

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИКАТОДНОЙ ОБЛАСТИ В ДИОДЕ С КАТОДНЫМ СТАТИЧЕСКИМ ДОМЕНОМ НА ПОРОГ ГЕНЕРАЦИИ СВЧ-ШУМА

Э. Д. Прохоров, О. В. Боцула, С. Б. Соколов

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина*

*4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина*

E-mail: [Eduard.D.Prokhorov@univer.kharkov.ua](mailto:Eduard.D.Prokhorov@univer.kharkov.ua)

Рассматривается диод, в котором при определенных условиях образуется катодный статический домен. В нем при больших напряжениях может развиваться ударная ионизация, приводящая к лавинно-пролетному эффекту и возникновению шумовой генерации в см и мм диапазонах. Показано, как влияют на вольтамперные характеристики диода с катодным статическим доменом параметры прикатодной слаболегированной области – низкополевая подвижность электронов и дырок, дрейфовая скорость насыщения электронов и дырок, легирование прикатодной области хромом. Ил. 4. Библиогр.: 4 назв.

**Ключевые слова:** статический домен, зависимость  $v(E)$ , напряженность электрического поля.

Диоды с катодным статическим доменом при определенных напряжениях являются высокоэффективными источниками СВЧ-шума в см и мм диапазонах с уровнем спектральной плотности мощности шума  $\sim 10^2 \dots 10^5 kT_0$  [1].

Ранее [1] оценка максимальных напряженностей электрического поля вблизи катода и вольтамперных характеристик диодов была проведена на простейшей модели, в которой учитывалась только электронная составляющая тока, а скорости электронов в областях диода считались постоянными.

В работе [2] был исследован катодный статический домен на основе локально-полевой модели с учетом электронной и дырочной составляющих тока при одинаковых зависимостях дрейфовой скорости электронов и дырок во всех областях диода. Полученные при этом пороговые напряжения  $U'_{\text{пор}}$  при которых начинается ударная ионизация и генерация СВЧ-шума, оказались завышенными по сравнению с экспериментальными результатами.

Далее приводится анализ процессов в рассматриваемой структуре диода с катодным статическим доменом на основе локально-полевой модели при различных подвижностях и зависимостях дрейфовой скорости электронов и дырок в прикатодной области диода и с учетом легирования прикатодной области хромом.

**1. Методика расчетов.** Рассматриваемая структура диода  $n^+ - n^- - n - n^+$  (все области GaAs). Параметры областей:  $n^+$  сильнолегированные области катода и анода с омическими контактами на катоде и аноде (концентрация  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ ),  $n$ -область легирована слабее (концентрация  $5 \cdot 10^{15} \dots 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) с длиной  $L_2$ , область вблизи катода  $L_1$  легирована на порядок меньше  $n^-$  ( $5 \cdot 10^{14} \dots 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) и концентрация в ней может варьироваться так же, как и длины

областей. Переходные области  $n^+ - n$ ,  $n^- - n$ ,  $n - n^+$  конечны по величине и составляют  $0,1 \dots 0,05 \text{ мкм}$ .

При рассмотрении электронных процессов в диоде использовалась система уравнений, состоящая из уравнений непрерывности для электронов и дырок с учетом ударной ионизации, уравнения Пуассона и уравнений для электронных и дырочных токов [2, 3].

Зависимости дрейфовой скорости электронов и дырок от напряженности электрического поля и коэффициенты ударной ионизации в этих уравнениях записываются выражениями (1)–(4) для GaAs и могут быть различны для всех областей диода:

$$v_n(E) = \frac{a\mu_n E + bv_S \left(\frac{E}{E_0}\right)^4}{1 + \left(\frac{E}{E_0}\right)^4}; \quad (1)$$

$$v_p(E) = \begin{cases} a\mu_p E, & E < E_p, \\ bv_p E, & E > E_p; \end{cases} \quad (2)$$

$$a_n(E) = A_n e^{-\left(\frac{B_n}{E}\right)^{m_1}}; \quad (3)$$

$$a_p(E) = A_p e^{-\left(\frac{B_p}{E}\right)^{m_2}}, \quad (4)$$

где  $a_n(E)$ ,  $a_p(E)$  – коэффициенты ударной ионизации электронов и дырок соответственно;  $B_n = 1,3 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ ;  $B_p = 1,3 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ ;  $A_n = 3,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ ;  $A_p = 1,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$ ;  $m_1 = 1,464$ ;  $m_2 = 1,417$  [4];  $a$  и  $b$  – коэффициенты меньше единицы, которые позволяют менять подвижность и дрейфовую скорость в прикатодной области.

