



УДК 539.234

Влияние плазмохимической модификации поверхности на поперечный электронный транспорт и вольт-амперные характеристики кремниевых структур металл–диэлектрик–полупроводник



Р. К. Яфаров, Д. В. Нефедов

Яфаров Равиль Кяшшафович, доктор технических наук, заведующий лабораторией субмикронной электронно-ионной технологии, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, rigrc@yandex.ru

Нефедов Денис Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории субмикронной электронно-ионной технологии, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, nefedov_dv@rambler.ru

Исследуются закономерности модификации вольт-амперных характеристик (ВАХ) структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) за счет формирования встроенных поверхностных потенциалов. Поверхностные потенциалы образуются при получении атомарно чистой поверхности кристаллов кремния с использованием микроволновой плазменной микрообработки. Целью работы является исследование влияния плазменной микрообработки в различных химически активных газовых средах на свойства кремниевых МДП структур. Микроволновая плазменная микрообработка подзатворной области проводилась в среде хладона-14 или аргона. Далее на подзатворную область структуры в том же технологическом цикле последовательно осаждались герметизирующий туннельно тонкий (10–20 нм) слой карбида кремния и слой диоксида кремния толщиной 0.5 мкм. На области стока и истока осаждался слой аморфного кремния толщиной 20 нм. В ходе измерения вольт-амперных характеристик экспериментально установлено и предложена интерпретация влияния поверхностных потенциалов на перенос электронов и крутизну вольт-амперных характеристик кремниевых устройств металл–диэлектрик–полупроводник.

Ключевые слова: микроволновая плазма, металл–диэлектрик–полупроводник, встроенные поверхностные потенциалы, перенос электронов.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-1-76-82>

Введение

Важной особенностью полупроводников является сильная зависимость их электрических и оптических свойств от состояния поверхности и способов поверхностной обработки [1]. При любых поверхностных обработках полупроводниковые кристаллы-подложки помимо собственных поверхностных состояний, обусловленных прерыванием периодичности

потенциала кристаллической решетки, приобретают и другие, несобственные поверхностные состояния, обусловленные возмущением потенциала идеальной атомно-чистой поверхности [2]. Наличие локальных поверхностных уровней энергии приводит к тому, что электроны и дырки могут «прилипнуть» к поверхности, образуя поверхностный электрический заряд. При этом под поверхностью формируется равный по величине и противоположный по знаку пространственный заряд, который приводит к перераспределению подвижных носителей заряда и изменению приповерхностных свойств полупроводников [3]. Подобная электронная модификация проявляется в ослаблении явлений, связанных с использованием эффектов поля, люминесценции, фото- и поверхностной проводимости, в изменении работы выхода [4, 5].

Цель работы – исследование влияния плазменной микрообработки в различных химически активных газовых средах на свойства кремниевых МДП структур.

Материалы и методы

В экспериментах использовались кристаллы кремния (100) различных типов проводимости с удельным сопротивлением 0.01... 0.02 Ом·см. После низкоэнергетичного СВЧ плазмохимического травления [6, 7] в среде хладона-14 или аргона на подзатворную область структуры в том же технологическом цикле осаждались последовательно герметизирующий туннельно тонкий (10–20 нм) слой карбида кремния и слой диоксида кремния толщиной 0.5 мкм. На области стока и истока осаждался слой аморфного кремния толщиной 20 нм. Затем на все области наносились металлические контакты. Фиксирование данных измерений производилось с применением АЦП. Подача напряжений осуществлялась с помощью двухканального блока фирмы ATEN APS3005S-3D (Китай).



Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены ВАХ МДП структур при положительной полярности напряжения на затворе для кристаллов кремния *p*-типа и отрицательной полярности для кристаллов кремния *n*-типа после их плазменного травления в различных плазмообразующих средах. Видно, что для кристаллов *p*-типа при разности потенциалов исток-сток около 3.5 В наблюдается пересечение ВАХ. При $U < 3.5$ В большие токи при одинаковых напряжениях реализуются при травлении

кристаллов кремния в плазме хладона-14. При $U = 2-2,5$ В крутизна ВАХ на структуре, обработанной в плазме аргона, увеличивается и при $U > 3.5$ В токи при травлении в плазме аргона превышают токи в структурах, обработанных в плазме хладона-14. При плазменной обработке кристаллов кремния *n*-типа в среде хладона-14 с отрицательным потенциалом на затворе начало роста тока происходит при меньшем на 3.5–4 В напряжении между истоком и стоком, чем в плазме аргона.

