

06.1;06.2;12

Влияние кратковременного отжига на проводимость пористого кремния и переходное сопротивление контакта алюминий–пористый кремний

© С.П. Зимин, Е.П. Комаров

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Поступило в Редакцию 22 июля 1997 г.

Проведены измерения переходных сопротивлений контакта алюминий–пористый кремний (Al–PS) и удельного сопротивления приповерхностной области пористого материала после кратковременного отжига в инертной среде в интервале температур 300–550°С. Показано, что параметры контактов определяются морфологией пор, температурой отжига и проведением операции плазмохимического травления. Для PS, сформированного на *p*-Si, обнаружен эффект уменьшения переходных сопротивлений при отжиге на несколько порядков. Показано, что в этом случае происходит резкое снижение удельного сопротивления приповерхностной области PS. Проведен анализ результатов с точки зрения пассивирующего действия водорода в пористом кремнии.

При создании полупроводниковых структур с активными слоями пористого кремния (PS) необходимо формировать как омические, так и выпрямляющие контакты к пористому слою. В настоящее время в литературе содержатся противоречивые сведения о свойствах контакта металл–пористый кремний и практически отсутствует информация о влиянии термической обработки на электрические параметры такого перехода. Кроме этого, при высоких температурах отжига возможно изменение свойств самого пористого материала. Целью данной работы явилось изучение воздействия кратковременного отжига (300–550°С) в инертной среде на проводимость пористого кремния и переходное сопротивление контактов Al–PS при разных структурных характеристиках пористого слоя.

Исследования проводились на тестовых структурах, геометрия которых описана в [1]. Исходные кремниевые подложки с легирующей примесью бора ($0.03 \Omega \cdot \text{cm}$) и фосфора ($4.5 \Omega \cdot \text{cm}$) имели ориентацию

(111) и (100) соответственно. Формирование пористого слоя проводилось методом анодной электрохимической обработки в электролите на основе плавиковой кислоты при плотности тока анодирования 1 mA/cm^2 в течение 10–60 минут. Полученные слои PS имели толщину 17–90 μm , весовая пористость составляла 16–40% для кремния с дырочным типом проводимости и 5–10% для кремния, легированного фосфором. Морфология пор для кремния *n*- и *p*-типа была различной. Для кремния, легированного фосфором, имели место крупные цилиндрические поры диаметром 1–2 μm , ориентированные параллельно оси [100] и отстоящие друг от друга на расстоянии 3–10 μm [2]. Для кремния, легированного бором, наблюдалась сильноразветвленная сеть мелких пор нанометровых размеров. На образцах–свидетелях проводилась дополнительная операция плазмохимической обработки поверхности PS для удаления поверхностной аморфизированной пленки. На поверхность пористого слоя методом вакуумного напыления наносились алюминиевые контактные площадки одинаковой площади, расположенные в одну линию на равном расстоянии друг от друга. Первоначально контакты Al–PS вжигались в азоте при температуре $T_0 300^\circ\text{C}$ в течение 10 минут. Для определения электрических параметров контактов был применен метод, описанный в [3]. Особенностью исследуемых структур являлось наличие двух слоев с разной величиной удельного сопротивления, причем проводимость подложки значительно превосходит проводимость пористого слоя. Поэтому для исключения шунтирующего действия подложки измерения в рамках методики [3] проводились только в области малых токов, не превышающих 15 μA . При этом предполагалось, что малые напряжения на контактных площадках вызывают дрейф носителей только в приповерхностной области PS. Для оценки величины удельного сопротивления в приповерхностной области пористого материала был применен четырехзондовый метод при ограниченных величинах тока.

Измерения вольтамперных характеристик исследуемых структур Al–PS–Al показали, что при малых плотностях тока через контакт, не превышающих 1 mA/cm^2 , зависимости являются линейными. При больших токах наблюдалось отклонение от линейности, что может быть связано как с шунтирующим действием подложки, так и с неомическим характером контакта. Поскольку разделить эти два явления экспериментально довольно сложно, то следует отметить, что наблюдаемый линейный участок в области малых токов в общем случае не может быть

