

УДК 621.382

А. В. Афанасьев, В. А. Голубков, В. А. Ильин, В. В. Лучинин,
А. А. Рябко, К. А. Сергушичев, В. В. Трушлякова
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

С. А. Решанов
Компания «Ascatron AB» (Швеция)

Характеризация функциональных областей карбидкремниевых эпитаксиальных и приборных структур методом РЭМ в режиме контраста легирования

Отработаны режимы получения контраста легирования в растровом электронном микроскопе для карбидкремниевых эпитаксиальных и ионноимплантированных структур, позволяющие характеризовать функциональные 4H-SiC области в части типа проводимости, уровней легирования и геометрических размеров. Показано влияние энергии первичного пучка электронов на контраст. Установлено, что максимальный контраст в режиме регистрации вторичных электронов наблюдается при работе РЭМ в низковольтном режиме при энергиях первичных электронов 2–6 кэВ. Проведены исследования топологии анизотипных областей 4H-SiC JBS-диода и послойный анализ высоковольтного мезаэпитаксиального 4H-SiC $p-i-n$ -диода. Приведено расположение внутренних областей структуры диодов, их толщины и тип проводимости. Оценены толщины функциональных слоев исследуемых структур. Показано, что разработанная методика позволяет идентифицировать в приборных структурах 4H-SiC функциональные области различного типа проводимости, с приемлемой точностью измерять их толщины, а также качественно оценивать их уровни легирования. Выдвинуто предположение о возможности количественной оценки примесей в функциональном слое.

Растровая электронная микроскопия, контраст легирования, карбид кремния, эпитаксиальная структура, $p-i-n$ -диод, JBS-диод

Уникальная совокупность электрофизических свойств карбида кремния политипной модификации 4H (4H-SiC) позволяет создавать на его основе приборы силовой электроники с характеристиками, существенно превосходящими кремниевые аналоги. К преимуществам SiC-компонентов силовой электроники на 4H-SiC по сравнению с кремниевой относятся:

- меньшее сопротивление активной области приборной структуры;
- меньшие потери при переключении;
- большая плотность коммутируемой мощности;
- более высокие максимальная рабочая температура и рабочая частота [1].

Данные преимущества позволяют обеспечить экстремальные режимы эксплуатации силовых электронных систем при снижении их массогабаритных параметров и стоимости за счет увеличения их рабочей частоты, использования пассив-

ных компонентов меньшего размера и отказа от принудительного охлаждения электронных компонентов [2]. Поэтому развитие карбидкремниевой электронной компонентной базы (ЭКБ) для силовой и импульсной электроники обуславливает применение новых эффективных методов анализа эпитаксиальных и приборных структур.

В настоящее время на рынке силовой SiC-ЭКБ доминируют униполярные приборы – интегрированные диоды Шотки/ $p-n$ -диоды (JBS – Junction Barrier Schottky) и полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET – metal-oxide-semiconductor field-effect transistor). Биполярные SiC-приборы – IGBT (Insulated-gate bipolar transistor) транзисторы, $p-i-n$ -диоды и т. п. – ввиду дороговизны их изготовления, связанной с особенностями технологии получения бездефектных эпитаксиальных $p-n$ -слоев, обычно представлены в сверхвысоковольтном приборном сегменте (напряжения более 5 кВ) [3], [4]. Выше-

упомянутые приборы в большинстве случаев имеют вертикальную структуру с чередующимися функциональными SiC-эпитаксиальными слоями и локальными ионноимплантированными областями n - или p -типов проводимости. Контроль параметров таких слоев, безусловно, является важной технической задачей как на этапе макетирования SiC-приборов, так и при межоперационном контроле непосредственно на производственной стадии. Одним из наиболее информативных методов исследования функциональных SiC-слоев может быть растровая электронная микроскопия в режиме регистрации концентрационного контраста.

Эффект зависимости контраста изображения в растровом электронном микроскопе (РЭМ) во вторичных электронах от уровня легирования и типа примеси – так называемый концентрационный контраст, или контраст легирования, был выявлен в эру интенсивного развития электронной микроскопии. О таком контрасте сообщалось еще в 1967 г. в работе по исследованию планарных транзисторов [5]. Однако в связи с низким уровнем контраста изображения и малой зависимостью контраста от изменения уровня легирования этот метод контроля в качестве аналитического метода широкого распространения не получил. Все эти особенности были связаны с конструкцией и системой регистрации вторичных электронов. Современные детекторы вторичных электронов создают контраст между областями одного типа проводимости на уровне от 10 %, а между p - и n -областями – на уровне 20 % и более, что вполне достаточно для надежного анализа данных и измерения ширины легированных областей.

