

Формирование встроенного потенциала в кристаллах кремния (100) при СВЧ плазменной микрообработке

© Р.К. Яфаров[¶]

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Саратов, Россия

(Получена 30 мая 2013 г. Принята к печати 19 июня 2013 г.)

Приведены результаты исследований закономерностей влияния на электронные свойства поверхности монокристаллов кремния кристаллографической ориентации (100) с естественным оксидным покрытием низкоэнергетичной СВЧ плазменной микрообработки в различных плазмообразующих средах. Рассмотрены модельные механизмы процессов и факторы, обеспечивающие устойчивую модификацию электронных свойств поверхности кристаллов кремния за счет формирования встроенных поверхностных потенциалов, определяемых химической активностью используемых рабочих газов при плазменной микрообработке в условиях слабой адсорбции. Показана принципиальная возможность активного формирования электронных свойств поверхности полупроводниковых кристаллов с целью расширения их электрофизических и функциональных свойств.

1. Введение

Актуальными задачами современного полупроводникового материаловедения являются получение атомно-чистых поверхностей, создание квантово-размерных слоев и гетерограниц с заданным составом и структурным совершенством. Это обусловлено высокой чувствительностью электронных свойств материалов к дефектам и неоднородностям структуры. Проблема совершенства атомной структуры поверхностей и переходных слоев полупроводниковых систем, создаваемых с использованием различных технологических методов и приемов обработки, приобретает особое значение в связи с развитием нанотехнологий и изучением квантовых и одноэлектронных эффектов, при разработке новых материалов и устройств полупроводниковой микро-, опто- и наноэлектроники.

Сохранение электрофизических характеристик полупроводниковых систем при технологических обработках требует минимизации последствий их влияния на структуру и электронные свойства вблизи поверхности, которые сильно отличаются от электронных свойств в объеме исходных полупроводниковых материалов и наноструктур. Дополнительные модификации вносит реконструкция поверхности. Модификации касаются перераспределения плотности заряда в приповерхностной области и появления, помимо собственных поверхностных состояний, обусловленных прерыванием периодичности кристаллической решетки полупроводника, других, несобственных поверхностных состояний. Последние обусловлены возмущениями потенциала идеальной поверхности, локализуются вблизи дефектов их порождающих и связаны и используемыми методами поверхностной обработки. Такая модификация поверхностей проявляется прежде всего в ослаблении явлений, связанных с использованием эффектов поля, люминесценции, фото- и поверхностной проводимости, в изменении

работы выхода и др. [1,2]. Однако, с другой стороны, это может позволить в определенной степени активно формировать электронные свойства поверхности обрабатываемых полупроводниковых кристаллов.

Существуют различные методы получения атомарно-чистых поверхностей материалов [1,3]. Каждый из них имеет определенные преимущества и недостатки. Поэтому универсальной процедуры очистки не существует. Для каждого материала, как правило, требуется индивидуальная методика или даже комбинация нескольких методик. В настоящее время наиболее перспективным методом получения атомарно-чистых поверхностей представляется низкоэнергетическое травление. Так, одним из наиболее распространенных методов очистки кристаллов от поверхностных загрязнений является распыление ионами инертных газов (обычно для этих целей используется Ar^+) вместе с верхним слоем образца. Однако этот метод имеет отрицательный побочный эффект: ионная бомбардировка разрушает структуру поверхности. Поэтому после бомбардировки необходим отжиг, который восстанавливает кристаллическую структуру поверхности и удаляет атомы Ar, внедренные в приповерхностный слой и адсорбированные на поверхности.

При получении атомарно-чистых поверхностей кристаллов в плазмохимических средах, очевидно, необходимо учитывать возможность образования на поверхности химических соединений, которые могут существенным образом повлиять на процессы модификации поверхностной структуры полупроводников и их электронные свойства. Например, широко известны положительные результаты обработки структур арсенида галлия в низкоэнергетической водородной плазме, приводящей к улучшению оптоэлектронных свойств приборов, изготовленных на их основе [4,5].

Одним из наиболее востребованных материалов современной микро- и наноэлектроники остается монокристаллический кремний. Так, в последнее время благодаря созданию квантово-размерных структур на кремнии

[¶] E-mail: pirpc@yandex.ru

преодолена трудность его использования в фотоэлектронике из-за вероятности излучательной рекомбинации, обусловленной запретом на прямые переходы носителей в процессе рекомбинации, и тем самым получен новый импульс его широкого применения в названных областях науки и техники.

