

Высоковольтные лавинные 4H-SiC диоды с прямой фаской

Н.М. Лебедева, П.А. Иванов, Н.Д. Ильинская, Т.П. Самсонова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Аннотация: изготовлены высоковольтные лавинные $p^+p-n_0n^+$ -диоды на основе 4H-SiC. Диоды выполнены в виде меза-структур с пологими боковыми стенками, образующими прямую фаску с углом наклона боковых стенок 5° от плоскости $p-n_0$ -перехода. Измерены вольтамперные характеристики изготовленных диодов. В прямом направлении дифференциальное сопротивление диодов и падение напряжения при токе 10 А составляют 0.35 Ом и 6.5 В, соответственно. В обратном направлении диоды показывают резкий пробой при напряжении около 1500 В, совпадающим с теоретически предельным напряжением лавинного пробоя идеализированного одномерного диода. Изготовленные диоды выдерживают без деструкции одиночные импульсы лавинного тока с амплитудой 10 А (плотность тока 10^3 А/см²) и длительностью 1.2 мкс (рассеиваемая энергия 9 мДж).

Ключевые слова: Карбид кремния, диод, прямая фаска, лавинный пробой

1. Введение

Для развития современной импульсной и СВЧ электроники важное значение приобретает внедрение перспективных широкозонных полупроводниковых материалов, в частности, карбида кремния политипа 4H (4H-SiC). В настоящее время разработка и исследования 4H-SiC приборов широкой номенклатуры проводятся во всем мире ударными темпами. В полупроводниковой силовой, импульсной и СВЧ электронике востребованы приборы, способные к работе в режиме контролируемого лавинного пробоя - это ключевые диоды и транзисторы, лавинные диоды (они применяются в качестве ограничителей СВЧ мощности, а также в качестве быстродействующих ограничителей импульсных перенапряжений), лавинно-пролетные диоды, импульсные диоды с задержанной ударной ионизацией, S-диоды, лавинные транзисторы, и др.

Одной из ключевых проблем при создании высоковольтных 4H-SiC приборов является устранение преждевременного краевого пробоя. Для 4H-SiC приборов предложено и реализовано множество конструктивно-технологических решений этой проблемы [1]. В приборах с блокирующей n -базой часто применяют формирование на периферии базовой n -области локальных имплантированных (охранных) областей p -типа. Существенным недостатком таких систем является то, что создание p -областей сопряжено с проведением прецизионных (а в некоторых вариантах многоступенчатых) процессов ионного легирования, предусматривающих высокотемпературные (1500 - 2000°C) отжиги для активации внедренных примесей. Помимо этого, для формирования элементов некоторых охранных систем необходима прецизионная литография с разрешением порядка ~ 1 мкм, что намного усложняет технологический процесс в целом. Поэтому поиск новых эффективных методов подавления краевого пробоя все еще актуален.

В настоящей работе продемонстрированы высоковольтные (1500 В) 4H-SiC $p^+p-n_0n^+$ -диоды с прямой фаской в качестве охранного контура. Изготовленные диоды способны к работе в режиме мощного контролируемого лавинного пробоя при плотностях тока $\sim 10^3$ А/см².

2. Прямая фаска: концепция и моделирование

Для защиты высоковольтных 4H-SiC диодов от краевого пробоя эффективным может быть формирование меза-структур с наклонными стенками по аналогии с формированием прямой фаски в кремниевых приборах [2]. На рисунке 1 схематически показана полупроводниковая меза-структуры с прямой фаской на подложке n -типа (4H-SiC приборы изготавливаются исключительно на подложках n -типа).

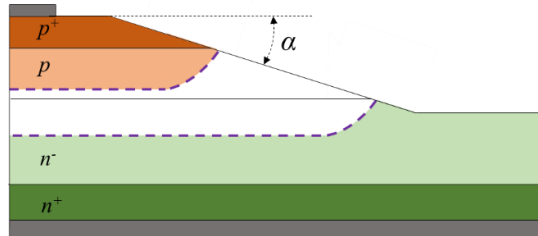


Рисунок 1. Полупроводниковая $p^+ - p - n - n^+$ -структура с прямой фаской.

В показанной структуре за уменьшение краевого поверхностного поля отвечает расширение обедненной области $p - n_0$ -перехода у поверхности p -слоя.

