



# ГАЗОФАЗНАЯ ЭПИТАКСИЯ – КЛЮЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СИЛОВЫХ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ НА КАРБИДЕ КРЕМНИЯ

## VAPOUR PHASE EPITAXY AS THE KEY TECHNOLOGY FOR POWER MIS-TRANSISTORS BASED ON SILICON CARBIDE

DOI: 10.22184/1993-8578.2018.11.7-8.488.497

А.В.Афанасьев\*, В.А.Ильин\*, В.В.Лучинин\*, А.И.Михайлов\* / [m.aleksey.spb@gmail.com](mailto:m.aleksey.spb@gmail.com)  
A.V.Afanasiev\*, V.A.Iljin\*, V.V.Luchinin\*, A.I.Mikhailov\*

Рассмотрены особенности применения и возможности газофазной эпитаксии в технологии изготовления силовых вертикальных МДП-транзисторов на основе 4H-SiC при формировании дрейфовой области прибора и оптимизации электрофизических свойств канала транзистора. Карбидокремниевые компоненты силовой электроники обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными кремниевыми. Они характеризуются более высоким напряжением электрического пробоя, низким сопротивлением активной области, высокой рабочей частотой, низкими потерями при переключении, высокими значениями максимальной рабочей температуры и плотности коммутируемой мощности. С технологической точки зрения ключевыми элементами, определившими возможность создания электронной компонентной базы (ЭКБ) силовой электроники на 4H SiC, являются технологии объемного и эпитаксиального роста. Улучшение технологии эпитаксиального роста наряду с улучшением качества подложек, сделало возможным изготовление приборных структур, демонстрирующих преимущества карбида кремния как базового материала силовой электроники по сравнению с другими полупроводниками.

In this paper, we report on possibilities and main features of SiC epitaxial growth in 4H SiC vertical power MOSFET fabrication technology: for the drift layer formation and electrical properties optimization of the transistor channel. Silicon carbide components of power electronics have several advantages in comparison with traditional silicon ones. These components are characterized by higher electrical breakdown voltage, low active area resistance, high operating frequency, low losses at switching, high values of peak operating temperature and switching power density. Technologies of volume and epitaxial growth are, from a technological viewpoint, the main elements which enabled to create an electronic component basis for the 4H SiC-based power electronics. Improvement of the epitaxial growth technology and quality of substrates permit to prepare instrument structures that demonstrate an advantage of silicon carbide as the base material of power electronics compared to other semiconductors.

### ВВЕДЕНИЕ

Востребованность силовой электроники определяется основными тенденциями развития современного общества, одной из которых является

увеличение объема потребления энергоресурсов. Согласно данным международных энергетических агентств [1, 2], потребление электроэнергии в мире за последние 25 лет удвоилось и продолжает

\* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ", 197376 Санкт-Петербург, Россия / Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation.



непрерывно расти. Совершенно очевидно, что увеличение эффективности использования электроэнергии позволит сократить потребление невозобновляемых природных ресурсов и уменьшить антропогенное воздействие на биосферу. Одним из способов увеличения эффективности систем энергообеспечения является снижение электрических потерь при преобразовании и коммутации электроэнергии.

В настоящее время приборы силовой электроники изготавливаются преимущественно из доступного и технологически освоенного полупроводника – кремния. Использование карбида кремния политипа 4H (4H-SiC) в качестве базового материала силовой электроники позволяет существенно увеличить эффективность работы силовых систем. Уникальные электрофизические свойства 4H-SiC (рис.1) определяют возможность создания на его основе силовой, импульсной, высокотемпературной и радиационно-стойкой ЭКБ нового поколения [3–6].

Более высокая напряженность поля лавинного пробоя в 4H-SiC по сравнению с кремнием [7–9] позволяет увеличить уровень легирования дрейфовой области силового прибора и уменьшить ее толщину, а значит, существенно понизить сопротивление по сравнению с кремниевым аналогом и, как следствие, резистивные (статические) потери в нем. Низкое сопротивление активной области позволяет использовать более высокочастотные

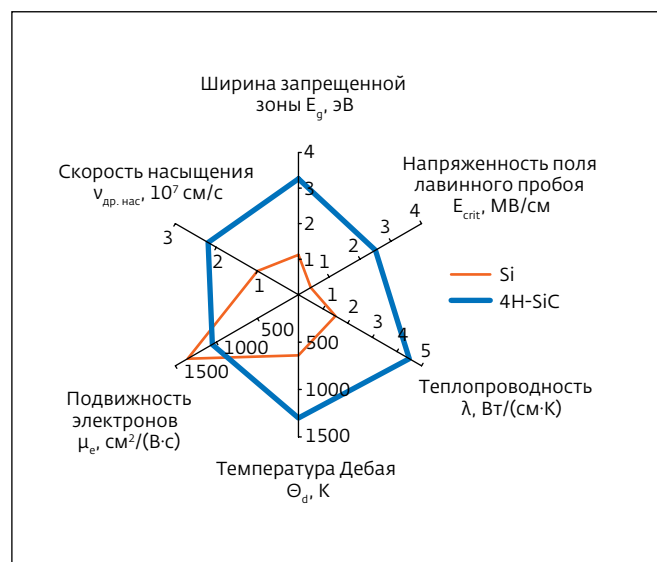


Рис.1. Сравнение основных электрофизических свойств 4H-SiC и Si

Fig.1. Comparison of basic electro-physical properties of 4H-SiC and Si

униполярные приборы на основе 4H-SiC вместо существующих биполярных приборов на кремнии. Это позволяет увеличить рабочую частоту силовых устройств и использовать более миниатюрные пассивные компоненты. Низкие статические и динамические потери в приборах на основе 4H-SiC (в

## INTRODUCTION

The demand for power electronics is determined by the main trends in the modern society development, one of them being an increase in the energy consumption volume. According to the international energy agencies data [1, 2], consumption of the electrical energy in the world for the last 25 years has doubled and continues to grow. Obviously, the higher efficiency of the electrical energy use will reduce consumption of non-renewable natural resources and diminish anthropogenic impact on the biosphere. One of the ways to raise efficiency of the energy supply systems is to reduce electrical losses when converting and switching of electricity.

