

УДК 621.382.2

ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДОВ С КАТОДНЫМ СТАТИЧЕСКИМ ДОМЕНОМ, ВАРИЗОННЫМ СЛОЕМ И ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ

О. В. Боцула, К. Г. Приходько

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина, Тел.(0572) 7051262
e-mail: oleg.botsula@mail.ru, kyrylo.h.prykhodko@univer.kharkov.ua
Поступила в редакцию 25 мая 2016 г.

Рассматриваются короткие диоды, в которых формируются катодные статические домены и возникает ударная ионизация. Особенностью рассматриваемых диодов является наличие гетероперехода на катодном контакте и области варизонного полупроводника.

Анализ работы диодов проводился с использованием метода Монте-Карло. Исследовано влияние профиля легирования на вольтамперные характеристики диодов. Получены распределения концентрации носителей и электрического поля, определены зависимости параметров катодного статического домена от структуры диода и напряжения смещения. Показано, что определяющее влияние на параметры домена и вольтамперные характеристики оказывает ширина обедненной области на катоде. Продемонстрировано роль ударной ионизации, как механизма релаксации энергии электронов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ударная ионизация, статический катодный домен, вольтамперные характеристики, гетеропереход, варизонный слой.

Розглядаються короткі діоди, в яких формуються катодні статичні домени та виникає ударна іонізація. Особливістю діодів, що розглядаються є наявність гетеропереходу на катодному контакті та області, що являє собою варизонний напівпровідник.

Аналіз роботи діодів проводився з використанням методу Монте-Карло. Досліджено вплив профілю легування на вольтамперні характеристики діодів. Отримано розподіли концентрації носіїв та електричного поля, визначено залежність параметрів катодного статичного домену від структури діода та напруги зміщення. Показано, що визначальний вплив на параметри домена та вольтамперні характеристики має ширина збідненої області на катоді. Продемонстровано роль ударної іонізації, як механізму релаксації енергії електронів.

КЛЮЧЕВІ СЛОВА: ударна іонізація, статичний катодний домен, вольтамперні характеристики, гетероперехід, варизонний шар.

The short length diode with forming cathode static domain and occurring impact ionization are considered. The diode peculiarity is using of heterojunction on cathode contact and region with varying composition.

The analysis of the diodes operation was performed using Monte Carlo technique. The influence of doping profile on diode current – voltage characteristic is investigated. The carrier concentration and electric field distribution are obtained. The cathode static domain parameters depending on diode structure and voltage bias are determined. The main influence on domain parameters is caused by low concentration region size in the cathode. The role of impact ionization as a electrons energy relaxation mechanism has been demonstrated.

KEYWORD: impact ionization, static cathode domain, current voltage characteristics, heterojunction, graded layer.

ВВЕДЕНИЕ

Освоение длинноволновой части терагерцового диапазона (0,1–1 ТГц) твердотельными приборами происходит в двух основных направлениях. Первое направление связано с использованием приборов, работа которых основана на новых, не свойственных традиционным приборам принципах, как, например, возникновение плазменных неустойчивостей [1]. Вторым направлением является использование традиционных приборов с улучшенными характеристиками, которые позволяют им работать на столь высоких частотах (диоды Ганна, лавинно-пролетные, инжекционно-пролетные диоды и т.д.).

При этом основным способом повышения быстродействия и, соответственно, увеличения частоты остается уменьшение размеров элементов. Однако, приборы нанoeлектроники, например, резонансно-туннельные диоды, хоть и являются по своей сути достаточно высокочастотными элементами, не способны обеспечить приемлемые уровни выходной мощности в силу необходимости использования малых площадей диодов для снижения их емкости. В тоже время среди всех известных твердотельных источников терагерцового излучения наибольшими уровнями выходной мощностью обладают приборы на лавинных эффектах и эффекте междолинного переноса электронов [2]. Поэтому, именно этим эффектам нужно отдать предпочтение при создании эффективных источников терагерцового излучения.

