



НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ В P-I-N ДИОДЕ

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

Саратовский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

Приведены результаты экспериментальных исследований с помощью ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа стационарных распределений напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в p-i-n диоде, а также выполнен численный расчет этих величин, с учетом зависимости подвижности и коэффициента диффузии электронов и дырок от напряженности электрического поля. Показано, что вблизи контактов распределение поля и проводимости носит характер чередующихся максимумов и минимумов.

Ключевые слова: Ближнеполевая СВЧ микроскопия, p-i-n диод, подвижность, коэффициент диффузии.

Введение. Постановка задачи

В работе [1] продемонстрирована возможность экспериментального исследования распределения поля и концентрации носителей заряда бесконтактным методом с использованием ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа в диоде Ганна при прохождении через него электрического тока. Была экспериментально обнаружена и подтверждена теоретически возможность существования многодоменного режима работы диодов Ганна.

Представляет интерес использование результатов измерений с применением ближнеполевого СВЧ микроскопа для уточнения представлений о физике работы другого широко распространенного в практике прибора – p-i-n диода, то есть диода, в котором области электронной (n) и дырочной (p) проводимостей разделены областью кристалла с собственным типом проводимости (i). Согласно большинству опубликованных работ, усредненное распределение напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в p-i-n диоде при прямом смещении не имеет пространственных осцилляций вблизи контактов [2–4]. В то же время из результатов измерений контактными методами [5] следует, что вблизи p-i и i-n переходов эти распределения могут носить характер чередующихся максимумов и минимумов. Однако результаты такого рода измерений можно связывать, например, с неоднородностями

на поверхности диода, с изменением режима работы зондов при пропускании тока через р-і-п диод и другими факторами. В отличие от контактных методов ближнеполевая сканирующая СВЧ микроскопия дает возможность проводить измерения бесконтактно и измерять подповерхностные свойства материалов, что позволяет избежать погрешностей, связанных с дефектами на сканируемой поверхности.

Теоретическое описание возможности возникновения пространственных осцилляций электрического поля и концентрации носителей заряда при биполярном дрейфе в р-і-п диоде было приведено в работе З.С. Грибникова [6]. Однако в этой работе прямых сопоставлений с результатами экспериментальных исследований не проводилось. Кроме этого, при теоретическом описании для объяснения экспериментов уравнения Пуассона и полного тока записывались с учетом предположения о наличии малых осцилляций подвижности электронов и дырок в диоде.

1. Описание установки. Методика измерений

Были проведены исследования бескорпусного диода типа 2А513А-1 с помощью разработанного ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа (рис. 1, а) [7] и измерительной электродинамической системы [8].

Источником зондирующего ближнего поля служил заостренный зонд 12, связанный с резонатором через петлю связи 13. СВЧ сигнал от генератора, источником

