——— ПРИБОРЫ ——

УДК 621.382

# ВЛИЯНИЕ ВСТРОЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ВАХ КРЕМНИЕВЫХ МДП СТРУКТУР

© 2019 г. Р. К. Яфаров\*

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской АН, Россия, 410019, Саратов, ул. Зеленая, 38 \*E-mail: pirpc@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.01.2018 г.

Исследованы закономерности модификации ВАХ МДП-структур за счет формирования встроенных поверхностных потенциалов, которые образуются при получении атомно-чистой поверхности кремниевых кристаллов с использованием СВЧ плазменной микрообработки в различных химически активных газовых средах. Установлено влияние поверхностных потенциалов на крутизну ВАХ МДП-устройств, а также величину их несимметричности при изменении полярности на затворе. Повышение крутизны ВАХ интерпретировано уменьшением диффузного рассеяния электронов при формировании на границе отрицательно заряженных поверхностных ловушечных состояний и увеличением их подвижности в слое пространственного заряда вблизи поверхности полупроводника.

**DOI:** 10.1134/S0544126919010095

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Важной особенностью полупроводников является сильная зависимость их электрических и оптических свойств от состояния поверхности и способов поверхностной обработки. 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. Наличие локальных поверхностных уровней энергии приводит к тому, что электроны и дырки могут "прилипать" 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. Подобная электронная модификация проявляется в ослаблении явлений, связанных с использованием эффектов поля, люминесценции, фото- и поверхностной проводимости, в изменении работы выхода [1, 2].

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

### 2. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В экспериментах использовались кристаллы кремния (100) различных типов проводимости с удельным сопротивлением 0.01...0.02 Ом см. После низкоэнергетичного СВЧ плазмохимического травления 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 ATTEN APS3005S-3D.

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, обрабо-



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

танных в плазме хладона-14. При плазменной обработке кристаллов кремния *n*-типа в среде хладона-14 с отрицательным потенциалом на за-творе начало роста тока происходит при меньшем на 3.5–4 В напряжении между истоком и стоком, чем в плазме аргона.

На рис. 2 приведены ВАХ МДП-структур для различных полярностей потенциала электрического поля на затворе после плазменной обработки в среде аргона кристаллов кремния *p*- и *n*-типов. Из рис. 2*a* можно видеть, что для МДПструктур на основе кристаллов кремния *p*-типа при положительном потенциале на затворе и разности потенциалов между истоком и стоком до 3.5 В токи меньше, чем при отрицательном. При разности потенциалов исток—сток больше 3.5 В рост тока ВАХ при положительном потенциале на затворе значительно опережает рост тока при отрицательном потенциале. Для кристаллов *n*-типа кривые ВАХ при положительном потенциале на затворе располагаются в области более низких напряжений между истоком и стоком, а их крутизна и величины токов выше, чем при отрицательном потенциале (рис. 26). Начало роста тока при положительном потенциале на 5.5—6 В и значительно меньшей крутизне ВАХ.

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА том 48 № 2 2019



**Рис. 2.** ВАХ МДП-структур после плазменного травления кристаллов кремния *p*- (*a*) и *n*- ( $\delta$ ) – типов в среде аргона при различной полярности напряжении на затворе: 1 - U > 0; 2 - U < 0.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные закономерности изменения ВАХ МДП-структур в зависимости от вида плазмообразующей среды использованной 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 [2].

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, которые при хемосорбции образуют адкомплексы Si–C и Si–F [4]. Хемосорбированные комплексы SiC и SiF 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.

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 [1, 2]. Прочность 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 возмущает электронную структуру в объеме и делает ее энергетически невыгодной. Поэтому поверхностные атомы кремния, имеющие ненасыщенную химическую связь, лействуют как лырочные ловушки, заряжаясь положительно при переходе электрона в объем 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 SiC и SiF уменьшается, по сравнению с обработкой в аргоне, величина поверхностного заряда  $Q_{ss}$  и, как следствие, уменьшаются величина встроенного поверхностного потенциала.

У акцепторных полупроводников наличие положительного поверхностного заряда приводит, как известно, к обеднению приповерхностной области основными носителями. Неоднородное распределение заряда приводит к возникновению электростатического потенциала, с направлением электрического поля 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 отсутствии внешних полей равен и противоположен по знаку заряду в поверхностных состояниях.

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 [1]. 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 (рис. 1).

При отрицательной полярности на затворе на границе кристалла кремния сохраняется положительный заряд трехвалентных атомов кремния. Он уменьшает отрицательный потенциал на затворе и увеличивает в поверхностном слое концентрацию электронов. При небольших разностях потенциалов между истоком и стоком это способствует увеличению тока, по сравнению с положительным потенциалом на затворе, когда часть ловушечных центров заполняется электронами и они становятся нейтральными (рис. 2*a*, *U* < 3.5 В). При увеличении разности потенциалов за счет увеличения дрейфовой составляющей скорости увеличивается вероятность соударения электронов с поверхностью и их туннелирование в поверхностные ловушечные центры. Это уменьшает положительный заряд поверхностных ловушечных состояний и подвижность электронов в слое пространственного заряда вблизи поверхности. Следствием этого является уменьшение поверхностной проводимости и скорости роста тока с увеличением разности потенциалов между истоком и стоком (рис. 2*a*, *U* > 3.5 В).

При положительной полярности на затворе кремниевых МДП структур *п*-типа электроны туннелируют на ловушечные поверхностные уровни. Возникший встроенный заряд электронов частично нейтрализует положительный заряд затвора и уменьшает действующее поле и концентрацию электронов под затвором. За счет кулоновского взаимодействия между одноименными зарядами основных носителей заряда полупроводника и электронами ловушечных поверхностных центров при приложении разности потенциалов между истоком и стоком уменьшается нормальная к поверхности составляющая скорости электронов и диффузное рассеяние электронов. В отсутствие диффузного рассеяния с увеличением разности потенциалов между истоком и стоком ток ВАХ быстро увеличивается (кривая 1 на рис. 26).

При отрицательной полярности на затворе, встроенный отрицательный заряд на поверхности кристалла, усиливает поле затвора. Это обедняет канал проводимости основными носителями и поверхностная проводимость кристалла уменьшается. В результате этого ток между истоком и стоком начинает увеличиваться при более высоком напряжения между ними, а абсолютные его значения уменьшаются. Смещение между ВАХ структур обработанных в плазме аргона при изменении полярности на затворе с положительной на отрицательную составляет ~4 В (рис. 26).

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 токи ВАХ в случае обработки в аргоне начинает увеличиваться при более высоком напряжении, а абсолютные их значения уменьшаются. Смещение между ВАХ-структур, обработанных в плазме аргона и хладона, составляет около 3 В (рис. 1*б*).

Влияние встроенного поверхностного потенциала на крутизну ВАХ МДП-устройств на основе кристаллов кремния различных типов проводимости, а также величину их несимметричности 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 BAX, других приборов и устройств наносистемной техники.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10033).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977. 672 с.
- 2. *Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А. и др.* Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. 490 с.
- 3. *Яфаров Р.К., Климова С.А. //* ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 3. С. 103–107.
- 4. *Яфаров Р.К.* Физика СВЧ-вакуумно-плазменных нанотехнологий. М.: Физматлит, 2009. 216 с.