



## ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОДОМЕННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ В АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВОМ ДИОДЕ ГАННА КАК НЕЛИНЕЙНЫЙ ФЕНОМЕН

*Д. А. Усанов, С. С. Горбатов, В. Ю. Кваско*

Проведены экспериментальные исследования с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа стационарных распределений напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в диоде Ганна. Выполнен компьютерный расчет этих величин, с учетом зависимости подвижности и коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля. Экспериментально обнаружена и подтверждена теоретически возможность существования многодоменного режима диодов Ганна.

*Ключевые слова:* Ближнеполевая СВЧ-микроскопия, диод Ганна, подвижность электронов, коэффициент диффузии, домен сильного электрического поля.

### Введение

К настоящему времени режимы работы диодов Ганна и устройств на их основе можно считать хорошо изученными. Параметры полупроводниковых структур, используемых в современных диодах Ганна, выбираются такими, чтобы в них реализовались условия для работы в режиме так называемого стационарного домена, в котором возможна СВЧ-генерация или усиление в широкой полосе частот. Подаваемое при этом на диод Ганна рабочее напряжение примерно в два раза превышает пороговое напряжение, отвечающее возникновению неустойчивости однородного состояния с формированием домена сильного поля (в GaAs оно приблизительно составляет 3600 В/см). В то же время вопрос о характере изменения в пространстве поля и концентрации носителей заряда с ростом подаваемого на диод напряжения (то есть вопрос о формировании доменной структуры) экспериментально исследован не был. Задача по изучению распределения электрического поля решалась с использованием численного моделирования в предположении, что коэффициент диффузии носителей заряда не зависит от поля. Экспериментальное исследование затруднялось невозможностью использования зондовых контактных методов применительно к структуре со столь малыми межэлектродными расстояниями. В настоящее время

для решения такой задачи был применен разработанный ближнеполевой сканирующий СВЧ-микроскоп [1,2], позволяющий проводить бесконтактные измерения с достаточной степенью локальности.

*Целью настоящей работы* является экспериментальное исследование динамики изменения характера распределения поля в диоде Ганна с помощью ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа и сопоставление результатов измерений с результатами численного моделирования.

## 1. Эксперимент и результаты численного моделирования

Современные зондовые бесконтактные методики позволяют провести исследование распределения концентрации носителей заряда в объеме кристалла полупроводникового прибора непосредственно в процессе его работы, что позволяет получить достоверную информацию о распределении электрического поля и концентрации носителей заряда при различных значениях подаваемого на него напряжения. Такого рода экспериментальные исследования применительно к диодам Ганна ранее не проводились.

Результаты, изложенные в настоящей статье, получены на основании зондовых исследований бескорпусного диода типа АА735А-6 с помощью созданного нами ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа (рис. 1). В качестве низкоразмерного резонатора использовалась система «короткозамыкатель с выемкой–металлический штырь». Штырь располагался напротив выемки при различных расстояниях между короткозамыкателем с выемкой и штырем, всегда значительно меньших длины волны основного типа [3]. Источником зондирующего ближнего поля служил заостренный зонд, связанный с резонатором через петлю связи.

Описанная методика применялась для измерения электрических параметров полупроводниковой структуры в диоде Ганна [4]. В экспериментах использовался панорамный измеритель коэффициента стоячей волны (КСВН) и ослабления типа Р2-61. Сигнал от генератора ГКЧ-61 подавался в СВЧ-тракт волновода 1. В волноводе 1 происходило взаимодействие СВЧ-сигнала со штырем 3 и короткозамыкателем 2, имеющим выемку 4. В окрестности штыря возникало ближнее поле, приводящее к резонансу. Отраженный от резонансной системы сигнал поступал на входящий в состав панорамного измерителя измерительный блок типа Я2Р-67 с аналоговым выходом и через аналогово-цифровой преобразователь LCard E14-140 подавался в компьютер. Обработка данных проводилась с использованием программной среды Mathcad v14. При проведении эксперимента изменением расстояния между короткозамыкателем 2 и штырем 3 добивались возникновения резонанса с малым коэффициентом отражения, после чего это расстояние фиксировалось. Ближнее поле в резонаторе взаимодействовало с заостренным зондом 6, выступающим за пределы резонатора и являющимся продолжением петли связи 7, а ближнее поле от зонда 6 взаимодействовало с исследуемым образцом, который располагался вблизи зонда 6. В измерительное устройство поступал отраженный сигнал, и проводились измерения частоты резонанса  $f_{рез}$  и коэффициента отражения  $R_{рез}$ .

