

К. ф.-м. н. Н. С. БОЛТОВЕЦ, к. ф.-м. н. А. Г. БОРИСЕНКО,  
к. т. н. В. Н. ИВАНОВ, к. ф.-м. н. А. О. ФЕДОРОВИЧ,  
В. А. КРИВУЦА, Б. П. ПОЛОЗОВ

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»; Институт ядерных исследований  
E-mail: ndiorion@tsua.net

Дата поступления в редакцию  
18.09 2009 г.

Оппонент д. т. н. Р. В. КОНАКОВА  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## ФОРМИРОВАНИЕ МЕЗАСТРУКТУР 4HSiC $p-i-n$ -ДИОДОВ МЕТОДОМ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ

*Представлены результаты исследования и оптимизации процесса формирования карбидокремниевой мезаструктуры для  $p-i-n$ -диода на промышленной технологической базе. Исследованы характеристики диодов в интервале температуры 25—500°C.*

Известно, что совокупность фундаментальных свойств карбида кремния и уровень развития технологии выращивания эпитаксиальных  $p^+-n-n^+$ -структур создает реальные предпосылки для создания быстродействующих высоковольтных 4HSiC  $p-i-n$ -диодов, предназначенных для коммутации СВЧ-сигналов мощностью до 2 кВт со временем переключения 10—30 нс [1, 2]. Исследования 4HSiC  $p-i-n$ -диодов в широком интервале температуры показали, что диоды могут функционировать при высокой температуре — вплоть до 500°C [3].

В предыдущих наших работах было показано, что для реализации потенциальных возможностей  $p-i-n$ -диодов на основе 4HSiC необходимо создать промышленную технологию формирования чипа (мезаструктуры) с термостабильными контактами, пригодными для использования в производстве СВЧ интегральных схем и корпусированных приборов [2, 3]. Однако, в отличие от промышленной технологии изготовления кремниевых чипов, процесс изготовления карбидокремниевых чипов быстродействующих диодов значительно сложнее, поскольку связан с техпроцессами прецизионного плазмохимического травления 4HSiC на глубину 4—6 мкм, которые еще недостаточно изучены.

Целью данной работы была разработка и оптимизация техпроцессов формирования мезаструктур высоковольтных быстродействующих 4HSiC  $p-i-n$ -диодов на промышленной технологической базе, а также исследование их вольт-амперных характеристик (ВАХ) и характеристик переключения в интервале температуры 25—500°C.

### Технологические процессы формирования чипа $p-i-n$ -диода на основе 4HSiC

Разработанный чип диода (рис. 1) представляет собой прямую мезаструктуру  $p^+-n-n^+$ -типа с жесткими золотыми выводами, предназначенными для монтажа в СВЧ-корпус диода или в элементы топологии

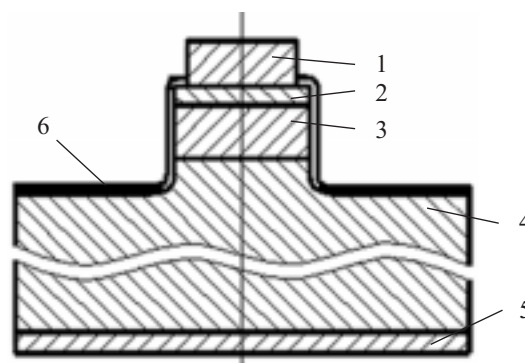


Рис. 1. Общий вид чипа карбидокремниевых  $p-i-n$ -диодов: 1 — контакт к  $p^+$ -области; 2 —  $p^+$ -область (1 мкм); 3 —  $n$ -область (8—10 мкм); 4 —  $n^+$ -область (150 мкм); 5 — контакты к  $n^+$ -области; 6 — защитный слой  $\text{SiO}_2$

СВЧ интегральных схем. Толщина  $i$ -области мезаструктуры составляет 6—8 мкм, что обеспечивает пробивное напряжение до 1000 В. Исходным материалом служили эпитаксиальные  $p^+-n-n^+$ -структуры 4HSiC. Технологическая схема формирования 4HSiC-мезаструктуры включает в себя группу операций, обеспечивающих создание маски (Cr-Ni), а также ионно-плазменного травления незащищенных участков пластины на глубину 6—7 мкм, формирования контактов к  $p^+$ - и  $n^+$ -областям и порезку пластины на чипы.

Маска для селективного травления 4HSiC создавалась вакуумным напылением слоев Cr и Ni толщиной 0,05 и 0,5 мкм, соответственно, с последующим формированием защищенных областей методом фотолитографии и жидкостного травления.