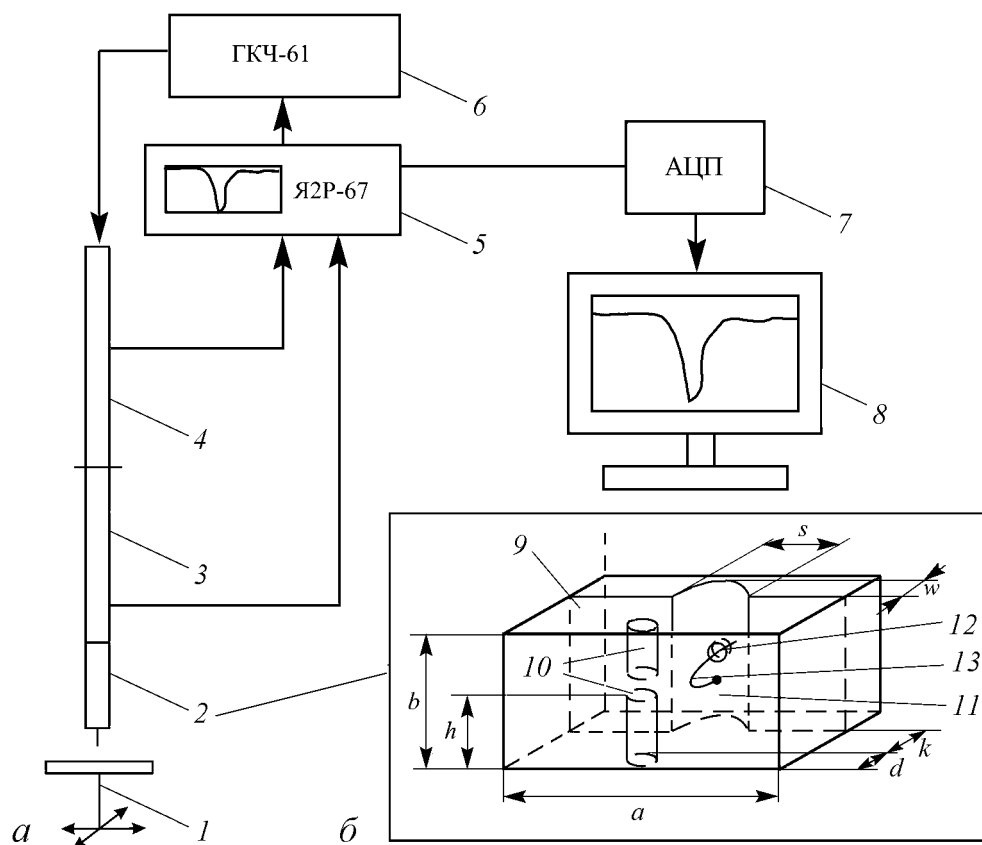


Рис. 1. а – ближнеполевой СВЧ микроскоп [7], б – измерительная электродинамическая система [8]

которого служил генератор 6 качающейся частоты типа ГКЧ-61, поступал в СВЧ измерительный волноводный тракт, состоящий из двух плеч – опорного 4 и измерительного 3, которые были включены по схеме измерения КСВН. Резонансная система 2 представляла собой штырь 10 и короткозамыкатель 9, имеющий выемку 11. В ходе эксперимента расстояние между короткозамыкателем 9 и штырем 10 изменялось до возникновения резонанса, характеризующегося малым коэффициентом отражения, после чего это расстояние фиксировалось. Отраженный от исследуемого диода сигнал регистрировался панорамным индикатором 5 КСВН и ослабления типа Я2Р-67, в котором фиксировались значения частоты резонанса $f_{рез}$ и коэффициента отражения $R_{отр}$. Полученный низкочастотный сигнал, несущий информацию о величине КСВН, через аналогово-цифровой преобразователь 7 типа L-Card E14-140 поступал в компьютер 8 для последующей обработки с использованием программной среды MathCAD.

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 $\lambda/10$.

Сканирование свойств р-і-п диода проводилось путем перемещения площадки 1, на которой был расположен р-і-п диод, относительно зонда с шагом 2 мкм при различных значениях плотности тока, протекающего через р-і-п диод (рис. 1, б). Расстояние между зондом и гранью кристалла составляло 1 мкм. Диаметр иглы зонда составлял 0.25 мкм. Плотность тока изменялась в интервале от 0 до $5.04 \cdot 10^2$ А/см². Зондирование диодной структуры производилось на области протяженностью 260 мкм.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

По результатам сканирования были получены профили распределения СВЧ отклика (рис. 2, а) по координате при различных значениях плотности тока, поданного на диод. СВЧ отклик определялся как модуль коэффициента отражения СВЧ излучения $R(x)$ на частоте 11.45 ГГц, соответствующей резонансному пику резонатора с зондом.

Зависимость уровня СВЧ отклика от пространственной координаты в рассматриваемом случае связана с изменением проводимости р-і-п диода по длине кристалла при практически неизменной диэлектрической проницаемости. Зависимость распределения концентрации носителей заряда от координаты в р-і-п диоде имеет три характерных области:

- область вблизи р-і перехода, где концентрация носителей заряда высока и велико значение градиента вследствие инжекции;
- область квазинейтральной базы, где распределение носителей заряда однородно вдоль длины;
- область вблизи n-і перехода, где концентрация носителей заряда и ее градиент велики вследствие инжекции носителей заряда.