Резонатор характеризовался следующими размерами:  $h = 6.5$  мм,  $g = 1$  мм,  $d = 0.9$  мм; размеры выемки:  $s = 7$  мм,  $w = 2.15$  мм. Расстояние  $k$  между штырем и короткозамыкателем не превышало  $\lambda/10$ , диаметр кончика зонда составлял 1 мкм.

Сканирование проводилось вдоль одной из открытых граней диода, от его анода к катоду с шагом 5 мкм при различных значениях внешнего напряжения смещения. Расстояние между зондом и гранью кристалла составляло 1 мкм, а диаметр иглы-зонда 0.25 мкм. Внешнее напряжение смещения изменялось в диапазоне от 0 до 6 В с шагом 1 В. Зондирование диодной структуры производилось в пределах области протяженностью 90 мкм. В результате сканирования были получены профили распределения СВЧ-отклика  $R$  по координате  $x$  при различных значениях напряжения внешнего электрического смещения  $U$ , поданного на диод Ганна (рис. 2). СВЧ-отклик определялся как модуль коэффициента отражения СВЧ-излучения  $R(x)$  на частоте 8.23 ГГц, соответствующей резонансному пику резонатора с зондом.

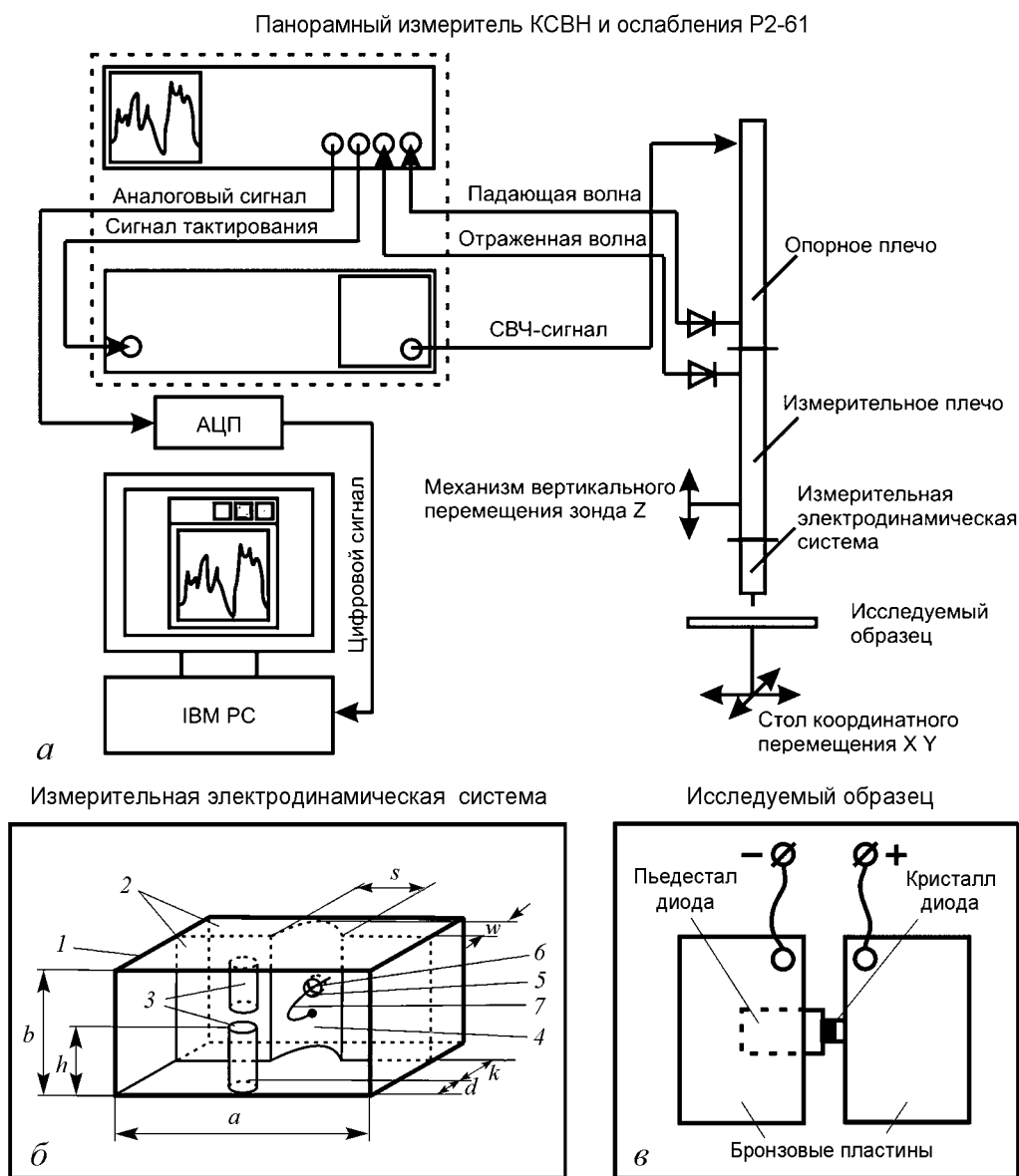


Рис. 1. а – ближнеполевой СВЧ-микроскоп [2]; б – измерительная электродинамическая система [1]; в – диод АА735А-6, установленный в специальную оправку

