

КАТОДНЫЙ СТАТИЧЕСКИЙ ДОМЕН В ДИОДЕ С МЕЖДОЛИННЫМ ПЕРЕНОСОМ ЭЛЕКТРОНОВ

О. В. Боцула, Д. В. Павленко, Э. Д. Прохоров

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина, Тел. (0572) 7051262*

Поступила в редакцию 15 ноября 2008 года

Рассматривается диод, в котором при определенных условиях образуется катодный статический домен, в котором при больших напряжениях может развиваться ударная ионизация. Возникновение ударной ионизации приводит к лавинно-пролетному эффекту и возникновению шумовой генерации. Ниже показано, при каких напряжениях на диоде можно получить напряженности электрического поля в таком домене ~ 200 кВ/см (для GaAs при одинаковой зависимости дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля $v(E)$ в области катода и в объеме GaAs-диода)

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: статический домен, зависимость $v(E)$, напряженность электрического поля.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] была высказана идея о возможности создания катодного статического домена, в котором возможна ударная ионизация, лавинно-пролетный эффект и шумовая генерация в широком диапазоне частот. Оценка максимальных напряженностей электрического поля вблизи катода была проведена на простейшей модели, в которой учитывалась только электронная составляющая тока и скорости электронов в областях диода считались постоянными. Идея о возможности шумовой генерации была подтверждена экспериментально [1]. В настоящей работе приводится анализ процессов в рассматриваемой структуре на основе локально-полевой модели при одинаковой зависимости дрейфовой скорости электронов и дырок во всех областях диода.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Рассматриваемая структура диода показана на рис. 1. Параметры областей: n^+ сильнолегированные области катода и анода (концентрация $5 \cdot 10^{16} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$) с омическими контактами на катоде и аноде, n -область легирована слабее (концентрация $1 \dots 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) с длиной L_2 , область вблизи катода L_1 легирована примерно на порядок меньше n_k (10^{15}) и концентрация в ней может варьироваться также как и длины областей. Переходные области $n^+ - n_k$, $n_k - n$, $n - n^+$ конечны по величине и составляют $0,1 \dots 0,5$ мкм. Зависимости дрейфовой скорости электронов и дырок от напряженности электрического поля записываются выражениями (7,8) и одинаковы для всех областей диода (это можно считать первым приближением в рассматриваемой задаче).

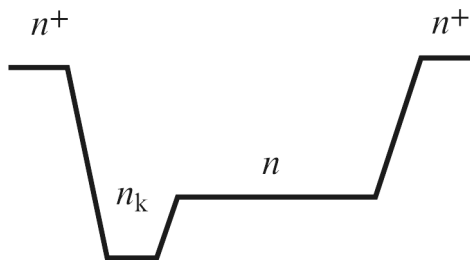


Рис.1. Структура рассматриваемого диода

При рассмотрении электронных процессов в диоде используется система уравнений, состоящая из уравнений непрерывности для электронов (1) и дырок (2), уравнения Пуассона (3) и уравнений для электронных и дырочных токов [2,3]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial J_n}{\partial x} + a_n(E) |J_n(x,t)| + a_p(E) |J_p(x,t)| - R(n,p) \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{e} \frac{\partial J_p}{\partial x} + a_n(E) |J_n(x,t)| + a_p(E) |J_p(x,t)| - R(n,p) \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 j}{\partial x^2} = \frac{e}{e e_0} (n - N_D - p) \quad (3)$$

$$J_n(x,t) = env_n(E) + eD_n \frac{\nabla n}{\nabla x} \quad (4)$$

$$J_p(x,t) = epv_p(E) + eD_p \frac{\nabla p}{\nabla x} \quad (5)$$

$$R(n,p) = (np - n_i^2) \left(\frac{1}{t_n(p + n_{ie}) + t_p(n + n_{ie})} + C_n n + C_p p \right) \quad (6)$$

$$v_n(E) = \frac{m_n E + u_s \left(\frac{E}{E_0} \right)^4}{1 + \left(\frac{E}{E_0} \right)^4} \quad (7)$$

$$v_p(E) = \begin{cases} m_p E, & E < E_p \\ v_p, & E > E_p \end{cases} \quad (8)$$

