

УДК 621.382.323

ЛАВИННЫЙ ПРОБОЙ ТРАНЗИСТОРА С ВЫСОКОЙ ПОДВИЖНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОНОВ
НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ С ТЕПЛОТВОДЯЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА

Волчѣк В.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь, vlad.volchek@bsuir.by

Аннотация: Одной из главных проблем транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия, препятствующих их развитию, является эффект саморазогрева. Неравномерное распределение рассеиваемой мощности и повышение средней температуры приводят к появлению вблизи канала области с очень высокой температурой и деградации прибора. Среди перспективных решений, направленных на снижение влияния эффекта саморазогрева, стоит отметить использование теплоотводящих элементов на основе двумерных материалов с высокой теплопроводностью, таких как графен и гексагональный нитрид бора. Недостатком графенового теплоотводящего элемента является его высокая электрическая проводимость, что ограничивает область его возможного расположения. В данной работе показано, что малое расстояние между затвором и слоями графена приводит к преждевременному пробую, вызванному лавинообразной генерацией носителей заряда.

Ключевые слова: гетероструктурный полевой транзистор, графен, лавинный пробой, модель Чиновета, нитрид галлия, теплоотводящий элемент, транзистор с высокой подвижностью электронов, ударная ионизация.

I. ВВЕДЕНИЕ

Эффект саморазогрева является одной из основных проблем транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия, препятствующих их развитию. Среди перспективных конструктивно-технологических решений, направленных на снижение влияния эффекта саморазогрева, выделяется использование теплоотводящих элементов на основе двумерных материалов с высокой теплопроводностью, таких как графен [1] и гексагональный нитрид бора [2]. Недостатком графенового теплоотводящего элемента является его высокая электрическая проводимость, что ограничивает область его возможного расположения. В данной работе посредством численного моделирования показано, что малое расстояние между затвором и слоями графена приводит к преждевременному пробую вследствие лавинообразной генерации носителей заряда.

II. ПРИБОРНАЯ СТРУКТУРА

Объектом исследования является нормально закрытый транзистор с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия, изображенный на рис. 1. Система теплоотвода включает графитовый теплопоглощающий элемент (ТПЭ), предназначенный для поглощения избыточного тепла, и графеновый теплоотводящий элемент (ТОЭ), задачей которого является создание дополнительного (помимо подложки) маршрута для отведения тепла из активной области транзистора.

Размеры на рисунке указаны в микрометрах. Ширина приборной структуры равна 1 мм.

III. МОДЕЛЬ УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИИ

Если напряженность электрического поля является достаточно высокой, свободные носители заряда могут приобрести кинетическую энергию, необходимую для ионизации нейтральных атомов и переброски электронов и дырок соответственно в зону проводимости и валентную зону. В результате ионизации появляются электронно-дырочные пары, которые в свою очередь ускоряются полем и создают дополнительные носители заряда. Поскольку при этом сами ионизирующие носители остаются в разрешенных зонах, концентрация электронов и дырок будет лавинообразно увеличиваться до тех пор, пока этот процесс не окажется уравновешенным процессом рекомбинации или не произойдет лавинный пробой. Такой механизм генерации свободных носителей называется ударной ионизацией.

Скорость генерации электронно-дырочных пар вследствие ударной ионизации задается уравнением

$$G = \frac{1}{q} (\alpha_n |\vec{J}_n| + \alpha_p |\vec{J}_p|), \quad (1)$$

где q – элементарный заряд, Кл; α_n и α_p – коэффициенты ударной ионизации для электронов и дырок, $1/\text{м}$; J_n и J_p – плотности электронного и дырочного токов, $\text{А}/\text{м}^2$.

