

Ю. П. СНИТОВСКИЙ

ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ В ГАЗОВОЙ СМЕСИ $\text{BF}_3 + \text{H}_2$ И $\text{BF}_3 + \text{H}_2 + \text{CF}_4$

Работа посвящена применению новых методов создания омических контактов к р-области кремния при распылении молибдена в BF_3 плазме, что позволяет получить минимальное переходное сопротивление системы $\text{Mo/p}^+\text{Si}$ до термообработки (0,09 Ом). Эта величина в 4,4 раза меньше, чем при распылении молибдена в Ar плазме. При этом методе обработки показано, что минимальное значение переходного сопротивления несколько выше, чем при распылении молибдена магнетронным методом при использовании дополнительной обработки кремниевой пластины с активными областями в перекисно-аммиачном растворе, с последующей выдержкой пластины в вакууме $4 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ Па в течение 30–50 мин. при температуре 250–350 °С и повторной обработки в перекисно-аммиачном растворе перед нанесением молибдена (0,07 Ом).

Ключевые слова: плазменная обработка, омические контакты, удельное сопротивление контакта, кремниевые эпитаксиальные структуры, рентгенофазовый анализ, твердый сплав.

Yu.P. Snitovsky

SILICON SURFACE TREATMENT IN $\text{BF}_3 + \text{H}_2$ AND $\text{BF}_3 + \text{H}_2 + \text{CF}_4$ PLASMA

The method of creating ohmic contacts to the p-region of silicon by sputtering molybdenum in a BF_3 plasma makes it possible to obtain the minimum transient resistance of the $\text{Mo/p}^+\text{Si}$ system before heat treatment (0.09 Ohm). This value is 4.4 times less than when molybdenum is sputtered in Ar plasma. With this processing method, it was shown that the minimum value of the transient resistance is slightly higher than when sputtering molybdenum by the magnetron method when using additional processing of a silicon wafer with active regions in a peroxide-ammonia solution, followed by holding the wafer in a vacuum of $4 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ Pa for 30–50 minutes at a temperature of 250–350 °C and re-treatment in a peroxide-ammonia solution before applying molybdenum (0.07 Ohm).

Keywords: plasma treatment, ohmic contacts, contact resistivity, silicon epitaxial structures, x-ray phase analysis, hard alloy.

Введение

К настоящему времени, анализ возможных причин повышенного значения удельного сопротивления контакта R_k позволил выяснить следующее.

Во-первых, процесс плазмохимического травления SiO_2 в BF_3 плазме сопровождается образованием нелетучего побочного продукта B_2O_3 согласно реакции [1]: $\text{SiO}_2 + \text{F}^* + \text{B}^* \rightarrow \text{SiF}_4 \uparrow + \text{B}_2\text{O}_3 \downarrow$, где F^* и B^* – радикалы фтора и бора соответственно. В связи с тем, что процесс травления протекает непосредственно в контактных окнах на поверхности кремния, B_2O_3 осаждается именно в них и переходное сопротивление контакта за счет этого увеличивается.

Во-вторых, в результате реакции гидролиза фторида бора по схеме: $\text{BF}_3 + \text{H} + \text{O} \rightarrow \text{B}_2\text{O}_3 \downarrow + \text{HF} \uparrow$ и $\text{BF}_3 + \text{HO} \rightarrow \text{B}_2\text{O}_3 \downarrow + \text{HF} \uparrow$, также может образоваться соединение B_2O_3 , которое осаждается в контактных окнах.

Подтверждением сказанному является экспериментально обнаруженная в работе [2] кремний–бор–фторсодержащая пленка на поверхности кремния при внедрении бора в $\text{Ar} +$

BF_3 плазме ВЧ-индукционного разряда низкого давления. Толщина указанной пленки определяется конкурирующими процессами ее образования и распыления. Химический состав указанной пленки можно интерпретировать как смесь B_2O_3 и SiO_2 с промежуточными продуктами травления и гидролиза, например, $SiOF_2$ и BOF . Ее наличие, несомненно, препятствует удалению SiO_2 из контактных окон.