$$a_n(E) = A_n e^{-\frac{B_n}{E} \frac{m_1}{h}} \quad (9)$$

$$a_p(E) = A_p e^{-\frac{B_p}{E} \frac{m_2}{h}} \quad (10)$$

где $i = 1$, $J_n(x,t)$ ($J_p(x,t)$)- плотность электронного (дырочного) тока в диоде, D_n (D_p)- коэффициенты диффузии электронов (дырок). $a_n(E)$, $a_p(E)$ - коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок соответственно, C_n , C_p - коэффициенты Оже рекомбинации, t_n , t_p - времена жизни электронов и дырок, $B_n = 1,3 \cdot 10^6$ В/см, $B_p = 1,3 \cdot 10^6$ В/см, $A_n = 3,5 \cdot 10^6$ см⁻¹, $A_p = 1,5 \cdot 10^6$ см⁻¹, $m_1 = 1,464$, $m_2 = 1,417$ [4].

Структура исследуемого диода выбирается такой, что приконтактные области диода сильно легированы донорной примесью. Это гарантирует, что поле на контактах будет низким и ударная ионизация в приконтактной области не будет происходить. Поэтому значение концентраций на контактах можно считать величинами постоянными и не меняющимися во времени, что соответствует условию квазинейтральности, выполняемым для идеальных омических контактов, которое при $n \approx p$ принимает вид:

$$n(0,t) = N_d(0) \quad (11)$$

$$n(L,t) = N_d(L) \quad (12)$$

Поскольку, полная система уравнений, состоящая из уравнений (1)-(5) с граничными условиями (11)-(12) является нелинейной, то ее решение вызывает большие сложности и его можно осуществить, только используя конечноразностные итерационные методы, учитывающие специфические особенности данной задачи.

Для получения задачи в виде конечных разностей использован интегроинтерполяционный метод, предложенный А. Н. Тихоновым и А. А. Самарским [5], с помощью которого можно построить разностные схемы выражающие на сетке законы сохранения (консервативные разностные схемы). Для данной системы построение такой схемы возможно с использованием в качестве базисных переменных переменные n , p и j . Значения электрического поля E и токов J_n и J_p определяются численным дифференцированием переменных n , p и j . При переходе к переменным n и j для концентрации используются условия (11) - (12), а потенциал полагается равным: $j(0) = 0$ - на катодном контакте и $j(L) = V(t)$, где $V(t)$ - действующее на диоде напряжение на анодном контакте.

В плоскости (x, t) вводится равномерная сетка $\bar{w} = \left\{ (x_i, t_j), x_i = ih, i = 1, m+1, h = \frac{l_a}{m}; t_j = jt, j = 0, 1, \dots \right\}$, где h - шаг по координате, t - шаг по времени, где:

$$x_1 = 0, x_{m+1} = l_a \quad (13)$$

Кроме того, используются потоковые точки:

$$x_{i+1/2} = x_i + \frac{h_i}{2} \quad (i = 1, m) \quad (14)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Профиль легирования расчетной структуры диода показан на рис. 1. Параметры областей (длины, концентрации) изменяются в разумных пределах для получения статического домена с высокой напряженностью электрического поля, достаточной для развития в нем ударной ионизации.

В приводимых ниже расчетах скорость – поле для арсенида галлия одинакова для прикатодной области n_k и для объема диода n и имеет вид (7,8). В этой зависимости μ_0 – низкополевая подвижность одинаковая во всех областях диода (и в слаболегированной и в сильнолегированной областях, концентрации при этом разнятся на порядок), E_0 – пороговая напряженность электрического поля, равная для GaAs ~ 4 кВ/см, $u_s \sim 1 \cdot 10^7$ см/с.

На рис. 2 приведены зависимости напряженности электрического поля от координаты при различных приложенных к структуре напряжениях. Максимум электрического поля соответствует границе слаболегированной области и сильнолегированной области. Максимальная напряженность электрического поля растет с увеличением напряжения и при 45-55 В достигает 180 кВ/см. При больших напряженностях начинает сказываться ударная ионизация, это приводит к изменению формы катодного статического домена: домен начинает расширяться в сильнолегированную область (см. рис. 2). В области вне домена напряженность электрического поля меньше пороговой и составляет 1,5...2,0 кВ/см. Зависимость максимальной напряженности электрического поля в статическом домене показана на рис. 3, она отражает зависимости, показанные на рис.2.