Коэффициент ударной ионизации определяется как число электронно-дырочных пар, создаваемых электроном или дыркой на единице пути перемещения. Точное вычисление этого параметра, значение которого очень сильно зависит от напряженности электрического поля, является важным при моделировании различных эффектов, связанных с ударной ионизацией, в том числе лавинного пробоя. Классической моделью, предназначенной для расчета коэффициентов ударной ионизации, является модель Чиновета [3]:

$$\alpha_n = A_n \exp\left(-\frac{E_n}{|\vec{E}|}\right), \quad (2)$$

$$\alpha_p = A_p \exp\left(-\frac{E_p}{|\vec{E}|}\right), \quad (3)$$

где A_n , A_p , E_n и E_p – эмпирические коэффициенты; E – напряженность электрического поля, В/м.

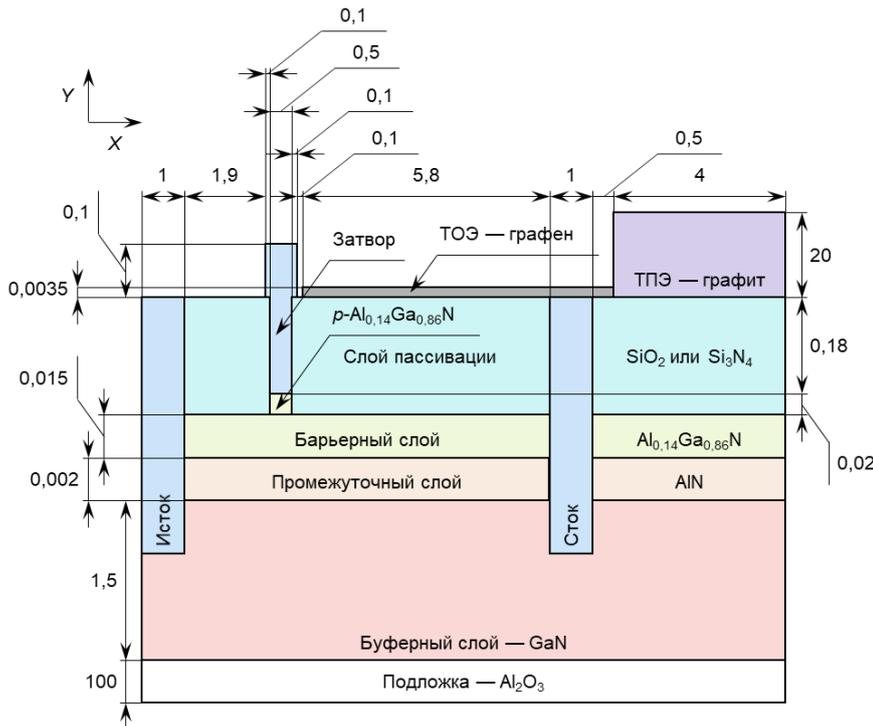


Рисунок 1. Приборная структура

Значения параметров модели ударной ионизации для нитрида галлия перечислены в табл. 1. В данной работе используется первый набор параметров.

Таблица 1. Параметры модели ударной ионизации

Параметр				Источник
A_n (1/см)	E_n (МВ/см)	A_p (1/см)	E_p (МВ/см)	
$2,9 \cdot 10^8$	34	–	–	[4]
$4,48 \cdot 10^8$	33,9	$7,13 \cdot 10^6$	14,6	[5]
$2,11 \cdot 10^9$	36,89	$4,39 \cdot 10^6$	18	[6]
$2,69 \cdot 10^7$	22,7	$4,32 \cdot 10^6$	13,1	[7]

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 показаны профили распределения напряженности электрического поля вдоль канала транзистора при напряжении затвор-исток 0 В и напряжении сток-исток 320 В. Как следует из результатов моделирования, при отдалении от затвора напряженность резко возрастает и достигает максимальной величины на расстоянии около 0,25 мкм от затвора, после чего плавно снижается. При использовании нитрида кремния в качестве материала пассивации верхней поверхности эпитаксиальной структуры напряженность электрического поля намного выше, чем при пассивации

оксидом кремния, поскольку относительная диэлектрическая проницаемость первого материала почти в два раза превышает соответствующее значение для второго. Максимальное значение напряженности в случае нитрида кремния равно 6,7 МВ/см, в то время как для оксида кремния получено значение 5,3 МВ/см.