В зависимостях дрейфовой скорости от напряженности электрического поля (1), (2)  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  – низкополевые подвижности электронов и дырок,  $E_0$  – напряженность электрического поля, равная для GaAs  $\sim 4$  кВ/см,  $v_s \sim 1 \cdot 10^7$  см/с. В переходных областях  $n^+ - n$  и  $n - n^-$  подвижность принималась равной в  $n^-$ -области. В прикатодной области характеристики материала GaAs могут быть отличны от объемных характеристик GaAs.

Нами рассмотрены следующие случаи:

– в  $n$ -области подвижность электронов постоянна и составляет  $\mu_n \sim 8000$  см<sup>2</sup>/(В·с), в  $n^-$ -области подвижность может уменьшаться до  $\mu_n \sim 1600$  см<sup>2</sup>/(В·с), аналогичным образом меняется подвижность дырок в  $n^-$ -области. Это возможно при легировании прикатодной области;

– в прикатодной области меняются и подвижность и дрейфовая скорость электронов и дырок, что может происходить из-за легирования прикатодной области или использования в прикатодной области другого полупроводникового материала (например, GaAsP);

– прикатодная область представляет собой компенсированный арсенид галлия, легированный хромом ( $Cr^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$ ). Такой материал обладает низкой подвижностью носителей заряда и отличной от объема зависимостью дрейфовой скорости электронов и дырок от напряженности электрического поля (это соответствует первому и второму случаям). В таком материале при высоких напряженностях электрического поля будет происходить ударная ионизация электронов, захваченных на уровне хрома. При этом образуется свободный электрон и зафиксированный в решетке атом хрома. Коэффициент ударной ионизации определяется энергией ионизации зона-зона или примеси  $\Delta\varepsilon$  ( $B_n \approx \Delta\varepsilon/eEl$ , где  $E$  – напряженность электрического поля,  $l$  – длина свободного пробега электрона). Уровни хрома находятся в запрещенной зоне GaAs примерно на 0,6...0,7 эВ ниже дна зоны проводимости, для них  $\Delta\varepsilon \approx 0,43...0,48 \varepsilon_g$ , где  $\varepsilon_g$  – ширина запрещенной зоны GaAs. Поэтому коэффициент ударной ионизации электронов в прикатодной области может быть записан в виде (3) с  $B_n = 0,62...0,7 \cdot 10^6$  В/см.

Таким образом, в последнем случае в уравнениях непрерывности для прикатодной области учитывалась, кроме ударной ионизации зона-зона, и ударная ионизация электронов на уровнях хрома.

Граничные условия использовались и численные расчеты проводились аналогично работе [2].

## 2. Результаты расчетов и обсуждение.

Для получения напряженностей электрического поля более 200 кВ/см в арсениде галлия длина прикатодной области должна быть достаточно протяженной ( $\sim 2...5$  мкм). Соотношение концентраций для стабилизации домена у катода  $n/n^- \sim 5...10$ .

Максимум электрического поля соответствует границе слаболегированной и сильнолегированной областей. Максимальная напряженность электрического поля растет с увеличением напряжения и при  $\sim 60$  В достигает 200 кВ/см при одинаковых зависимостях скорость-поле в прикатодной области и в объеме (длина прикатодной области 5 мкм, общая длина 20 мкм).

Вольтамперные характеристики (ВАХ) структуры при одинаковых зависимостях скорость-поле в прикатодной области и в объеме показаны на рис. 1, где  $U'_{пор}$  – порог генерации шума диодом, площади контактов  $\sim 10^{-5}$  см<sup>2</sup>.

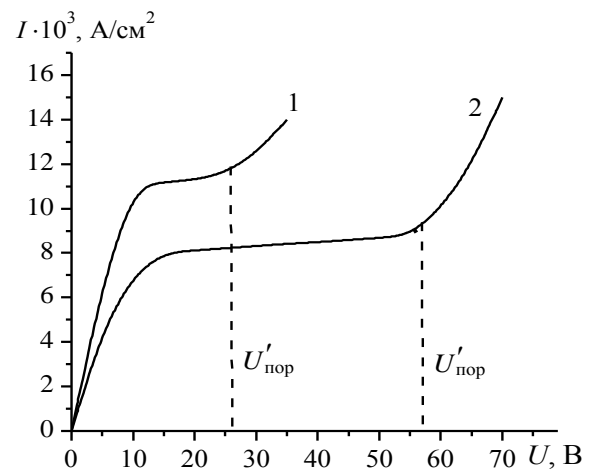


Рис. 1. ВАХ структур  $n^+ - n^- - n - n^+$ : 1 – длина прикатодной области 2,5 мкм, общая длина диода 10 мкм, материал GaAs; 2 – длина прикатодной области 5 мкм, длина диода 20 мкм

Ток через структуру растет и насыщается. Насыщение тока объясняется тем, что основная часть электрического поля сконцентрирована в домене, а вне домена электрическое поле незначительно ( $1,5...2,0$  кВ/см), поэтому изменение величины тока с ростом напряжения будет невелико. При  $U'_{пор}$  ток возрастает из-за ударной ионизации в  $n^-$ -области.