Nowadays, power electronics devices are mainly manufactured using the most accessible and technologically familiar semiconductor – silicon. Use of polytype silicon carbide 4H (4H-SiC) as the base material for power electronics allows us to significantly enhance efficiency of the power systems. Unique electrophysical properties of 4H-SiC (Fig.1) determine a possibility of creating a new generation power, pulsed, high-temperature and radiation-resistant ECB on its basis [3–6]. A higher avalanche breakdown field strength in 4H-SiC compared to silicon [7–9] allows of increasing of the doping level of the power device drift region and to decrease its thickness, and, therefore, significantly lower resistance

compared to the silicon analog and, as a result, resistive (static) losses in it. Low resistance of the active region allows of using high-frequency unipolar devices based on 4H-SiC instead of the existing bipolar devices on silicon. This permits us to increase an operating frequency of power devices and use smaller passive components. Low static and dynamic losses in the 4H-SiC-based devices (also due to a low concentration of the minority charge carriers), together with high thermal conductivity and maximum operating temperature, make it possible to operate them without forced cooling. The above factors determine superiority of silicon carbide power electronics over silicon and allow to reduce



Рис. 2. Преимущество силовой электроники на 4H-SiC перед кремниевой (на уровне систем)

Fig. 2. Advantages of power 4H-SiC electronics in comparison with Si (system level)

том числе из-за низкой концентрации неосновных носителей заряда) в совокупности с высокой теплопроводностью и максимальной рабочей температурой позволяют отказаться и от их принудительного охлаждения. Вышеперечисленные факторы определяют превосходство карбидкремниевой силовой электроники над кремниевой и дают возможность снизить массу, объем, электрические потери и стоимость всей силовой системы (рис. 2) [10].

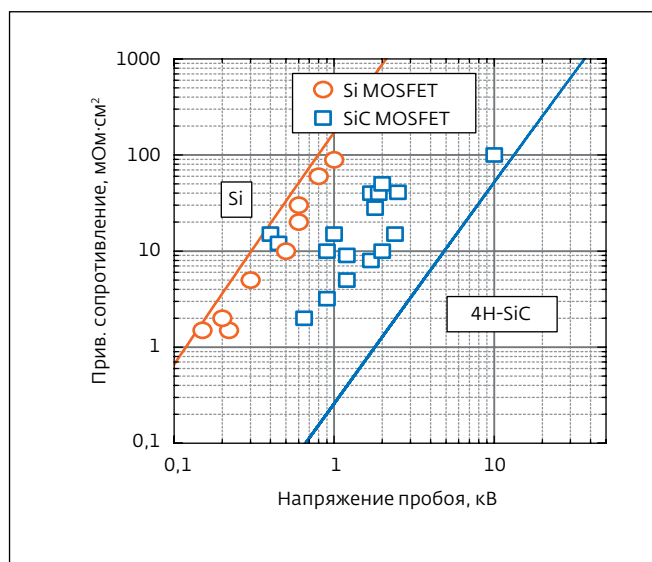


Рис. 3. Уровень развития технологии формирования МДП транзисторов на основе 4H-SiC и кремния

Fig. 3. State of the art of the 4H-SiC and Si-based MIS-transistors production technology

Современный уровень развития технологии изготовления МДП-транзисторов на 4H-SiC можно оценить по рис. 3, на котором показаны параметры МДП-транзисторов на 4H-SiC и кремнии, выпускаемых разными производителями, и теоретические пределы для униполярных приборов на основе этих материалов. Видно, что технология изготовления МДП-транзисторов на кремнии исчерпала себя и благодаря ряду технических

mass, volume, electrical losses and cost of the entire power system (Fig. 2) [10].

Current level of the 4H-SiC MIS-transistors development can be estimated in Fig. 3 where parameters of 4H-SiC and Si-based MIS-transistor produced by various manufacturers and theoretical limits of the unipolar devices are presented. It can be seen that the manufacturing technology of silicon-based MIS-transistors has exhausted itself and, thanks to a number of technical and technological solutions [11], even surpassed its theoretical limit, while the technology of 4H-SiC based MIS-transistors requires further development,

despite a significant progress made in recent decades.

In this paper we present results of the developments achieved in St. Petersburg Electrotechnical University "LETI" in the field of creating MIS-transistors based on 4H-SiC. This work is aimed at studying a possibility of improving the technical and operational parameters of transistors manufactured using the ion implantation and vapour phase epitaxy technology, as compared with those previously developed in [3, 5, 12].

For a long time the development of SiC electronics was hindered by absence of a technology for growing

high-quality large-size SiC crystals. Development of a new method for growing bulk SiC crystals at the Leningrad Electrotechnical Institute (1978) by Yu. M. Tairov and V. F. Tsvetkov on the basis of a modification of the Lely method (the LETI method) [13] made it possible to obtain large-size SiC substrates and marked the beginning of the stage of industrial development of SiC technology [14]. It is difficult to overestimate importance of this development and its impact on the future of all power electronics.