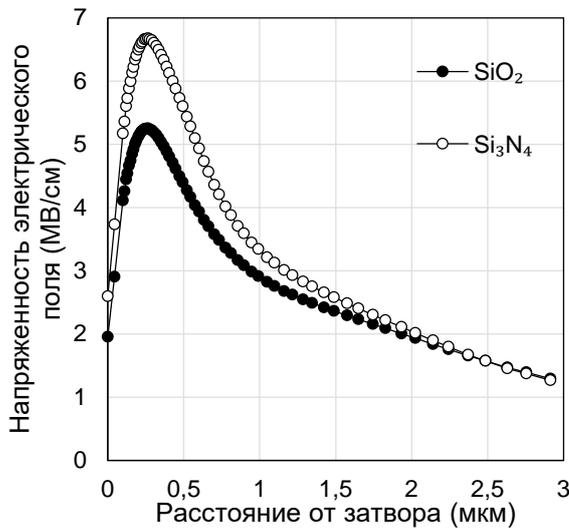


Рисунок 2. Профили распределения напряженности электрического поля вдоль канала

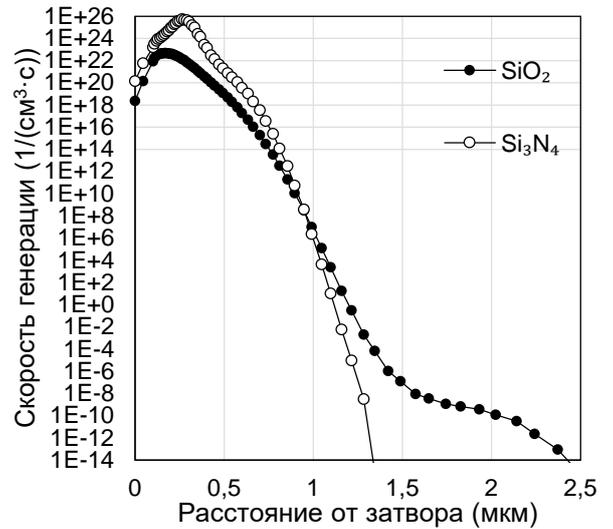


Рисунок 3. Профили распределения скорости генерации электронно-дырочных пар вдоль канала

Возрастание напряженности электрического поля у затвора приводит к увеличению коэффициентов ударной ионизации и, следовательно, лавинообразному увеличению скорости генерации носителей заряда, профили распределения которой вдоль канала показаны на рис. 3. Видно, что вид зависимости скорости генерации электронно-дырочных пар от расстояния до затвора в целом повторяет форму зависимости для напряженности электрического поля. Если материалом пассивации является нитрид кремния, максимальное значение скорости генерации составляет $5,4 \cdot 10^{25}$ 1/(см³·с). В случае оксида кремния соответствующая величина на три порядка меньше – $5,0 \cdot 10^{22}$ 1/(см³·с).

Так как напряженность электрического поля и скорость генерации электронно-дырочных пар в приборной структуре со слоем пассивации на основе нитрида кремния выше, вполне ожидаемо, что лавинный пробой этой структуры наступает раньше, что подтверждается рассчитанными вольт-амперными характеристиками, представленными на рис. 4. Так, пробой этого транзистора ожидается при напряжении сток-исток 324 В. Эта величина существенно ниже той, которая получена для приборной структуры со слоем пассивации на основе оксида кремния – 443 В.