Исследовано влияние подвижности и дрейфовой скорости насыщения в прикатодной области на вид ВАХ диода и  $U'_{пор}$ . Рассматривались первый и второй случаи. Результаты приведены на рис. 2 и 3 для диодов длиной 20 мкм и длиной прикатодной области 5 мкм.

При изменении подвижности в прикатодной области от  $8\,000\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  до  $1\,600\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  пороговое напряжение  $U'_{\text{пор}}$ , при котором начинается увеличение тока через диод и СВЧ-генерация, меняется незначительно (см. рис. 2). Это связано с тем, что дрейфовая скорость насыщения электронов в GaAs в диапазоне напряженностей электрического поля от 10 до 200 кВ/см не меняется.

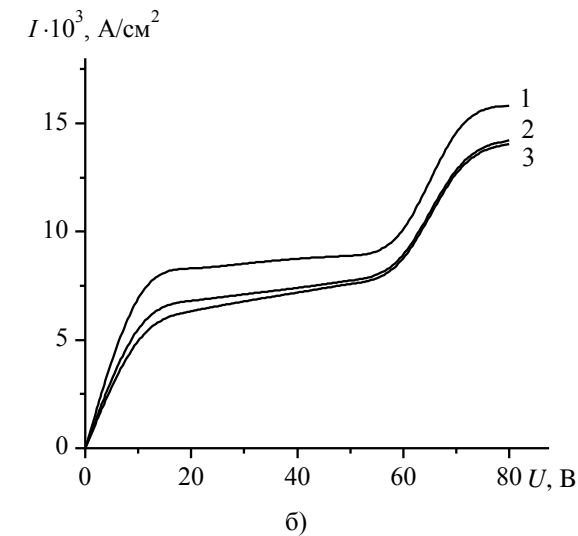
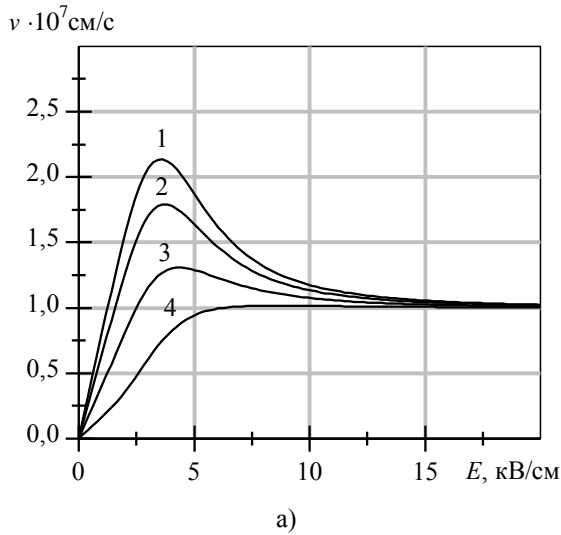


Рис. 2. Зависимость  $v(E)$  для электронов (а), подвижности ( $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ): 1 – 8 000, 2 – 6 400, 3 – 4 000, 4 – 1 600; ВАХ диода  $n^+ - n^- - n - n^+$  (б): 1 –  $a = b = 1$ ; 2 –  $a = 0,5$ ; 3 –  $a = 0,2$

Изменение одновременно и подвижности и дрейфовой скорости насыщения от  $8\,000\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  и  $10^7\text{ см/с}$  до  $1\,600\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  и  $0,2\cdot 10^7\text{ см/с}$  также приводит к малым изменениям порога генерации СВЧ-шума в пределах 3...5 В. Изменение дрейфовой скорости насыщения при-

водит только к уменьшению тока через диод (см. рис. 3).

Таким образом, низкая подвижность и дрейфовая скорость насыщения электронов в прикатодной области незначительно влияют на порог генерации СВЧ-шума диода с катодным статическим доменом. Однако теоретические результаты по порогу генерации завышены по сравнению с экспериментальными результатами [2].

