

07

Формирование SiC-мезаструктур с пологими боковыми стенками сухим селективным травлением через маску из фоторезиста

© Н.М. Лебедева, Т.П. Самсонова, Н.Д. Ильинская, С.И. Трошков, П.А. Иванов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: Natali_lebedeva@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 15 января 2020 г.

В окончательной редакции 15 января 2020 г.

Принято к публикации 28 января 2020 г.

Продemonстрировано формирование SiC-мезаструктур с пологими боковыми стенками с помощью селективного реактивно-ионного травления (Reactive Ion Etching, RIE) карбида кремния через маску из фоторезиста (наклонные стенки сформированы при одновременном травлении SiC и резистивной маски, край которой имеет форму острого клина). Простая геометрическая модель травления предсказывает, что результирующий угол наклона стенки мезаструктуры должен задаваться двумя параметрами — исходным углом резистивного клина и селективностью травления SiC по отношению к фоторезисту (отношением скоростей травления SiC и фоторезиста). Для экспериментов использовались полированные пластины 4H-SiC с ориентацией (0001). На Si-стороне пластин фотолитографическими методами были нанесены площадки из фоторезиста с краевым углом 22°. Затем проводилось травление мезаструктур в трифториде азота в установке с индуктивно-связанной плазмой. Были подобраны параметры RIE-процесса, обеспечивающие травление SiC и фоторезиста со скоростями 55 и 160 nm/min соответственно (селективность травления 1 : 3). Сформированные травлением SiC-мезаструктуры имеют высоту 3.2 μm и пологие боковые стенки с углом наклона около 8°. Данная технология может использоваться при изготовлении высоковольтных SiC-приборов с прямой фаской.

Ключевые слова: карбид кремния, мезаструктура, наклонные стенки, фотолитография, реактивно-ионное травление.

DOI: 10.21883/JTF.2020.06.49289.12-20

Введение

Карбид кремния (SiC) обладает рядом уникальных физико-химических свойств, из которых особенно выделяются высокая твердость (по твердости SiC уступает только алмазу и карбиду бора) и почти абсолютная химическая инертность: при нормальных условиях SiC не взаимодействует ни с одним из известных для других полупроводниковых материалов химических травителей. В отличие, например, от кремния в технологии SiC-приборов механическая обработка и химическое травление не применяются. В свое время для изготовления мезаэпитаксиальных SiC-приборов был разработан метод сухого селективного травления SiC в плазме фторсодержащих молекулярных газов, таких как CF₄, SF₆, и NF₃ [1,2]. Считается, что плазменное травление SiC происходит по реактивно-ионному механизму: атомы кремния удаляются с поверхности SiC за счет их химической реакции с ионами фтора и образования летучих молекул SiF₄, а углеродные атомы — за счет их преимущественного физического распыления [3]. Благодаря низкой температуре, чистоте обработки, высокой селективности травления по отношению к некоторым металлам — алюминию (порядка 10 : 1) и никелю (порядка 100 : 1) — в настоящее время метод реактивно-ионного травления (Reactive Ion Etching, RIE) широко используется в технологии полупроводниковых приборов на основе 4H-SiC.

Характерная особенность селективного травления SiC методом RIE через металлическую маску состоит в том, что стенка протравливаемой ступеньки получается строго вертикальной. Дело в том, что при травлении боковая поверхность SiC покрывается монослоем графита и, поскольку последняя не подвергается ионной бомбардировке, латеральное травление блокируется. Именно этим объясняется высокая анизотропия, достигаемая при травлении SiC методом RIE. Однако для формирования структуры мезаэпитаксиальных SiC-приборов некоторых типов необходимо формировать мезаструктуры с наклонными стенками (см., например, [4,5]).

Мезаструктуры с пологими боковыми стенками могут использоваться для создания защитной фаски в высоковольтных 4H-SiC-приборах. В работе [6] нами проводилось численное моделирование пространственного распределения электрического поля в высоковольтных (~ 1500 V) обратносмещенных мезаэпитаксиальных 4H-SiC $p^+ - p - n_o - n^+$ -диодах с прямой фаской (модерируемую $p^+ - p - n_o - n^+$ -структуру имеют, в частности, дрейфовые диоды с резким восстановлением на основе 4H-SiC [7,8]). Было показано, что снятие фаски под углами менее 10° от плоскости $p - n_o$ -перехода позволяет в несколько раз уменьшить краевое поверхностное поле по сравнению с полем в объеме (например, при угле фаски около 6° краевое поле меньше объемного почти в 3 раза).