The chemical vapour deposition (CVD) is the main method for growing high-quality 4H-SiC epitaxial



Рис.4. Параметры SiC-CVD-технологии, обеспечивающие требуемые характеристики эпислоев

Fig.4. Parameters of SiC prepared by CVD technology ensure necessary characteristics of epitaxial layers

и технологических решений [11], даже превзошла свой теоретический предел, в то время как технология МДП-транзисторов на основе 4H-SiC требует дальнейшего развития, несмотря на существенный прогресс, достигнутый в последние десятилетия.

В настоящей статье представлены результаты разработок СПбГЭТУ "ЛЭТИ" в области создания МДП-транзисторов на основе 4H-SiC. Целью работы являлось исследование возможности улучшения технических и эксплуатационных параметров транзисторов, изготовленных с применением технологий ионной имплантации и газовой эпитаксии по сравнению с разработанными ранее в [3, 5, 12].

Долгое время отсутствие технологии выращивания качественных кристаллов SiC большого размера сдерживало развитие SiC-электроники. Разработка нового метода выращивания объемных кристаллов SiC в Ленинградском электротехническом институте (1978 г.) Ю.М.Таировым и В.Ф.Цветковым на основе модификации метода Лели (метод ЛЭТИ) [13] позволила получать SiC-подложки большого размера и ознаменовала начало этапа индустриального становления SiC-технологии [14]. Трудно переоценить важность этой разработки и ее влияние на будущее всей силовой электроники.

Основным способом роста высококачественных эпитаксиальных структур 4H-SiC из газовой фазы является метод химического газифазного осаждения (CVD – Chemical Vapor Deposition). Преимуществом CVD-технологии является то, что в газообразном состоянии отношение Si/C можно контролировать в процессе роста эпислоев.

Важнейшей задачей в SiC-CVD-эпитаксии является обеспечение качества эпислоев в части политипной репликации (стабильной воспроизводимости политипа подложки эпислоем), морфологии, уровня легирования и толщины. Данные показатели связаны с технологическими параметрами процесса, которые необходимо контролировать (рис.4).

Эпитаксия 4H-SiC проводится при высоких температурах (1550...1750 °C) на предварительно искусственно отклоненных от базовых кристаллографических плоскостей подложках [15], что делает возможным наследование кристаллической структуры подложки и позволяет избежать включения иных политипов в выращенном эпислое. Легирование SiC-слоев в ходе эпитаксии осуществляется введением в реакционную камеру прекурсоров легирующих примесей

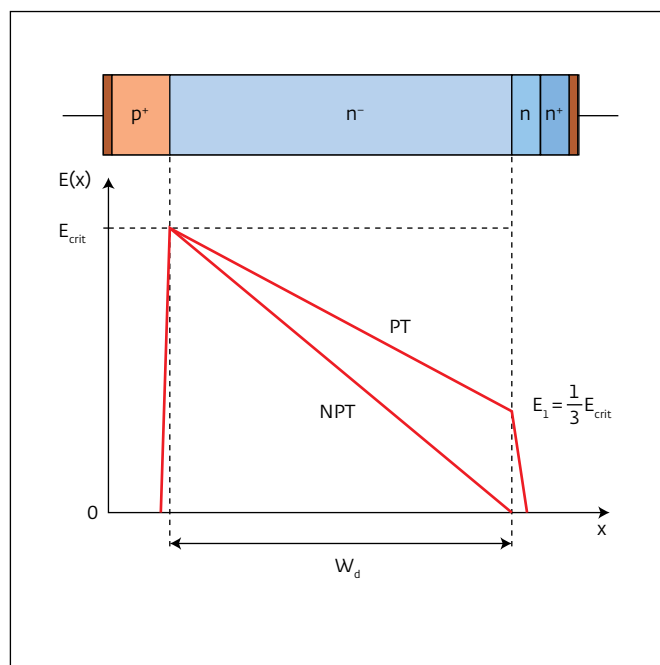


Рис. 5. Напряженность поля в р-п-переходе: NPT-подход; PT-подход

Fig.5. Field gradient into p-n-transition: NPT-approach; PT-approach

(Al для формирования слоя р-типа проводимости и N для формирования слоя n-типа) в широком диапазоне концентраций:  $1 \cdot 10^{14} \dots 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  – для N и  $5 \cdot 10^{14} \dots 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  – для Al.

Поскольку подвижность электронов в 4H-SiC существенно выше подвижности дырок, на практике

создают МДП-транзисторы с n-каналом, который индуцируется в р-области, сформированной методом ионной имплантации. Для этого на высоколегированной подложке n-типа формируют эпислой заданной толщины с определенной концентрацией азота в соответствии с расчетным напряжением пробоя. При этом для уменьшения в эписле количество дефектов, наследуемых из подложки, сначала формируют тонкий буферный n<sup>+</sup>-слой [16].

Толщина дрейфовой области  $W_d$  и концентрация легирующей примеси в ней  $N_d$  рассчитываются исходя из напряжения пробоя  $V_b$  проектируемого МДП-транзистора и напряженности поля лавинного пробоя полупроводника  $E_{crit}$ , которая зависит от концентрации легирующей примеси [17, 18]. Существует два подхода к расчету этих параметров: NPT-подход и PT-подход\*.