Ионно-плазменное травление карбида кремния выполнялось в плазмохимическом реакторе (ПХР) с замкнутым дрейфом электронов [4—6]. Для исследования и оптимизации процесса травления в качестве опытного материала были использованы пластины кремния. Оптимизация проводилась с целью получения максимальных скоростей травления кремния при небольших значениях энергии химически активных ионов. Как показано в работе [7], при энергии ионов больше 250 эВ происходит достаточно интенсивное распыление никелевой защитной маски. Поэтому исследования проводились при значениях энергии меньше 220 эВ.

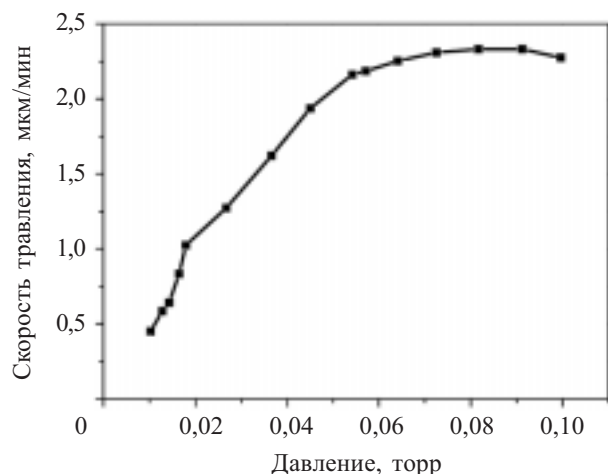


Рис. 2. Зависимость скорости травления кремния от давления рабочего газа в реакторе

В используемом ПХР применялись высокочастотные разряды в скрещенных магнитных полях, что позволяло регулировать энергию ионов и работать с химически активными ионами с энергией ниже 200 эВ. Использование плазмы с ионами относительно малых энергий позволяет проводить травление образцов без радиационных повреждений поверхности и перераспыления на поверхность образцов атомов материалов, из которых изготовлена вакуумная камера ПХР. Кроме того, наличие магнитных полей дает возможность получить высокую степень диссоциации молекул рабочего газа и ионизации атомов и реализовать более высокую скорость травления материалов, используемых в микроэлектронике.

Результаты исследований зависимости скорости травления кремния от давления рабочих газов в ПХР приведены на рис. 2. В качестве рабочего газа использовался  $\text{SF}_6$ . Напряженность магнитного поля в ПХР составляла  $1,2 \cdot 10^4$  А/м, ток высокочастотного (13,56 МГц) разряда составлял 8 А. Использовался генератор мощностью до 1 кВт со стабилизацией мощности. Скорость напуска газа оставалась постоянной, рабочее давление в реакторе регулировалось механически с помощью диффузионного насоса Н-2Т (скорость откачки 2000 л/с). Обрабатываемая площадь кремниевых пластин была одинаковой (для устранения влияния загрузки) и составляла 2,7 см<sup>2</sup>. Как видно из рис. 2, при увеличении давления в реакторе до  $10^{-1}$  торр скорость травления кремния растет от 0,7 до 2,5 мкм/мин при давлении  $(6-8) \cdot 10^{-2}$  торр. Последующее увеличение давления приводит к насыщению и даже снижению скорости травления кремния. Из приведенных данных видно, что для травления кремния оптимальным давлением рабочего газа в реакторе является  $(6-8) \cdot 10^{-2}$  торр. При дальнейшем увеличении давления мощности генератора становится недостаточно для диссоциации и ионизации большого количества рабочего газа.

Было также установлено, что скорость травления кремния зависит не только от давления рабочего вещества в камере, но и от величины потока рабочего газа (рис. 3). При неизменном давлении в камере,

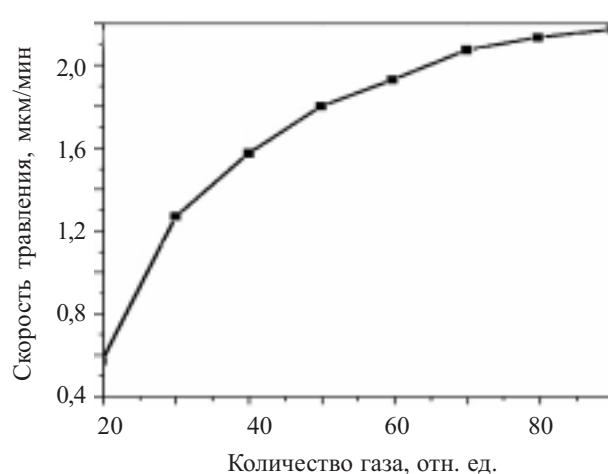


Рис. 3. Зависимость скорости травления кремния от количества рабочего газа в реакторе

близком к условиям максимальной скорости травления (около  $5 \cdot 10^{-2}$  торр), увеличение количества газа в пять раз приводит к увеличению скорости травления от 0,6 до 2,2 мкм/мин. Это свидетельствует о необходимости выбора соответствующей скорости потока газа через ПХР для получения максимальных скоростей травления.