В принципе прямая фаска в 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 SiC должны травиться со сравнимыми скоростями; 2) край маски должен иметь форму острого клина. В качестве маски лучше всего подходит фоторезист, а наиболее подходящий способ травления — это традиционный для SiC RIE-процесс.

В настоящей работе с помощью фотолитографических методов и ионно-плазменных процессов изготовлены SiC-мезаструктуры с пологими стенками, имеющими угол наклона около 8°.

1. Геометрическая модель селективного травления

На рис. 1 показана идеализированная геометрическая модель селективного сухого травления SiC с маской из фоторезиста. Наклонный профиль формируется при одновременном травлении SiC и резистивной маски, край которой имеет форму клина. Исходная поверхность SiC — плоская (сплошная линия 1), поверхность фоторезиста наклонена под углом α к поверхности SiC (сплошная линия 2). В процессе травления открытая поверхность SiC (на участке AB) травится на глубину Δh_{SiC} . Фоторезист на участке CD травится на глубину Δh_{ph} . На участке BC фоторезист стравливается за время процесса полностью, так, что после травления край фоторезиста сдвигается в латеральном направлении на расстояние BC (пунктирная линия 2'). В результате поверхность SiC после травления на участке BC оказывается наклоненной под углом β к исходной поверхности пластины SiC (штриховая линия (1')). Легко убедиться, что

$$\text{tg}(\beta) = \text{tg}(\alpha) / (\Delta h_{ph} / \Delta h_{SiC}) \equiv \text{tg}(\alpha) / K, \quad (1)$$

где K — отношение скоростей травления фоторезиста и SiC. Таким образом, из простых геометрических соображений следует, что результирующий угол

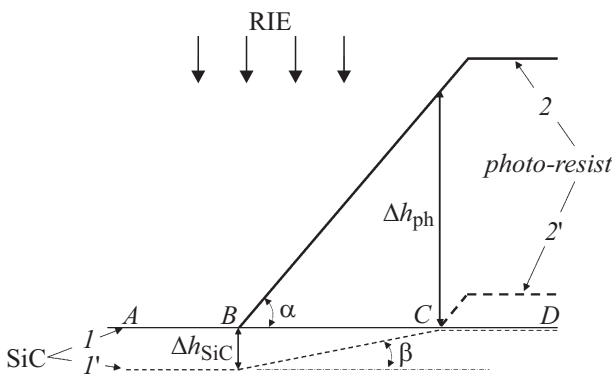


Рис. 1. Идеализированная модель селективного травления SiC с маской из фоторезиста.

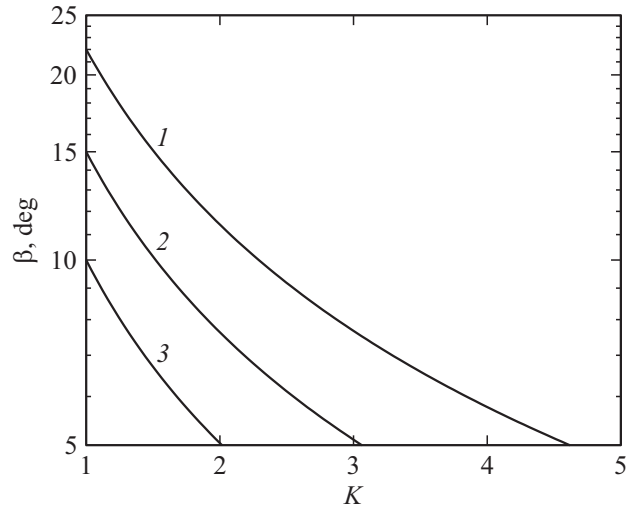


Рис. 2. Расчетные зависимости $\beta(K)$ при разных значениях α : 1 — 22°, 2 — 15°, 3 — 10°.