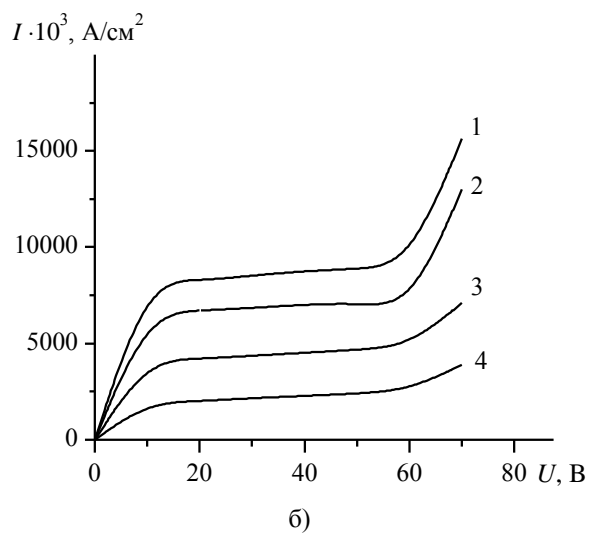
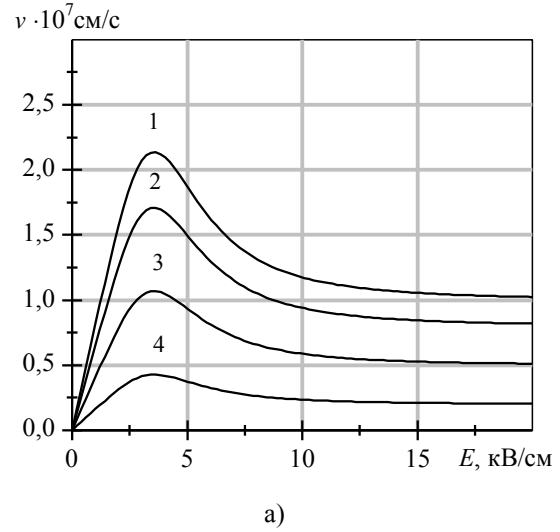


Рис. 3. Зависимость  $v(E)$  для электронов (а) подвижности ( $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ): 1 – 8 000, 2 – 6 400, 3 – 4 000, 4 – 1 600;  $v_s$  ( $\text{см/с}$ ): 1 –  $10^7$ , 2 –  $0,8\cdot 10^7$ , 3 –  $0,5\cdot 10^7$ , 4 –  $0,2\cdot 10^7$ ; ВАХ диода  $n^+ - n^- - n - n^+$  (б): 1 –  $a = b = 1$ ; 2 –  $a = b = 0,8$ ; 3 –  $a = b = 0,5$ ; 4 –  $a = b = 0,2$

Это говорит о том, что необходимо учитывать особенности процессов, связанных с ударной ионизацией в полуизолирующем арсениде галлия, легированном хромом.

Исследовано влияние ударной ионизации хрома в прикатодной области  $n^+ - n^- - n - n^+$  диода при длине прикатодной области 5 мкм, общей длине 20 мкм (рис. 4), где  $U'_{\text{пор}}$  – расчетные и  $U_{\text{пор}}^{\text{эксп}}$  – экспериментальные пороги генерации.

Ударная ионизация хрома учитывалась только в слаболегированной прикатодной области, в остальной области диода ( $n$ -области) хрома нет и учитывается ударная ионизация зона-зона.

Видно, что порог генерации диодом СВЧ-шума  $U'_{\text{пор}}$  стал ниже. Это связано с тем, что до ударной ионизации зона-зона в прикатодной области начинается ударная ионизация электронов, захваченных на уровни хрома. Если при ударной ионизации зона-зона коэффициент ударной ионизации  $\alpha_n$  достигает значений 1...10 при ~180...200 кВ/см, то для достижения таких же значений  $\alpha_n$  при ионизации хрома нужны напряженности электрического поля ~80...100 кВ/см. Соответственно, и рост тока через диод начинается при меньших напряжениях на диоде (рис. 4).

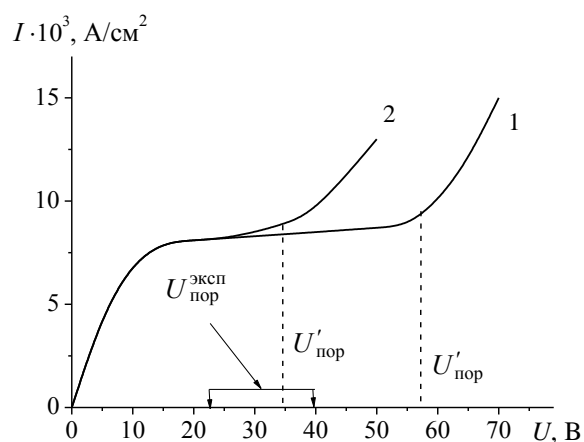


Рис. 4. ВАХ диода  $n^+ - n^- - n - n^+$  с учетом ударной ионизации хрома (2) и без учета (1), для длины прикатодной области 5 мкм, длина диода 20 мкм

Экспериментальные значения пороговых напряжений  $U'_{\text{пор}}$  меньше расчетных при одинаковых зависимостях скорость-поле в прикатодной области и в объеме и при различных зависимостях скорость-поле в прикатодной области и в объеме.