При вытравливании мезаструктур на карбиде кремния выбирались условия, при которых разряд обеспечивает наибольшую скорость травления кремния. Для реализации процесса травления должны быть разорваны химические связи и получены летучие соединения углерода и кремния. Энергия связи в молекулах  $4\text{HSiC}$  составляет 4,48 эВ, в  $\text{SiC}_2$  — 6,52 эВ, в  $\text{Si}_2\text{C}$  — 5,94 эВ [8]. Если в качестве химически активных ионов для травления кремния используется фтор, который может образовывать летучую молекулу  $\text{SiF}_4$ , то для разрыва химической связи в молекуле  $4\text{HSiC}$  можно использовать кислород, который при соединении с углеродом создает летучее вещество  $\text{CO}$  с выделением энергии, значительно превышающей энергию связи в молекулах  $4\text{HSiC}$ ,  $\text{Si}_2\text{C}$  и  $\text{SiC}_2$ :  $\text{C} + \text{O} \rightarrow \text{CO} + 11,11$  эВ. Это делает возможной реакцию замещения углерода в каждой из молекул  $4\text{HSiC}$  с положительным энергетическим балансом. Такая же реакция возможна и для разрыва химической связи  $\text{SiC}$  с водородом в соответствии с реакцией  $\text{H}_2 + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 9,51$  эВ, однако большое количество кислорода может приводить к окислению кремния с образованием связи  $\text{Si} + \text{O} \rightarrow \text{SiO} + 8,35$  эВ [8], которую тяжело разорвать. Потому количество кислорода выбиралось исходя из соотношения  $\text{SF}_6 : \text{O}_2 \approx 4 : 1$ . Это позволило протравить мезаструктуры  $4\text{HSiC}$ , защищенные масками никеля толщиной 0,5 мкм, до глубины 4 мкм за 140 мин при напряжении автосмещения  $U_{\text{см}} = -80$  В, и до глубины 8 мкм за 140 мин при  $U_{\text{см}} = -(50-70)$  В. Сила тока в разрядах составляла 7 А. Для очистки поверхности от углерода проводилась обработка образцов в кислородной плазме в течение 10 мин при напряжении автосмещения  $-90$  В и токе высокочастотного разряда 7,5 А.

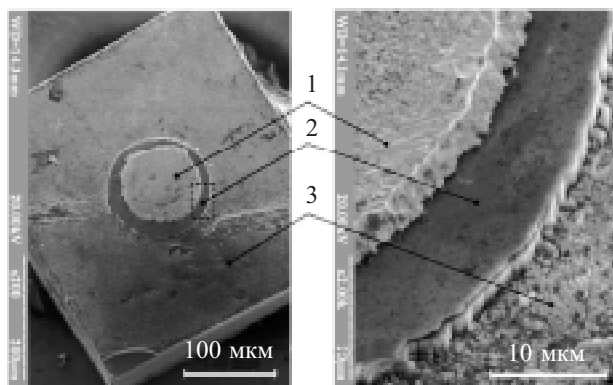


Рис. 4. Чип 4HSiC  $p-i-n$ -диода (а) и увеличенный фрагмент мезаструктуры (б):

1 — контактная площадка к  $p^+$ -области; 2 —  $p^+-n$ -мезаструктура; 3 — высоколегированная  $n^+$ -подложка

После вытравливания мезаструктуры на глубину 4–6 мкм на пластине методом термического окисления во влажном азоте формировалась пленка  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,1 мкм для защиты поверхности мезаструктуры на следующих этапах техпроцесса.

Контакты к  $n^+$ -области структуры создавались магнетронным напылением слоя никеля (0,1 мкм) с отжигом в вакууме при температуре 950°C в течение 2 мин и последующим электрохимическим осаждением на нем слоя золота толщиной 3 мкм.