Из приведенных на рис. 2, а графиков видно, что при увеличении плотности тока выше некоторого критического значения в диоде появляется немонотонная зави-

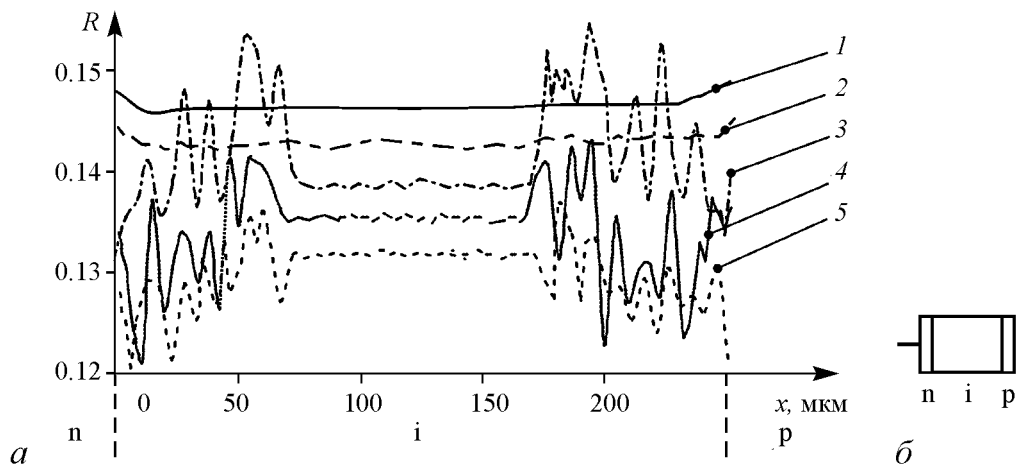


Рис. 2. *a* – зависимость коэффициента отражения от координаты сканирования при различных плотностях тока $j \times 10^{-2}$, А/см²: 1 – 0, 2 – 0.63, 3 – 1.89, 4 – 3.15, 5 – 5.04. *б* – схематическое изображение р-і-п диода

симость распределения проводимости вдоль диода. В данном случае проводимость имеет в зависимости от величины протекающего через диод тока различное число максимумов и минимумов. Наблюдаемое пространственное распределение можно интерпретировать как паттерн, сформированный в результате последовательных переходов по мере увеличения тока через диод от состояния, в котором не наблюдается пространственных осцилляций в области контакта, к состоянию, отвечающему наличию ряда таких осцилляций.

3. Теоретические расчеты и их обсуждение

Были выполнены компьютерные расчеты стационарного распределения электрического поля и концентрации носителей заряда в р-і-п диоде с учетом зависимости подвижности и коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля. Краевая задача решалась с использованием функции `bvp4c` математического пакета Matlab 2009.

Расчеты в рамках одномерной задачи основывались на численном решении уравнения Пуассона

$$\varepsilon\varepsilon_0 \frac{dE}{dx} = e((p - p_0) - (n - n_0)) \quad (1)$$

совместно с уравнением полного тока в диоде

$$j = e(n\mu_n(E) + p\mu_p(E))E + eD_n(E) \frac{dn}{dx} - eD_p(E) \frac{dp}{dx}, \quad (2)$$

где j – плотность тока, протекающего через р-і-п диод; e – заряд электрона; E – напряженность электрического поля; $\mu_n(E)$ – зависимость подвижности электронов от напряженности электрического поля в кремнии; $\mu_p(E)$ – зависимость подвижности дырок от напряженности электрического поля в кремнии; $D_n(E)$ – зависимость коэффициента диффузии электронов от напряженности электрического поля; $D_p(E)$ – зависимость коэффициента диффузии дырок от напряженности электрического поля; ε – диэлектрическая проницаемость кремния; ε_0 – диэлектрическая

постоянная; n – концентрация электронов проводимости; $n_0 = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ – равновесная концентрация электронов проводимости в i -области; p – концентрация дырок; $p_0 = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ – равновесная концентрация дырок в i -области.

Для расчета зависимости подвижности в кремнии от напряженности электрического поля использовалось соотношение, приведенное в [9],

$$\mu(E) = \mu_{0p,n}(1 - \beta_{p,n}E^2), \quad (3)$$

где $\mu_{0p} = 600 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_{0n} = 1500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\beta_p = 1.8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{В}^2$, $\beta_n = 4.9 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{В}^2$.