Цель работы – исследовать особенности плазменной обработки поверхности полупроводникового кремния, позволяющие снизить величину удельного сопротивления контакта R_k на поверхности пластины.

Методика исследования

Поскольку при распылении молибдена в плазме BF_3 на поверхности кремния в контактных окнах образуется кремний – бор – фторсодержащая пленка, препятствующая удалению SiO_2 из контактных окон, были разработаны новые составы газовой среды для создания омических контактов к кремнию при катодном распылении молибдена [3–5], табл. 1.

Таблица 1 – Составы газовой среды для создания омических контактов Mo/ p+Si

Газовая среда, состав % (об.)	Изобретение
$BF_3 - 100$	а. с. 795321 [3]
$H_2 - (15 - 30), BF_3 - \text{остальное}$	а. с. 1292628 [4]
$H_2 - (15 - 30), CF_4 - (15 - 25), BF_3 - \text{остальное}$	а. с. 1709864 [5]

Влияние добавки H_2 к BF_3 . Добавка H_2 [4, 6–9] способствует восстановлению соединения B_2O_3 до BH_3 и H_2O , которые при травлении SiO_2 в плазме бинарной смеси $BF_3 + H_2$ являются летучими. Это предупреждает осаждение на поверхности контактных окон B_2O_3 , что улучшает качество контакта. Метод восстановления основан на взаимодействии между образующимся в плазме атомарным водородом и соединением B_2O_3 :



где H – атомарный водород.

Дополнительными процессами, протекающими при добавке водорода, являются восстановление SiO_2 в контактных окнах до кремния и его травление радикалами фтора согласно реакциям:



С учетом вышеизложенного процесс травления SiO_2 при использовании в качестве основного плазмообразующего рабочего вещества бинарной смеси $BF_3 + H_2$ протекают по следующей схеме:



Сказанное выше согласуется также с результатами работ, например, [10–14], где показано, что очистка поверхности кремния от SiO_2 , углерода, кислорода основана на взаимодействии атомов поверхности кремния, SiO_2 , а также нелетучих соединений с образующимся в плазме атомарным водородом.

Влияние добавки CF_4 к $BF_3 + H_2$. Введение CF_4 обусловлено следующими соображениями [6–9]. Легирование кремния бором сопровождается образованием в приповерхностном слое полупроводника дефектов структуры, обусловленных высокой концентрацией легирующей примеси. Дефекты носят характер радиационных повреждений. Их плотность может быть оценена как степень аморфизации монокристаллической поверхности полупроводника. Это явление известно давно и достаточно хорошо описано, например, в [15]. Введение CF_4 в состав газовой смеси приводит к снижению уровня легирования за счет уменьшения концентрации бора в рабочем газе. Снижение уровня легирования приводит к уменьшению плотно-

сти дефектов структуры в области контакта, что улучшает его качество. Наличие H_2 в составе данной газовой смеси, очевидно, предупреждает также образование на поверхности кремния полимерной пленки состава $(-CF_2-)_x$, обнаруженной в ряде работ, см., например, [16], и ухудшающей качество контакта, за счет реакции:



Снижение концентрации BF_3 в составе газовой смеси не отражается на уменьшении концентрации радикалов фтора, так как CF_4 также является их источником. Поэтому скорость процесса очистки контактных окон не уменьшается, а качество очистки окон – не ухудшается.

Исходные образцы для проведения исследований электрофизических характеристик контактной системы Mo/p^+Si и методика их приготовления для формирования p -областей кремния были идентичны тем, о которых было сказано выше.

В качестве экспериментальной установки для напыления молибдена использовали установку УПР-1, как и для распыления молибдена в BF_3 плазме, но оборудованную двумя дополнительными газовыми натекателями.