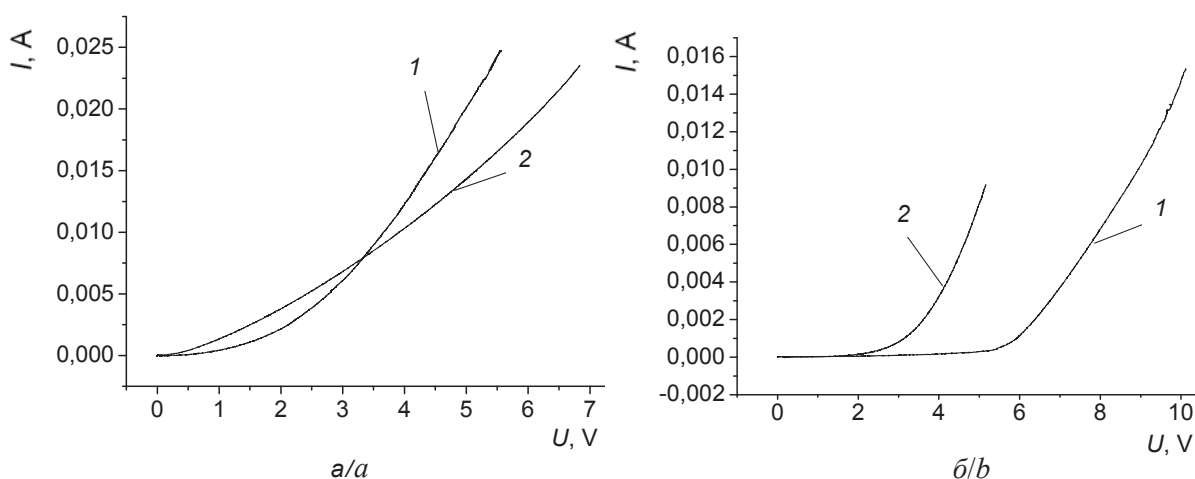


Рис. 1. ВАХ МДП структур при положительной полярности напряжения на затворе для кристаллов кремния *p*-типа (а) и отрицательной полярности для кристаллов кремния *n*-типа после микроволнового плазмохимического травления в различных плазмообразующих средах: 1 – аргоне; 2 – хладоне-14

Fig. 1. VAC of MIS structures with a positive voltage polarity at the gate for *p*-type silicon crystals (a) and a negative polarity for *n*-type silicon crystals (b) after microwave plasma-chemical etching in various plasma-forming media: 1 – argon, 2 – freon-14

Полученные закономерности изменения ВАХ МДП структур в зависимости от вида плазмообразующей среды при плазменном травлении кристаллов кремния могут быть интерпретированы следующим образом. При использовании низкоэнергетичной плазмы аргона травление пластин кремния осуществляется по ионно-физическому механизму за счет распыления атомов кремния и частиц его естественного окисла ускоренными ионами. За счет инертности аргона какие-либо химические связи с поверхностными атомами кремния не образуются. В результате этого поверхность кремния приобретает структуру и плотность оборванных (ненасыщенных) связей, характерных для атомно-чистой поверхности кремния заданной кристаллографической ориентации [5]. При этом первоначальная плотность ненасыщенных связей для атомно-чистых поверхностей кремния заданной кристаллографической ориентации остается неизменной для кристаллов обоих типов проводимостей.

При ионно-плазменной обработке кремния в плазме хладона-14 (CF_4) химически активными частицами являются ионы C^+ , CF_n^+ , где $n = 1..4$, а также радикалы CF_n и нейтральные атомы фтора, которые при хемосорбции образуют адкомплексы Si-C и Si-F [3–6]. Хемосорбированные комплексы Si-C и Si-F имеют сильные энергии химической связи (4.55 и 5.6 эВ соответственно) и пассивируют часть оборванных (ненасыщенных) химических связей поверхностных атомов кремния, уменьшая их поверхностную плотность (рис. 2).

