

07

Пространственные осцилляции электрического поля и плотности заряда в кремниевом $p-i-n$ -диоде

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

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: Fadey24@mail.ru

Поступило в Редакцию 16 июня 2014 г.

Проведены численный расчет распределения электрического поля и плотности заряда в $p-i-n$ -диоде при прямом смещении, а также экспериментальные исследования этих характеристик с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа. Показана принципиальная важность учета зависимости коэффициента диффузии носителей заряда от электрического поля при описании процессов, протекающих в $p-i-n$ -диодах. Численные результаты качественно согласуются с экспериментом.

С появлением ближнеполевой сканирующей СВЧ-микроскопии [1,2] появилась новая возможность формирования основанных на экспериментальных данных уточненных представлений о физике работы полупроводниковых приборов. В отличие от многих известных методов ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия позволяет проводить измерения бесконтактно и измерять подповерхностные свойства материалов, в том числе при прохождении через них электрического тока. Полученные в результате таких измерений экспериментальные данные могут быть использованы для сопоставления с теоретическим описанием, при проведении которого обычно используются различные упрощающие предположения.

Такая возможность, на наш взгляд, продемонстрирована при описании распределения поля и концентрации носителей заряда в диоде Ганна при различных значениях протекающего через него тока [3]. Представляет интерес использовать результаты измерений с применением ближнеполевого СВЧ-микроскопа для уточнения представлений о физике работы другого широко распространенного в практике прибора — $p-i-n$ -диода. Согласно большинству опубликованных работ,

усредненное распределение напряженности электрического поля и концентрации носителей заряда в $p-i-n$ -диоде при прямом смещении носит плавный характер [4–6]. В то же время из результатов измерений контактными методами [7] 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.

При изменении плотности тока через $p-i-n$ -диод трудно учесть его влияние на контактирующий с диодом измерительный зонд. Теоретическое описание возможности наблюдения пространственных осцилляций электрического поля и концентрации носителей тока при биполярном дрейфе в $p-i-n$ -диоде было приведено в работе [8], однако прямых сопоставлений с результатами экспериментальных исследований в ней не проводилось.

Целью данной работы являлось измерение с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа распределений поля и концентрации носителей заряда при различных значениях плотности тока через кремниевый $p-i-n$ -диод и сопоставление результатов измерений с теоретическим описанием.

Нами был проведен численный расчет распределения электрического поля в $p-i-n$ -диоде с использованием ЭВМ, с учетом зависимости от напряженности электрического поля, подвижности и коэффициента диффузии электронов и дырок, а также проведены экспериментальные исследования распределения этих величин с помощью ближнеполевого СВЧ-микроскопа, конструкция которого описана в [9]. Отметим, что в [8] зависимость коэффициента диффузии от напряженности электрического поля не учитывалась. В то же время решение аналогичной задачи на примере диода Ганна [2] показало хорошее совпадение теории с экспериментом именно при учете этой зависимости. Важная роль такого учета отмечалась также в [10].

При теоретическом описании использовалось уравнение Пуассона

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

и уравнение для полного тока в диоде, которое в одномерном случае выглядит следующим образом:

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

где j — плотность тока, протекающего через $p-i-n$ -диод, e — заряд электрона, E — напряженность электрического поля, $\mu_{n,p}(E)$, $D_{n,p}(E)$ — подвижности и коэффициенты диффузии электронов и дырок в кремнии, 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 подвижности использовалось соотношение, приведенное в [11]:

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

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

В качестве зависимости $D_n(E)$ и $D_p(E)$ мы использовали предложенные нами выражения, аппроксимирующие известные для Si из [12] экспериментальные зависимости, в виде

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

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

В соответствии с [13] в качестве граничных условий использовались

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

где l — длина i -области $p-i-n$ -диода, левее $x = 0$ расположена n -область, а правее $x = l$ p -область.