Для создания контактов Mo/p^+Si пленки молибдена толщиной 50 нм получали следующим образом. После достижения вакуума $(3-5) \cdot 10^{-4}$ Па в камеру подавали бинарную газовую смесь $BF_3 + H_2$ или тройную газовую смесь $BF_3 + H_2 + CF_4$. Когда давление снижалось до $(3-6) \cdot 10^{-2}$ Па зажигали тлеющий разряд при потенциале 30–150 В. После травливания в контактных окнах пленки SiO_2 создавали постоянное рабочее напряжение 2–3 кВ между молибденовой мишенью и подложкодержателем с рабочими пластинами кремния.

Для сравнения результатов пленки молибдена распыляли в Ar плазме, в Ar плазме с предварительной очисткой контактных окон в CF_4 плазме (в разных циклах), в BF_3 плазме, BF_3+H_2 и $BF_3+H_2+CF_4$ плазме.

Поверх пленки молибдена проводилось напыление пленки алюминия толщиной ~ 1 мкм. Вклад очистки поверхности кремния от SiO_2 в контактных окнах и дополнительное легирование кремния в них бором в BF_3 , BF_3+H_2 , $BF_3+H_2+CF_4$ плазме оценивали по вольт-амперным характеристикам контактов и величине контактного сопротивления. Результаты измерения переходного сопротивления контактов представлены в табл. 2 [7].

Путем проведения серии предварительных исследований было установлено, что наиболее эффективным рабочим газом, позволяющим существенно снизить величину переходного сопротивления контактов Mo/p^+Si , являются смеси, состоящие соответственно из 75 % BF_3 и 25 % H_2 , а также из 55 % BF_3 , 25 % H_2 и 20 % CF_4 . Контроль качества поверхности пластин кремния, подвергнутых воздействию $BF_3 + H_2$, а также $BF_3 + H_2 + CF_4$ плазмы проводился в темноте.

Таблица 2 – Технологическая обработка поверхности кремния в контактных окнах и переходное сопротивление контактов Mo/p^+Si [7]

Процесс	Вид обработки	Переходное сопротивление R_k , Ом
1	Без обработки, только катодное распыление Mo в Ar плазме	0,40
2	Очистка в CF_4 плазме и катодное распыление Mo в Ar плазме в разных циклах	0,27
3	Очистка, легирование и катодное распыление Mo в BF_3 плазме	0,10
4	Очистка, легирование и катодное распыление Mo в BF_3+H_2 плазме	0,02
5	Очистка, легирование и катодное распыление Mo в $BF_3 + H_2 + CF_4$ плазме	0,01

Качество поверхности оценивалось по числу точек, светящихся в темном поле микроскопа, поскольку количество светящихся точек может служить мерой как числа твердых частиц и микродефектов поверхности, так и количества загрязнений ионами металлов, и рядом органических веществ, см., например [17–20].

Анализ процесса 3 показывает, что плазмохимическая очистка и распыление молибдена в BF_3 плазме в едином вакуумном цикле без разгерметизации установки позволяет получить более низкое значение R_k . Это достигается благодаря более полной очистке контактных окон от SiO_2 , подлегированию поверхности кремния через окна бором, а также за счет исключения влияния атмосферного воздуха на поверхность кремния. Исключение влияния атмосферного воздуха предотвращает повторное окисление кремния в контактных окнах, как это имеет место в процессе 2.

Очистка, легирование и распыление молибдена в $BF_3 + H_2$ плазме в едином вакуумном цикле без разгерметизации установки (процесс 4) позволяет получить еще меньшее значение величины переходного сопротивления R_k . Это достигается тем, что добавка водорода способствует восстановлению V_2O_3 атомарным водородом до VH_3 и H_2O (см. реакции (4.19), (4.22)), которые в условиях травления являются летучими. Это предупреждает осаждение на поверхности контактных окон V_2O_3 , что улучшает качество контакта.