При учете ударной ионизации хрома в прикатодной области пороговые напряжения находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами. На рис. 4 показан диапазон пороговых напряжений диодов с катодным статическим доменом с длиной прикатодной области от 3 до 6 мкм. Разброс пороговых напряжений можно объяснить неточностью определения толщины прикатодной области в экспериментальных образцах.

Различие в токах через диоды в расчетах и экспериментах можно объяснить следующими причинами:

- влиянием разогрева рабочей области диода, поскольку основное напряжение падает на прикатодной области и она разогревается сильнее, чем объем (на GaAs температура в прикатодной области может достигать ~200°C);
- различными площадями контактов.

**Выводы.** Таким образом, проведенные расчеты показали:

– ВАХ диодов с катодным статическим доменом с учетом генерации электронов и дырок при ударной ионизации для GaAs имеют участок насыщения тока и участок быстрого роста тока, который обусловлен ударной ионизацией зона-зона или примесей;

– учет различных зависимостей скорость-поле в областях диода с катодным статическим доменом (с низкой подвижностью и меньшей, по сравнению с объемом, дрейфовой скоростью) приводит к завышенным пробивным напряжениям относительно экспериментальных результатов;

– учет ударной ионизации электронов, захваченных на уровни хрома в запрещенной зоне прикатодной области, приводит к вольтамперным характеристикам и пороговым напряжениям  $U'_{\text{пор}}$ , которые находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами.

1. Прохоров Э. Д. Генерация СВЧ шума диодом Ганна с катодным статическим доменом / Э. Д. Прохоров, С. Н. Скоробогадова, Е. С. Золотарев // Радиотехника и электрон. – 1976. – 21, № 8. – С. 1732–1739.
2. Боцула О. В. Катодный статический домен в диоде с междолинным переносом электронов / О. В. Боцула, Д. В. Павленко, Э. Д. Прохоров // Вестн. Харьк. нац. ун-та им. В. Н. Каразина. Радиофизика и электрон. – 2008. – № 834. – С. 104–107.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 т. Т. 2 / С. Зи. – М: Мир, 1984. – 456 с.
4. Ранг Т. Коэффициенты ударной ионизации носителей заряда в <100> арсенида галлия / Т. Ранг, М. Пауусеп // Электрон. техника. Сер. 2, Полупроводниковые приборы. – 1987. – Вып. 2. – С. 98–100.

## INFLUENCE PARAMETER DIODE WITH CATHODE STATIC DOMEN UPON OSSILATION THRESHOLD OF UHF NOISE

E. D. Prokhorov, O. V. Botsula, S. B. Sokolov

It is considered diode, in which under determined condition is formed static cathode domain, in which under greater voltages can develop impact ionization. The impact ionization lead to avalanche transit effect and arising UHF range noise. Influence parameters cathode region (mobility electron and holes, drift saturation velocity of the electron and holes, chromium doping level of cathode region) upon voltage-current characteristics of the diode with cathode static domain are shown below.

**Key words:** static domen, velocity – field characteristic, electric field strange.

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ  
ПРИКАТОДНОЇ ОБЛАСТІ В ДІОДІ  
З КАТОДНИМ СТАТИЧНИМ ДОМЕНОМ  
НА ПОРІГ ГЕНЕРАЦІЇ НВЧ-ШУМУ

Е. Д. Прохоров, О. В. Боцула, С. Б. Соколов

Розглядається діод, у якому при визначених умовах утворюється катодний статичний домен. У ньому при великих напругах може розвинути ударна іонізація, яка приводить до

лавинно-пролітного ефекту й виникнення шумової генерації в см і мм діапазонах. Показано, як впливають на вольтамперні характеристики діода з катодним статичним доменом параметри прикатодної слабологової області – низькопольова рухливість електронів і дірок, дрейфова швидкість насичення електронів і дірок, легування прикатодної області хромом.

**Ключові слова:** статичний домен, залежність  $\nu(E)$ , напруженість електричного поля.

*Рукопись поступила 17 декабря 2009 г.*