Решение уравнения (2) с граничными условиями (5) позволяет определить распределение электрического поля $E(x)$ вдоль диода. Если коэффициент диффузии считать независящим от электрического поля, то при расчете пространственных осцилляций электрического поля не наблюдается. Уравнение (2) решалось с использованием функции `bvp4c` математического пакета Matlab 2009. Результаты численного моделирования приведены на рис. 1.

Подставляя полученное решение в (1), получим распределение плотности заряда вдоль диода (рис. 1). Из рисунка видно, что всю

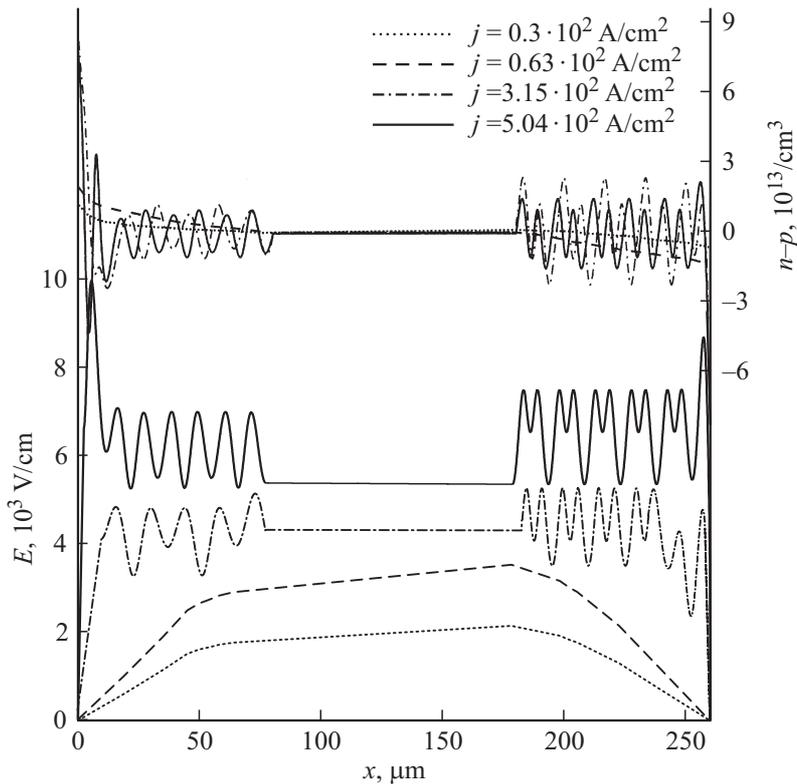


Рис. 1. Рассчитанные распределения поля (нижние кривые, левая шкала) и плотности заряда (верхние кривые, правая шкала) в i -области $p-i-n$ -диода.

i -область $p-i-n$ -диода можно разделить на 3 области: области у контактов, где наблюдаются пространственные осцилляции концентрации носителей заряда, и область квазинейтральности, где такие осцилляции не наблюдаются. Необходимо отметить, что при малых значениях тока зависимость напряженности электрического поля от координаты носит плавный характер и только при достижении определенного значения плотности тока начинают возникать пространственные осцилляции, число которых с ростом тока увеличивается. Тем самым показана принципиальная важность учета зависимости коэффициента диффузии носителей заряда от электрического поля при описании процессов, протекающих в $p-i-n$ -диодах.