В качестве расчетных формул для $D_n(E)$ и $D_p(E)$ были использованы полученные нами следующие выражения, аппроксимирующие известные для Si [10] экспериментальные зависимости:

$$D_n(E) = ae^{-\frac{(E-b)^2}{c}} + d, \quad D_p(E) = ke^{-\frac{(E-b)^2}{m}} + d, \quad (4)$$

где для Si: $a = 29 \text{ см}^2/\text{с}$, $b = 2 \cdot 10^3 \text{ В/см}$, $c = 1.73 \cdot 10^7 \text{ В}^2/\text{см}^2$, $d = 7 \text{ см}^2/\text{с}$, $k = 9 \text{ см}^2/\text{с}$, $m = 0.99 \cdot 10^7 \text{ В}^2/\text{см}^2$.

В соответствии с [11] в качестве граничных условий использовались соотношения

$$\begin{cases} E(0) = 0, \\ E(l) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где l – длина i -области p - i - n диода. Физический смысл данных граничных условий – преобладание диффузионной компоненты плотности полного тока над дрейфовой компонентой при $x = 0, l$.

Решение уравнения (2) с граничными условиями (5) позволяет найти распределение электрического поля $E(x)$ вдоль диода. Результаты численного моделирования приведены на рис. 3.

Распределение разности концентраций неравновесных носителей заряда вдоль i -области диода можно получить, подставляя полученное решение для $E(x)$ в (1).

Как видно из рис. 4, распределение разности концентраций неравновесных носителей заряда имеет три характерные области: области у каждого контакта, где наблюдаются пространственные осцилляции концентрации носителей заряда и область квазинейтральности, где такие осцилляции не наблюдаются, что согласуется с результатами наших экспериментальных исследований.

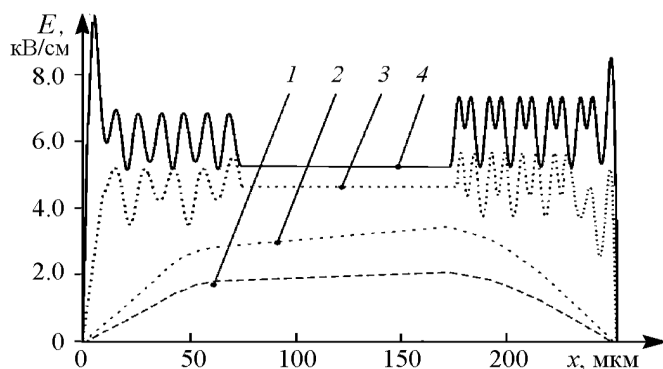


Рис. 3. Профили распределения напряженности электрического поля вдоль кристалла p - i - n диода при различных плотностях тока $j \times 10^{-2}$, А/см^2 : 1 – 0.3, 2 – 0.63, 3 – 3.15, 4 – 5.04