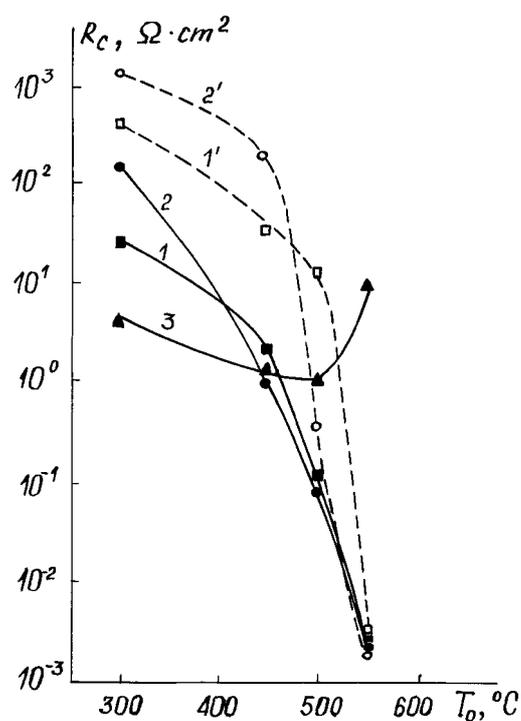


Рис. 1. Зависимость переходного сопротивления контакта Al-PS от температуры отжига для PS на основе p -Si (1, 1', 2, 2') и n -Si (3). Время анодирования: 1 и 1' — 20 min, 2 и 2' — 40 min, 3 — 60 min. На образцах 1' и 2' плазмохимическое травление не проводилось.

отождествлен с омичностью контакта в широком интервале смещений. Такой характер вольтамперной характеристики может быть обусловлен линейностью барьера Шоттки вблизи нулевой точки. Однако экспериментальные результаты позволяют по крайней мере сделать вывод о том, что в области малых плотностей тока через контакт (менее 1 mA/cm^2) переход Al-PS не обладает нелинейными свойствами и, следовательно, эту нелинейность можно исключить при анализе явлений переноса носителей заряда в структурах с пористым кремнием.

Линейный характер вольтамперных характеристик перехода Al-PS при малых токах позволил в рамках методики [3] определить переходные сопротивления контактов R_c . Величины переходных сопротивлений имели широкий интервал значений в зависимости от морфологии пор и от факта проведения операции плазмохимического травления. Если для PS, сформированного на кремнии n -типа, переходные сопротивления составляли $0.6\text{--}18 \Omega \cdot \text{cm}^2$, то для PS, полученного на p -Si, они варьировались в пределах $0.6\text{--}1.3 \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$. Плазмохимическое травление поверхности пористого кремния перед нанесением металла приводило к изменению R_c . В частности, удаление аморфизированной пленки с поверхности PS на p -Si уменьшало переходные сопротивления в 3–10 раз. На рис. 1 представлено изменение переходного сопротивления контактов Al-PS после проведения пошагового кратковременного отжига (5–7 min) в инертной среде N_2 при температуре T_0 (450 – 550°C). Как следует из приведенных зависимостей, для PS на p -Si наблюдается стабильное уменьшение величины R_c при отжиге до значений $(1 - 3) \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$. При этом исчезает разница в электрических свойствах контактов при наличии и отсутствии аморфизированной пленки. Для пористого кремния, сформированного на n -Si, изменения переходных сопротивлений контактов при отжиге были менее выражены (кривая 3).

Поскольку параметры контактов металл–кремний во многом определяются величиной концентрации носителей заряда (проводимостью) в полупроводнике [4], то представлялось интересным сопоставить полученные результаты с данными по измерению удельного сопротивления ρ^* приповерхностной области PS. На рис. 2 приведено изменение величины ρ при пошаговом отжиге. Видно, что в исходном состоянии для PS на p -Si удельное сопротивление приповерхностной области для образцов, имеющих аморфизированную пленку, превышает величину ρ^* для образцов с удаленной пленкой. Проведение термообработки приводит к резкому уменьшению (на несколько порядков) величины удельного сопротивления. Для PS с крупными порами, полученного на кремнии, легированном фосфором, наблюдалось уменьшение удельного сопротивления при отжиге 450, 500°C в 1.5–3 раза, а при обработке 550°C ρ^* незначительно увеличилось. Таким образом, существует корреляция между изменениями переходных сопротивлений контактов и величины удельного сопротивления приповерхностной области пористого материала для PS на n -Si и p -Si.