наклона стенки протравленной мезаструктуры (β) должен задаваться двумя параметрами: исходным углом резистивного клина (α) и селективностью травления SiC по отношению к фоторезисту (величиной K). При селективности травления 1 : 1 ($K = 1$) краевой профиль маски будет „копироваться“ в карбиде кремния. Важно то, что в случае технологических проблем по созданию фоторезистивной маски с малыми углами ($\alpha < 10^\circ$) эти проблемы могут быть решены подбором таких режимов травления, при которых скорость травления фоторезиста будет выше скорости травления SiC ($K > 1$). Это проиллюстрировано на рис. 2, где показаны рассчитанные из соотношения (1) зависимости $\beta(K)$ при разных значениях α . Например, при $\alpha = 22^\circ$ результирующий угол $\beta = 8^\circ$ получается при $K = 2.9$ (селективность травления SiC по отношению к фоторезисту 1 : 2.9).

2. Формирование SiC-мезаструктур

Исходные пластины Si. Для изготовления SiC-мезаструктур использовались коммерческие 4H-SiC-подложки диаметром 76 mm с ориентацией (0001), с двухсторонней химико-механической полировкой, плотностью микропор менее 10 cm^{-2} (промышленное качество) и удельным сопротивлением около $0.02 \Omega \cdot \text{cm}$ (n -тип проводимости). Из подложек вырезались фрагменты размером $20 \times 20 \text{ mm}$. Микропрофилирование проводилось на Si-стороне пластин. Перед нанесением фоторезиста обратная C-сторона пластин шлифовалась алмазной пастой с последующим напылением на шлифованную поверхность слоя никеля толщиной около $0.2 \mu\text{m}$.

Формирование маски из фоторезиста. Использовались позитивные фоторезисты, состоящие из новолачной смолы, смешанной с небольшим количеством диазоафтохиноновой фотоактивной добавки. Эти фоторезисты

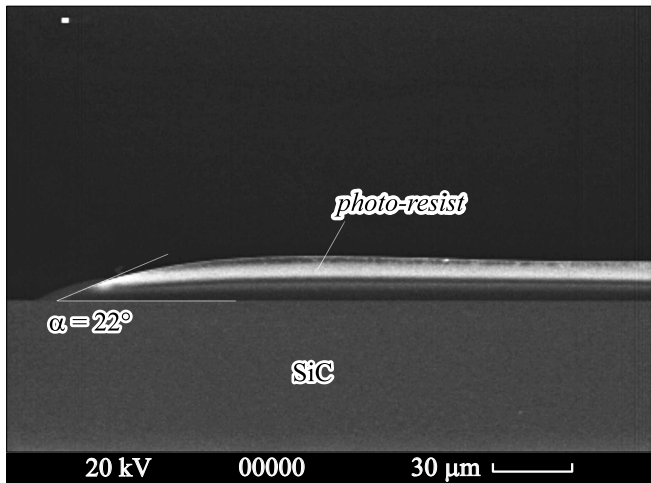


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение профиля фоторезистивной маски. Толщина слоя фоторезиста $15\ \mu\text{m}$, угол краевого клина 22° .

обладают хорошей плазмостокостью и легко удаляются в органических растворителях. При термическом задублении фоторезиста протекают сложные физико-химические процессы с участием смолы, чувствительного компонента, остаточного растворителя и воздуха [9]. Особенностью позитивных фоторезистов на основе новолачной смолы является их выраженное пластическое течение, которое наступает при температуре стеклования (ниже температуры задубления) и зависит от конкретной марки фоторезиста. Задубление приводит к оплавлению боковой стенки резиста; условия задубления должны подбираться так, чтобы при заданном размере элемента достигались требуемые параметры: толщина слоя резиста и краевой угол. В экспериментах фоторезист AZ4562 наносился в два слоя методом центрифугирования (суммарная толщина пленки составляла $15\text{--}20\ \mu\text{m}$). Сушка проводилась в конвекционной печи при 90°C в течение 30 min. Затем путем экспонирования и проявления в 1%-м растворе KOH в слое резиста создавался рисунок — квадратные площадки разного размера. Задубление проводилось в конвекционной печи при температуре 150°C в течение 60 min. После изготовления элементов замерялись углы наклона их боковых стенок. Для этого снималось изображение сколов структур с помощью растрового электронного микроскопа CamScan S4-90FE. Оказалось, что угол наклона боковой стенки после задубления зависит от толщины слоя резиста и от размеров элемента: на элементах размером от 100 до $600\ \mu\text{m}$ измеренные углы монотонно уменьшались от 42 до 22° (при размерах элементов более $600\ \mu\text{m}$ угол уже не изменялся). Для последующего травления мезаструктур использовались образцы с маскирующими площадками, имеющими угол наклона боковых стенок 22° (рис. 3).