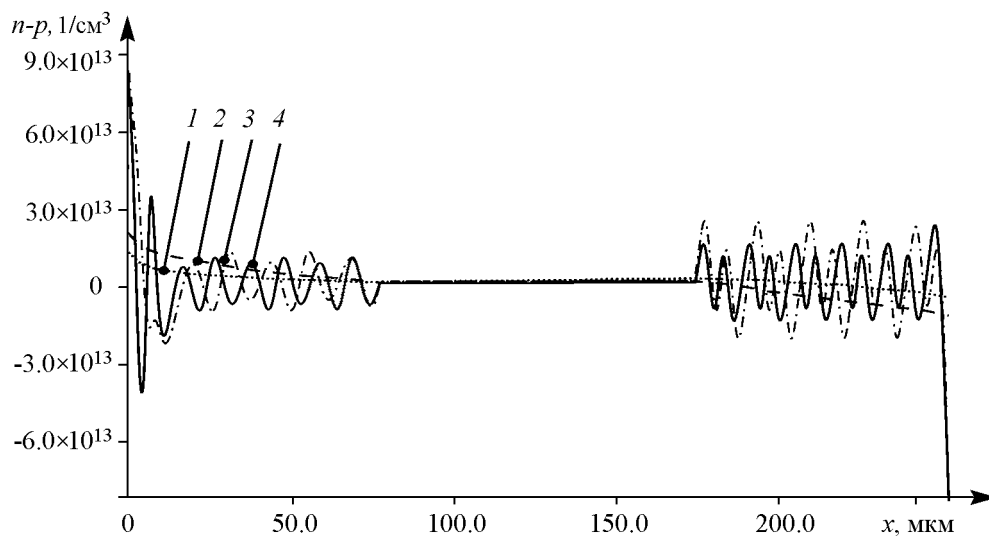


Рис. 4. Профили распределения неравновесной компоненты концентрации вдоль кристалла р-і-п диода при различных плотностях тока $j \times 10^{-2}$, А/см²: 1 – 0.3, 2 – 0.63, 3 – 3.15, 4 – 5.04

В результате численного решения уравнения (2) с граничными условиями (5) получаем массив значений напряженности поля вдоль і-области р-і-п диода и массив значений производной от напряженности поля вдоль і-области р-і-п диода. Эти два массива позволяют нам изобразить поведение траекторий на фазовой плоскости $(E, dE/dx)$.

На рис. 5 приведены результаты расчетов фазовых портретов для двух значений плотности тока. Фазовый портрет для плотности тока $0.63 \cdot 10^2$ А/см² существенно отличается от портрета для плотности тока $5.04 \cdot 10^2$ А/см², при которой на диаграмме можно видеть несколько замкнутых контуров.

На рис. 6 приведен фазовый портрет на плоскости $(E, dE/dx)$ для случая, когда коэффициент диффузии от поля не зависит. Сравнение двух фазовых портретов показывает, что теоретически рассчитанные фазовые портреты (см. рис. 5) хорошо согласуются с измерениями (см. рис. 2 и рис. 3), чего не наблюдается для фазового портрета, приведенного на рис. 6. Это подтверждает принципиальную важность учета зависимости коэффициента диффузии для основных носителей заряда от электрического поля, действующего на эти носители, при описании процессов, протекающих в р-і-п диодах.

Таким образом, показано, что с увеличением тока через р-і-п диод происходит изменение пространственных распределений поля и концентрации носителей заряда от отсутствия пространственных осцилляций вблизи контактов до состояния, характеризующегося наличием нескольких чередующихся максимумов и минимумов в этих распределениях. По всей видимости, здесь имеет место феномен самоорганизации и образования паттернов, являющийся одним из ключевых в нелинейной динамике распределенных систем. В нашем случае состояние без осцилляций следует, по-видимому, рассматривать как изолированный стационарный автопаттерн, а возникновение нескольких чередующихся максимумов и минимумов – как начало формирования устойчивой пространственной структуры, порожденной диффузионной неустойчивостью [12].

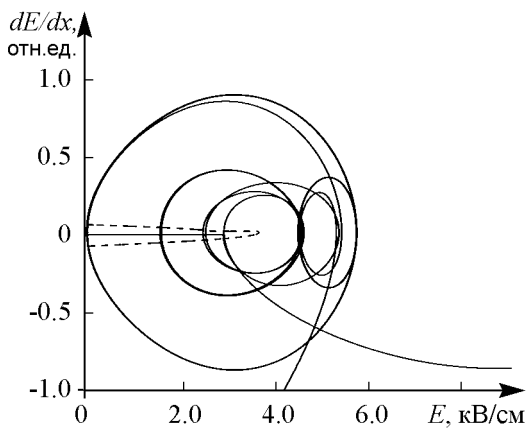


Рис. 5. Фазовый портрет на фазовой плоскости $(E, dE/dx)$ от для двух значений плотности тока j , A/cm^2 : штриховая кривая – $0.63 \cdot 10^2$, сплошная кривая – $5.04 \cdot 10^2$, полученные с учетом зависимости коэффициента диффузии от напряженности электрического поля

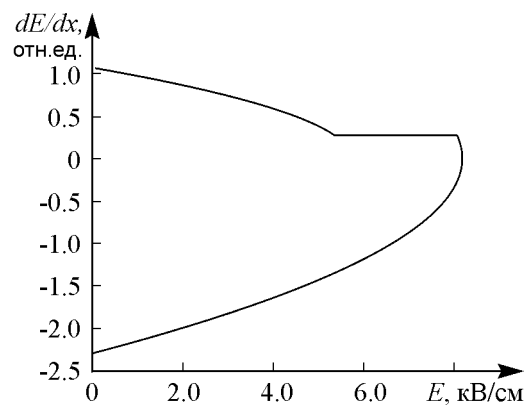


Рис. 6. Фазовый портрет p-i-n диода для плотности тока $5.04 \cdot 10^2 A/cm^2$, полученный в предположении что коэффициент диффузии не зависит от напряженности электрического поля и равен таковому при $j = 0$

