуды и рассчитаны мощности гармоник  $P_k$  на выходе генератора с использованием соотношения  $P_k = i_{ki}^2 R_l / 2$ , где  $i_{ki}$  – амплитуды гармонических составляющих тока через активное сопротивление  $R_l$ .

### Результаты расчета

Расчеты, выполненные с использованием вышеприведенной модели, показали, что в отсутствие внешнего СВЧ–сигнала спектр выходного сигнала генератора на туннельном диоде определяется параметрами эквивалентной схемы и режимом питания активного элемента. Рассчитанное значение частоты основной гармоники выходного сигнала составляло 1.5 ГГц. Отклонение формы СВЧ–тока в нагрузке от гармонического закона (рис. 2, а) вызывает присутствие в спектре выходного сигнала достаточно большой по амплитуде второй гармоники (рис. 2, б). Соответствующий фазовый портрет приведен на рис. 2, в.

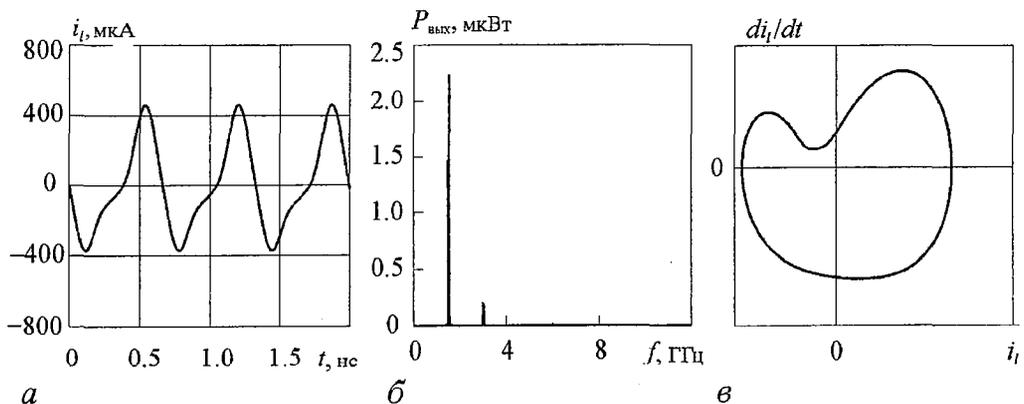


Рис. 2. Форма (а), спектр (б) и фазовый портрет (в) выходного сигнала генератора в отсутствие внешнего СВЧ–сигнала

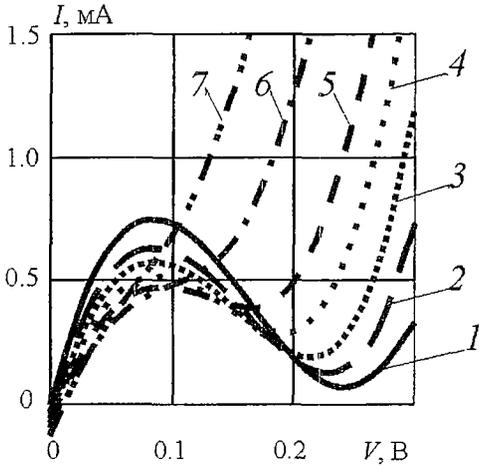


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики туннельного диода при различных уровнях мощности внешнего СВЧ-сигнала  $P_0$ , мВт: кривая 1 - 0.0, 2 - 0.3, 3 - 0.5, 4 - 0.75, 5 - 1.0, 6 - 1.5, 7 - 2.0

порядка 0.5 мВт форма СВЧ-тока в нагрузке усложняется (рис. 4, а), наблюдается монотонное перераспределение мощности автоколебаний между основной и второй гармониками при некотором уменьшении суммарной выходной мощности (рис. 4, б), отображение последования Пуанкаре образует на фазовой плоскости замкнутую кривую (рис. 4, в).