При NPT-подходе  $W_d$  и  $N_d$  подбираются таким образом, чтобы при пробое структуры распределение поля имело треугольную форму с максимальным значением напряженности поля на металлургической границе р-п-перехода, равным напряженности поля лавинного пробоя полупроводника (рис.5). При этом площадь треугольника равна напряжению, приложенному к МДП-транзистору. При высоких значениях напряжения пробоя контактной разностью потенциалов можно пренебречь, и в случае резкого

\* NPT (Non Punch-Through) – без прокола дрейфовой области; PT (Punch-Through) – с проколом дрейфовой области.

structures from the gas phase. The advantage of CVD technology is that, in the gaseous state, the Si/C ratio can be controlled during growth of epitaxial layers.

The most important task in SiC CVD epitaxy is to ensure high quality of epitaxial layers in terms of polytype replication (stable reproducibility of the polytype of the substrate by epitaxial layer), morphology, doping level and thickness. These indicators are associated with the technological parameters of the process, which must be controlled (Fig.4). Epitaxy of 4H-SiC is carried out at high temperatures (1550... 1750 °C) on substrates

artificially deviated from the base crystallographic planes [15], which makes it possible to inherit the crystal structure of the substrate and avoid the inclusion of other polytypes in the grown epitaxial layer. During epitaxy, the SiC layers are doped by introducing doping impurities into the reaction chamber (Al to form a p-type conductivity layer and N to form an n-type layer) in a wide concentration range:  $1 \cdot 10^{14} \dots 2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  – for N and  $5 \cdot 10^{14} \dots 5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  – for Al. Since the mobility of electrons in 4H-SiC is significantly higher than the mobility of holes, in practice they create MIS-transistors with an n-channel,

which is induced in the p-region formed by ion implantation.

To this end, a high-alloyed n-type substrate of a given thickness is formed by the epitaxial layer with a certain nitrogen concentration in accordance with the calculated breakdown voltage. At the same time, in order to reduce the number of defects inherited from the substrate to the epitaxial layer, a thin buffer n<sup>+</sup>-layer is formed first [16].

Thickness of the drift region  $W_d$  and concentration of the dopant  $N_d$  in it are calculated based on the breakdown voltage  $V_b$  of the designed MIS-transistor and the field strength of the avalanche breakdown of the



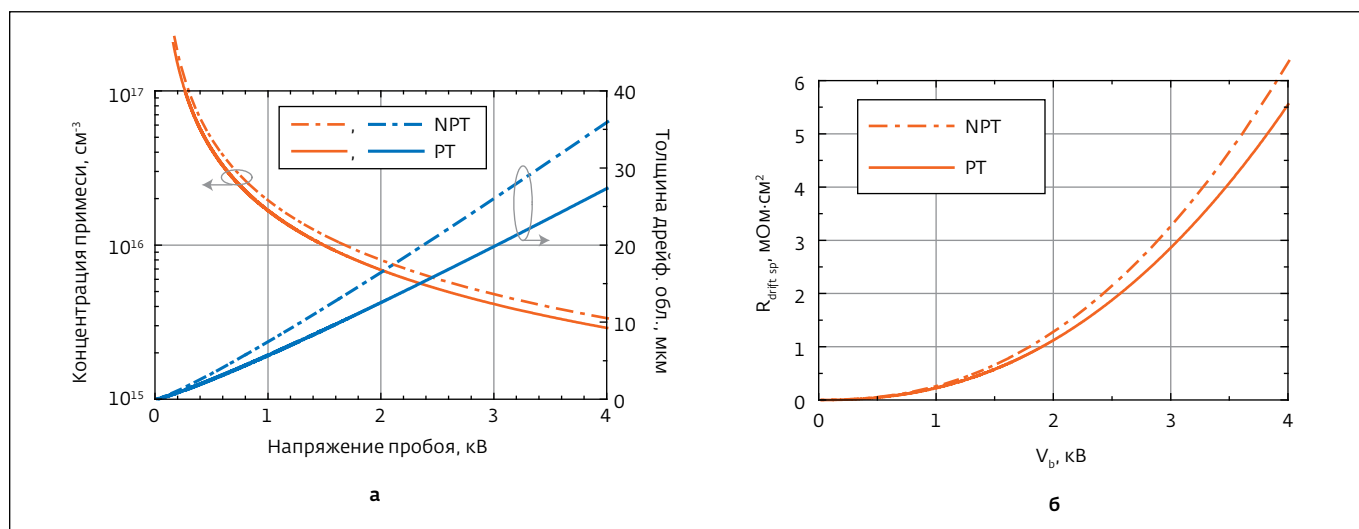


Рис.6. Расчет параметров дрейфовой области униполярных приборов в рамках NPT-подхода и PT-подхода: а – толщина дрейфовой области и концентрация примеси в ней; б – сопротивление

Fig.6. Calculation of the drift area parameters of unipolar devices according to NPT-approach and PT-approach: а – thickness of drift area and concentration of impurities in it; б – resistance

несимметричного р-п-перехода расчеты проводятся в соответствии со следующими выражениями [9, 17, 18] (рис.6, а):

$$N_d = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 E_{crit}^2}{2qV_b} \quad (1)$$

и

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_b}{qN_d}} \quad (2)$$

Приведенное сопротивление дрейфовой области можно найти из уравнения (рис.6, б):

$$R_{drift\ sp} = \frac{W_d}{q\mu_n N_d} = \frac{4V_b^2}{\epsilon\epsilon_0\mu_n E_{crit}^3}, \quad (3)$$

где  $\mu_n = \mu_n(N_d)$  – подвижность электронов в дрейфовой области.