Таким образом, более низкое значение переходного сопротивления контактов в данном случае обусловлено наиболее полной очисткой контактных окон в $BF_3 + H_2$ плазме.

В свою очередь сравнение процессов 4 и 5 показывает, что уменьшить величину переходного сопротивления контактов Mo/p^+Si можно, используя в качестве газовой среды смесь, состоящую из 55 % BF_3 , 25 % H_2 и 20 % CF_4 .

Выше было сказано, что снижение уровня легирования приводит к уменьшению плотности структурных дефектов в области контакта, что приводит к улучшению его качества. Подтверждением этого является контроль качества поверхности пластин кремния, подвергнутых воздействию $BF_3 + H_2$ и $BF_3 + H_2 + CF_4$ плазмы, в темном поле оптического микроскопа ММУ-3 при 250-кратном увеличении. Установлено, что в первом случае плотность светящихся точек, которые могут быть отнесены к структурным дефектам, составляет $2-5 \text{ см}^{-2}$. В то же время плотность аналогичных дефектов на пластинах, подвергнутых обработке в $BF_3 + H_2 + CF_4$ плазме, составляет величину менее $0,5 \text{ см}^{-2}$.

Кроме того, было обнаружено, что селективность травления SiO_2/Si в процессе, включающем травление SiO_2 в контактных окнах, в $BF_3 + H_2 + CF_4$ плазме в 6 раз выше, чем селективность травления SiO_2/Si в процессе, включающем травление кремния в CF_4 плазме.

Таким образом, для снижения R_k контактов Mo/p^+Si предпочтительно использование $BF_3 + H_2 + CF_4$ плазмы, так как именно в этом случае (процесс 5) наблюдается самое низкое его значение. Как следует из вышеизложенного, эффект снижения переходного сопротивления контактов при переходе от процесса 1 к процессу 5 объясняется повышением качества обработки поверхности контактных окон за счет более полного удаления пленки естественного диоксида кремния, обеспечения оптимального уровня легирования кремния в области контакта и установления за счет этого тесного контакта металл–полупроводник. Сопоставив полученные данные по качеству обработки пластин кремния с результатами [21–24] можно сделать вывод, что для получения высокого качества контактов Mo/p^+Si необходимо обеспечить максимально высокую чистоту поверхности полупроводника и оптимальный уровень подлегирования. Указанные требования достигаются оптимизацией состава газовой среды при плазмохимической очистке контактных окон непосредственно перед напылением слоя металла и режимами обработки. Для повышения скорости плазмохимического травления оксида кремния целесообразно использование магнитного поля, скрещенного с электрическим полем [25–28].

Формирование омических контактов молибден/кремний имплантацией ионов в область границы раздела

Полупроводниковые приборы, в том числе СВЧ-диапазона, представляют собой нагроможденную структуру различных тонких пленок. Границы раздела между этими пленками играют важную роль в работе приборов. Поэтому формирование высококачественных пленок, имеющих «идеальные» границы раздела, является наиболее существенным моментом при изготовлении приборов с прекрасными характеристиками. Имеется много примеров деградации качества пленки и неидеальных границ раздела, вызванных выдержкой таких границ на воздухе в процессе изготовления приборов [25]. Значимые границы раздела для работы прибора, такие, как например, граница раздела Si-SiO₂ в МОП-транзисторе, граница раздела перехода эмиттер-база в биполярном транзисторе и др., никогда не должны подвергаться воздействию воздуха.

Проблема КПД, являющаяся принципиальной для любых мощных устройств, в случае полупроводниковых приборов СВЧ имеет дополнительный смысл: чем выше КПД, тем лучше обеспечивается при заданной выходной мощности тепловой режим прибора и тем выше его надежность. Общим для повышения КПД всех полупроводниковых приборов [12] является требование максимального снижения омических потерь в пассивных областях полупроводника и контактах, в частности в омических контактах металл-полупроводник. И как было сказано выше для того, чтобы вклад этих потерь в выходные параметры прибора был мал, удельное сопротивление контактов ρ_k не должно превышать величин 10^{-5} – 10^{-6} и 10^{-6} – 10^{-7} Ом·см² в приборах сантиметрового и миллиметрового диапазона соответственно.