Следует отметить, что если длина активной области составляет сто или нескольких сотен нанометров, то она становится соизмерима с характерными длинами релаксации носителей по импульсу и энергии, а время пролета носителей может быть сравнимым с временем развития ударной ионизации. Электронные процессы в

таких коротких структурах сложны, а существующие критерии получения генерации становятся неприменимыми. Например, критерий Кремера, определяющий область существования генерации в диодах Ганна [3], изначально был получен при условии, что постоянная времени образования домена значительно превышает время релаксации энергии электрона, а длина домена превышает длину свободного пробега носителей заряда. Очевидно, что эти условия не выполняются в случае коротких диодов. Численное моделирование диодов на основе GaN с длиной активной области менее 0,3 мкм, выполненное с помощью метода Монте-Карло [4], показало, что возникновение неустойчивостей тока возможно при значениях концентрации носителей заряда меньшей величины, которая определяется из критерия Кремера. Кроме того, было показано, что в таких диодах возможно возникновение ударной ионизации (УИ), которая не приводит к пробоему диода, однако оказывает влияние на процесс генерации.

Целью данной работы является исследование электронных процессов в коротких диодах с ударной ионизацией и получение их вольтамперных характеристик (ВАХ).

МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассматриваемые диоды представляли собой $n^+ - n^- - n - n^+$ -структуру длиной 640 нм, в которой концентрации n^- и n различаются более чем на порядок (рис.1 а). В результате на границе раздела n^- и n -областей формируется стабильная область с большой напряженностью электрического поля (статический домен). Диоды выполнены на основе соединения $Al_z Ga_{1-z} N$ с неравномерным распределением состава (рис. 1 б).

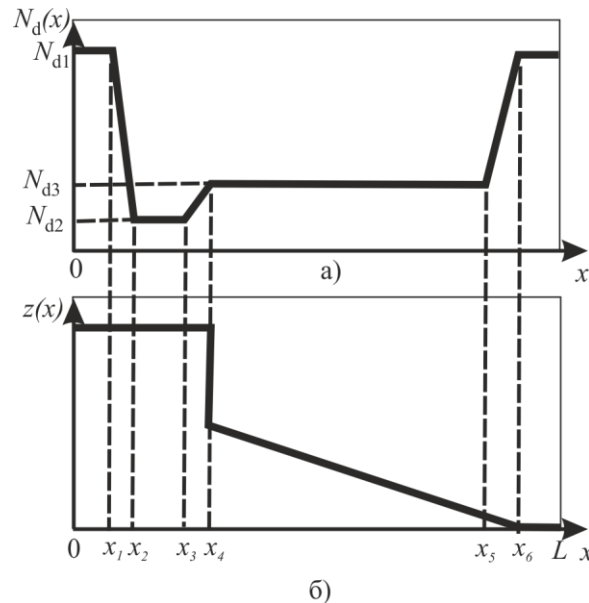


Рис.1 Структура рассматриваемого диода а) – профиль легирования; б) – распределение молярной доли алюминия

Область в промежутке от 0 до x_4 представляет собой полупроводник $Al_{0,45} Ga_{0,55} N$, материал в анодной области ($x_6 - L$) – GaN. В точке x_4 сформирован гетеропереход, за которым располагается слой, в котором содержание алюминия в соединении $Al_z Ga_{1-z} N$ монотонно убывает (варизонный слой). В рассмотренном диоде концентрация алюминия на гетеропереходе изменялась скачком от $z = 0,45$ до $z = 0,12$, а в пределах варизонной области менялась от $z = 0,12$ до $z = 0$ по линейному закону.

Такое распределение состава приводит к тому, что ударная ионизация в рассматриваемом диоде возникает не в области максимального электрического поля катодного статического домена, а в варизонной области диода и будет зависеть от закона распределения состава $z(x)$. За счет квазиэлектрических полей варизонного слоя дырки в полупроводнике n -типа могут двигаться к аноду, аналогично электронам [5].