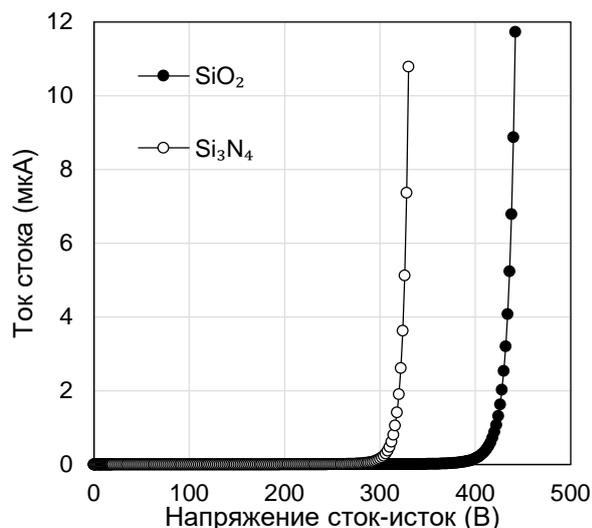


Рисунок 4. Зависимость тока стока от напряжения сток-исток

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам численного моделирования, проведенного в рамках модели ударной ионизации Чиновета, малое расстояние между затвором и графеновым теплоотводящим элементом, используемым для снижения влияния эффекта саморазогрева, транзистора с высокой подвижностью электронов на основе нитрида галлия приводит к преждевременному пробое, вызванному лавинообразной генерацией электронно-дырочных пар. Исходя из рассчитанных значений напряжения пробоя, оксид кремния является более предпочтительным материалом пассивации, чем нитрид кремния.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования проводятся в рамках выполнения заданий 3.1 и 3.9 государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yan, Z. Graphene Quilts for Thermal Management of High-Power GaN Transistors / Z. Yan, G. Liu, J. M. Khan, A. Balandin // Nature Communications. 2012. Vol. 3. Art. No 827.
- [2] Lin, Z. High Thermally Conductive and Electrically Insulating 2D Boron Nitride Nanosheet for Efficient Heat Dissipation of High-Power Transistors / Z. Lin, C. Liu, Y. Chai // 2D Materials. 2016. Vol. 3, No 4. Art. No 041009.
- [3] Chynoweth, A. G. Ionization Rates for Electrons and Holes in Silicon / A. G. Chynoweth // Physical Review. 1958. Vol. 109, No 5. P. 1537–1540.
- [4] Kunihiro, K. Experimental Evaluation of Impact Ionization Coefficients in GaN / K. Kunihiro, K. Kasahara, Y. Takahashi, Y. Ohno // IEEE Electron Device Letters. 1999. Vol. 20, No 12. P. 608–610.
- [5] Cao, L. Experimental Characterization of Impact Ionization Coefficients for Electrons and Holes in GaN Grown on Bulk GaN Substrates / L. Cao [et al.] // Applied Physics Letters. 2018. Vol. 112. Art. No 262103.
- [6] Ji, D. Experimental Determination of Impact Ionization Coefficients of Electrons and Holes in Gallium Nitride Using Homojunction Structures / D. Ji, B. Ercan, S. Chowdhury // Applied Physics Letters. 2019. Vol. 115. Art. No 073503.
- [7] Maeda, T. Impact Ionization Coefficients and Critical Electric Field in GaN / T. Maeda [et al.] // Journal of Applied Physics. 2021. Vol. 129. Art. No 185702.

AVALANCHE BREAKDOWN IN GALLIUM NITRIDE HIGH ELECTRON MOBILITY TRANSISTORS ENHANCED BY GRAPHENE HEAT-ELIMINATING ELEMENTS

V. Volchek

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,
vlad.volchek@bsuir.by

Abstract: One of the main problems that hinder the expansion of high electron mobility transistors based on gallium nitride is the self-heating effect. The non-uniform distribution of dissipated power and the increase in average temperature lead to the formation of a hot spot near the active area, resulting in device degradation. Among the promising solutions for tackling the self-heating issues is the use of heat-eliminating elements based on two-dimensional materials with high thermal conductivity such as graphene and hexagonal boron nitride. A disadvantage of graphene heat-eliminating elements is their high electrical conductivity, which limits the areas of their possible location. In this work, we show that a small spacing between the gate and graphene layers leads to a premature breakdown due to the avalanche-like generation of charge carriers.

Keywords: avalanche breakdown, Chynoweth model, gallium nitride, graphene, heat-eliminating element, heterostructure field-effect transistor, high electron mobility transistor, impact ionization.