В производстве кремниевых интегральных схем, кроме качества структуры поверхности, большое значение имеет выбор кристаллографической ориентации кристаллов-подложек, который предопределен особенностями строения решетки полупроводникового материала и изготавливаемых на его основе приборов. Так, традиционно биполярные схемы формируют на подложках кремния с ориентацией (111), а МОП — приборы на подложках с ориентацией (100). Это обусловлено тем, что плотность поверхностных состояний на подложках с ориентацией (100) почти на порядок меньше, по сравнению с ориентацией (111) [6]. Естественно предположить, что плазменная обработка в процессах получения атомно-чистых поверхностей и создания ИС может оказывать существенное влияние на модификацию их электронной структуры.

Цель работы заключалась в исследовании влияния низкоэнергетичной СВЧ плазменной микрообработки в различных газовых средах поверхности пластин монокристаллического кремния кристаллографической ориентации (100) на электронные свойства гетероструктур, функционирующих на их основе.

2. Методики и результаты экспериментов

Эксперименты проводились в вакуумной установке с использованием СВЧ ионно-плазменного источника, описанного в работе [7]. Мощность СВЧ излучения и индукция магнитного поля, соответствующая возникновению в зоне газового разряда электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), составляли соответственно 250 Вт и 875 Гс. Давление рабочих газов в процессе плазменной обработки было равным 0.1 Па и обеспечивало выполнение условий ЭПР, при котором степень ионизации плазмы составляла около 5% [8].

В качестве рабочих газов для получения атомно-чистой поверхности пластин монокристаллического кремния (100) *p*-типа, пассивированных тонкой пленкой естественного окисла, использовались хладон-14, аргон и водород. Величины ускоряющих напряжений на подложкодержателе в процессах плазменного травления кремния были фиксированными и составляли –100 В. В соответствии с природой используемого рабочего газа обработка кремниевой пластины с естественным окислом осуществляется в режимах ионно-плазменного травления в случае использования аргона или реактивного ионно-плазменного травления в случае использования хладона-14 или водорода. Распыленные поверхностные атомы кремния при ионно-плазменном травлении и

образующиеся летучие кремнийсодержащие продукты реакций в случае реактивного ионно-плазменного травления откачиваются вакуумной системой.

После плазменной очистки пластин кремния в одном вакуумной технологическом цикле осуществлялось осаждение в СВЧ плазме смеси паров этанола и моносилана пленочных структур аморфного гидрогенизированного карбида кремния (*a*-SiC:H) толщиной 10 нм. Затем на поверхность гетероструктуры методом вакуумного термического осаждения наносились металлические контакты диаметром 2 мм.

В полученных структурах исследовался поперечный электронный транспорт с прямой полярностью подключения к источнику питания. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) производились с использованием универсального мультиметра Keithley 2000. Измерялись вольт-амперные характеристики образцов при изменении внешнего напряжения в интервале от 0 до 10 В в прямом и обратном направлениях.

На рис. 1 приведены в логарифмических координатах ВАХ поперечного электронного транспорта в пленочных структурах *a*-SiC:H, полученных в одинаковых режимах осаждения на кристаллах кремния (100) после их травления в различных плазмообразующих газовых средах. Наблюдается закономерность: при изменении напряжения в одном и том же интервале значений максимальные токи через гетероструктуру „кремний–туннельно-тонкая пленка *a*-SiC:H“ увеличиваются на порядки величин в ряду аргон–водород–хладон, а значения напряжений, при которых наблюдаются начала роста токов, напротив, уменьшаются от примерно 10 В при травлении естественного оксидного покрытия кремния

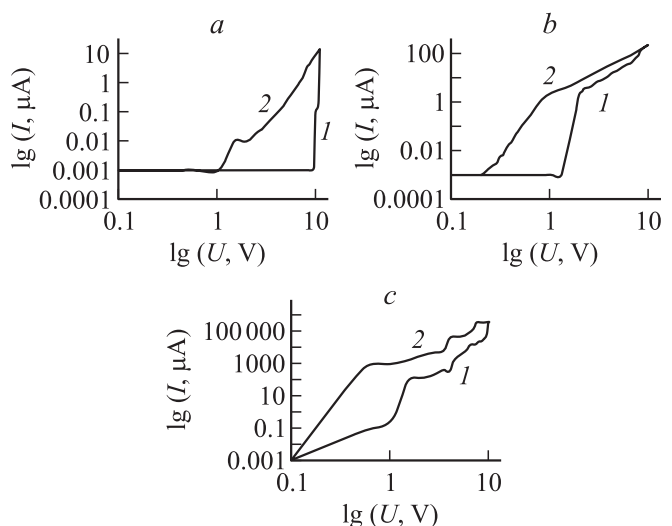


Рис. 1. ВАХ поперечного транспорта электронов в пленочных структурах *a*-SiC:H на кремнии (100) *p*-типа, полученных при прямом (1) и обратном (2) изменении напряжения после обработки кремния в СВЧ плазме различных газовых сред: а) аргон, б) водород, в) хладон (на осях графиков токи представлены в мкА, напряжения в В).