Целью настоящей статьи являлась отработка режимов получения контраста легирования в РЭМ для образцов карбидкремниевых анизотипных эпитаксиальных структур, а также непосредственное исследование 4H-SiC JBS- и p - n -диодов, изготовленных в СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Методика эксперимента. Эффект контраста легирования заключается в том, что при исследовании полупроводниковых структур с разными типами проводимости методом растровой электронной микроскопии в режиме вторичных электронов области образца с проводимостью n -типа выглядят темнее областей с проводимостью p -типа. Иными словами, интенсивность вторичной электронной эмиссии из областей p -типа выше, чем из областей n -типа. В качестве примера на

рис. 1 приведено изображение фрагмента поверхности JBS-диодной структуры на основе 4H-SiC, в которой методом ионной имплантации Al в эпитаксиальный n -слой созданы области с дырочным типом проводимости. РЭМ-изображение (режим вторичных электронов) и сигнал с ВКУ, зарегистрированный по отмеченной линии раstra, представленные на рис. 1 и на последующих рисунках, были получены с использованием электронного микроскопа Quanta Inspect и комплекса Helios Nanolab D449, размещенных в ИЦ ЦМИД СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

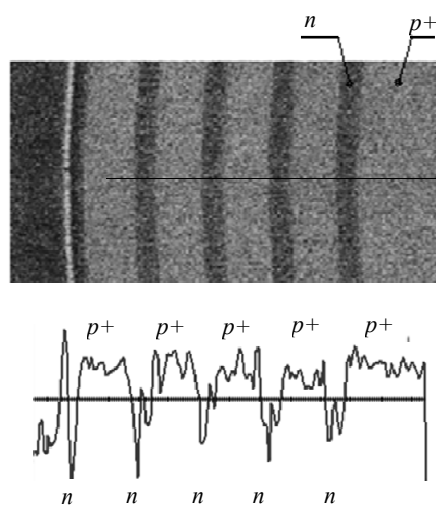


Рис. 1

При изменении ускоряющего напряжения первичных электронов (при прочих постоянных условиях измерений) можно подобрать условия, наиболее подходящие для исследования карбидкремниевых структур в режиме контраста легирования, а также проследить за ходом зависимости уровня контраста от ускоряющего напряжения. Для количественной характеристики уровня эмиссии вторичных электронов регистрировалось изменение тока детектора по отмеченной на рисунке линии сканирования в зависимости от ускоряющего напряжения первичных электронов (рис. 2, а–в). На рис. 2, а–в приведены изображения карбидкремниевой структуры, полученные при ускоряющем напряжении первичных электронов 500 В, 2 и 20 кВ, соответственно.

При обработке результатов эксперимента за уровень контрастности принималась амплитуда сигнала, измеренная в относительных единицах. Как следует из данных, приведенных на рис. 2, г, максимальный контраст наблюдается при работе в низковольтном режиме при энергиях первичных электронов 2...6 кэВ. С увеличением ускоряюще-