При дальнейшем увеличении мощности внешнего СВЧ-сигнала на ВАХ туннельного диода (см. рис. 3, кривые 5, 6, 7) наблюдается постепенное исчезновение участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, приводящее к резкому уменьшению амплитуд как первой, так и второй гармоник выходного сигнала. При уровне мощности внешнего СВЧ-сигнала  $P_0 \sim 1.0$  мВт автоколебательный режим генератора на туннельном диоде исчезает, а в спектре выходного сигнала на нагрузке присутствуют только составляющие, обусловленные воздействием внешнего СВЧ-сигнала.

Поскольку известны работы, в которых моделирование нелинейной динамики устройств на туннельных диодах проводится в предположении, что ВАХ диода остается неизменной при увеличении уровня воздействующего на диод внешнего сигнала [8], то представляется интересным сравнить выходные характеристики генератора, рассчитанные с учетом изменения вида ВАХ

При подаче на туннельный диод СВЧ-сигнала с частотой, существенно превышающей частоту собственных колебаний, наблюдается изменение его ВАХ, связанное с уменьшением туннельной, резким увеличением диффузионной и незначительным увеличением избыточной компоненты полного тока диода вследствие разогрева свободных носителей заряда [1,5,6].

Результаты расчета ВАХ туннельного диода при различных уровнях мощности  $P_0$  внешнего СВЧ-сигнала с частотой  $f=10$  ГГц приведены на рис. 3.

Численное моделирование динамики генератора показало, что при воздействии на туннельный диод внешнего СВЧ-сигнала с частотой, не кратной частоте автоколебаний, наблюдается режим асинхронных колебаний.

При увеличении мощности внешнего СВЧ-сигнала до значений

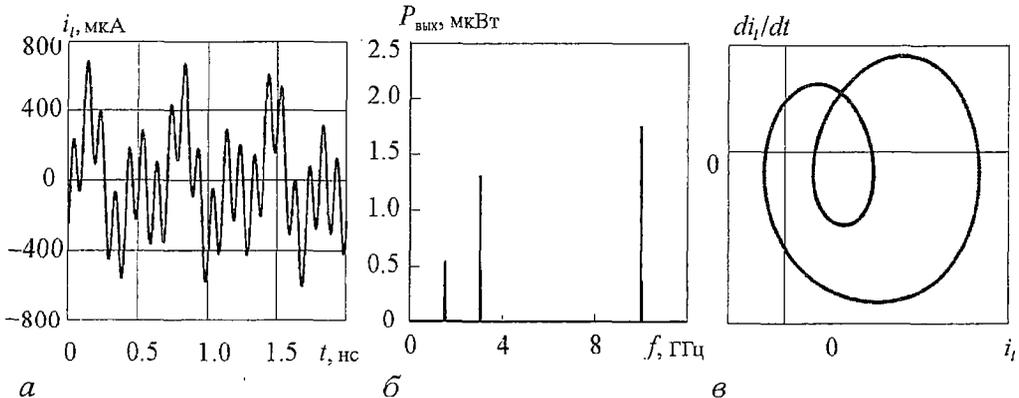


Рис. 4. Форма (а), спектр (б) и отображение последования Пуанкаре (в) выходного сигнала генератора при воздействии внешнего СВЧ-сигнала

туннельного диода под воздействием внешнего СВЧ-сигнала, с характеристиками, рассчитанными без учета этого эффекта.

На рис. 5 представлены зависимости мощности основной гармоники  $P_1$  выходного сигнала генератора на туннельном диоде от мощности внешнего СВЧ-сигнала, рассчитанные с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) изменения ВАХ туннельного диода.

Проведенные исследования показали, что в случае предположения о неизменности ВАХ туннельного диода спектральные составляющие, обусловленные наличием автоколебательного режима, не претерпевают никаких изменений до значений мощности внешнего СВЧ-сигнала  $P_0 \sim 10 \div 20$  мВт (см. рис. 5, кривая 2). Следует отметить, что дальнейшее увеличение мощности внешнего СВЧ-сигнала примерно до 50 мВт приводило к уменьшению амплитуды собственных колебаний, известному как режим асинхронного подавления вследствие снижения средней крутизны характеристики активного элемента [9].