Реактивно-ионное травление SiC с резистивной маской. Решаемая в настоящей работе задача фор-

мирования мезаструктур с пологими стенками ориентирована на изготовление в будущем высоковольтных $4H\text{-SiC } p^+p\text{-}n_0\text{-}n^+$ -диодов с прямой фаской. В работе [6] с помощью моделирования было показано, что для 1500-V диода эффективной должна быть прямая фаска с углом менее 10° относительно плоскости $p\text{-}n_0$ -перехода; при этом глубина травления SiC должна немного превышать суммарную толщину всех слоев p -типа (около $3\ \mu\text{m}$). Исходя из этого, а также из результатов, показанных на рис. 2 и 3, к травлению предъявлялись следующие требования:

- глубина травления SiC должна составлять не менее $3\ \mu\text{m}$ (при этом скорость травления должна обеспечивать приемлемое морфологическое совершенство протравленной поверхности SiC);

- коэффициент K должен варьироваться в зависимости от заданного значения угла β : при углах β в пределах $6\text{--}10^\circ$ коэффициент K необходимо изменять в пределах от 2.3 до 3.8 (рис. 2);

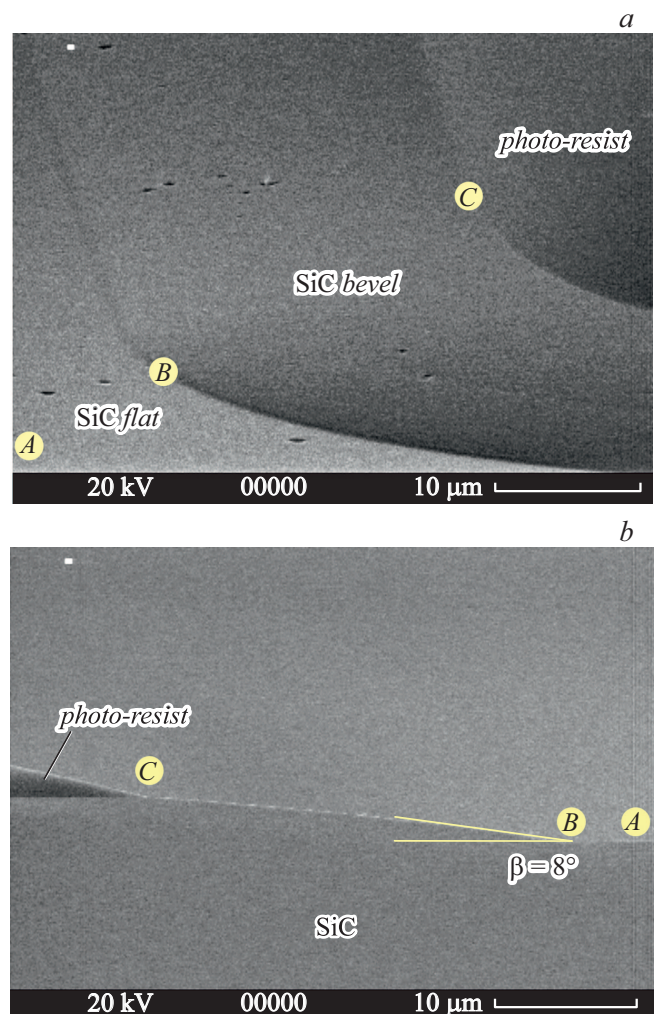


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение протравленной SiC мезаструктуры: *a* — поверхность, *b* — скол. Участок AB — плоское дно, участок BC — пологая боковая стенка с углом наклона 8° .

Параметры селективного травления SiC с маской из фоторезиста

Глубина травления SiC, μm	3.2
Скорость травления SiC, nm/min	53
Скорость травления фоторезиста, nm/min	160
Селективность травления SiC по отношению к фоторезисту	1 : 3
Результирующий угол наклона стенки мезаструктуры (β), $^\circ$	8

— толщина слоя фоторезиста должна составлять не менее $12\mu\text{m}$; это необходимо, например, в случае травления SiC на глубину $3\mu\text{m}$ с селективностью травления по отношению к фоторезисту 1 : 3.8.