Это даст возможность избежать накопления дырок в области варизонного слоя и должно способствовать быстрому восстановлению состояния диода до предпробойного, а значит, обеспечивать высокое быстродействие диода.

Моделирование диода проводилось с использованием метода Монте-Карло. Была рассмотрена трехдолинная модель зоны проводимости. Все аспекты моделирования электронов выбраны аналогично рассмотренным в работах [4,6]. Для расчета потенциала в областях был выбран один из разновидностей методов релаксации - многосеточный метод. Ударная ионизация учитывается аналогично работе [4].

В состоянии равновесия $U=0$ в структуре образуются внутренние электрические поля в области переходов в результате перераспределения электронов вследствие градиентов концентраций. Внутреннее электрическое поле n^+-n^- перехода противоположно электрическому полю $n^- - n$ перехода и электрическому полю $n-n^+$ анодного контакта.

Приложение внешнего электрического поля приводит к образованию прикатодного домена с сильным электрическим полем на границе $n^- - n$ областей. Внешнее прикладываемое поле противоположно полю n^+-n^- перехода. Поэтому на границе n^+-n^- в рассматриваемой структуре при малых напряжениях образуется область с отрицательной напряженностью электрического поля, которая исчезает при повышении приложенного напряжения (рис. 2,а).

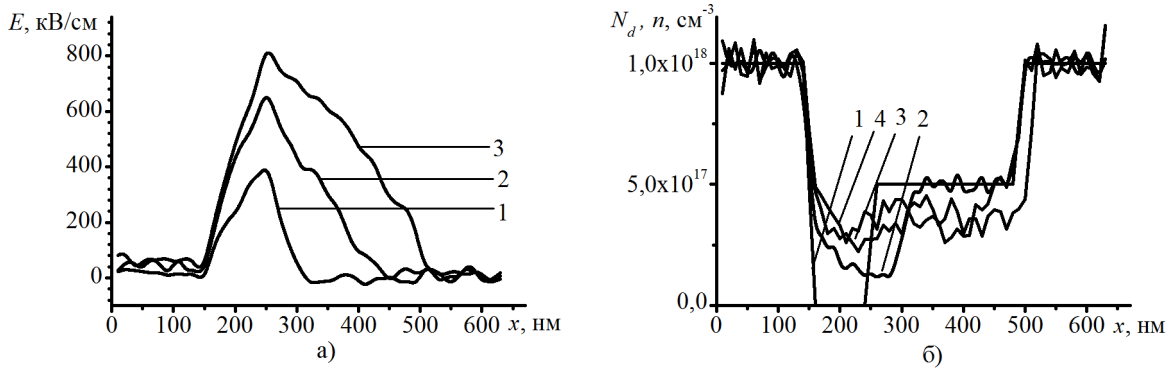


Рис. 2 Распределение электрического поля – а): 1 – $U=5$ В; 2 – $U=12$ В; 3 – $U=20$ В; распределение легирующей примеси и концентрации электронов – б): 1 – $N_d(x)$; 2-4 – $n(x)$; 2 – $U=5$ В; 3 – $U=12$ В; 4 – $U=20$ В; длина области зарубки 80 нм; $N_{d2} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $N_{d3} = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Такое распределение напряженности характерно для структуры при наличии n^+ -анода. Напряженность электрического поля в области $n^- - n$ перехода при соответствующем внешне приложенном напряжении может возрастать до значений, достаточных для возникновения ударной ионизации. В области анода, в случае n^+ или антизапорного металлического контакта, напряженность электрического поля также возрастает и может достигать больших значений (сотни киловольт на сантиметр).

Из полученных распределений электрического поля от координаты видно, что с увеличением напряжения на диоде происходит не только увеличение величины напряженности электрического поля, но также расширение области заполняемой статическим доменом в сторону анодного контакта. На рис. 2 б показаны распределения концентрации электронов, соответствующие распределениям поля на рис. 2 а.