Формирование ненасыщенных электронных связей при плазмохимическом травлении приводит к появлению локализованных на поверхности полупроводника состояний, которые в зависимости от степени сродства к электрону и дырке, положения уровня Ферми на поверхности могут проявлять себя как донорные или акцепторные ловушки захвата или рекомбинационные центры [4, 8]. Прочность ненасыщенных

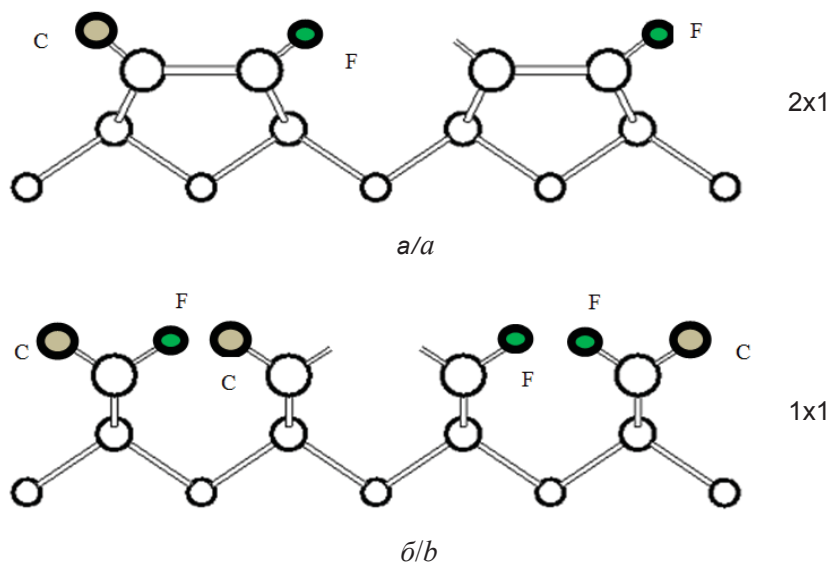


Рис. 2. Схема расположения хемосорбированных атомов углерода и фтора на поверхностях Si(100) после плазменной обработки в хладоне: а – после димерной реконструкции Si (100) 2×1; б – идеальной нереконструированной Si (100) 1×1
Fig. 2. Layout of chemisorbed carbon and fluorine atoms on Si (100) surfaces after plasma treatment in freon: a – after dimeric reconstruction of Si (100) 2×1, b – ideal unreconstructed Si (100) 1×1

электронных связей существенно меньше, чем прочность насыщенных ковалентных связей, которые имеют место в равновесных электронных конфигурациях объемных атомов. Кроме того, присутствие электронных поверхностных состояний на поверхности полупроводника возмущает электронную структуру в объеме и делает ее энергетически невыгодной. Поэтому поверхностные атомы кремния, имеющие ненасыщенную химическую связь, действуют как дырочные ловушки, заряжаясь положительно при отдаче электрона в валентную зону полупроводника (такие поверхностные состояния, как известно, называются донорными). Это приводит к образованию на поверхности трехвалентного кремния с положительным зарядом, поверхностная плотность которого, как показано выше, зависит от вида плазмообразующей среды. При СВЧ плазменной обработке кремния в атмосфере хладона-14 в результате образования адкомплексов Si-C и Si-F уменьшается, по сравнению с обработкой в аргоне, величина поверхностного заряда Q_{ss} и, как следствие, уменьшается величина встроенного поверхностного потенциала с направлением вектора электрического поля в глубь полупроводника. Для кристаллов кремния электронного типа проводимости за счет высокой электрокомпенсированности [5] встроенные поверхностные потенциалы существенно ниже, чем

для кристаллов дырочного типа проводимости, в которых электроны не являются основными носителями.

У акцепторных полупроводников наличие положительного поверхностного заряда приводит, как известно, к обеднению приповерхностной области основными носителями. Ширина области пространственного заряда Q_{sp} и сопротивление обедненного слоя тем больше, чем больше пространственный заряд, который в случае свободной поверхности и отсутствии внешних полей равен и противоположен по знаку заряду в поверхностных состояниях.