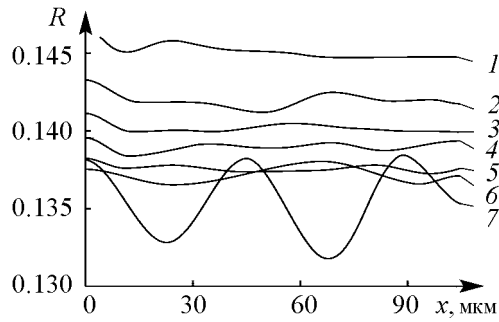


Рис. 2. Профили коэффициента отражения СВЧ-излучения  $R(x)$  на межэлектродном промежутке диода при различных значениях внешнего напряжения смещения  $U$  В и плотности диодного тока  $j$  А/см<sup>2</sup>: 1 – 0, 0; 2 – 1.0, 330; 3 – 2.0, 630; 4 – 3.0, 800; 5 – 4.0, 920; 6 – 5.0, 960; 7 – 6.0, 920

значения, но до наступления порога генерации, в системе обнаруживается немонотонная зависимость распределения напряженности постоянного электрического поля. Иными словами, концентрация носителей заряда имеет в зависимости от величины протекающего через диод тока различное число максимумов. Наблюдаемое пространственное распределение можно интерпретировать как паттерн, очевидно формирующийся по мере увеличения тока через диод как результат последовательных переходов от состояния, характерного для одиночного стационарного домена, к состоянию, отвечающему наличию двух или трех доменов.

Помимо экспериментальных измерений были выполнены расчеты стационарного распределения электрического поля и концентрации носителей заряда в диоде Ганна от напряженности электрического поля с учетом зависимости подвижности и коэффициента диффузии электронов.