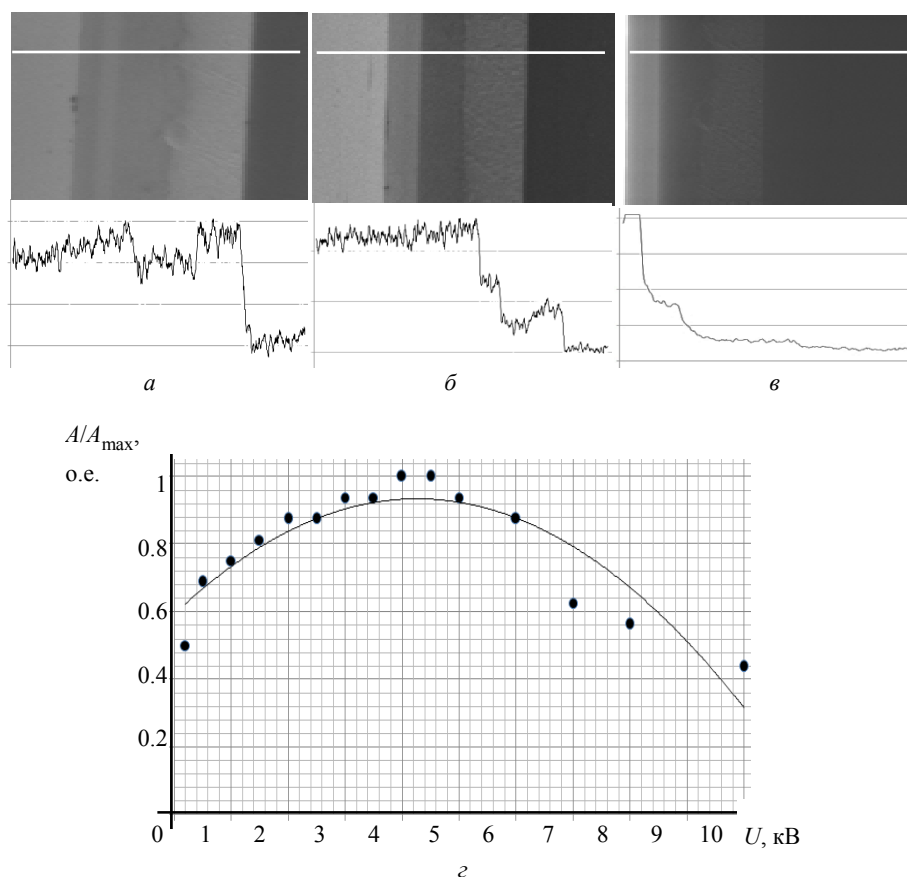


Рис. 2

го напряжения контраст становится меньше. Полученные зависимости можно объяснить следующим образом. При увеличении ускоряющего напряжения (энергии первичных электронов) увеличивается размер зоны взаимодействия в образце; как следствие, увеличивается число генерируемых обратнорассеянных электронов. В результате в суммарном сигнале, регистрируемом детекторной системой микроскопа, уменьшается доля истинно вторичных электронов, отвечающих за формирование контраста легирования.

Таким образом, контраст, возникающий за счет легирования, формируется исключительно низкоэнергетичными вторичными электронами. Малая концентрация легирующей примеси почти не изменяет средний атомный номер мишени, из-за чего композиционный контраст, наблюдаемый в отраженных электронах, отсутствует. Т. е. легирование материала оказывает влияние на интенсивность эмиссии истинно вторичных электронов. Данный факт следует учитывать при рассмотрении механизма формирования контраста легирования и проводить дальнейшие исследования, регистрируя сигнал вторичных электронов.

Результаты и их обсуждение. Наблюдаемый контраст в РЭМ, возникающий за счет эффекта

легирования, зависит от ряда параметров и характеристик образцов:

- свойств образцов: тип проводимости полупроводника, ширина запрещенной зоны, концентрация легирующих примесей и энергия их ионизации;
- состояния исследуемой поверхности: наличие поверхностных состояний, естественных диэлектрических слоев (оксидов), загрязнений;
- экспериментальных условий: рабочее расстояние РЭМ, уровень вакуума, тип детектора, значения ускоряющего напряжения и тока пучка первичных электронов и др.

В большинстве работ по изучению механизма формирования контраста легирования авторы, как правило, интерпретируют результаты экспериментов на основе моделей встроенного поверхностного электрического поля, влияния указанных параметров и характеристик на глубину выхода вторичных электронов и высоту поверхностного потенциального барьера [6]–[8].

Исследования топологии активной и периферийной (охранной) областей 4H-SiC JBS-диода (1700 В / 20 А), изготовленного в СПбГЭТУ «ЛЭТИ», методом контраста легирования в РЭМ проводилось при ускоряющих напряжениях 3 кВ.

На рис. 3, *а* представлена фотография диодного чипа размером 3.5×3.5 мм. Внешняя металлизация диода выполнена из алюминия, периферийная область пассивирована полиимидом. После удаления металлизации и защитно-изолирующих покрытий был сделан скол кристалла по линии А-А (рис. 3, *б*). Как видно на сколе (рис. 3, *в*), вблизи поверхности кристалла присутствуют «захороненные» p^+ -ионноимплантированные эмиттерные слои. Также на рис. 3, *в* наблюдаются предназначенные для обеспечения контакта с металлизацией открытые p^+ -области, сетка которых хорошо видна на рис. 3, *б* за счет морфологического контраста.