Удельное сопротивление ρ_k большинства применяемых контактных материалов к ионно-легированным слоям кремния в лучшем случае не ниже $1 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ Ом·см². Применение тугоплавких металлов в полной мере не решает проблему снижения величины контактного электросопротивления и для получения величин $\rho_k \sim 1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-7}$ Ом·см² требуется новый подход к созданию омических контактов [29].

Одним из эффективных методов воздействия на свойства контактов металл-полупроводник является ионное внедрение, особенностями которого является контролируемое нетермическое введение примеси и дефектов решетки, получение атомных смесей. При этом возможно создание однородных атомных смесей заданного состава без ограничений, определяемых такими термодинамическими параметрами, как, например, растворимость.

Благодаря этому появляется возможность формировать переходные слои контактных систем с заданными свойствами, путем внедрения высокоэнергетичных ионов через металлическую пленку в границу раздела металл-полупроводник. В этом случае уделяется внимание модификации свойств материала, основанной на способности ионных пучков смешивать нанесенный металлический слой с поверхностью полупроводника в результате каскадов динамического смещения, вызванных прохождением первичного иона [30–34]. При этом энергию иона выбирают такой, чтобы средний проективный пробег данного иона в материале металлической пленки был соизмерим с ее толщиной [35]. Смешивание слоев в этом случае начинается на границе раздела металл-полупроводник. Причем толщина смешанного слоя увеличивается пропорционально дозе ионов [36].

Отметим, что более высокое электросопротивление переходных металлов по сравнению с Ag, Au, Al и Cu объясняется рассеянием s-электронов на заполненных состояниях в d-полосе, обладающей высокой плотностью состояний на уровне Ферми [37].

Свойства омических контактов молибден/кремний, облученных ионами бора, фосфора, аргона. Образцы для исследований представляли собой тестовые структуры, технология изготовления которых была максимально приближена к технологии изготовления кремниевых эпитаксиально-планарных *n-p-n* генераторных СВЧ-транзисторов [38].

Для изготовления тестовых структур использовали эпитаксиальные однослойные структуры кремния 7КЭФ1,5/380ЭКС0,01(111). В эпитаксиальном слое формировали тестовые структуры для измерения контактного сопротивления ρ_k и области для проведения структур-

ных исследований, имитирующие условия взаимодействия пленки молибдена с монокремнием p - и n -типа в контактных окнах [39].

Для создания контактов Mo/p^+Si эпитаксиальные структуры окисляли при температуре 1150 °С в сухом, влажном и затем опять в сухом кислороде до толщины оксида кремния 400 нм. Имплантировали бор на ионно-лучевой установке «Везувий-5» с энергией $E_1 = 40$ кэВ в окна, полученные в окисле методами фотолитографии и травления. Дозу легирования D_1 для формирования p - n -переходов в тестовой структуре варьировали от $6,25 \cdot 10^{13}$ до $6,2 \cdot 10^{15}$ см⁻². Пиролитические пленки диоксида кремния осаждали при температуре 630 °С до толщины 300 нм. Для окончательного формирования p^+ -слоев с необходимыми параметрами проводили стационарный отжиг имплантированных бором пластин кремния при температуре 940 °С в течение 600 с в атмосфере кислорода. В пиролитической пленке диоксида методами фотолитографии и травления вскрывали контактные окна площадью 10^{-6} см² и наносили пленку молибдена.