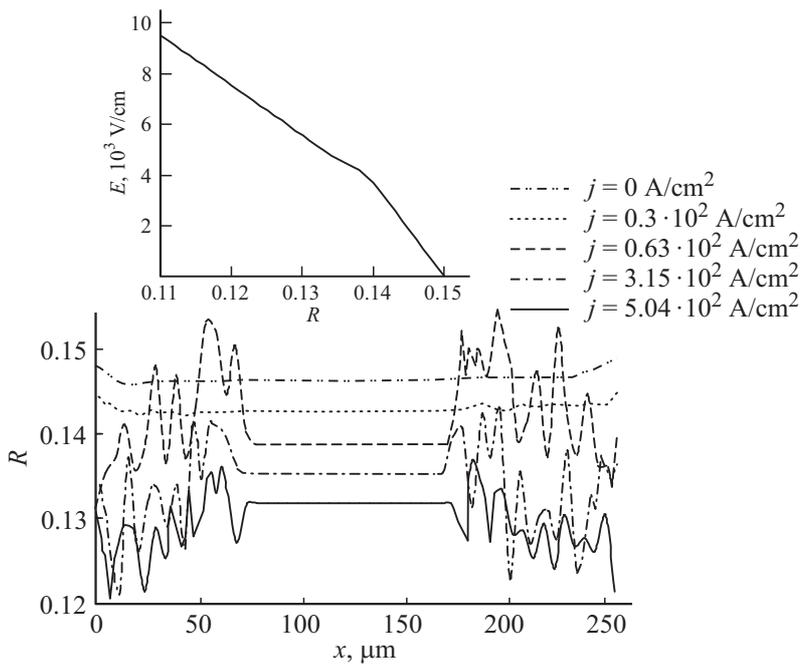


Рис. 2. Измеренная зависимость коэффициента отражения от координаты сканирования при различных плотностях тока. На вставке изображена калибровочная кривая для ближнеполевого СВЧ-микроскопа.

Были проведены исследования $p-i-n$ -диода 2A513A-1 с помощью созданного нами ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа. Сканирование проводилось вдоль i -области параллельно одной из граней диода с шагом $2 \mu\text{m}$ при различных значениях плотности тока, протекающего через $p-i-n$ -диод. Расстояние между зондом и гранью кристалла составляло $1 \mu\text{m}$. Диаметр иглы-зонда составлял $0.25 \mu\text{m}$. Плотность тока изменялась в интервале от 0 до $5.04 \cdot 10^2$ A/cm². Зондирование диодной структуры производилось на области протяженностью $260 \mu\text{m}$. В результате сканирования были получены профили распределения СВЧ-отклика (модуля коэффициента отражения СВЧ-излучения $R(x)$ на частоте резонатора с зондом 11.45 GHz) от координаты при различных значениях плотности тока, протекающего через $p-i-n$ -диод (рис. 2). Из рис. 2 видно, что при малых токах пространственные осцилляции

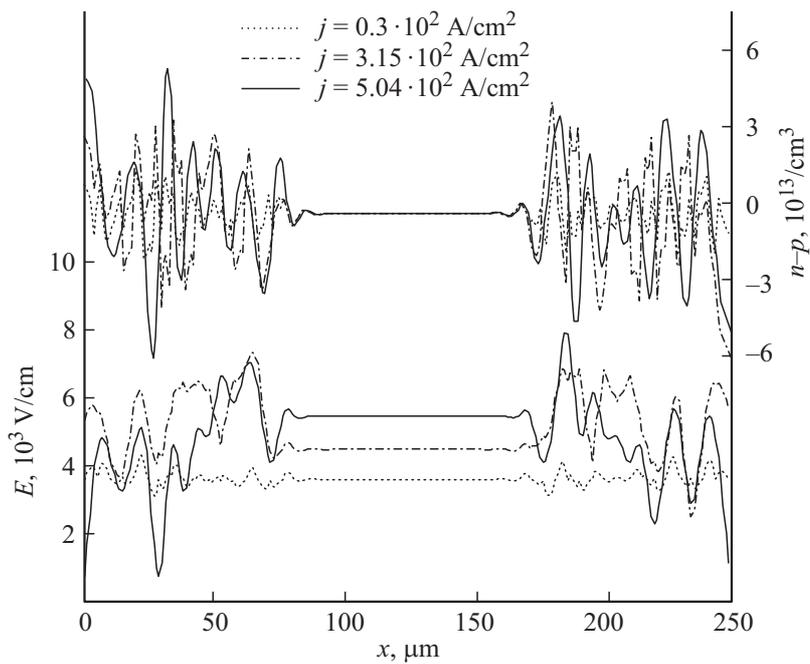


Рис. 3. Экспериментально определенные распределения поля (нижние кривые, левая шкала) и плотности заряда (верхние кривые, правая шкала) в i -области $p-i-n$ -диода. Результат получен путем обработки экспериментальных данных рис. 2.