На рис. 3 приведены ВАХ поперечного электронного транспорта в гетероструктурах на основе кристаллов кремния (100) *p*-типа и туннельно-тонкой (герметизирующей) пленкой аморфного карбида кремния. Исследования проводились при прямой полярности подключения Si (100) *p*-типа к источнику питания. В качестве рабочих газов для плазмохимического удаления пленки естественного окисла кремния использовались хладон-14 и аргон. Осаждение аморфного гидрогенизированного карбида кремния (a-SiC:H) толщиной 10 нм производилось после плазменной очистки кристаллов в СВЧ плазме смеси паров этанола и моносилаана. Затем на поверхность гетероструктуры методом вакуумного термического осаждения наносились

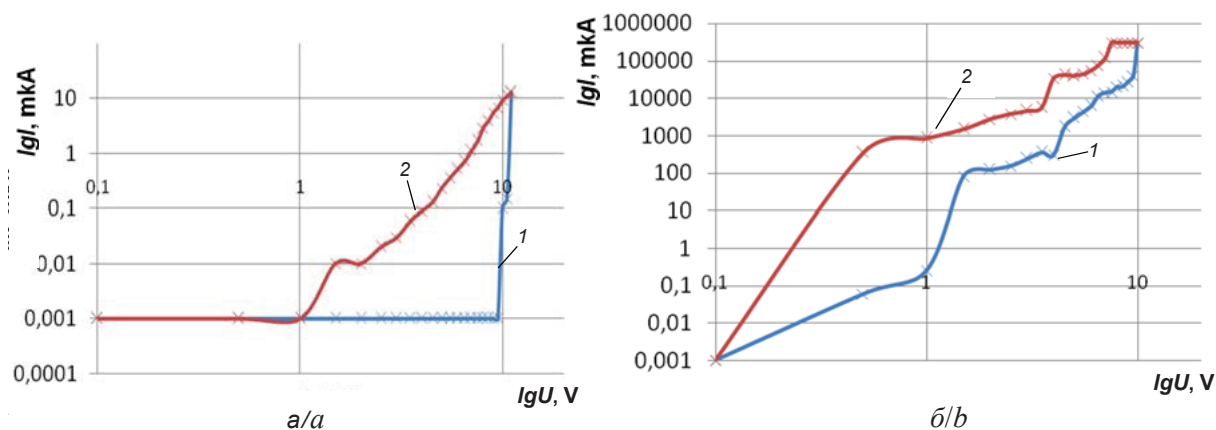


Рис. 3. ВАХ поперечного транспорта электронов в структурах a-SiC : H на кремнии (100) *p*-типа, полученных при прямом (1) и обратном (2) изменении напряжения после плазменного травления кристаллов кремния в СВЧ плазме различных газовых сред: *a* – аргон, *б* – хладон

Fig. 3. VAC of the transverse electron transport in a-SiC : H structures on *p*-type silicon (100) obtained by direct (1) and reverse (2) voltage changes after plasma etching of silicon crystals in the microwave plasma of various gaseous media: *a* – argon, *b* – freon

контактные площадки из алюминия диаметром 2 мм. Измерялись ВАХ образцов при изменении напряжения в интервале от 0 до 10 В в прямом и обратном направлениях. Можно видеть, что значение напряжения, при котором наблюдается начало роста тока, составляет около 10 В при травлении естественного оксидного покрытия кремния в плазме аргона, а при травлении в плазме хладона-14 задержки в росте тока не наблюдается. Причем участок начала роста токов после обработки в аргоне носит характер достаточно резкого (скачкообразного) переключения. Перепад токов при этом составляет около 4 порядков от начального уровня. После обработки пластин кремния в плазме хладона изменение токов в том же интервале изменения напряжений на гетероструктуре составляет более 8 порядков от исходного уровня. При изменении напряжения в обратном направлении токи через структуры во всех случаях выше, чем при изменении напряжения в прямом направлении.

Как известно [4, 9], подобные виды ВАХ характерны для токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ), которые имеют место в диэлектриках и высокоомных полупроводниковых материалах с ловушками захвата носителей. Согласно теории эти ловушки создают глубокие уровни энергии в запрещенной зоне (так что обратным тепловым выбросом электронов можно пренебречь) и равномерно распределены по объему полупроводника. Участок ВАХ с резким ростом тока, который по терминологии теории ТОПЗ называется участком «полного заполнения

ловушек» (ПЗЛ), является границей между режимом малых омических токов, существующих благодаря присутствию в полупроводниковой структуре некоторого количества равновесных электронов проводимости n_0 и сильных токов, соответствующих участку с линейным ростом тока, который по терминологии ТОПЗ называется «ловушечным квадратичным законом» (ЛКЗ). На участке малых омических токов инжектируемые в гетероструктуру из металлического контакта электроны захватываются ловушками – происходит формирование области пространственного заряда, индуцированное электрическое поле которого препятствует проникновению электронов из контакта в гетероструктуру. На участке ПЗЛ в начальный момент резкого увеличения тока от напряжения все ловушки оказываются заполненными инжектированными электронами, и тогда их концентрация в зоне проводимости начинает увеличиваться, что и приводит к резкому возрастанию тока. На следующем участке ВАХ в области сформировавшегося пространственного заряда токопрохождение описывается законом Мотта.