Статический домен образуется не при любых соотношениях концентраций и длин областей диода. Для получения статического домена длина прикатодной слаболегированной области должна быть достаточно протяженной для получения напряженностей электрического поля более 180 кВ/см в арсениде галлия (это длины $\sim 2...5$ мкм).

Соотношение концентраций в областях должно удовлетворять определенному соотношению. При небольшой разнице концентраций в слаболегированной области и в объеме образующийся у катода домен отрывается от катода и дрейфует к аноду. Чем больше концентрация в сильнолегированной области, тем больше может быть концентрация в прикатодной области для образования статического домена. Примерное соотношение для этих концентраций для стабилизации домена у катода $n/n_k \sim 10$, т.е. концентрация в прикатодной области меньше, чем в объеме примерно на порядок.

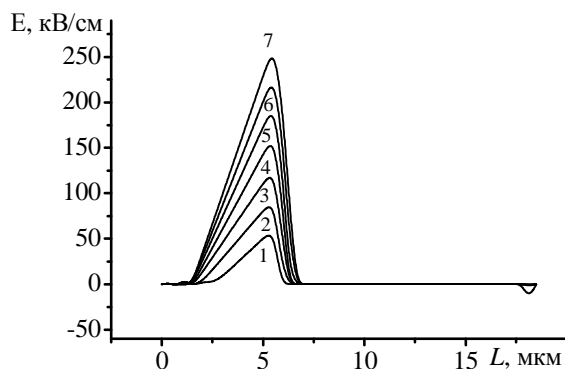


Рис. 2. Напряженность электрического поля в катодном статическом домене при различных приложенных к структуре напряжениях:
1- 10 В; 2- 20 В; 3- 30 В; 4- 40 В; 5- 50 В; 6- 60 В; 7- 70 В
(длина прикатодной области 5 мкм, длина диода общая 20 мкм, материал n -GaAs)

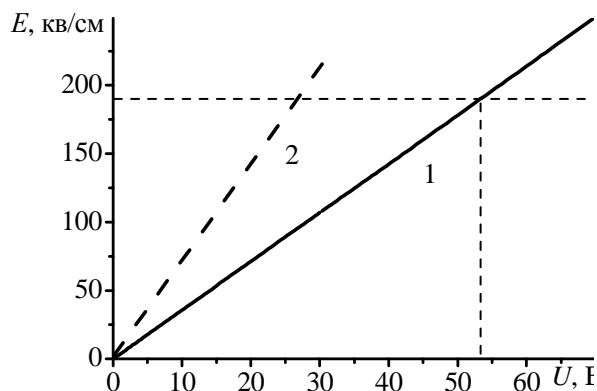


Рис. 3. Зависимость максимальной напряженности электрического поля в статическом домене от приложенного напряжения к диоду (1) (длина прикатодной области 5 мкм, длина диода общая 20 мкм, материал GaAs), 2 – предполагаемая зависимость в экспериментальном режиме

Вольтамперная характеристика структуры показана на рис. 4. Ток через структуру растет и насыщается. При дальнейшем увеличении напряжения на диоде начинается увеличение тока, обусловленное ударной ионизацией в статическом домене у катода. При этом статический домен с сильным электрическим полем за счет ударной ионизации расширяется в сильнолегированную n -область. Здесь же приведена экспериментальная вольтамперная характеристика диода к катодным статическим доменом с теми же параметрами, что и в приводимых расчетах при работе в непрерывном режиме (длина прикатодной области 5 мкм, длина диода общая 20 мкм, материал GaAs) [6]. Видно, что экспериментальные значения пороговых напряжений $U_{пор}$ (напряжений, при которых развивается ударная ионизация в катодном статическом домене и начинается рост тока) меньше расчетных. Экспериментальные значения пороговых напряжений $U_{пор}$ для

диодов с разной длиной прикатодной области (3 мкм и 5 мкм) составляли 10...30 В при концентрациях в n -области $6 \cdot 10^{15} \dots 10^{16} \text{ см}^{-3}$ примерно в два раза меньше расчетных.

Насыщение вольтамперной характеристики объясняется тем, что основная часть электрического поля сконцентрирована в домене, а вне домена электрическое поле незначительно, поэтому изменение величины тока с ростом напряжения будет невелико.