Расчеты в рамках одномерной задачи основывались на численном решении уравнения Пуассона

$$\varepsilon\varepsilon_0 \frac{dE}{dx} = (n - n_0)e \quad (1)$$

совместно с уравнением полного тока в диоде

$$j = en\mu_n(E)E + eD_n(E)\frac{dn}{dx}. \quad (2)$$

Здесь  $j$  – плотность тока, протекающего через диод;  $e$  – заряд электрона;  $E$  – напряженность электрического поля;  $\mu_n(E)$  – зависимость подвижности электронов от напряженности электрического поля в арсениде галлия;  $D_n(E)$  – зависимость коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость арсенида галлия  $n$ -типа;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $n$  – концентрация носителей заряда (электронов проводимости);  $n_0$  – равновесная концентрация носителей заряда. Подставляя выражение для концентрации  $n$ , получаемое из (1), в уравнение (2), можно записать его в следующем виде:

$$j = \varepsilon\varepsilon_0\mu_n(E)E\frac{dE}{dx} + en_0\mu_n(E)E + \varepsilon\varepsilon_0D_n(E)\frac{d^2E}{dx^2}. \quad (3)$$

Зависимость уровня СВЧ-отклика от пространственной координаты в рассматриваемом случае связана с изменением проводимости диода Ганна по длине кристалла, то есть с изменением подвижности электронов  $\mu_n$  и их концентрации  $n$ , при практически неизменной диэлектрической проницаемости. Отметим, что в отдельных участках структуры концентрация электронов может несколько отличаться от среднего значения.

Из приведенных на рис. 2 графиков видно, что при увеличении плотности тока выше некоторого критического

В качестве зависимости подвижности электронов от величины поля было использовано выражение, приведенное в работе [5],

$$\mu(E) = \frac{1}{E(x)} \frac{\mu_0 + v_s (E(x)/E_n)^4}{1 + (E(x)/E_n)^4}. \quad (4)$$

Для GaAs параметры имеют следующие значения:  $\mu_0 = 6000 \text{ см}^2/\text{Вс}$ ,  $v_s = 8.5 \times 10^6 \text{ см/с}$ ,  $E_n = 4000 \text{ В/см}$ . Для вычисления коэффициента диффузии  $D(E)$  было предложено соотношение, аппроксимирующее известную для GaAs экспериментальную зависимость [6], в виде

$$D_n(E) = ae^{-(E(x)-b)^2/c} + d. \quad (5)$$

Для GaAs параметры имеют следующие значения:  $a = 830 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $b = 3000 \text{ В/см}$ ,  $c = 17 \cdot 10^7 \text{ В/см}$ ,  $d = 150 \text{ см}^2/\text{с}$ . Кривые рис. 3 подтверждают допустимость использования аппроксимационной формулы (5) для вычисления зависимости коэффициента диффузии от электрического поля для кристалла арсенида галлия с указанными выше параметрами.

Подставив выражения (4) и (5) в формулу (3), получим уравнение

$$\begin{aligned} \varepsilon\varepsilon_0 \left( ae^{-(E(x)-b)^2/c} + d \right) \frac{d^2 E(x)}{dx^2} + \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\mu_0 + v_s (E(x)/E_n)^4}{1 + (E(x)/E_n)^4} \frac{dE(x)}{dx} + \\ + en_0 \frac{\mu_0 + v_s (E(x)/E_n)^4}{1 + (E(x)/E_n)^4} - j = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

Далее использовались следующие граничные условия:

$$\begin{cases} E(0) = 0, \\ E(l) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $l$  – длина активной  $n$ -области диода Ганна. Они получены посредством пересчета граничных условий для концентрации носителей у краев [7] в граничные условия для электрического поля. При этом пренебрегается проникновением поля в боковые  $n^+$ -области, так как они имеют значительно большую проводимость, чем у активной  $n$ -области. Получающееся поле у краев меньше поля, имеющего место в объеме  $n$ -области, примерно на три порядка.