в плазме аргона, 1.3–1.4 В — при травлении в плазме водорода и 0.1 В — при травлении в плазме CF_4 . Причем участки начала роста токов после обработки в аргоне и водороде носят характер достаточно резкого (практически скачкообразного) переключения. Перепад токов при этом составляет для плазменной обработки в аргоне 4 порядка, для обработки в плазме водорода свыше 5 порядков, а при обработке в плазме CF_4 — около девяти порядков от начального уровня. Плотности токов в последнем случае достигали значений 15 A/cm^2 [9]. При изменении напряжения в обратном направлении токи через структуры во всех случаях выше, чем при изменении напряжения в прямом направлении.

3. Обсуждение результатов

3.1. Взаимосвязь ВАХ гетероструктур и СВЧ плазмохимической микрообработки кремния в различных газовых средах

Как известно [2], 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 гетроструктуру из металлического контакта электроны захватываются ловушками — происходит формирование области пространственного заряда, индуцированное электрическое поле которого препятствует проникновению электронов из контакта в гетроструктуру. 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 приводит к резкому возрастанию тока. На следующем участке ВАХ в области сформировавшегося пространственного заряда токопроводящее состояние описывается законом Мотта. В этом случае ток пропорционален квадрату напряжения и обратно пропорционален кубу толщины пленки:

$$j = (9/8)\tau_M\sigma_0\mu U^2 L^{-3},$$

где τ_M — максвелловское время релаксации, μ — подвижность носителей заряда, σ_0 — электропроводность

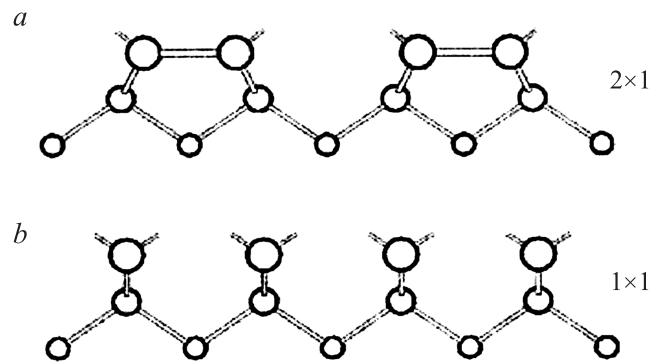


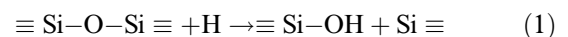
Рис. 2. Схематическое изображение ненасыщенных поверхностных связей на поверхности Si(100) после плазменной обработки в аргоне: *a* — после димерной реконструкции Si(100) 2×1 ; *b* — идеальной нереконструированной Si(100) 1×1 [1].

в отсутствие инжекции, U — приложенное напряжение, L — толщина пленочной структуры.

Согласно теории ТОПЗ, напряжение, при котором начинается участок ПЗЛ, связано с концентрацией первоначально незанятых электронами ловушек (p_0) соотношением $U_{FT} = qp_0L^2/\epsilon$, где q — абсолютная величина заряда электрона, ϵ — статическая диэлектрическая проницаемость изолятора. Из него следует, что большая длительность участков малых омических токов для гетроструктур после плазменной микрообработки кремния в аргоне и водороде обусловлена тем, что возникшие при микрообработке локальные неоднородности и дефекты поверхностной структуры кремния вызывают, по сравнению с обработкой в хладоне, появление дополнительных центров захвата электронов, которые расположены в глубине запрещенной зоны кремния и не могут быть активированы при комнатной температуре.

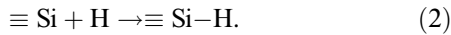
При использовании неэкзоэнергетичной плазмы аргона травление пластин кремния с естественным оксидным покрытием осуществляется по ионно-физическому механизму за счет распыления атомов кремния и частиц его естественного окисла ускоренными ионами. В этом случае, за счет инертности аргона, какие-либо химические связи с поверхностными атомами кремния не образуются. В результате такой обработки поверхность кремния приобретает структуру и плотность оборванных (ненасыщенных) связей, характерных для атомно-чистой поверхности кремния заданной кристаллографической ориентации (рис. 2) [1].