Численное моделирование пространственного распределения электрического поля в обратносмещенной меза-диодной $p^+ - p - n_0 - n^+$ -структуре с прямой фаской подтвердило эффективность последней. В расчетах параметры эпитаксиальной структуры диода выбирались такими, чтобы напряжение пробоя идеального одномерного диода составляло около полутора киловольт. Концентрации акцепторов в p^+ - и p -областях: $N_{A1} = 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $N_{A2} = 8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$; концентрации доноров в n_0 - и n^+ -областях: $N_{D3} = 8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $N_{D4} = 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Толщины p^+ -, p -, n_0 - и n^+ -слоев: 1, 2, 7 и 1 мкм. Потенциал анода принимался равным 1200 В, угол фаски α варьировался в пределах от 3-х до 11-ти градусов. Расчеты проводились с помощью компьютерной программы, реализующей численное моделирование двумерных электростатических полей методом конечных элементов.

На рисунке 2 для примера показано рассчитанное двумерное распределение электрического поля в диодной 4H-SiC $p^+ - p - n_0 - n^+$ -структуре с прямой фаской.

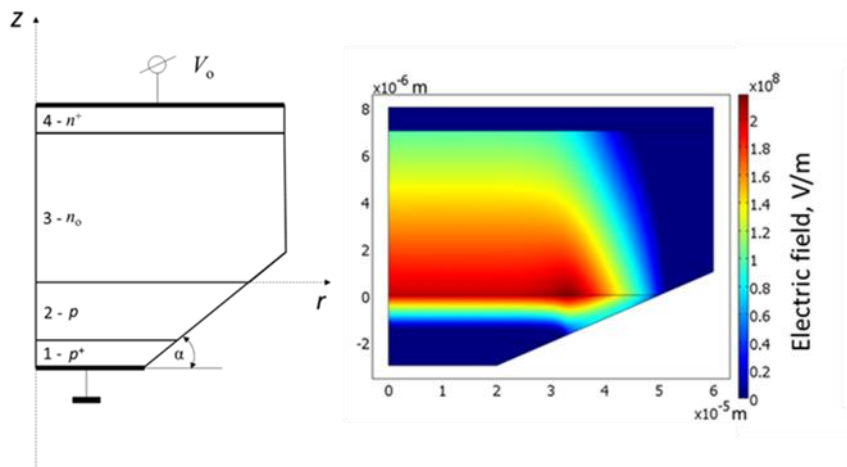


Рисунок 2. Двумерное распределение электрического поля в диодной 4H-SiC $p^+ - p - n_0 - n^+$ -структуре с прямой фаской ($\alpha = 5.7^\circ$).

Как видно, фаска под углом $\alpha = 5.7^\circ$ демонстрирует высокую эффективность: она позволяет уменьшить краевое поверхностное поле почти в 3 раза по сравнению с полем в объеме структуры. В принципе, меза-структура с прямой фаской в 4H-SiC приборах может быть создана с использованием фотолитографических методов и

процессов селективного сухого травления. Для того, чтобы стенки при травлении получались наклонными, необходимо обеспечить два условия: 1) маска и 4H-SiC должны травиться со сравнимыми скоростями и 2) край маски должен иметь форму острого клина [3]. В качестве маски лучше всего подходит фоторезист, а наиболее подходящий способ травления, - это традиционный для 4H-SiC процесс реактивного ионного травления (РИТ).

3. Изготовление диодов

Для изготовления диодов использовалась коммерческая 4H-SiC пластина *n*-типа с выращенной методом CVD-эпитаксии $p^+p\text{-}n_0\text{-}n^+$ -структурой. Концентрации акцепторов в p^+ - и p -областях: $N_{A1} = 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $N_{A2} = 8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$; концентрации доноров в n_0 - и n^+ -областях: $N_{D3} = 8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $N_{D4} = 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Толщины p^+ -, p -, n_0 - и n^+ -слоев: 1, 2, 5.5 и 1 мкм. Последовательность основных технологических операций следующая:

*Формирование сплошного катодного омического контакта к шлифованной *n*-подложке.* Контактным металл - Ni (толщина слоя 0.3 мкм), нанесенный ионным распылением и отожженный при температуре 950°C в течение 15 минут; поверх контактного Ni-слоя ионным распылением наносился слой Ag толщиной 1 мкм.

Формирование на поверхности p^+ -слоя анодных омических контактов. Анодные контакты площадки размером 960 × 960 мкм формировались с помощью взрывной фотолитографии. Контактный слой - комбинация из Ti + Cr (толщина 50 и 50 нм, соответственно), нанесенная электронно-лучевым испарением и отожженная при температуре 950°C в течение 5 минут; поверх вожденного контактного слоя ионным распылением наносился слой Ni толщиной 0.3 мкм с помощью взрывной фотолитографии.