коэффициента отражения не наблюдаются по всей длине диода. При достижении определенной плотности тока (кривая 3) появляются 3 характерные области: области у контактов, в которых наблюдается осциллирующая зависимость коэффициента отражения от координаты сканирования, и область, где коэффициент отражения остается практически постоянным.

Получаемые таким образом координатные зависимости коэффициента отражения $R(x)$ можно конвертировать в распределения локальной напряженности электрического поля $E(x)$. С этой целью используется заранее полученная калибровочная кривая $E(R)$ для ближнеполевого СВЧ-микроскопа (вставка к рис. 2). На рис. 3 представлен результат: профили $E(x)$ для исследуемых образцов кремниевых $p-i-n$ -диодов.

Дифференцируя эти зависимости, из (1) находим распределения плотности заряда вдоль диода, также показанные на рис. 3.

Таким образом, в результате численного моделирования и экспериментальных исследований продемонстрированы осцилляции пространственного распределения поля и концентрации носителей заряда для различных значений плотности тока через $p-i-n$ -диод. Результаты расчета и эксперимента находятся в хорошем качественном согласии.

Предложенные экспериментальная и численная методики расширяют представления о физике работы $p-i-n$ -диодов и позволяют разработчикам полупроводниковых устройств с использованием $p-i-n$ -диодов уточнить условия их эксплуатации.

Список литературы

- [1] *Anlage S.M., Steinhauer D.E., Feenstra B.J., Vlahacos C.P., Wellstood F.C.* Near-Field Microwave Microscopy of Materials Properties, in *Microwave Superconductivity*. Amsterdam: Kluwer, 2001.
- [2] *Усанов Д.А.* Ближнеполевая сканирующая СВЧ-микроскопия и области ее применения. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2010.
- [3] *Усанов Д.А., Горбатов С.С., Кваско В.Ю.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2013. Т 21. № 5. С. 51–59.
- [4] *Адирович Э.И.* Токи двойной инжекции в полупроводниках. М.: Сов. радио, 1978.
- [5] *Баранов Л.И., Гаманюк В.Б., Усанов Д.А.* // Радиотехника и электроника. 1972. № 11. С. 2409–2413.
- [6] *Mayer J.W., Marsh O., Varon R.* // *J. Appl. Phys.* 1968. V. 39. N 3. P. 1447–1455.
- [7] *Баранов Л.И., Вагарин А.Ю., Гаманюк В.Б., Усанов Д.А.* // Проблемы диэлектрической электроники. Ташкент, 1974. С. 499.
- [8] *Грибников З.С.* // ФТП. 1975. Т. 9. В. 9. С. 1710–1716.
- [9] *Усанов Д.А., Горбатов С.С., Кваско В.Ю.* // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2010. В. 6. С. 66–69.
- [10] *Трубецков Д.И., Мчедлова Е.С., Красичков Л.В.* Введение в теорию самоорганизации открытых систем. М.: Физматлит, 2002.
- [11] *Конуэлл Э.* Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях / Пер. с англ. А.Ф. Волкова и А.Я. Шульмана. М.: Мир, 1970.
- [12] *Электроны в полупроводниках. Вып. 3. Диффузия горячих электронов.* Вильнюс: Мокслас, 1981.
- [13] *Роуз А.* Основы теории фотопроводимости / Пер. с англ. А.А. Рогачева и Р.Ю. Хансварова. М.: Мир, 1966.