Напряженность электростатических полей, созданных однократно ионизированными поверхностными атомами кремния, пропорциональна поверхностной плотности зарядов и может составлять, например, для $N_s = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ величину порядка 10^8 В/см [5]. В случае прямого подключения гетероструктуры на кремнии *p*-типа к источнику питания внутреннее поле, вызванное присутствием поверхностных



зарядов, будет направлено противоположно внешнему электрическому полю, что приводит к ослаблению последнего. Поэтому ток через структуру при изменении внешнего напряжения возникает только после того, как напряженность от внешнего поля превысит напряженность поля от встроенного заряда [10].

При плазменной обработке в хладоне-14 в результате образования адкомплексов Si-C и Si-F уменьшается внутреннее электрическое поле и, как следствие, степень обеднения приповерхностной области основными носителями. Вследствие этого порог «включения» проводимости в гетероструктуре после плазменной обработки подложки кремния в среде аргона выше, чем при обработке в хладоне-14.

В результате преодоления встроенного потенциала для обеспечения поперечного транспорта электронов в гетероструктуре «действующее» напряжение в системе уменьшается. Это уменьшение тем больше, чем больше величина встроенного потенциала. Вследствие этого при приложении одинаковой величины внешнего электрического поля величина тока через гетероструктуры с обработкой в различных плазмообразующих средах будет увеличиваться при переходе от аргона к хладону.

После преодоления внутреннего электростатического поля на границе полупроводника и α -SiC:H и заполнения всех ловушек в объеме структуры устанавливается термодинамически равновесный для данных условий транспорт носителей заряда, при котором инжектированный заряд носителей компенсирует все связанные электростатические заряды внутри объема структуры. Это состояние достигается после резкого увеличения тока на ВАХ. При изменении с этого момента внешнего электрического напряжения на исследуемой структуре в обратном направлении в результате снижения внешней инжекции происходит постепенное уменьшение пространственного заряда подвижных носителей. Это приводит к уменьшению тока через структуру, который, однако, остается большим, чем при таком же значении напряжения, но при изменении напряжения в прямом направлении, когда не все ловушки были заполнены. При еще меньших внешних напряжениях и концентрациях подвижных носителей, когда их пространственный заряд становится сравнимым с электростатическим внутренним потенциалом, подвижность носителей из-за изменения условий рассеяния резко падает.

Поэтому при обработке кремния в аргоне, где плотности поверхностных зарядов в отличие от обработки в хладоне наиболее высокие, наблюдается переключение в исходное «непроводящее» состояние. Напряжение переключения характеризует величину внутреннего электростатического поля [11].

При положительной полярности на затворе МДП структуры неосновные носители заряда в полупроводнике p -типа туннелируют в ловушечные центры на границе кристалла, частично нейтрализуя приложенный внешний потенциал. Так как при травлении в плазме аргона встроенный пространственный потенциал больше, чем при плазмохимическом травлении в среде хладона-14, то ослабление внешнего поля больше в случае аргона. Благодаря этому концентрация электронов в канале проводимости под затвором в случае аргона ниже и при одинаковой небольшой разности потенциалов исток-сток ток в структуре меньше по сравнению с обработкой в плазме хладона-14.

При увеличении разности потенциалов между истоком и стоком увеличивается дрейфовая скорость носителей заряда. В случае обработки в плазме хладона суммарное поле, действующее на электроны, больше. В результате этого среднее время свободного пробега электронов в области пространственного заряда уменьшается, и, как следствие, уменьшается их подвижность [4]. По сравнению с обработкой в плазме аргона это приводит к большему диффузному рассеянию электронов при соударениях с поверхностью и уменьшению скорости роста тока с увеличением разности потенциалов между истоком и стоком (см. рис.1).

В случае плазменной обработки кристаллов кремния n -типа в среде хладона-14 отрицательное суммарное поле затвора меньше, чем после обработки в среде аргона. Это меньше обедняет канал проводимости основными носителями. В результате этого тока ВАХ в случае обработки в аргоне начинают увеличиваться при более высоком напряжении, а абсолютные их значения уменьшаются. Смещение между ВАХ структур обработанных в плазме аргона и хладона составляет около 3 В (см. рис. 1, б).