Для создания контактов Mo/n^+Si перед окислением ионно имплантировали бор по всей поверхности эпитаксиального слоя кремния n -типа с энергией $E = 30$ кэВ и дозой $D = 1,25 \cdot 10^{15}$ см⁻². Затем поверхность окисляли при температуре 1000 °С. С целью формирования p - n -перехода тестовой структуры ионно имплантировали фосфор в окна с энергией $E_1 = 30$ кэВ. Дозу легирования (D_1) изменяли от $6,25 \cdot 10^{13}$ до $6,20 \cdot 10^{15}$ см⁻². Для окончательного формирования n^+ -слоев с необходимыми параметрами проводили стационарный отжиг имплантированных фосфором пластин кремния при температуре 900 °С в течение 600 с в атмосфере азота.

Для контактов Mo/n^+Si и для Mo/p^+Si после вскрытия контактных окон в пиролитической пленке диоксида кремния пленки молибдена наносили двумя методами: термическим испарением в вакууме $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па со скоростью 5 нм/с на образцы, нагретые до 300 °С, и магнетронным способом при токе 5 А и напряжении на электродах 500 В до толщины ~100 нм. После этого проводили фотолитографию и травление с целью формирования рисунка токопроводящих дорожек.

В табл. 3 приведены режимы облучения контактов Mo/p^+Si и Mo/n^+Si через пленку молибдена ионами аргона, фосфора и бора. Средний проективный пробег ионов в пленке Мо и среднеквадратичный разброс определены экстраполяцией данных работы [40]. Отжигали тестовые структуры со сформированными контактами в вакууме $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па на ленточном молибденовом нагревателе в течение 900 с в диапазоне температур 200–600 °С.

Измеряли ρ_k по методике [41]. Структуру переходного слоя исследовали на электронографе ЭМР-100 при ускоряющих напряжениях 50–100 кВ методами «на просвет» и «на отражение». Образцы для съемки предварительно травили с обратной стороны пластины в полирующем травителе СР-4.

Таблица 3 – Режимы облучения ионами контактов молибден/кремний

Ионы	Энергия (E_2), кэВ	Доза (D_2), см ⁻²	Параметры распределения ионов	
			$\bar{R}_p, \Delta R_p$, нм [108]	
			Мо	
			\bar{R}_p	ΔR_p
В ⁺	60	$6,25 \cdot 10^{13}$ - $3,125 \cdot 10^{15}$	71	40
	80	$6,25 \cdot 10^{13}$ - $3,125 \cdot 10^{15}$	93	47
	100	$6,25 \cdot 10^{13}$ - $3,125 \cdot 10^{15}$	114	53
P ⁺	100	$6,25 \cdot 10^{13}$ - $3,125 \cdot 10^{15}$	45	27
Ar ⁺	100	$6,25 \cdot 10^{14}$	43	26

К концу травления применяли разбавленный травитель и снижали скорость травления. При этом образец помещали в стакан на поверхность воды и подсвечивали снизу лампой накаливания, что позволяло точно выйти на необходимую толщину образца и предохранить от подтравливания границу раздела Мо-Si. Контролировали травление с помощью микроскопа МБС-2.

Основные результаты исследования

Установлено, что характер изменения ρ_k контактов $\text{Mo}/p^+\text{Si}$ с возрастанием температуры отжига существенно зависит как от дозы легирования кремния D_1 , так и от дозы облучения контактов D_2 . Для образцов с дозой легирования кремния $\text{V}^+ D_1 = 6,25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, не подвергнутых облучению, ρ_k уменьшается почти в 2 раза (рис. 12, кривая 1), в то время как для доз легирования $6,25 \cdot 10^{14}$ и $6,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ оно возрастает в 20 и 100 раз соответственно (рис. 1, кривые 3, 5).