Минимизация приведенного сопротивления транзистора является важной задачей, поскольку

$E_{crit}$  semiconductor, which depends on the dopant concentration [17, 18]. There exist two approaches to calculating these parameters: the NPT-approach and the PT-approach.

According to the NPT-approach,  $W_d$  and  $N_d$  are chosen so that at breakdown of the structure the field distribution has a triangular shape, the maximum field strength in the metallurgical p-n-junction boundary being equal to the semiconductor avalanche breakdown field (Fig.5).

The triangle area is equal to the voltage applied to the MOS-transistor. At high breakdown voltages, the contact potential difference

is negligible, and in case of an abrupt asymmetrical p-n-junction, calculations are performed in accordance with the following expressions [9, 17, 18] (Fig.6, a):

$$N_d = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 E_{crit}^2}{2qV_b} \quad (1)$$

and

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_b}{qN_d}} \quad (2)$$

The reduced resistance of the drift area can be found from the equation (Fig.6, b):

$$R_{drift\ sp} = \frac{W_d}{q\mu_n N_d} = \frac{4V_b^2}{\epsilon\epsilon_0\mu_n E_{crit}^3}, \quad (3)$$

where  $\mu_n = \mu_n(N_d)$  – a mobility of electrons in a drift area.

Minimization of the reduced resistance of a transistor is an important task, because low resistance decreases the static losses in the device or reduces its area, which leads to cost reduction and often gives a decisive competitive advantage.

The PT-approach allows of reducing the drift area resistance at the same breakdown voltage (or of increasing the breakdown voltage at the same resistance). In this case, the parameters of the drift area are selected in such a way (see Fig.6, a) so that the field distribution has a



низкое сопротивление позволяет снизить статические потери в приборе или уменьшить его площадь, что приводит к снижению стоимости и зачастую дает определяющее конкурентное преимущество.

РТ-подход позволяет снизить сопротивление дрейфовой области при том же напряжении пробоя (или увеличить напряжение пробоя при том же сопротивлении). В этом случае параметры дрейфовой области подбираются таким образом (см. рис.6а), чтобы распределение поля имело трапециевидную форму (см. рис.5), причем напряженность поля  $E_1$  в р-п-переходе "дрейфовая область – подложка" должна составлять 1/3 от напряженности поля на металлургической границе р-п-перехода, равной  $E_{crit}$ . Данное условие соответствует минимуму функции  $R_{drift\ sp}(s)$ , где  $s = E_1/E_{crit}$  [18]:

$$E_1 = sE_{crit} = E_{crit} - \frac{qN_d W_d}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (4)$$

$$V_b = \frac{1}{2}W(E_{crit} + sE_{crit}) \quad (5)$$

откуда

$$N_d = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 E_{crit}^2}{2qV_b}(1-s^2) \quad (6)$$

$$и \quad R_{drift\ sp}(s) = \frac{W_d}{q\mu_n N_d} = \frac{4V_b^2}{\epsilon_s \epsilon_0 \mu_n E_{crit}^3 (1+s)(1-s^2)} \quad (7)$$

Таким образом, при заданном напряжении пробоя достигается минимальное сопротивление

дрейфовой области, которое на ~15% ниже, чем сопротивление дрейфовой области, спроектированной в рамках NPT-подхода (см. рис.6б).

Параметры дрейфовой области с расчетным напряжением пробоя 1200 В:

$$N_d \sim 1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}, W_d \sim 9,2 \text{ мкм}, R_{drift\ sp} \sim 0,39 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2 \text{ (NPT-подход);}$$

$$N_d \sim 1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}, W_d \sim 7 \text{ мкм}, R_{drift\ sp} \sim 0,34 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2 \text{ (РТ-подход).}$$

На практике необходимо предусмотреть некоторый запас по напряжению пробоя из-за наличия дефектов в кристаллической структуре 4H-SiC, возможных отклонений толщины дрейфовой области и концентрации примеси в ней от расчетных значений. Дрейфовая область изготовленного МДП-транзистора была спроектирована в рамках РТ-подхода на напряжение пробоя ~2000 В с  $R_{drift\ sp} \sim 1,1 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$  ( $N_d \sim 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $W_d \sim 13 \text{ мкм}$ ). Дрейфовая область, спроектированная на то же напряжение в рамках NPT-подхода, составляла бы величину  $R_{drift\ sp} \sim 1,3 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2$ .

Кроме формирования дрейфовой области, технология эпитаксиального роста 4H-SiC может быть использована для заглубления канала транзистора. По результатам моделирования в программном пакете Medici TCAD были сформированы два эпислоя: нижний слой п-типа толщиной 50 нм с уровнем легирования  $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и верхний слой р-типа толщиной 50 нм

trapezoidal shape (see Fig.5), and the field strength  $E_1$  in the p-n-junction "drift area – substrate" should be 1/3 from the field strength at the metallurgical boundary of the p-n-junction equal to  $E_{crit}$ . This condition corresponds to the minimum of the function  $R_{drift\ sp}(s)$ , where  $s = E_1/E_{crit}$  [18]:

$$E_1 = sE_{crit} = E_{crit} - \frac{qN_d W_d}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (4)$$

$$V_b = \frac{1}{2}W(E_{crit} + sE_{crit}) \quad (5)$$

wherefrom

$$N_d = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 E_{crit}^2}{2qV_b}(1-s^2) \quad (6)$$

and

$$R_{drift\ sp}(s) = \frac{W_d}{q\mu_n N_d} = \frac{4V_b^2}{\epsilon_s \epsilon_0 \mu_n E_{crit}^3 (1+s)(1-s^2)} \quad (7)$$

Thus, at a given breakdown voltage, the minimum resistance of the drift area is achieved, which is ~ 15% lower than the resistance of the drift region designed in the framework of the NPT-approach (see Fig.6b).