Видно, что расширение домена сильного поля происходит, как за счет заливания области зарубки электронами, так и за счет расширения обедненной области в сторону анода. Из-за выравнивания концентрации электронов положение максимума электрического поля локализуется у $n^- - n$ перехода, где объемный заряд равен нулю.

Зависимость плотности тока от приложенного напряжения с учетом и без учета ударной ионизации для диода с длиной зарубки 80 нм при разной концентрации легирующей примеси показана на рисунке 3 а. На рисунке 3 б представлены зависимости плотности тока от приложенного напряжения для диодов с различной длиной зарубки.

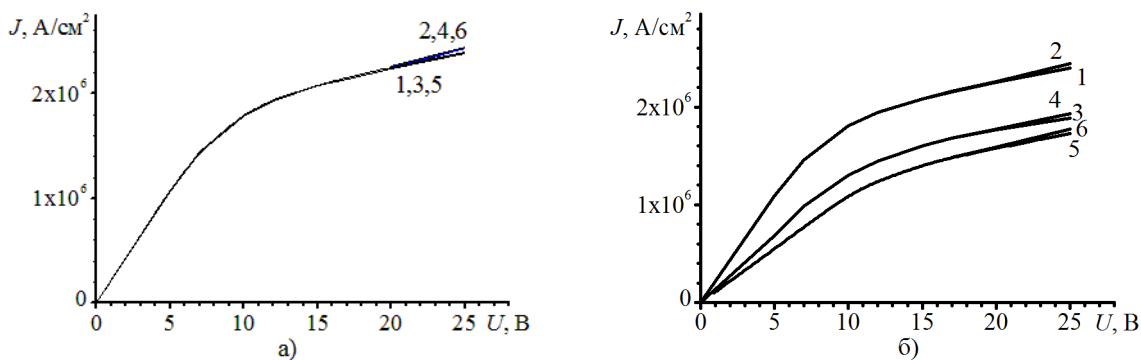


Рис. 3 ВАХ диодов: а) – с длиной зарубки 80 нм и разной концентрацией легирующей примеси в ней; 1,2 – $N_{d2} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 3,4 – $N_{d2} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 5,6 – $N_{d2} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$; б) – для диодов с разной шириной зарубки; 1, 2 – 80 нм; 3, 4 – 120 нм.; 5, 6 – 140 нм; 1, 3, 5 – без учета УИ; 2, 4, 6 – с учетом УИ.

Как видно из полученных результатов влияние длины зарубки на ВАХ диодов является существенным. Уменьшение длины зарубки способствует уменьшению сопротивления диода и увеличению плотности тока, протекающего через него.

Если к рассматриваемому диоду $n^+ - n^- - n^+$ прикладывать большие напряжения, то напряженность электрического поля в катодном домене (область $n - n$ перехода) может достичь значений, достаточных для сообщения электронам энергии, которая в некоторой точке (области) варизонного слоя может превысить пороговое значения начала развития ударной ионизации. Как видно из рис. 3 в этом случае в области высоких напряжения ток через диод возрастает.

Для уточнения роли ударной ионизации были получены энергетические распределения электронов в нижней (Γ) (рис. 4 а)) и самой верхней ($M - L$) (рис. 4 б)) долинах.