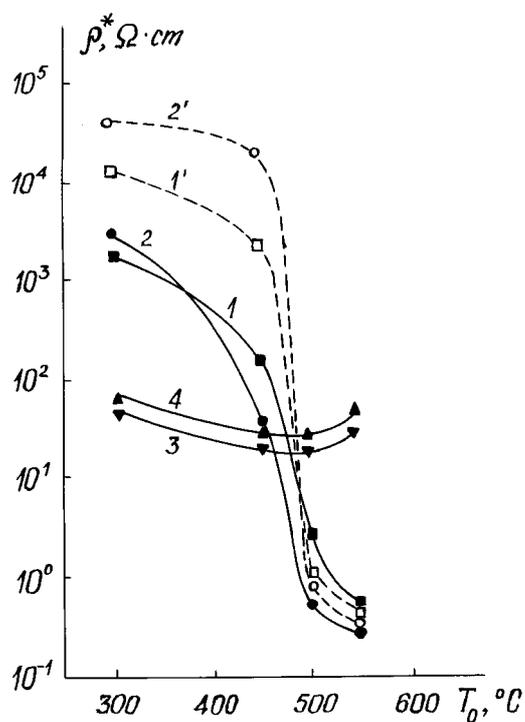


Рис. 2. Влияние температуры отжига на удельное сопротивление приповерхностной области PS. Обозначения 1, 1', 2, 2' — как на рис. 1. Образцы PS 3 и 4 получены на подложке *n*-Si при времени анодирования 40 min (3), 60 min (4) и подвергнуты плазмохимическому травлению.

Для объяснения полученных результатов может быть применена модель, основанная на пассивирующем действии атомов водорода. Известно, что водород в кремнии способен приводить к электрической нейтрализации примесных атомов и уменьшать концентрацию носителей заряда [5,6]. При этом возможно путем кратковременного высокотемпературного отжига восстанавливать электрическую активность примесных атомов [7]. Поскольку в процессе анодной обработки атомы водорода находятся в контакте с кремниевой матрицей, то возможен процесс

диффузии атомов водорода в монокристаллическую матрицу пористого материала [8]. Оценки, проведенные с использованием известных значений коэффициента диффузии водорода в кремнии, показали, что при комнатной температуре за время анодирования глубина проникновения водорода может составить десятые доли микрона. Таким образом, каждая пора имеет вокруг себя обедненную область и для пористого кремния с развитой сетью мелких пор области обеднения могут охватывать весь объем монокристаллической матрицы PS. Для PS с крупными порами, отстоящими достаточно далеко друг от друга, обедненные области будут распространяться только на часть объема матрицы [2]. Если при отжиге действительно происходит эффузия водорода и восстановление электрической активности примеси, то становится понятным, почему наблюдается такое сильное различие в свойствах PS на p -Si и n -Si. В случае PS с крупными порами уменьшение удельного сопротивления при отжиге менее выражено, поскольку увеличение концентрации носителей заряда происходит только в части объема матрицы пористого материала. Кроме того, известно, что в n -Si пассивирующее действие водорода слабее, чем в p -Si [7].

Таким образом, результаты данной работы позволяют говорить о том, что путем кратковременного отжига в инертной среде можно варьировать электрические параметры контакта металл-PS и большое значение при этом имеет изменение проводимости пористого материала. Показано, что значительную роль в изучаемых процессах играет морфология пористого слоя. Процессы изменения проводимости PS при воздействии высоких температур необходимо учитывать при создании многослойных структур высокотемпературными методами, например при осуществлении процессов эпитаксиального роста на PS. Кроме этого, для локального изменения электрических свойств пористого материала и создания обогащенных областей перспективными могут оказаться лазерные или радиационные способы обработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Госкомвуза РФ по фундаментальным исследованиям в области электроники и в области химических технологий.

Авторы выражают глубокую признательность А.А. Лебедеву (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург) за полезную дискуссию о пассивации примесных атомов в пористом кремнии. Авторы благодарны В.А. Рекшинскому и М.И. Маковийчуку за отжиг образцов.

Список литературы

- [1] *Zimen S.P., Kusnetsov V.S., Prokaznikov A.V.* // Appl. Surf. Sci. 1995. V. 91. P. 355–358.
- [2] *Зимин С.П.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 24. С. 46–50.
- [3] *Валиев К.А., Дягилев В.Н., Лебедев В.И., Лубашевский А.В.* Микроомощные интегральные схемы. М.: Сов. радио. 1975. 256 с.
- [4] *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1. 456 с.
- [5] *Pearton S.J., Corrbett J.W., Shi T.S.* // Appl. Phys. A. 1987. V. 43. P. 153–195.
- [6] *Мукашев Б.Н., Тамендаров М.Ф., Токмолдин С.Ж.* // ФТП. 1992. Т. 26. В. 6. С. 1124–1133.
- [7] *Курова И.А., Мелешко Н.В., Ларина Э.В.* и др. // ФТП. 1996. Т. 30. В. 1. С. 12–16.
- [8] *Allongue P., Henry de Villeneuve C., Pinsard L., Bernard M.C.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 941–943.