The parameters of the drift region with a calculated breakdown voltage of 1,200 V:

$$N_d \sim 1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}, W_d \sim 9,2 \text{ мкм}, R_{drift\ sp} \sim 0,39 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2 \text{ (NPT-approach);}$$

$$N_d \sim 1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}, W_d \sim 7 \text{ мкм}, R_{drift\ sp} \sim 0,34 \text{ мОм} \cdot \text{см}^2 \text{ (PT-approach).}$$

In practice, it is necessary to provide for some margin of the breakdown voltage due to presence of defects in the 4H-SiC crystal structure, possible deviations of thickness of the drift area and impurity concentration in it from the calculated values.

The drift area of the manufactured MIS-transistor was designed as part of the PT-approach for a breakdown voltage of ~ 2000 V

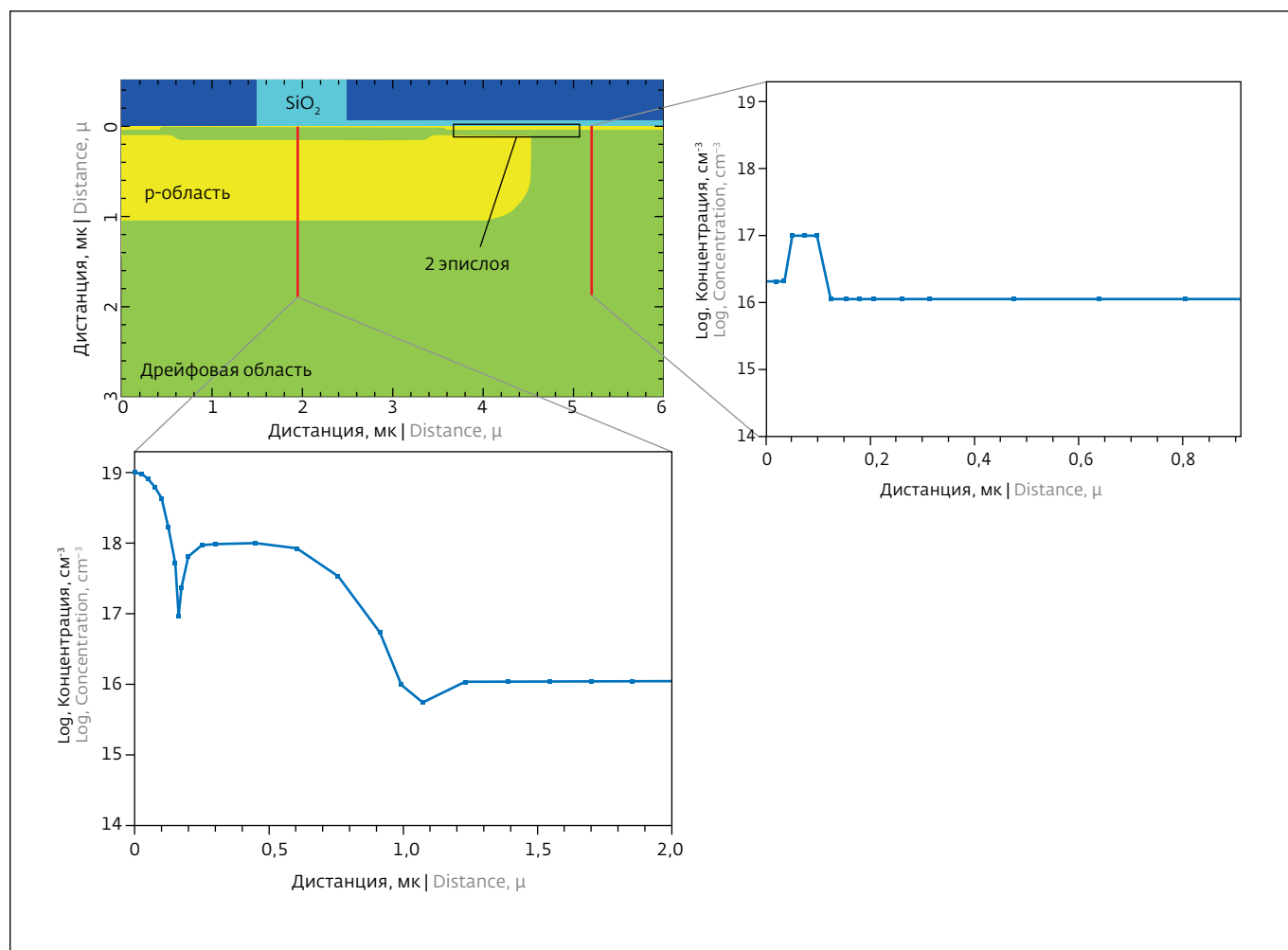


Рис.7. Структура активной области МДП-транзистора с заглубленным каналом

Fig.7. Structure of the active area in MIS-transistor with buried channel

with  $R_{\text{drift sp}} \sim 1.1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$  ( $N_d \sim 7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,  $W_d \sim 13 \text{ }\mu\text{m}$ ). The drift region, designed for the same voltage within the NPT-approach, would be  $R_{\text{drift sp}} \sim 1.3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ . In addition to the formation of the drift area, epitaxial growth technology of 4H-SiC can be used to bury the transistor channel. According to the simulation results, two epitaxial layers were formed in the "Medici TCAD" software package: an n-type lower layer 50 nm thick with a doping level of  $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  and a p-type upper layer 50 nm thick with a doping level of  $2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

The structure of the active area of the power MIS-transistor with a

buried channel is shown in Fig.7. The insets show the concentration profiles of the dopant in the corresponding cross sections of the structure. In accordance with the simulation results, an n-type epitaxial layer in the channel area must be completely depleted due to the upper p-type epitaxial layer and the high-alloyed p-region, and such a MIS-transistor must be locked at zero gate voltage.