Формирование меза-структур. Для изготовления маскирующих площадок для РИТ использовались позитивные фоторезисты, состоящие из новолачной смолы, смешанной с небольшим количеством диазонафтохиноновой фотоактивной добавки [4]. Фоторезист наносился методом центрифугирования (толщина пленки 15 - 20 мкм). Сушка проводилась в конвекционной печи при 90°C в течение 30 минут. Затем путем экспонирования и проявления в 1%-ном растворе КОН в слое резиста создавался рисунок - площадки размером 1160 × 1160 мкм. Задубливание проводилось в конвекционной печи при температуре 150°C в течение 60 минут. После изготовления маскирующих элементов замерялись углы наклона их боковых стенок. Для последующего травления меза-структур использовались образцы с маскирующими площадками, имеющими угол наклона боковых стенок 22°.

Реактивно-ионное травление SiC с резистивной маской. Эксперименты по травлению проводились в лабораторном реакторе с индуктивно-связанной плазмой (в плазме NF_3). Экспериментально подбирались оптимальные параметры процесса - селективность и скорость травления. С этой целью варьировались мощность ВЧ разряда и давление рабочего газа в реакционной камере. И мощность, и давление по возможности выбирались малыми (при условии сохранения приемлемой скорости травления) для того, чтобы обеспечить приемлемое морфологическое качество протравленных поверхностей 4H-SiC. Наилучшие результаты с точки зрения достижения требуемых параметров - глубины травления 4H-SiC и угла наклона боковых стенок меза-структур - были получены при мощности ВЧ разряда в пределах 20 - 50 Вт и давлении газа 0.4 Па.

На рисунке 3 показан профиль поверхности меза-структуры, полученный с помощью профилометра ДЕКТАК 3030.

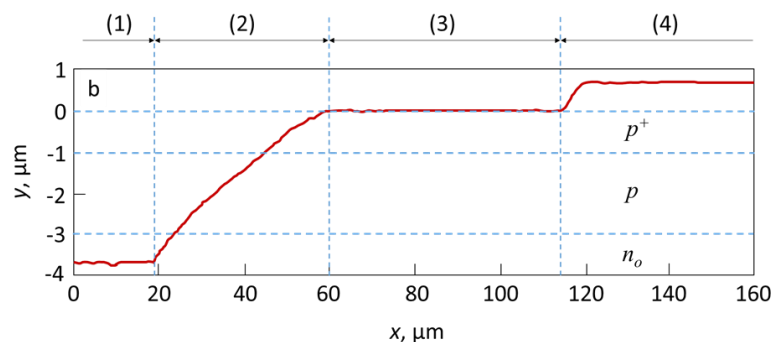


Рисунок 3. Профиль поверхности $p^+p-n_0-n^+$ -диода с прямой фаской: (1) - n_0 -база, (2) - фаска, (3) - p^+ -эмиттер, (4) - анодный никелевый контакт.

Как видно, меза-структура имеют высоту 3.6 мкм, которая немного больше глубины залегания $p-n_0$ -перехода (3 мкм), и угол наклона боковой стенки 5° от плоскости $p-n_0$ -перехода.

Резка пластин на чипы. Пластина с дискретными диодными структурами разрезалась алмазным диском на отдельные чипы размером 2×2 мм.

Корпусирование чипов. Изготовленные чипы спаивались в металlostеклянные корпуса с последующим присоединением анодных выводов. Поверхность чипов закрывалась электроизоляционным лаком.

4. Вольтамперные характеристики

В прямом направлении дифференциальное сопротивление диодов и падение напряжения при токе 10 А составляют 0.35 Ом и 6.5 В, соответственно. Обратные ВАХ изготовленных диодов измерялись с помощью импульсной схемы разблокированного индуктивного переключения (в зарубежной литературе она получила название Unclamped Inductive Switching, UIS [5]; схема UIS предназначена для пропуска через полупроводниковый диод импульсов лавинного тока треугольной формы с крутым фронтом нарастания ~ 100 нс и временем спада в микросекундном диапазоне). Изготовленные диоды выдерживали без разрушения одиночные импульсы лавинного тока с амплитудой, как минимум, 10 А и длительностью 1.2 мкс (рассеиваемая энергия 9 мДж). На рисунке 4 показаны соответствующие осциллограммы напряжения и тока. Пиковая плотность тока составляет 10^3 А/см² при напряжении 1480 В.