При низкоэнергетичной СВЧ плазменной микрообработке кремния в среде водорода наличие атомарного водорода на границе Si–SiO₂ приводит к взаимодействию его с диоксидом кремния:



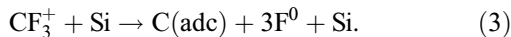
с последующим образованием и десорбцией паров воды. Процесс восстановления диоксида кремния осуществляется в условиях выделения большого количества

теплоты (4.5 эВ/мол) в результате образования молекулярного водорода и деионизации ионов (13.6 эВ). Другим процессом является взаимодействие атомарного водорода с поверхностными атомами кремния с ненасыщенной химической связью:

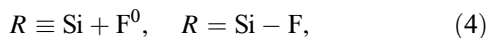


Результатом этого является насыщение валентности и уменьшение плотности ненасыщенных поверхностных связей кремния. При этом из-за низкого коэффициента аккомодации и отсутствия распыления атомов кремния ионами водорода образование новых ненасыщенных поверхностных связей не происходит.

При ионно-плазменной обработке кремния в плазме CF_4 химически активными частицами являются ионы C^+ , CF_n^+ , где $n = 1-4$, а также радикалы CF_n и нейтральные атомы фтора [7]. Поступление из плазмы двух видов частиц — нейтральных и ионизированных определяет и два вида взаимодействия их с поверхностными атомами: гетерогенные химические реакции с образованием летучих соединений и физические эффекты, связанные с ионной бомбардировкой. При СВЧ плазменной обработке с давлением рабочих газов около 0.1 Па реализуется режим слабой адсорбции, который характеризуется низкой степенью заполнения поверхности адсорбированными частицами. В этом случае наиболее вероятным является процесс травления, при котором ускоренный электрическим смещением молекулярный ион, например CF_3^+ , при ударе о поверхность диссоциирует на атомы углерода и фтора (ионно-индуцированная (ударная) диссоциация молекулярного иона):

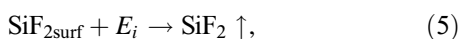


В режимах СВЧ ВПТ при энергиях ионов около 100 эВ, когда процессами физического распыления можно пренебречь, травление кремния во фторсодержащей плазме может начаться только в результате образования связей $\text{Si}-\text{F}$:



где R — кристаллическая решетка кремния.

Удаление хемосорбированных комплексов $\text{Si}-\text{F}$ с поверхности кремния в связи с большой энергией химической связи (5.6 эВ) является сложной задачей. Наиболее вероятными механизмами их удаления с поверхности являются [8]: 1 — образование промежуточных продуктов химических реакций — адкомплексов SiF_2 , которые уже сравнительно легко (пороговая энергия радиационно-стимулированной десорбции для них составляет доли эВ) могут быть десорбированы с поверхности кремния ионным ударом:



где E_i — энергия иона, необходимая для десорбции $\text{SiF}_{2\text{surf}}$, и, 2 — образование легко летучего соединения SiF_4 в результате взаимодействия двух адкомплексов SiF_2 между собой.

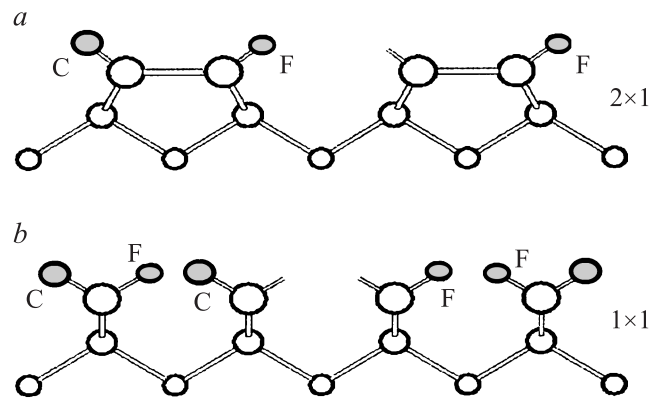


Рис. 3. Схема расположения хемосорбированных атомов углерода и фтора на поверхностях $\text{Si}(100)$ после плазменной обработки в хладоне: *a* — после димерной реконструкции $\text{Si}(100)2 \times 1$; *b* — идеальной нереконструированной $\text{Si}(100)1 \times 1$ [1].