Formation of the buried channel by growing epitaxial layers on a high-doped p-region allows us to significantly increase mobility of the charge carriers in the transistor channel by reducing the

Coulomb scattering of free charge carriers on charged traps, since the electron current flows further from the 4H-SiC/SiO<sub>2</sub>. The higher mobility of the charge carriers is also due to the fact that the SiC layer doped during epitaxy has no defects resulting from the bombardment of the SiC surface with high-energy Al ions during formation of the high-alloyed p-region by ion implantation.

The power vertical MIS-transistors with a buried channel (BC) and without (N<sub>2</sub>O) were formed from an array of hexagonal cells and floating guard rings located around the device perimeter, in



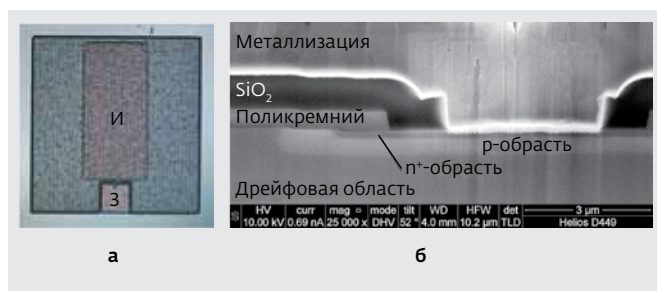


Рис.8. Изготовленный силовой МДП-транзистор на 4H-SiC:  
а – фотография; б – РЭМ-изображение ячейки транзистора  
(образец подготовлен при помощи фокусируемого ионного пучка)  
Fig.8. Fabricated power MIS-transistor based on 4H-SiC:  
а – image; б – SEM-image of transistor cell (sample prepared with  
focused ion beam)

с уровнем легирования  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Структура активной области силового МДП-транзистора с заглубленным каналом изображена на рис.7. На вставках представлены профили концентрации легирующей примеси в соответствующих сечениях структуры. Согласно результатам моделирования, эпислой n-типа в области канала должен быть полностью обеднен за счет верхнего эпислоя p-типа и высоколегированной p-области, а такой МДП-транзистор должен быть заперт при нулевом напряжении на затворе.

Формирование заглубленного канала путем выраживания эпислоев на высоколегированной

p-области позволяет существенно увеличить подвижность носителей заряда в канале транзистора за счет снижения кулоновского рассеяния свободных носителей заряда на заряженных ловушках, поскольку электронный ток протекает дальше от границы раздела 4H-SiC/SiO<sub>2</sub>. Увеличение подвижности носителей заряда также связано с тем, что легированный в ходе эпитаксии слой SiC не имеет дефектов, образовавшихся вследствие бомбардировки поверхности SiC высокоэнергетическими ионами Al при формировании высоколегированной p-области методом ионной имплантации.

Силовые вертикальные МДП-транзисторы с заглубленным каналом (BC) и без (N<sub>2</sub>O) были сформированы из массива гексагональных ячеек и плавающих охранных колец, расположенных по периметру прибора, в соответствии с разработанной ранее топологией [12]. Ячейка транзистора имела ширину 13 мкм при длине канала 1 мкм и ширине JFET-области 3 мкм. Изображения одного из изготовленных силовых МДП-транзисторов приведены на рис.8. Подзатворный диэлектрик был сформирован методом термического окисления в атмосфере N<sub>2</sub>O.

Изготовленные транзисторные чипы, состоящие из ~37 000 ячеек и имеющие площадь активной области ~5,4 мм<sup>2</sup>, были установлены в корпус KT-105-1 с последующей разваркой выводов. Выходные характеристики корпусированных приборов приведены на рис.9. Приведенное

accordance with the previously developed topology [12]. The transistor cell had a width of 13 μm at a channel length of 1 μm and a JFET width of 3 μm. Images of one of the manufactured power MIS-transistors are shown in Fig.8. The gate dielectric was formed by thermal oxidation in N<sub>2</sub>O atmosphere.

The manufactured transistor chips, consisting of ~37,000 cells and having an active area of ~5.4 mm<sup>2</sup>, were installed into a KT-105-1 case with subsequent unwinding of the leads.

Output characteristics of the enclosed devices are shown in

Fig.9. The reduced resistance of  $R_{ds(on)sp}$  transistors equaled 23.8 and 7.3 mΩ·cm<sup>2</sup> for N<sub>2</sub>O and BC transistors, respectively. The BC transistor is capable of switching a current up to 83 A in a pulsed mode (with  $V_{gs} = 20 \text{ V}$  and  $V_{ds} = 20 \text{ V}$ ), which corresponds to a current density of about 1,500 A/cm<sup>2</sup> and is associated with its low resistance in the "switched on" state.