Контакты к  $p^+$ -области создавались напылением многослойной системы  $\text{Al-Ti-Ni-Ti-Au}$  и формировались в два этапа. Сначала напыленные на лицевую сторону пластины слои  $\text{Al-Ti-Ni}$  отжигались в течение 2 мин в вакууме при температуре 950°C. Затем проводилось вакуумное напыление системы  $\text{Ti-Au}$ . При окончательном формировании контакта методами фотолитографии проводили вытравливание  $\text{SiO}_2$  в окнах и электрохимическое осаждение золота толщиной 3 мкм.

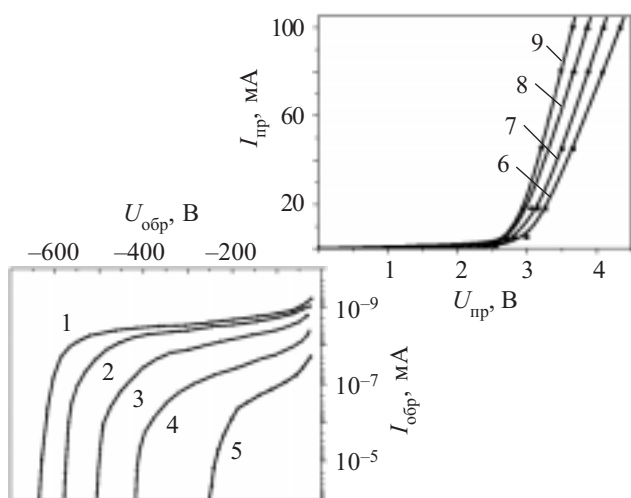


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики  $p-i-n$ -диода (1–5 — обратные, 6–9 прямые ветви), измеренные при разной температуре (в °C):

1, 6 — 25; 2 — 100; 3 — 200; 4, 8 — 350; 5, 9 — 500; 7 — 150

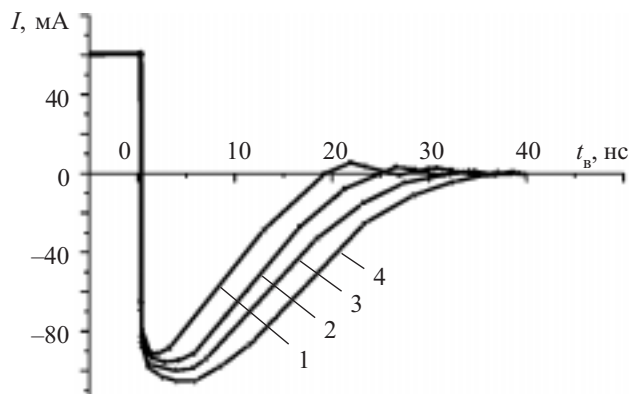


Рис. 6. Форма импульсов тока при переключении 4HSiC  $p-i-n$ -диода из прямого направления в обратное, измеренного при разной температуре (в °C):

1 — 25; 2 — 150; 3 — 350; 4 — 500

Пластина с мезаструктурами разрезалась на чипы алмазными дисками толщиной 30 мкм. На **рис. 4** показана фотография чипа 4HSiC  $p-i-n$ -диода с мезаструктурами, где видно, что  $p^+-n$ -мезаструктура имеет цилиндрическую форму. В верхней части мезаструктуры по периметру имеется темная полоска, которая ограничивает высоколегированный  $p^+$ -слой. Рельеф травления  $n^+$ -слоя имеет неоднородности, которые отражают степень неоднородности физико-химических свойств  $n^+$ -подложки 4HSiC. Профиль травления контактной площадки на  $p^+$ -слое является характерным для жидкостного травления и имеет угол наклона относительно плоскости  $p^+$ -слоя порядка 60°.

На изготовленных вышеописанным методом мезаструктурах измерялись вольт-амперные характеристики с прямыми и обратными ветвями при значениях температуры 25, 100, 200, 350 и 500°C. Как видно из **рис. 5**, прямое падение напряжения при токе 100 мА при увеличении температуры с 25 до 500°C уменьшается с 4,4 до 3,7 В, что обусловлено уменьшением сопротивления диода при увеличении температуры. Обратные ветви ВАХ исследовались до величины тока  $10^{-4}$  А. При комнатной температуре 4HSiC  $p-i-n$ -диоды имеют обратное напряжение 630 В, с ростом температуры оно уменьшается и при 500°C составляет 250 В.