Заключение

Влияние встроенного поверхностного потенциала на крутизну ВАХ МДП устройств на основе кристаллов кремния различных типов проводимости, а также величину их несим-



метричности при изменении полярности на затворе может быть использовано, например, при создании специализированных устройств записи и считывания информации, TVS диодов с несимметричной прямой и обратной ветвями ВАХ, других приборов и устройств наносистемной техники.

Список литературы

1. *Bhattacharyya R., Mukherjee C., Sushil Kumar, Dixit P. N.* Cold plasma processing for some novel material development // AIP Conference Proceedings. 2015. Vol. 1670. P. 020002. DOI: 10.1063/1.4926681
2. *Geissbuhler J., de Wolf S., Demareux B., Seif J. P., Alexander D. T., Barraud L., Ballif C.* Amorphous/crystalline silicon interface defects induced by hydrogen plasma treatments // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 102. P. 231604. DOI: 10.1063/1.4811253
3. *Fujino Y., Kita K.* Estimation of near-interface oxide trap density at SiO₂/SiC metal-oxide-semiconductor interfaces by transient capacitance measurements at various temperatures // J. Appl. Phys. 2016. Vol. 120. P. 085710. DOI: 10.1063/1.4961871
4. *Бонч-Бруевич В. Л., Калашиников С. Г.* Физика полупроводников. М. : Наука, 1977. 672 с.
5. *Оура К., Лифшиц В. Г., Саранин А. А.* Введение в физику поверхности. М. : Наука, 2006. 490 с.
6. *Яфаров Р. К.* Неравновесная СВЧ плазма низкого давления в научных исследованиях и разработках микро- и нанoeлектроники // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15, вып. 2. С. 16–31.
7. *Яфаров Р. К.* Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий. М. : Физматлит, 2009. 216 с.
8. *Mews M., Mader C., Traut S., Sontheimer T., Winnicke O., Korte L., Rech B.* Solution-processed amorphous silicon surface passivation layers // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 105. P. 122113. DOI: 10.1063/1.4896687
9. *Kudo T., Ito T., Nakajima A.* Characteristics of metal–oxide–semiconductor field-effect transistors with a functional gate using trap charging for ultralow power operation // J. Vac. Sci. Technol. B. 2013. Vol. 31. P. 012206. DOI: 10.1116/1.4773576
10. *Moore J. E., Dongaonkar S., Chavali R. V. K., Alam M. A., Lundstrom M. S.* Correlation of Built-In Potential and I–V crossover in Thin-Film Solar Cells // IEEE Journal of Photovoltaics. 2014. Vol. 4. iss. 4. P. 1138–1148. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2014.2316364
11. *Mueller F., Konstantaras G., van der Wiel W. G., Zwanenburger F. A.* Single-charge transport in ambipolar silicon nanoscale field-effect transistors // Appl. Phys. Lett. 2015. Vol. 106. P. 172101. DOI: 10.1063/1.4919110

Образец для цитирования:

Яфаров Р. К., Нефедов Д. В. Влияние плазмохимической модификации поверхности на поперечный электронный транспорт и вольт-амперные характеристики кремниевых структур металл–диэлектрик–полупроводник // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2019. Т. 19, вып. 1. С. 76–82. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-1-76-82>

Influence of Plasma-Chemical Modification of the Surface on Transverse Electron Transport and VAC of Silicon MIS Structures

R. K. Yafarov, D. V. Nefedov

Ravil K. Yafarov, <https://orcid.org/0000-0001-6678-511X>, Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya Str., Saratov 410019, Russia, pirpc@yandex.ru

Denis V. Nefedov, <https://orcid.org/0000-0002-8695-5777>, Saratov Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, 38 Zelenaya Str., Saratov 410019, Russia, nefedov_dv@rambler.ru

Background and Objectives: The laws governing the modification of the current-voltage characteristics of the metal-insulator-semiconductor structures due to the formation of embedded surface potentials are investigated. Surface potentials are formed when an atomically clean surface of silicon crystals is produced using microwave plasma micromachining. The aim of the work is to study the effect of plasma micromachining in various chemically active gaseous media on the properties of silicon MIS structures. **Materials and Methods:** In the experiments, silicon (100) crystals of various types of conductivity with a specific resistance of