Решение уравнения (6) с граничными условиями (7) позволяет найти распределение электрического поля  $E(x)$  вдоль диода. Результаты численного моделирования приведены на рис. 4. Распределение концентрации неравновесных носителей заряда  $\Delta n = (n - n_0)$  вдоль активной  $n$ -области диода можно получить, подставляя полученное решение для  $E(x)$  в формулу (1). Из графиков, приведенных на рис. 5, видно, что результаты расчета хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований (ср. кривую 7 на рис. 2 с кривой 6 на рис. 5).

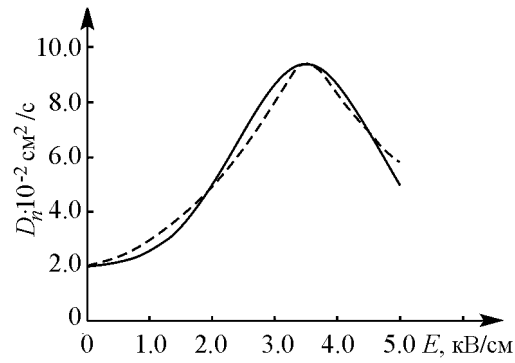


Рис. 3. Зависимость коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля: штриховая линия – экспериментальная зависимость из [6]; сплошная линия – аппроксимирующее выражение (5)

На рис. 6 приведены результаты расчетов распределения поля и концентрации носителей заряда вдоль диода Ганна, а также диаграммы на фазовой плоскости для двух значений плотности тока:  $9 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$  и  $11 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$ . Из представленных графиков видно, что при увеличении плотности тока до значения  $11 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$  равномерное распределение концентрации носителей и поля вдоль диода сменяется резко неоднородным. Диаграммы на фазовой плоскости в координатах  $dE(x)/dx$  и  $E(x)$  приведены для соответствующих значений плотности тока. Фазовый портрет для допорогового значения плотности тока существенно отличается от портрета для плотности тока  $11 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$ , при которой на диаграмме можно видеть дополнительный замкнутый контур. Следует отметить, что повышение плотности тока относительно уровня  $11 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$  может вызывать потерю работоспособности диода, поэтому диаграммы для больших значений плотности тока не приведены.

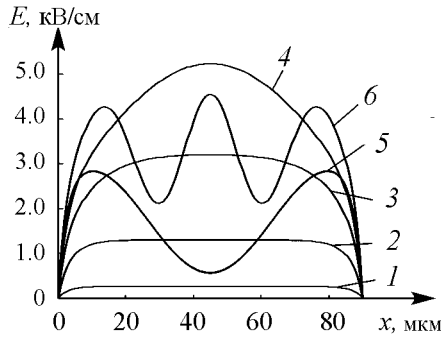


Рис. 4. Профили распределения напряженности электрического поля  $E(x)$  вдоль кристалла диода Ганна при различных значениях плотности диодного тока  $j \text{ A/cm}^2$ : 1 – 50; 2 – 250; 3 – 550; 4 – 850; 5 – 1050; 6 – 1150

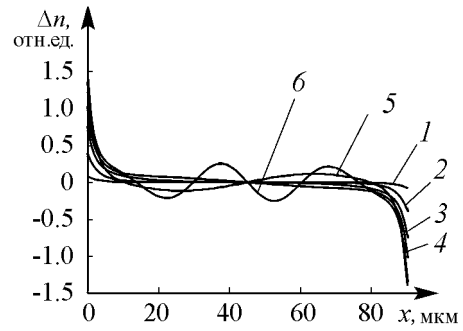


Рис. 5. Профили распределения неравновесной компоненты концентрации  $\Delta n$  вдоль кристалла диода Ганна при различных значениях плотности диодного тока  $j \text{ A/cm}^2$ : 1 – 50; 2 – 250; 3 – 550; 4 – 850; 5 – 1050; 6 – 1150