Процесс переключения  $p-i-n$ -диодов с прямого тока (60 мкА) на обратное напряжение (10 В) исследовался в интервале температуры 25–500°C (**рис. 6**). Время восстановления диода  $t_v$  при 25°C составило 20 нс, при 500°C — 35 нс. С повышением температуры время восстановления диода увеличивается, что свидетельствует об увеличении эффективного времени жизни неосновных носителей заряда.

### Закключение

Разработанный на промышленной технологической базе процесс формирования мезаструктур карбидокремниевых  $p-i-n$ -диодов обеспечивает вытравливание мезаструктур высотой 4–6 мкм при энергии ионов 50–70 эВ, что исключает радиационные повреждения в приповерхностных слоях 4HSiC и не приводит к распылению защитных покрытий из никеля.

Результаты исследований ВАХ и переключения диода с прямого тока на обратное напряжение свидетельствуют о том, что мезаструктуры 4HSiC *p-i-n*-диодов, изготовленные по разработанной технологии, могут функционировать при высокой температуре — вплоть до 500°C.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лебедев А. А., Сбруев С. SiC электроника. Прошлое, настоящее, будущее // Электроника: Наука. Технология. Бизнес.— 2006.— № 5.— С. 23—41.
2. Camara N., Zekentes K., Romanov L. P. et al. Microwave *p-i-n*-diodes and switches based on SiC // IEEE Electron Device Letters.— 2006.— Vol. 27.— N 2.— P. 108—110.
3. Boltovets M. S., Basanets V. V., Camara N. et al. Investigation of packaged high-voltage 4HSiC *p-i-n*-diodes in the 20—700°C temperature range // TTP Materials Science Forum.— 2006.— Vols. 527—529.— P. 1375—1378.
4. Коновал В. М., Усталов В. В., Федорович О. А. Плазмохимический реактор с замкнутым дрейфом электронов для производства элементов с субмикронными размерами // Матер. 6-й Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Украина, г. Севастополь.— 1996.— С. 285—287.
5. Усталов В. В., Федорович О. А., Вдовенков А. А., Левицкая С. К. Плазмохимический реактор с низкой энергией ионов для селективного травления материалов // Матер. 10-й Междунар. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». — Украина, г. Севастополь.— 2000.— С. 434—435.
6. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов.— М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Левицкая С. К., Федорович О. А., Усталов В. В. Селективное травление многоуровневых структур в плазмохимическом реакторе с низкими энергиями ионов // Матер. 12-й Междунар. конф. «КрыМиКо—2002». — Украина, г. Севастополь.— 2002.— С. 371—373.
8. Веденеев В. И., Гурвич Л. В., Кондратьев В. Н. и др. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродства к электрону / Справочник.— М.: Химия, 1962.

#### НОВЫЕ КНИГИ

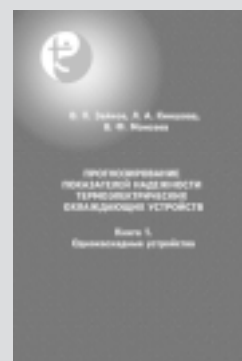
##### НОВЫЕ КНИГИ



**Зайков В. П., Киншова Л. А., Моисеев В. Ф.** Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Кн. 1. Однокаскадные устройства.— Одесса: Политехпериодика, 2009.— 120 с.

Книга посвящена оценке и прогнозированию показателей надежности однокаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств, качественному и количественному описанию этих показателей в зависимости от токового режима работы термоэлемента, величины тепловой нагрузки, условий эксплуатации, а также с учетом воздействия повышенной или пониженной температуры среды как на стадии проектирования термоэлектрического устройства, так и на стадии его эксплуатации.

Книга предназначена для инженеров, научных работников, а также студентов соответствующих специальностей, занимающихся вопросами надежности элементов электроники и в целом РЭА, и разработкой и проектированием термоэлектрических устройств.



##### НОВЫЕ КНИГИ



**Худяков Г. И.** Статистическая теория радиотехнических систем.— М.: Академия, 2009.— 400 с.

В учебном пособии кратко изложены математические основы статистической теории радиотехнических систем. Представлены основные вероятностные модели сигналов и помех в радиотехнических системах. Рассмотрены основы теории поиска, обнаружения и различения сигналов на фоне помех, статистической теории оптимального оценивания параметров сигналов, теории фильтрации и разрешения простых и сложных сигналов. Описаны основные методы расчета статистических характеристик пространственно-временных радиопомех, стохастических трасс распространения радиосигналов и эффективных площадей рассеяния радиолокационных целей.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