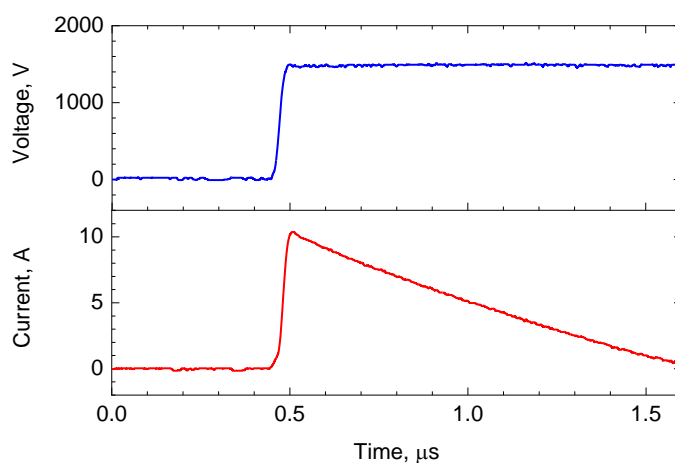


Рисунок 4. Осциллограммы напряжения и тока, измеренные в схеме UIS.

На рисунке 5 точками показана построенная обратная ВАХ. На этом же рисунке сплошной линией показана обратная ВАХ идеализированного одномерного диода, рассчитанная с помощью TCAD-моделирования. Как видно, экспериментальная и рассчитанная ВАХ практически идентичны. В режиме пробоя дифференциальное сопротивление диода составляет около 3 Ом, что свидетельствует о том, что пробой однороден по площади.

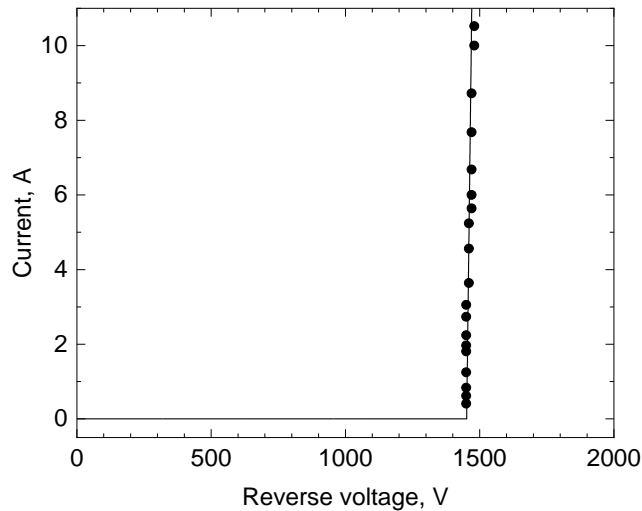


Рисунок 5. Осциллограммы напряжения и тока, измеренные в схеме UIS.

5. Заключение

В работе продемонстрированы 1500-В лавинные диоды на основе 4H-SiC, способные работать в режиме пробоя при плотностях тока $\sim 10^3$ А/см². Решающим фактором в достижении таких высоких параметров стало создание высокоэффективного (практически 100%) краевого охранного контура. Наряду с высокой эффективностью, охранный контур - прямая фаска - относительно прост в изготовлении: не требуется прецизионная фотолитография; не требуется глубокое травление на всю толщину блокирующей n_o -базы. Важно отметить также, что прямая фаска может применяться не только для диодов с $p^+ - p - n_o - n^+$ -структурой. Например, для диодов с $p^+ - n_o - n^+$ -структурой и диодов Шоттки с n_o -базой может использоваться комбинированная защита: вначале на периферии таких диодов создается умеренно легированная p -область (например, с помощью имплантации бора), а затем формируется меза-структура с прямой фаской.

Список литературы

1. Kimoto T., Cooper J.A. Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices, and applications. - Wiley-IEEE Press, 2014.
2. Евсеев Ю.А., Дерменжи П.Г. Силовые полупроводниковые приборы. - М.: Энергоатомиздат, 1981.
3. Лебедева Н.М., Самсонова Т.П., Ильинская Н.Д., Трошков С.И., Иванов П.А. Формирование SiC меза-структур с пологими боковыми стенками сухим селективным травлением через маску из фоторезиста. - Журнал технической физики. - 2020. - Т. 90. - N 6. - С. 997-1000.
4. У. Моро. Микролитография: Принципы, методы, материалы. - М: Мир. 1990.
5. Unclamped Inductive Switching (UIS) Test and Rating Methodology. - Интернет ресурс: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/an19/an1968.pdf>