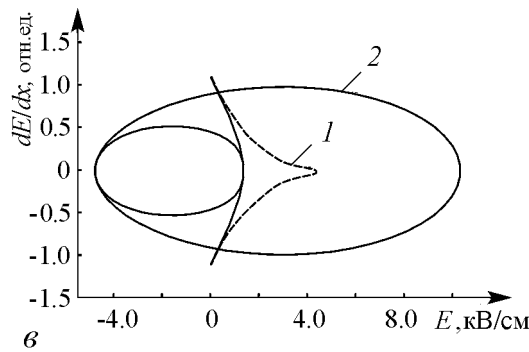
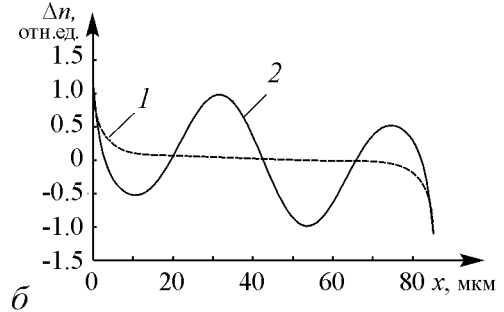
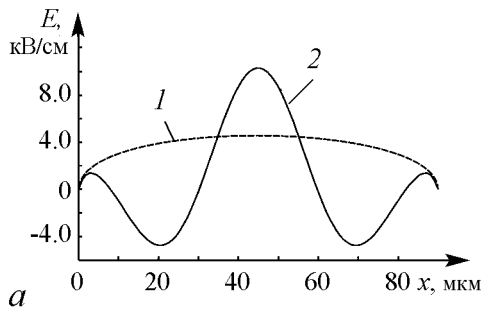


Рис. 6. Результаты расчетов электрических характеристик диода Ганна для двух значений плотности диодного тока  $j \text{ A/cm}^2$ : 1 – 900; 2 – 1100. Расчеты проводились с учетом зависимости коэффициента диффузии  $D(E)$  от напряженности электрического поля: а – распределение поля; б – концентрация носителей заряда вдоль диода Ганна; в – диаграммы на фазовой плоскости