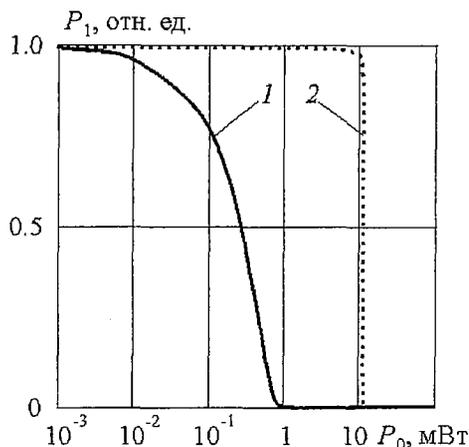


Рис. 5. Зависимости мощности основной гармоники  $P_1$  выходного сигнала генератора на туннельном диоде от мощности внешнего СВЧ-сигнала  $P_0$

### Заключение

Таким образом, в результате построения модели генератора на туннельном диоде, учитывающей изменение вида ВАХ диода при воздействии внешнего СВЧ-сигнала вследствие разогрева свободных носителей заряда и появления продетектированного сигнала, описана динамика перехода от режима автоколебаний через режим асинхронных колебаний к режиму подавления автоколебаний при относительно низких уровнях мощности внешнего СВЧ-сигнала.

Показано, что учет изменения вида ВАХ туннельного диода при воздействии внешнего СВЧ-сигнала позволяет адекватно описать наблюдавшиеся экспериментально уменьшение генерируемой мощности и последующий срыв автоколебаний в генераторе на туннельном диоде с ростом уровня мощности внешнего СВЧ-сигнала.

*Работа выполнена в рамках научной программы «Фундаментальные исследования высшей школы в области естественных и гуманитарных наук. Университеты России».*

### Библиографический список

1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. 376 с.
2. Рабинович М. И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. 432 с.
3. Усанов Д.А., Коротин Б.Н., Орлов В.Е., Скрипаль А.В. Снятие вырождения в р- и п-областях туннельного диода внешним СВЧ-сигналом // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16, вып.8. С.50.
4. Усанов Д.А., Орлов В.Е., Коротин Б.Н., Скрипаль А.В. Влияние внешнего СВЧ-сигнала на работу СВЧ-генератора на туннельном диоде // Изв.вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34, № 1. С. 81.

5. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Коротин Б.Н., Орлов В.Е. Влияние греющего СВЧ-поля на вид вольт-амперной характеристики туннельного диода // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, вып.7. С.81.

6. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Угрюмова Н.В., Вениг С.Б., Орлов В.Е. Возникновение режима отрицательного дифференциального сопротивления и переключения в туннельном диоде под действием внешнего СВЧ-сигнала // ФТП. 2000. Т. 24, вып.5. С. 567.

7. Хелзайн Дж. Пассивные и активные цепи СВЧ / Пер. с англ. под ред. А.С. Галина. М.: Радио и связь, 1981. 200 с.

8. Карташов В.М., Котов А.Ф., Решетняк С.А., Филимонов Ю.С. Исследование стохастического резонанса в электрической цепи с туннельным диодом // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26, вып. 5. С. 67.

9. Минакова И.И. Неавтономные режимы автоколебательных систем. М.: Изд-во МГУ, 1987. 168 с.

Саратовский государственный  
университет

Поступила в редакцию 30.03.2000

## NONLINEAR DYNAMICS OF TUNNEL-DIODE OSCILLATOR AT THE INFLUENCE OF EXTERNAL MICROWAVE SIGNAL

*A.V. Skripal, D.A. Usanov, A.V. Abramov*

The model tunnel-diode oscillator was built, in which the change of the tunnel diode  $I$ - $V$ -characteristic because of heating of free charge carriers and the appearance of detected signal under the influence of external microwave signal is taken into account. Dynamics of the transition from self-oscillation mode through asynchronous oscillation mode to mode of the oscillation suppression at comparatively low levels of an external microwave signal power was described.

It was shown that account of tunnel diode  $I$ - $V$ -characteristic change under the influence of external microwave signal allows to describe adequately the effect of output power observed in experiments reduction and following destruction of self-oscillation in the tunnel-diode oscillator with the increase of external microwave signal power.