Из реакции (3) можно видеть, что в процессе травления в плазме CF_4 при отрицательных смещениях на поверхности кремния образуются также атомы углерода, которые на начальных стадиях процесса способствуют восстановлению и удалению в виде CO естественного окисла на кремнии. После удаления оксида кремния атомы углерода за счет поверхностной миграции и хемосорбции могут образовывать адкомплексы $\text{Si}-\text{C}$, которые также имеют сильную энергию химической связи (4.55 эВ) и препятствуют процессу травления, замедляя его скорость [7,8].

Таким образом, в результате плазмохимической микрообработки кремния с естественным оксидным покрытием в среде хладона-14 на его очищенной поверхности образуются хемосорбированные комплексы SiC и SiF , которые так же, как при плазменной обработке в среде водорода, пассивируют часть оборванных (ненасыщенных) химических связей поверхностных атомов кремния и уменьшают их поверхностную плотность (рис. 3).

Из сравнения энергий разрыва химических связей адкомплексов SiH , SiC и SiF , которые имеют соответственно значения 3.13, 4.55 и 5.6 эВ, можно утверждать, что после удаления оксидного покрытия кремния в СВЧ плазме и последующего осаждения в одном вакуумном цикле аморфного карбида кремния плотность ненасыщенных связей поверхностных атомов кремния на гетерогранице должна иметь тенденцию к уменьшению при переходе от микрообработки в среде водорода к микрообработке в среде хладона-14. Это обусловлено возрастанием концентраций и прочностей химических связей соответствующих адкомплексов, которые пассивируют часть ненасыщенных связей поверхностных атомов кремния в процессе очистки от пленочных загрязнений. Максимальная поверхностная плотность ненасыщенных связей соответствующей атомно-чистой поверхности кремния реализуется, как было видно из

вышесказанного, при плазменной микрообработке в среде аргона.

3.2. Приповерхностный пространственный заряд на кремнии (100) после СВЧ обработки в различных плазмохимических средах

Формирование на поверхности кремния *p*-типа ненасыщенных электронных связей при травлении с целью удаления естественного оксидного покрытия в СВЧ плазме различных плазмообразующих сред 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 [2]. Прочность поверхностных ненасыщенных 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 *p*-типа 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 при плазменной микрообработке зависит, как показано выше, от вида плазмообразующей среды.

В присутствии положительного заряда в локализованных поверхностных состояниях электронейтральность в приповерхностной области полупроводника обеспечивается тем, что вызванное зарядом Q_{ss} внутреннее электрическое поле способствует перераспределению подвижных носителей и возникновению двойного электрического слоя, экранирующего объем полупроводника от действия этого поля. У высоколегированных акцепторных полупроводников наличие положительного поверхностного заряда приводит, как известно, к обеднению приповерхностной области основными носителями и, следовательно, заряжается отрицательно. Неоднородное распределение заряда приводит к возникновению электростатического встроенного потенциала, с направлением электрического поля, направленного в объем полупроводника. Ширина области пространственного заряда Q_{sp} и сопротивление обедненного слоя тем больше, чем больше пространственный заряд, который в случае свободной поверхности и отсутствия внешних полей равен и противоположен по знаку заряду в поверхностных состояниях.

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 [2]. При прямом подключении исследуемой гетероструктуры на кремнии *p*-типа к источнику питания внутреннее поле, вызванное поверхностными зарядами, будет направлено противоположно внешнему, что приводит к ослаблению последнего. В результате этого поперечный ток через структуру при изменении внешнего напряжения возникает только после того, как напряженность от внешнего поля превысит напряженность поля от встроенного заряда.

При СВЧ плазменной обработке кремния в атмосфере водорода и хладона-14, как отмечалось выше, в результате образования комплексов SiH, SiC и SiF, согласно реакциям (2)–(4), уменьшается, по сравнению с обработкой в аргоне, величина поверхностного заряда Q_{ss} и, как следствие, уменьшаются внутреннее электрическое поле и 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 водороде и хладоне-14.

Необходимость преодоления встроенного потенциала для обеспечения поперечного транспорта электронов в гетероструктуре приводит к уменьшению в ней „действующего“ напряжения. Это уменьшение тем больше, чем больше величина встроенного потенциала. Вследствие этого при приложении одинаковой величины внешнего электрического поля величина поперечного тока через гетероструктуры будет увеличиваться при переходе от обработки в аргоне с максимальной плотностью ненасыщенных поверхностных связей и встроенным потенциалом к обработке в водороде и хладоне.