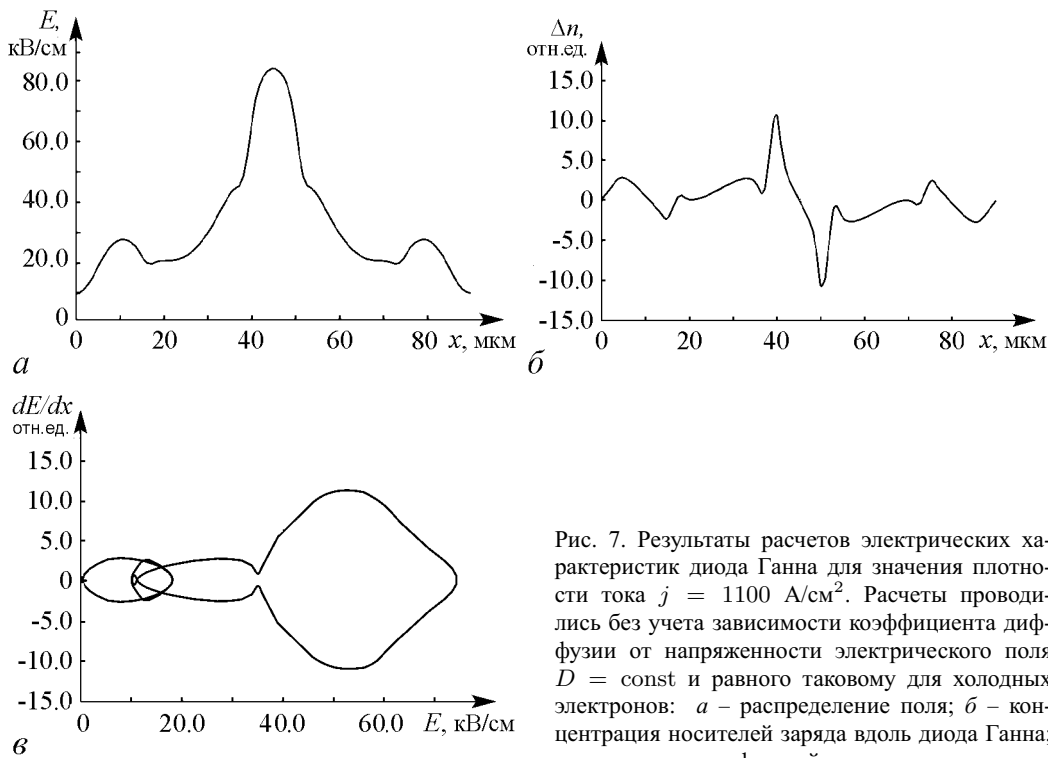


Рис. 7. Результаты расчетов электрических характеристик диода Ганна для значения плотности тока  $j = 1100 \text{ A/cm}^2$ . Расчеты проводились без учета зависимости коэффициента диффузии от напряженности электрического поля  $D = \text{const}$  и равного таковому для холодных электронов: *a* – распределение поля; *б* – концентрация носителей заряда вдоль диода Ганна; *в* – диаграмма на фазовой плоскости

На рис. 7 приведены зависимости  $E(x)$ ,  $\Delta n(x)$  и диаграмма на фазовой плоскости для случая, когда коэффициент диффузии от поля не зависит  $D = \text{const}$ . Сравнение теоретического распределения электрического поля и концентрации носителей заряда вдоль диода показывает, что результаты, приведенные на рис. 6, хорошо согласуются с измеренными экспериментально, чего не наблюдается для кривых, приведенных на рис. 7. Это подтверждает принципиальную важность учета зависимости коэффициента диффузии для основных носителей заряда от электрического поля, действующего на эти носители, при описании процессов, протекающих в диодах Ганна.

### Выводы

Показано, что с увеличением тока через диод Ганна происходит изменение пространственных распределений поля и концентрации носителей заряда от характерного для одиночного стационарного домена к многодоменной структуре. По-видимому, здесь мы имеем дело с проявлением феномена самоорганизации и образования паттернов, являющегося одним из ключевых в нелинейной динамике распределенных систем. В нашем случае одиночный стационарный домен следует, очевидно, рассматривать как изолированный стационарный автопаттерн, а возникновение двух и трех доменов – как начало формирования пространственной структуры, представляющей собой последовательность автопаттернов и аналогичной по характеру структуре Тьюринга [8].

В результате численного моделирования и экспериментальных исследований продемонстрирован многодоменный характер распределения поля и концентрации носителей заряда при достаточно большой плотности тока через диод. Показано, что результаты расчета и эксперимента находятся в хорошем качественном согласии.

Подчеркнем, что в известных публикациях по физике работы диодов Ганна авторы основываются на представлениях о существовании в них одиночного стационарного домена, в том числе, при напряжениях в два и более раз превышающих пороговое. Учет многодоменной структуры распределения электрического поля и концентрации носителей заряда в диоде Ганна открывает возможность более точного расчета характеристик СВЧ-устройств, в которых эти диоды используются в качестве активных элементов. Также этот феномен представляет, по-видимому, интерес для нелинейной динамики распределенных систем как конкретный пример структурообразования в устройстве, имеющем существенное прикладное значение.

Авторы выражают благодарность профессору С.П. Кузнецову, учет замечаний которого способствовал повышению качества изложения материала статьи.