Для определения топологии p^+ -ионноимплантированных областей диода было проведено прецизионное травление методом РИПТ на глубину 1 мкм. На рис. 4, *а* представлено РЭМ-изображение области кристалла 4H-SiC JBS-диода после операции реактивного ионно-плазменного травления. Эта область соответствует области на рис. 3, *б*. На рис. 4, *б* приведено изображение активной области диода (JBS), область 1 на рис. 4, *а*, а на рис. 4, *в* – периферийная область (охранные кольца), область 2 на рис. 4, *а*.

На изображениях отчетливо различимы области разных типов проводимости: более светлые

участки соответствуют областям p -типа, темные – n -областям. Необходимо отметить, что в данном случае контраст на изображении во вторичных электронах формируется исключительно за счет эффекта разницы концентрации, поскольку легирующие примеси не дают композиционного контраста, и поверхность не содержит каких-либо морфологических особенностей.

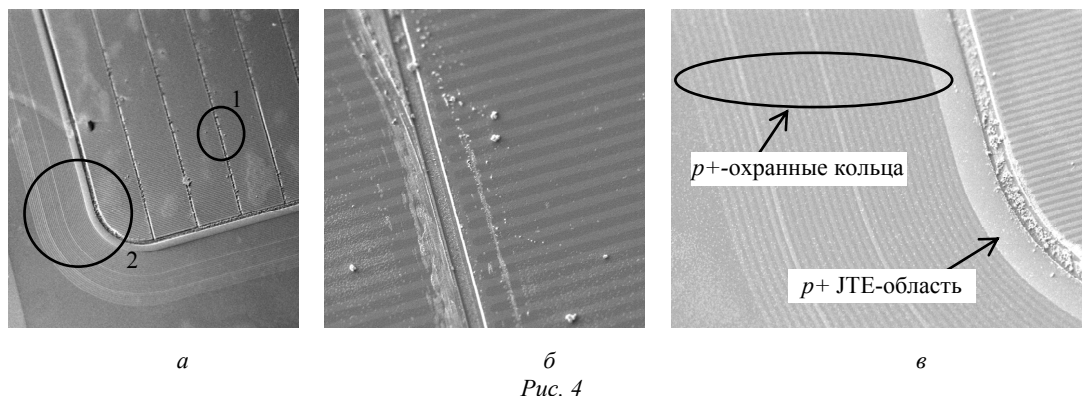
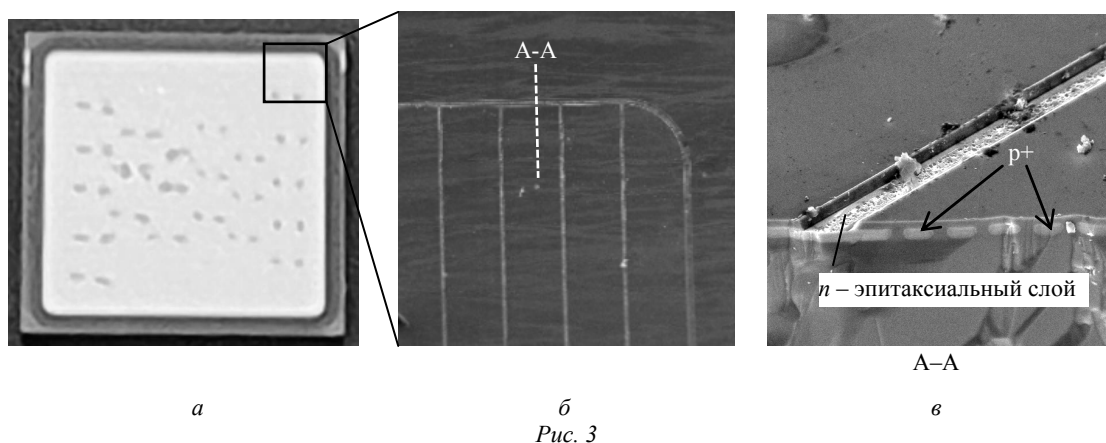
На рис. 5, *в–е* приведены изображения во вторичных электронах плоскости скола карбидкремниевой приборной структуры – высоковольтного мезаэпитаксиального 4H-SiC p - i - n -диода [9] (рис. 5, *а*). Этот диод изготовлен с использованием эпитаксиальной структуры типа n^+ -подложка – n^+ - p - p^+ (рис. 5, *б*) со следующими технологическими параметрами слоев:

n^+ -подложка: толщина 350 мкм, удельное сопротивление $0.012 \dots 0.025 \text{ Ом} \cdot \text{см}$;

n^+ -буферный слой: толщина 2 мкм, $N_d - N_a = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$;

p -слой: толщина 18 мкм, $N_d - N_a = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$;

p^+ -эмиттер (общая толщина 5 мкм, уровень легирования возрастает от p -слоя к поверхности: 2 мкм, $N_d - N_a = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 2.5 мкм, $N_d - N_a = 10^{19} \text{ см}^{-3}$; 0.5 мкм, $N_d - N_a = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$).