Выводы

В результате численного моделирования и экспериментальных исследований продемонстрировано наличие чередующихся максимумов и минимумов распределения поля и концентрации носителей заряда при достаточно большой плотности тока через p-i-n диод. Показано, что результаты расчета и эксперимента находятся в хорошем качественном согласии.

Данный феномен может быть интересен для нелинейной динамики распределенных систем как конкретный пример структурообразования в приборе, имеющем широкое практическое применение.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (государственные задания № 1376 и 1575).

Библиографический список

1. Усанов Д.А., Горбатов С.С., Кваско В.Ю. Нелинейная динамика формирования доменной структуры в арсенид-галлиевом диоде Ганна // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2013. Т 21, № 5. С. 51.
2. Адирович Э.И. Токи двойной инжекции в полупроводниках. М.: Сов. радио, 1978.
3. Баранов Л.И., Гаманюк В.Б., Усанов Д.А. К теории p-n-n⁺ и p-n-m диодов // Радиотехника и электроника. 1972. № 11. С. 2409.

4. Mayer J.W., Marsh O., Baron R. Double injection in long silicon p- π -n structures // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39, № 3. P. 1447.
5. Баранов Л.И., Вагарин А.Ю., Гаманюк В.Б., Усанов Д.А. Отклонение от нейтральности в слоистых полупроводниковых структурах в результате двойной инжекции // Проблемы диэлектрической электроники. Ташкент, 1974. С. 499.
6. Грибников З.С. Пространственные осцилляции электрического поля и концентрации носителей заряда при биполярном дрейфе в полупроводнике // ФТП. 1975. Т. 9, № 9. С. 1710.
7. Усанов Д.А. Горбатов С.С., Кваско В.Ю. Ближнеполевой СВЧ-микроскоп с низкоразмерным резонатором типа «индуктивная диафрагма – емкостная диафрагма» // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2010. Вып. 6. С. 66.
8. 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.
9. Конуэлл Э. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях/ Пер. с англ. А.Ф. Волкова и А.Я. Шульмана. М.: Мир, 1970.
10. Барейкис В. Электроны в полупроводниках. Вып. 3. Диффузия горячих электронов / Под ред. Ю. Пожелы. Вильнюс: Мокслас, 1981. 212 с.
11. Роуз А. Основы теории фотопроводимости / Пер. с англ. А.А. Рогачева и Р.Ю. Хансеева. М.: Мир, 1966.
12. Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В. Введение в теорию самоорганизации открытых систем. М.: Физматлит, 2002.

Поступила в редакцию 27.04.2014

NONLINEAR DYNAMICS OF THE FORMATION OF A SPATIALLY INHOMOGENEOUS STRUCTURE IN PIN DIODE

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

Saratov State University

The paper presents the results of experimental investigation of stationary distributions of the electric field and the charge carrier concentration in the PIN diode. The investigations have been carried out by use of near-field scanning microwave microscope. Numerical calculations of these values have been performed taking into account the dependence of the mobility and the diffusion coefficient of electrons and holes on the electric field. The alternating maxima and minima form of the field distribution near the contacts and the conductivity has been demonstrated.

Keywords: Near-field microwave microscopy, PIN diode, mobility, diffusion coefficient.



Усанов Дмитрий Александрович – родился в 1943 году в Менделеевске (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 Энгельсе 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 низкоразмерных 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 nano- 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



Фадеев Алексей Владимирович – родился в Балашове Саратовской области (1987), окончил обучение (2010) на физико-математическом факультете Балашовского института Саратовского государственного университета по специальности «физика». В 2011 году поступил на очное отделение аспирантуры по специальности «твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах». Автор и соавтор 8 научных работ, в том числе 2 статей в изданиях, входящих в Перечень ВАК.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: Fadey24@mail.ru