### Библиографический список

1. Пат. 2373545 С1 Российская Федерация, МПК G01R27/26. Устройство для измерения параметров материалов / Д.А. Усанов, С.С. Горбатов, А.Н. Сорокин, В.Ю. Кваско; № 2008122332/28; заявл. 03.06.2008. опубл. 20.11.2009.
2. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Кваско В.Ю. Ближнеполевой СВЧ-микроскоп с низкоразмерным резонатором типа «индуктивная диафрагма–емкостная диафрагма» // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2010. Вып. 6. С. 66.
3. Усанов Д.А., Горбатов С.С. Резонансы в волноводной системе «штырь с зазором–близкорасположенный поршень» // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2006. Т. 49, № 2. С. 27.
4. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Кваско В.Ю. Измерение подвижности и концентрации носителей заряда в арсенид-галлиевом диоде Ганна с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа // Изв. вузов. Электроника. 2013. № 2 (100). С. 77.
5. Murayama K., Ohmi T. Static negative resistance in highly doped Gunn diodes and application to switching and amplification // Japan J. Appl. Phys. 1973. Vol. 12, № 12. P. 1931.
6. Барейкис В., Матулёнис А., Пожелы Ю. и др. Электроны в полупроводниках. Вып.3. Диффузия горячих электронов / Под ред. Пожелы Ю. Вильнюс: Мокслас, 1981.
7. Адирович Э.И., Карагеоргий-Алкалаев П.М., Леидерман А.Ю. Токи двойной инжекции в полупроводниках / Под ред. Е.И. Гальперина. М.: Сов. радио, 1978.
8. Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. М.: Физматлит, 2002. 200 с.

Саратовский государственный  
университет

Поступила в редакцию 10.04.2013  
После доработки 16.07.2013

### FORMATION OF A MULTI-DOMAIN SPATIAL STRUCTURE IN GaAs GUNN DIODE AS A NONLINEAR PHENOMENON

*D. A. Usanov, S. S. Gorbatov, V. Yu. Kvasko*

Experimental studies of stationary distributions of the electric field intensity and the concentration of charge carriers in the Gunn diode have been provided by using near-field microwave microscope. The numerical computer calculation of these quantities based on



the dependence of electrons mobility and diffusion coefficient on the electric field has been carried out. The existence of a multidomain mode of Gunn diodes has been found experimentally and confirmed theoretically.

*Keywords:* Near-field microwave microscopy, Gunn diode, mobility, diffusion coefficient, and the domain of a strong electric field.



*Усанов Дмитрий Александрович* – родился в 1943 году в г. Менделеевск (Татарстан). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1965). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «Физика полупроводников и диэлектриков» (1972, СГУ) и диссертацию на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности «Радиофизика, включая квантовую радиофизику» (1989, СГУ). Заведующий кафедрой физики твердого тела (с 1985 года), проректор СГУ по научной работе (1989-2013). Заслуженный деятель науки Российской Федерации (1998). Обладатель Государственной научной стипендии РАН для учёных (2000). Автор монографий и более 200 статей в центральной и зарубежной печати, 174 авторских свидетельств и патентов.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru



*Горбатов Сергей Сергеевич* – родился в 1946 году в г. Энгельс Саратовской области. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1973). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по теме «Особенности нелинейного взаимодействия СВЧ излучения с диодами Ганна, работающими в режиме усиления или генерации» (1991, СГУ) и диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук на тему «Резонансные явления в низкочастотных электродинамических системах и их использование для создания новых типов устройств твердотельной СВЧ-электроники» (2007, СГУ). К настоящему времени опубликовал более 80 научных работ в области твердотельной СВЧ-электроники и Радиофизики (резонансные явления в электродинамических структурах, содержащих полупроводниковые элементы). Обладатель 14 авторских свидетельств СССР и патентов РФ на изобретения, часть которых была внедрена в серийное производство.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: Gorba@yandex.ru



*Кваско Владимир Юрьевич* – родился в 1986 году в Саратове. Окончил факультет нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета по специальности микроэлектроника и полупроводниковые приборы (2009). В том же году поступил на очное отделение аспирантуры по специальности «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах». Опубликовал 10 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, входящих в Перечень ВАК.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: Kvasko-V@yandex.ru