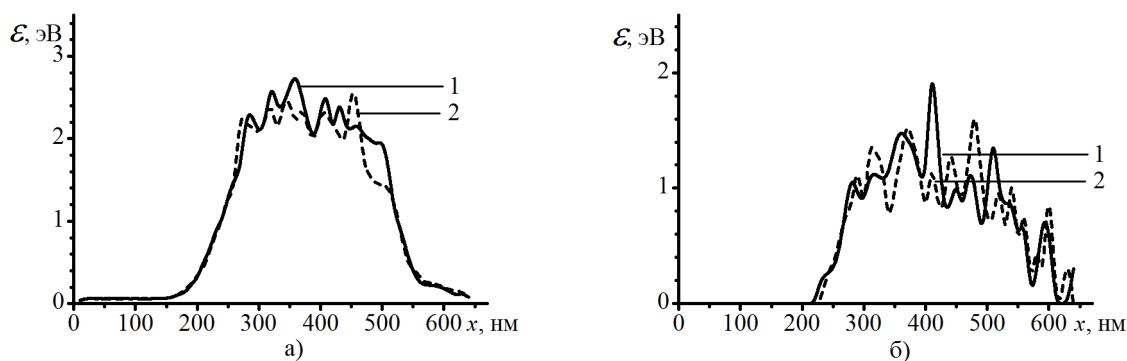


Рис. 4 Энергетическое распределение электронов в Γ -долине а) и $M - L$ -долине б) зоны проводимости: 1 - без УИ; 2 - с УИ.

Как видно из полученных зависимостей на расстояниях порядка 200 нм от начала области разогрева электронов за счет ударной ионизации наблюдается перераспределение энергии электронного газа между верхними и нижней долинами зоны проводимости. Происходит остывание электронного газа, что говорит о том, что в рассмотренных коротких диодах ударная ионизация способствует релаксации энергии электронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ работы коротких диодов на основе $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$ показал, что влияние параметров профиля легирования на статические характеристики аналогично тому, что наблюдается в длинных диодах с катодным статическим доменом[6]: при заданном значении концентрации в активной области величина концентрации в области зарубки, в случае стабильного домена сильного поля, слабо влияет на вольтамперные характеристики диодов, а уменьшение ширины зарубки при заданном значении концентрации в активной области приводит к росту тока, протекающего через диод. Ударная ионизация в рассмотренных диодах на $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{N}$, вызывает рост тока через диод при напряжениях 17- 20 В, а использование в диоде гетероперехода и варизонного слоя позволило понизить напряженность поля, необходимую для развития ударной ионизации до значений меньших 1000 кВ/см. В рассмотренных диодах ударная ионизация может играть роль релаксационного механизма, перераспределяющего энергию между долинами зоны проводимости, что в перспективе может быть использовано для создания быстродействующих активных элементов в терагерцовом диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. El Fatimy, N. Dyakonova, Y. Meziani, T. Otsuji, W. Knap, S. Vandenbrouk, K. Madjour, D. The'ron, C. Gaquiere, M.A. Poisson, S. Delage, P. Prystawko, C. Skierbiszewski.: AlGaN/GaN high electron mobility transistors as a voltage-tunable room temperature terahertz sources // J. Appl. Phys. 107, 024504 (2010)
2. B. Bhushan (ed.), Encyclopedia of Nanotechnology, Springer. – Springer Dordrecht Heidelberg New York London Library of Congress Control Number: 2012940716. – 2012. – P. 253- 267.
3. M. Levinshtein, J. Kostamovaara, S. Vainshtein Breakdown phenomena in semiconductors and semiconductors devises Selected topics of electronic and system. – Vol. 36. – World ScientificPublishing. – Singapore. – 2005. – 208 P.
4. O. V. Botsula, E.D. Prokhorov, D.S. Svergun , K.G. Prykhodko. Influence of impact ionization on oscillation efficiency of short GaN – based diodes // Материалы 24 Межд. Крымской конф.-“СВЧ техника и телекоммуникационные технологии”, Севастополь, КрыМиКо-2014. – Т.1. – С.143-144.
5. В. И. Ильин Квазиэлектрические поля в полупроводниках и полупроводниковых структурах//Соросовский образовательный журнал. – Т. 7, № 11. – 2001. – С. 109-115.
6. О. В. Боцула, К. Г. Приходько Диод с катодным статическим на основе гетероструктуры // Радиофизика и электроника – 2015. – Т. 6(20), № 3. – С. 66–71.