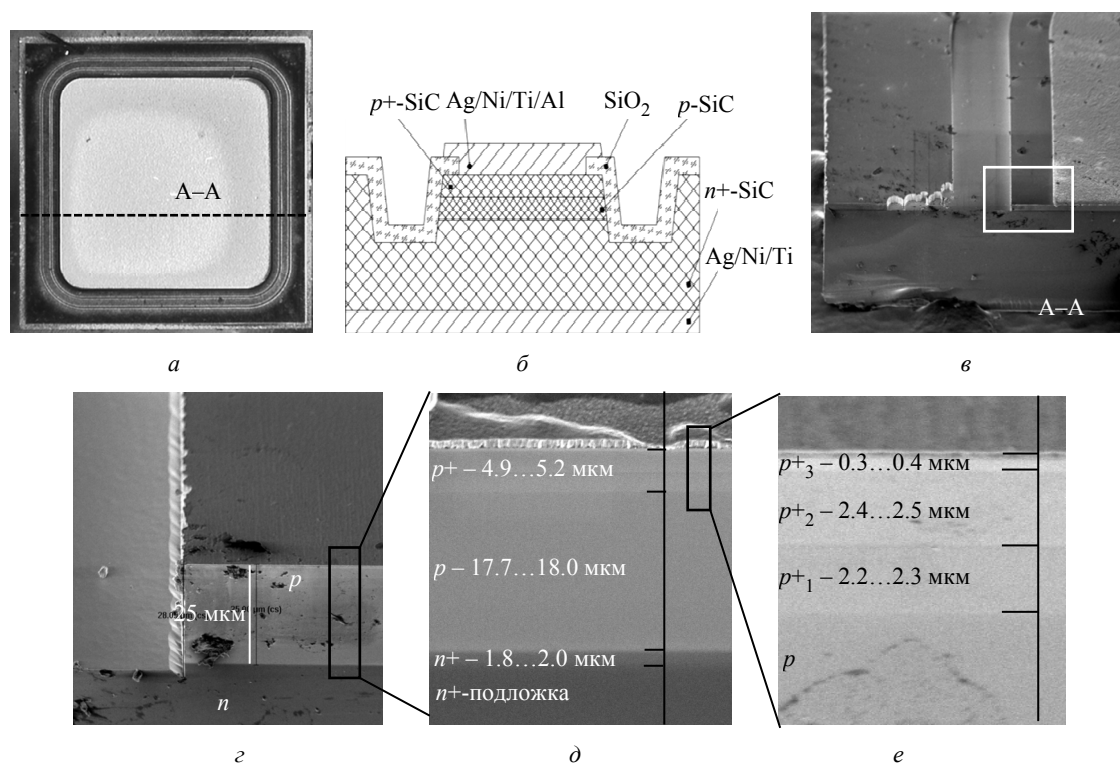


Рис. 5

На рис. 5, в приведено РЭМ-изображение во вторичных электронах фрагмента скола диода и его детализация (представленные области выделены рамкой): общий вид мезы с функциональными слоями (рис. 5, з), послойный состав эпитаксиальной структуры (рис. 5, д), состав p^+ -эмиттера (рис. 5, е).

Из рис. 5, д видно, что разработанная методика позволяет идентифицировать в 4H-SiC слои различных типов проводимости и с приемлемой точностью установить их толщины. Более того, наблюдаемый эффект, заключающийся в увеличении яркости получаемого во вторичных электронах изображения при увеличении концентрации акцепторной примеси (рис. 5, е), позволяет провести качественную оценку уровня легирования эпитаксиальных слоев.

Авторы статьи [7] на основе анализа экспериментальных данных сделали вывод, что интенсивность вторичной электронной эмиссии логарифмически пропорциональна концентрации примеси в образце. Такая зависимость делает возможным применение РЭМ для количественного

анализа концентрации легирующей примеси. Однако для того чтобы это осуществить, необходимо иметь полное представление о механизме формирования контраста легирования в РЭМ. Сложность математического расчета концентрации примеси заключается в том, что при формировании контраста в многослойных анизотипных структурах свое влияние может оказывать пространственный заряд p - n -перехода.