Эксперименты по травлению проводились в лабораторном ICP-реакторе, в ВЧ-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 высокое морфологическое качество протравленных поверхностей SiC. Наилучшие результаты, с точки зрения достижения требуемых параметров — глубины травления SiC и угла наклона боковых стенок мезаструктур — были получены при мощности ВЧ-разряда в пределах 20–50 W и давлении газа 0.4 Pa. На рис. 4 показаны микрорельефы, полученные при травлении SiC в данном режиме, а в таблице сведены достигнутые значения параметров травления. Отметим, что полученный экспериментально результат ($\beta = 8^\circ$ при $K = 3$) совпадает с результатом, который предсказывает рассмотренная выше простая модель (рис. 2). Как видно из рис. 4, и дно, и образующиеся стенки мезаструктуры довольно гладкие. При этом на поверхности SiC можно видеть отдельные ямки травления, образование которых обусловлено, по-видимому, наличием в объеме SiC проникающих дислокаций (плотность дислокаций в использованных коммерческих 4H-SiC подложках составляет до 10^3 cm^{-2}).

Заключение

В работе продемонстрировано формирование SiC-мезаструктур (высотой $3\mu\text{m}$) с пологими боковыми стенками (угол наклона 8°) с помощью процесса RIE через маску из фоторезиста. Данная технология может использоваться при изготовлении высоковольтных SiC-приборов с прямой фаской.

Из полученных модельных и экспериментальных результатов следует, что критически важными параметрами, определяющими конечную геометрию формируемых

мезаструктур, являются исходный краевой угол маски и селективность травления SiC по отношению к маске. Как показала практика, на фоторезистивных маскирующих элементах добиться углов менее 20° чрезвычайно сложно, если вообще возможно. Однако технологические проблемы по созданию фоторезистивной маски с малыми углами могут быть решены коррекцией селективности травления. Для варьирования селективности травления могут быть предложены разные подходы. В частности, для увеличения скорости травления фоторезиста (при сохранении скорости травления SiC) может быть опробовано реактивно-ионное травление SiC в смеси фторсодержащего газа с кислородом (в полупроводниковой технологии удаление фоторезиста в кислородной плазме является стандартной технологией). Кроме того, для варьирования селективности перспективными могут быть другие известные методы сухого травления, такие как ионно-лучевое травление под углом 45° к поверхности SiC и реактивное ионно-лучевое травление.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Сыркин А.Л., Попов И.В., Челноков В.Е. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 4. С. 240–243.
- [2] Palmour J.W., Davis R.F., Wallett T.M., Bhasin K.B. // J. Vacuum Sci. Technol. A4. 1986. Vol. 4. N 3. P. 590–593. DOI.org/10.1116/1.573854
- [3] Pan W.S., Steckl A.J. In: SPP Amorphous and Crystalline Silicon Carbide / Ed. by M.M. Rahman, C.Y.-W. Yang, G.L. Harris. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, 1989. P. 217.
- [4] Yano H., Hirao T., Kimoto T., Matsunami H., Shiomi H. // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81. N 25. P. 4772–4774. DOI.org/10.1063/1.1529313
- [5] Ильинская Н.Д., Лебедева Н.М., Задиранов Ю.М., Иванов П.А., Самсонова Т.П., Коньков О.И., Потанов А.С. // ФТП. 2020. Т. 54. Вып. 1. С. 97–102. DOI: 10.21883/FTP.2020.01.48783.9223
- [6] Лебедева Н.М., Ильинская Н.Д., Иванов П.А. // ФТП. 2020. Т. 54. Вып. 2. С. 207–211.
- [7] Иванов П.А., Грехов И.В. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 6. С. 111–117.
- [8] Иванов П.А., Коньков О.И., Самсонова Т.П., Потанов А.С. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. Вып. 3. С. 3–8. DOI: 10.21883/PJTF.2018.03.45572.17025
- [9] Моро У. Микролитография: Принципы, методы, материалы. М: Мир, 1990. 1237 с.