После преодоления внутреннего электростатического поля на границе полупроводника и *a*-SiH: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 встроенным потенциалом, подвижность носителей из-за изменения условий рассеяния резко падает. Напряжение, при котором происходит резкий спад тока, характеризует величину внутреннего электростатического поля.

Поэтому при обработке кремния в аргоне, где плотности поверхностных зарядов наиболее высокие, напряжения переключения в исходное „непроводящее“ состояние выше, чем при обработке в водороде.

4. Заключение

Низкоэнергетическая СВЧ плазменная микрообработка пластин монокристаллического кремния кристаллографической ориентации (100) в различных по химической активности газовых средах позволяет различным образом модифицировать („перестраивать“) электронную структуру и свойства поверхности. Модификация электронной структуры связана с перераспределением плотности заряда в приповерхностной области и определяется природой используемых плазмохимических сред. Их валентность по отношению к атомно-чистой поверхности и прочность образующихся химических связей способствует формированию устойчивых насыщенных связей поверхностных атомов кремния с различной плотностью. Оставшиеся ненасыщенные поверхностные связи участвуют в перестройке электронной структуры приповерхностной области полупроводника. Это приводит к возникновению встроенного электростатического потенциала и изменению его приповерхностных электрофизических свойств, которые в последующем определяют закономерности поперечного транспорта электронов в пленочных гетероструктурах, созданных на пластинах кремния после соответствующей их плазмохимической микрообработки.

При низкоэнергетичной плазменной микрообработке в среде аргона в результате его химической инертности на поверхности пластин кремния образуются ненасыщенные электронные связи с максимальной поверхностной плотностью. Это вызывает наиболее сильные изменения приповерхностных электрофизических свойств кремния и условий поперечного транспорта через туннельно-тонкие пленочные структуры, осажденные на его поверхности. Так, поперечный транспорт в туннельно-тонкой гетероструктуре α -SiH:H на кремнии (100) p -типа после плазменной микрообработки в среде аргона реализуется при прямых включениях источников питания только при напряжениях около 1 В/нм, что соответствует ионизации практически всех поверхностных атомов кремния [2].

Плазменная микрообработка в среде хладона-14, так же как и в среде водорода, пассивирует часть обрывных связей поверхностных атомов кремния. При этом пассивация ненасыщенных связей при обработке в хладоне-14 происходит более эффективно из-за более сильных и потому более устойчивых к последующим процессам осаждения α -SiH:H покрытий химических связей SiC и SiF по сравнению с химическими связями кремния с водородом SiH, возникающими при плазменной обработке кремния в среде водорода. Вследствие этого встроенный потенциал и приповерхностный

пространственный заряд на кремнии после плазменной микрообработки в хладоне-14 меньше, чем в водороде. Поэтому ВАХ поперечного транспорта электронов в исследуемой гетероструктуре для этого случая имеет и меньшую величину участка малых омических токов, которая, согласно теории ТОПЗ, должна быть пропорциональна концентрации первоначально незанятых электронами ловушек в структуре.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

- [1] К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин, А.В. Зотов, М. Катаяма. Введение в физику поверхности (М., Наука, 2006).
- [2] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. Физика полупроводников (М., Наука, 1977).
- [3] Б.С. Данилин, В.Ю. Киреев. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов (М., Энергоатомиздат, 1987).
- [4] Г.Г. Дворянкина, А.А. Телегин, В.Ф. Дворянkin, А.Г. Петров, Л.Г. Кяргинская, Н.М. Ушаков, С.Ф. Аверин, В.Э. Выдуц, В.И. Петросян, Б.Б. Эленкриг. Микроэлектроника, **18** (5), 412 (1989).
- [5] Н.М. Ушаков, С.А. Терентьев, Р.К. Яфаров. Письма ЖТФ, **28** (15), 10 (2002).
- [6] Технология СБИС: В 2-х кн. Пер. с англ. под ред. С. Зи (М., Мир, 1985).
- [7] В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров. ЖТФ, **79** (12), 73 (2009).
- [8] Р.К. Яфаров. Физика СВЧ вакуумно-плазменных нанотехнологий (М., Физматлит, 2009).
- [9] Д.В. Будко, Р.К. Яфаров. Тез. докл. VI Всеросс. конф. молодых ученых „Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика“ (Саратов. 13–15 сентября 2011) с. 13.

Редактор Т.А. Полянская