Несмотря на то что полная модель, описывающая физику процесса формирования контраста легирования, до сих пор не создана, данное явление успешно применяется в качестве метода диагностики полупроводниковых структур. В результате проведенных исследований отработаны режимы получения контраста легирования в РЭМ для карбидкремниевых эпитаксиальных и ионноимплантированных структур, позволяющие характеризовать функциональные 4H-SiC-слои в части типа проводимости, геометрических размеров и уровня легирования.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучинин В. В. Отечественная экстремальная ЭКБ: карбидкремниевая индустрия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» // Наноиндустрия. 2016. № 65 (3). С. 78–89.

2. Михайлов А. И. Физико-технологические основы формирования канала силового МДП-транзистора на карбиде кремния: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018.

3. Отечественная карбидкремниевая электронная компонентная база – силовой SiC МДП-транзистор / А. В. Афанасьев, В. А. Ильин, В. В. Лучинин, А. И. Михайлов, С. А. Решанов, А. Шонер // Нано- и микросистемная техника. 2016. Т. 18, № 5. С. 308–316.

4. High-voltage ultra-fast pulse diode stack based on 4H-SiC / V. A. Ilyin, A. V. Afanasyev, B. V. Ivanov, A. F. Kardo-Sysoev, V. V. Luchinin, S. A. Reshanov, A. Schöner, K. A. Sergushichev, A. A. Smirnov // Materials Science Forum. 2016. Vol. 858. P. 786–789.

5. Chang T. H. P., Nixon W. C. Electron beam induced potential contrast on unbiased planar transistors // Solid-State Electronics. 1967. Vol. 10. P. 701–702. URL: [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(67\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-1101(67)90099-8) (дата обращения 15.03.2020).

6. Perovic D. D., Castell M. R., Howie A. C. Field-emission SEM imaging of compositional and doping layer semiconductor superlattices // Ultramicroscopy. 1995. № 58. P. 104–113.

7. Contrast in Semiconductors as Interpretation Challenge at Imaging by Electrons / Frank Ludek, F. Mika, M. Hovorka, D. Valdaitsev, D. I. Dopant // Materials Transactions. 2007. Vol. 48, № 5. P. 936–939. Spec. Iss. on New Developments and Analysis for Fabrication of Functional Nanostructures #2007 The Japan Institute of Metals.

8. Volotsenko I., Molotskii M., Barkay Z. Secondary electron doping contrast: Theory based on scanning electron microscope and Kelvin probe force microscopy measurements // J. of Appl. Phys. 2010. № 107. URL: <https://doi.org/10.1063/1.3276090> (дата обращения 26.04.2020).

9. 30 kV Pulse Diode Stack Based on 4H-SiC / A. V. Afanasyev, Yu. A. Demin, B. V. Ivanov, V. A. Ilyin, A. F. Kardo-Sysoev, V. V. Luchinin, S. A. Reshanov, A. Schöner, K. A. Sergushichev, A. A. Smirnov // Materials Science Forum. 2018. № 924. P. 841–844.

A. V. Afanasyev, V. A. Golubkov, V. A. Ilyin, V. V. Luchinin, A. A. Ryabko,
K. A. Sergushichev, V. V. Trushlyakova
Saint Petersburg Electrotechnical University

S. A. Reshanov
Company Ascatron AB (Sweden)

CHARACTERIZATION OF FUNCTIONAL AREAS IN SILICON CARBIDE EPITAXIAL AND DEVICE STRUCTURES BY SEM IN DOPANT CONTRAST MODE

The modes for obtaining dopant contrast in SEM were developed for silicon carbide epitaxial and ion implanted structures, what made it possible to characterize functional 4H-SiC areas in terms of conductivity type, doping levels, and geometric dimensions. It was established that the maximum contrast in the secondary electron registration mode is observed when SEM operates in the low-voltage range at primary electron energies of 2–6 keV. The study of anisotypic regions topology of 4H-SiC JBS diode and layer-by-layer analysis of the high-voltage 4H-SiC p-i-n mesa-diode were carried out. It was demonstrated that the developed technique makes it possible to identify functional regions of various types of conductivity in 4H-SiC device structures, measure their thickness with acceptable accuracy, and qualitatively assess their doping level.

S Electron Microscopy, dopant contrast, silicon carbide, epitaxial structure, p-i-n diode, JBS-diode