## CONCLUSIONS

Thus, vapour phase epitaxy of silicon carbide processes make an integral component of the technological route when

manufacturing power MIS-transistors on 4H-SiC at a stage of creating the basic epitaxial n-n<sup>+</sup> structure that provides for the required breakdown voltage and optimum resistance of the drift region. The channel burying technology, implemented by the CVD-growth method of 4H-SiC epitaxial layers in the p<sup>+</sup> region, can significantly reduce resistance of the transistor in the "switched on" state. ■

The research was made with the financial support of The Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. 03.G25.31.0243).

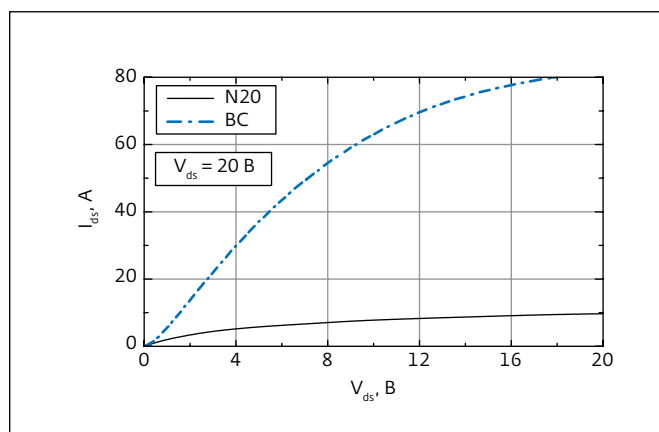


Рис.9. Выходные характеристики корпусированных силовых МДП-транзисторов

Fig.9. Output characteristics of the packaged power MIS-transistors

сопротивление транзисторов  $R_{ds(on) sp}$  составило 23,8 и 7,3 мОм·см<sup>2</sup> для транзисторов N2O и BC соответственно. Транзистор BC способен коммутировать ток до 83 А в импульсном режиме (при  $V_{gs} = 20$  В и  $V_{ds} = 20$  В), что соответствует плотности тока около 1500 А/см<sup>2</sup> и связано с его низким сопротивлением во включенном состоянии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, процессы газофазной эпитаксии карбида кремния являются неотъемлемой составляющей технологического маршрута изготовления силовых МДП-транзисторов на 4H-SiC при создании базовой эпитаксиальной  $n$ - $n^+$ -структуры, обеспечивающей требуемое напряжение пробоя и оптимальное сопротивление дрейфовой области. Технология заглибленного канала, реализуемая методом CVD-роста 4H-SiC эпислоев на  $p^+$ -области, позволяет существенно снизить сопротивление транзистора во включенном состоянии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект № 03.G25.31.0243.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Enerdata. World energy statistics [Электронный ресурс]. URL: <http://www.enerdata.net>.
2. Международное энергетическое агенство [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iea.org>.
3. Лучинин В.В. Технологии превосходства. Карбид кремния. Научно-технологический статус ЛЭТИ // Нано-микросистемная техника. 2016. Т.18. Вып. 5. С. 259–271.
4. Лучинин В.В. Отечественная экстремальная ЭКБ: карбидокремниевая индустрия СПбГЭТУ "ЛЭТИ" // Наноиндустрия. 2016. Т. 65. Вып. 3. С. 78–89.
5. Лучинин В.В. Отечественная экстремальная ЭКБ: карбидокремниевая индустрия СПбГЭТУ "ЛЭТИ" // Наноиндустрия. 2016. Т. 66. Вып. 4. С. 40–52.
6. Афанасьев А.В., Ильин В.А., Казарин И.Г., Петров А.А. Исследования термической стабильности и радиационной стойкости диодов Шоттки на основе карбида кремния // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 5. С. 78–81.
7. Ionization rates and critical fields in 4H silicon carbide / Konstantinov A.O. et al. // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71(1). P. 90–92.
8. Chynoweth A.G. Ionization rates for electrons and holes in silicon // Phys. Rev. 1958. Vol. 109(5). P. 1537–1540.
9. Sze S.M., Ng K.K. Physics of semiconductor devices, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 832 p.
10. Cree [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cree.com>.
11. Ye H., Haldar P. Optimization of the porous-silicon-based superjunction power MOSFET // IEEE Trans. Electron Devices. 2008. Vol. 55(8). P. 2246–2251.
12. Афанасьев А.В., Ильин В.А., Лучинин В.В., Михайлов А.И., Решанов С.А., Schoner A. Отечественная карбидокремниевая электронная компонентная база – силовой SiC МДП-транзистор // Нано-микросистемная техника. 2016. Т.18. Вып. 5. С. 308–315.
13. Tairov Y.M., Tsvetkov V.F. Investigation of growth processes of ingots of silicon carbide single crystals // J. Cryst. Growth. 1978. Vol. 43(2). P. 209–212.
14. Лучинин В., Таиров Ю. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету // Современная Электроника. 2009. Т. 7. С. 12–15.
15. Matsunami H., Kimoto T. Step-controlled epitaxial growth of SiC. High quality homoepitaxy // Mater. Sci. Eng. R Reports. 1997. Vol. 20(3). P. 125–166.
16. La Via F., Camarda M., La Magna A. Mechanisms of growth and defect properties of epitaxial SiC // Appl. Phys. Rev. 2014. Vol. 1(3). P. 31301.
17. Kimoto T., Cooper J.A. Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices and applications. Singapore: John Wiley & Sons, Inc., 2014. 400 p.
18. Baliga B.J. Fundamentals of power semiconductor devices. Boston, MA: Springer US, 2008. 1069 p.