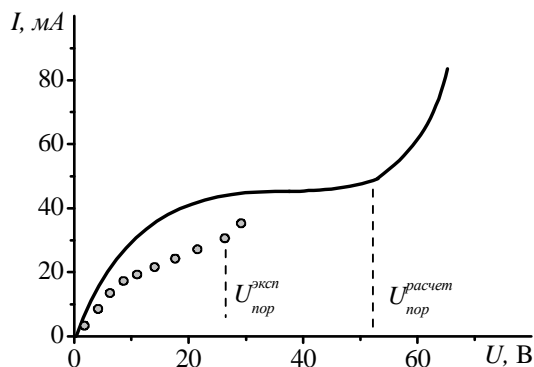


Рис. 4. Вольтамперная характеристика структуры $n^+ - n^- - n - n^+$ с катодным статическим доменом (длина прикатодной области 5 мкм, длина диода общая 20 мкм, материал GaAs). $U_{\text{пор}}$ – порог генерации шума диодом

экспериментальных диодах [7,8] слаболегированная область представляла собой полуизолирующий арсенид галлия, который как известно получают в результате легирования электронного GaAs хромом (Cr). Такой материал должен обладать низкой подвижностью носителей заряда (менее $3000 \text{ см}^2/\text{В с}$) и отличной от объема зависимостью дрейфовой скорости электронов и дырок от напряженности электрического поля. Таким образом, для подтверждения теоретической моделью экспериментальных результатов в рассмотренной выше модели катодного статического домена необходимо учесть разные зависимости дрейфовой скорости электронов и дырок в прикатодной области и в объеме. Введение прикатодного слоя с низкой подвижностью и скоростью электронов может скорректировать расчетные результаты и привести к подтверждению экспериментальных результатов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные предварительные расчеты показали:

- что при определенных соотношениях концентраций и длин областей диода возможно образование катодного статического домена с напряженностями электрического поля, при которых в домене развивается ударная ионизация;

- использование одинаковых зависимостей скорости поле во всех областях диода с катодным статическим доменом приводит к завышенным пробивным напряжениям по сравнению с экспериментальными результатами;

- с целью улучшения модели диода с катодным статическим доменом следует учитывать скорости дрейфа носителей заряда в каждой из областей структуры, которые обусловлены различными подвижностями в этих областях либо различными полупроводниковыми материалами этих областей (например, для n^- -области – это использование GaAsP с меньшими скоростями дрейфа электронов при различных составах тройного соединения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прохоров Э.Д., Скоробогатова С.Н., Золотарев Е.С. генерация СВЧ шума диодом Ганна с катодным статическим доменом, Радиотехника и электроника, 1976, т.21, №8, с.1732-1739.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов, -М.-Мир, 1984, т.2, 456 с.
3. Прохоров Э.Д. Твердотельная электроника, -Х.: ХНУ имени В.Н.Каразина, 2008.-544с.
4. Т. Ранг, М. Пауусепп Коэффициенты ударной ионизации носителей заряда в $\langle 100 \rangle$ арсенида галлия, Электронная техника, сер. 2. Полупроводниковые приборы, 1987, вып2.- с.98-100.
5. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Теория разностных схем, М.-Наука, 1983, 616 с.
6. Прохоров Э.Д., Скоробогатова С.Н. Шумовой спектр диода с катодным статическим доменом, Радиотехника и электроника, 1985, №7, с.14447-1449.
7. Прохоров Э.Д., Скоробогатова С.Н. А.С.СССР №1228737 от 03.02.1984, Полупроводниковый прибор для генерации СВЧ шума.
8. Прохоров Э.Д., Золотарев Е.С. А.С.СССР №1591775 от 26.07.1989, Диод для генерации СВЧ шума.

Необходимо отметить, что нелинейность ВАХ обусловлена так же значительным влиянием диффузионного тока, который возникает из-за больших градиентов концентрации электронов в переходах, особенно в катодном $n^+ - n$ переходе. С изменением длины прикатодной области изменяется и длина сильнолегированной области, что также приводит к изменению величины тока через структуру. В целом, экспериментальные ВАХ $n^+ - n^- - n - n^+$ диодов качественно совпадают с расчетными (рис. 4).

Сравнивая полученные результаты расчета с полученными ранее экспериментальными результатами для тех же длин диодов можно отметить, что экспериментальные значения напряжений, при которых начинается ударная ионизация, примерно в два раза меньше по сравнению с расчетными [1]. Это свидетельствует о том, что в прикатодной области характеристики материала GaAs отличны от объемных характеристик GaAs. Действительно, в