0.01 ... 0.02 Ohm · cm were used. After low-energy microwave plasma-chemical etching in freon-14 or argon medium, the sequentially sealing tunnel-thin (10–20 nm) silicon carbide layer and silicon dioxide layer of 0.5 microns thick were deposited on the gate region of the structure in the same technological cycle. A layer of amorphous silicon with a thickness of 20 nm was deposited on the drain and source. Then metal contacts were applied to all areas. The measurement data were recorded using the ADC. The supply voltage was carried out using a two-channel block ATEN APS3005S-3D. **Results:** With a positive polarity at the gate of the MIS structure, minority charge carriers in the *p*-type semiconductor tunnel into trap centers at the crystal boundary, partially neutralizing the applied external potential. Since the built-in spatial potential is larger during etching in the argon plasma than that with plasma-chemical etching in the freon-14 medium, the weakening of the external field is greater in the case of argon. In the case of plasma processing of *n*-type silicon crystals in the medium of freon-14, the negative total gate field is less than after the treatment in the argon medium. **Conclusion:** The influence of the built-in surface potential on the slope of the VAC of MIS devices based on silicon crystals of various types of conductivity, as well as their asymmetry upon changing the polarity on the gate can be used, for example, when creating specialized information recording and reading devices, TVS diodes with asymmetric direct and reverse branches VAC, other devices and devices of the nanosystem technology. **Keywords:** microwave plasma, metal-dielectric-semiconductor, built-in surface potentials, electron transfer.



References

1. Bhattacharyya R., Mukherjee C., Sushil Kumar, Dixit P. N. Cold plasma processing for some novel material development. *AIP Conference Proceedings*, 2015, vol. 1670, pp. 020002. DOI: 10.1063/1.4926681
2. Geissbuhler J., De Wolf S., Demareux B., Seif J. P., Alexander D. T., Barraud L., Ballif C. Amorphous/crystalline silicon interface defects induced by hydrogen plasma treatments. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, vol. 102, pp. 231604. DOI: 10.1063/1.4811253
3. Fujino Y., Kita K. Estimation of near-interface oxide trap density at SiO₂/SiC metal-oxide-semiconductor interfaces by transient capacitance measurements at various temperatures. *J. Appl. Phys.*, 2016, vol. 120, pp. 085710. DOI: 10.1063/1.4961871
4. Bonch-Bruevich V. L., Kalashnikov S. G. *Fizika poluprovodnikov* [Semiconductor physics]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 672 p. (in Russian).
5. Oura K., Lifshic V. G., Saranin A. A. *Vvedenie v fiziku poverhnosti* [Introduction to surface physics]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 490 p. (in Russian).
6. Yafarov R. K. Nonequilibrium the Microwave Plasma of Low Pressure in Scientific Researches and Development Micro and Nanoelectronics. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2015, vol. 15, iss. 2, pp. 16–31 (in Russian).
7. Yafarov R. K. *Fizika SVCh vakuumno-plazmennyyh nanotekhnologij* [Physics of microwave vacuum plasma nanotechnology]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 216 p. (in Russian).
8. Mews M., Mader C., Traut S., Sontheimer T., Wunnicke O., Korte L., Rech B. Solution-processed amorphous silicon surface passivation layers. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 105, pp. 122113. DOI: 10.1063/1.4896687
9. Kudo T., Ito T., Nakajimaa A. Characteristics of metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with a functional gate using trap charging for ultralow power operation. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2013, vol. 31, pp. 012206. DOI: 10.1116/1.4773576
10. Moore J. E., Dongaonkar S., Chavali R. V. K., Alam M. A., Lundstrom M. S. Correlation of Built-In Potential and I–V crossover in Thin-Film Solar Cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, vol. 4, iss. 4, pp. 1138–1148. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2014.2316364
11. Mueller F., Konstantaras G., van der Wiel W. G., Zwanenburga F. A. Single-charge transport in ambipolar silicon nanoscale field-effect transistors *Appl. Phys. Lett.*, 2015, vol. 106, pp. 172101. DOI: 10.1063/1.4919110

Cite this article as:

Yafarov R. K., Nefedov D. V. Influence of Plasma-Chemical Modification of the Surface on Transverse Electron Transport and VAC of Silicon MIS Structures. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2019, vol. 19, iss. 1, pp. 76–82 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2019-19-1-76-82>