*Скрипаль Александр Владимирович* – родился в 1954 году в городе Уч-Арал Талды-Курганской области, республика Казахстан. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1988), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1972) и доктора (1998) физико-математических наук. С 1998 года по настоящее время – профессор кафедры физики твердого тела Саратовского государственного университета. Автор монографии, более 100 научных трудов в области твердотельной электроники, физики полупроводников, радиоволнового контроля.



*Усанов Дмитрий Александрович* – родился в 1943 году в Менделеевске, республика Татария. Окончил Саратовский государственный университет (1965). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1972) и доктора (1989) физико-математических наук. С 1990 – профессор кафедры физики твердого тела, с 1989 по 2000 – проректор по НИР СГУ, с 1985 по настоящее время – заведующий кафедрой физики твердого тела. Автор монографий, большого числа статей и изобретений по твердотельной электронике и радиофизике. Заслуженный деятель науки РФ, член IEEE, МАН ВШ. E-mail: usanovda@info.sgu.ru



*Абрамов Антон Валерьевич* – родился в 1979 году в Куйбышеве. В настоящее время студент четвертого курса кафедры физики твердого тела Саратовского госуниверситета. Область научных интересов – физика полупроводников, твердотельная электроника.

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

1. Рукописи, объемом не более 16 стр. и 8 рис. принимаются в редакцию в 2 вариантах: бумажном и электронном.

Бумажный вариант должен быть напечатан на белой бумаге через два интервала и представлен в 2 экз. Рисунки выполняются на отдельных страницах в 2 экз. Под рисунком (или на оборотной стороне листа) указывается его номер, фамилии авторов, название статьи. Подрисовочные подписи печатаются на отдельном листе и не должны дублировать внутритекстовое описание рисунка.

Электронный вариант статьи представляется на 3.5" дискете или присылается по электронной почте (E-mail: and@cas.ssu.runnet.ru) в следующих кодировках: ASC II, Word, Tex, LaTeX. Рисунки в виде отдельных файлов в формате PCX, TIFF или GIF.

### 2. Требования к оформлению текста.

На первой странице перед текстом статьи должны быть напечатаны: индекс УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, краткая аннотация статьи, составленная по форме удобной для непосредственного включения ее в РЖ «Физика», издаваемый **ВИНИТИ**.

К статье прилагаются в 1 экземпляре:

а) перевод на английский язык: названия статьи, инициалов и фамилий авторов, аннотации;

б) краткие сведения об авторах с фотографиями любого формата.

В библиографическом списке нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. В списке указываются:

а) для книг – фамилия автора, инициалы, название книги, город, издательство, год издания, том;

б) для журнальных статей – фамилия автора, инициалы, название статьи, название журнала, серия, год, том, номер, выпуск, первая страница статьи;

в) для депонированных статей – название статьи, инициалы, фамилия автора, название организации, в которой выполнена работа, город, год, объем статьи, название депонирующей организации, дата депонирования, регистрационный номер;

г) для препринта – фамилия автора, инициалы, название издания, полное название издающей организации, год, количество страниц;

д) для материалов конференций, школ, семинаров – фамилия автора, инициалы, название статьи, название издания, время и место проведения конференции, город, издательство, год, первая страница статьи.

В конце статьи авторы должны указать наименование программы, в рамках которой выполнена работа, или наименование фонда поддержки.

Краткие сведения об авторах составляются по следующей форме:

Сидоров Петр Иванович – родился в 1938 году в Москве, окончил Московский физико-технический институт в 1961 году. После окончания МФТИ работает в ФИАН. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в МГУ (1964) и доктора физико-математических наук (1977) в области теории колебаний и волн, радиофизика и электроника, применение нелинейной динамики в различных областях науки. Автор монографии «Детерминированный хаос и экономика» и соавтор учебника «Волны в экологии». Опубликовал 120 научных статей по направлениям, указанным выше. Лауреат Государственной премии СССР. Редактор журнала International Journal of Chaos Theory и член редакционной коллегии журнала «Физика и жизнь».

Адрес редакции указан на последней странице журнала