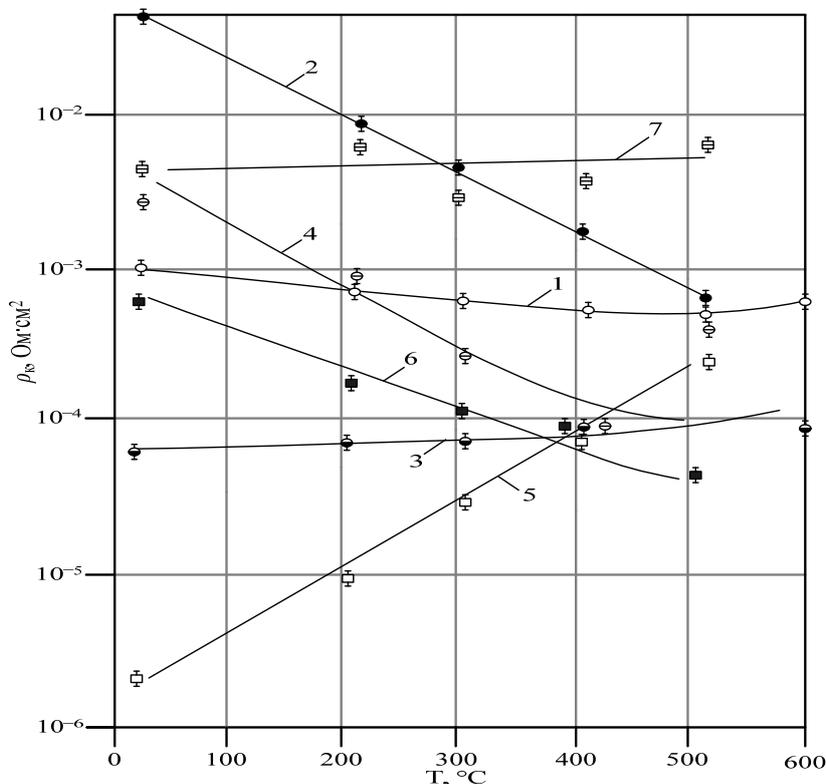


Рисунок 1 – Зависимость удельного сопротивления $\text{Mo}/p^+\text{Si}$ контактов от температуры отжига: доза легирования кремния ионами $\text{V}^+ D_1$: 1, 2, 7 – $6,25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; 3, 4 – $6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; 5, 6 – $6,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, доза облучения контактов D_2 : 2, 4, 6 – $6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (V^+); 7 – $6,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (Ar^+)

Наблюдаемые зависимости могут быть объяснены образованием на границе раздела $\text{Mo}/p^+\text{Si}$ силицидов молибдена, скорость роста которых существенно зависит от совершенства структуры приповерхностных слоев кремния. Большая доза легирования кремния влечет за собой большее количество структурных дефектов, сохраняющихся при "безразгонном" отжиге, что приводит к повышенной диффузии атомов кремния в пленку молибдена с границ зерен поликристаллической фазы кремния, образовавшейся после рекристаллизации аморфизованного слоя [42].

Выводы

1. Следует отметить, что добавление водорода в VF_3 , также, как и в CF_4 , см., например, [43] за счет связывания свободного фтора в HF приводит к его дефициту. Водород также выступает в роли ингибитора скорости травления SiO_2 , если его добавление в CF_4 более 30% (об.) [44].

2. Установлено, что во всех случаях вольт-амперные характеристики полученных контактов до термообработки являются линейными и симметричными относительно начала координат, что подтверждает их омический характер. Как видно из табл. 4.4 (процесс 2) более низкое значение R_k можно получить, если предварительно перед нанесением молибдена катодным распылением в Ar плазме в установке УПР-1 провести очистку контактных окон от SiO_2 в плазме CF_4 в установке для плазмохимического травления.

3. Наблюдаемое снижение R_k при обработке контактных окон к p^+ -области кремния в процессе 2 по сравнению с процессом 1 можно объяснить более полным удалением слоя SiO_2 с поверхности кремния в контактных окнах путем его травления радикалами фтора F^* [16, 45]. Однако проведение процесса плазмохимического травления SiO_2 и напыления пленки металла в разных вакуумных циклах приводит к повторному окислению поверхности кремния за счет воздействия атмосферных кислорода и влаги, что согласуется с результатами работ [46, 47], где пластины обрабатывались исключительно изолированно от воздуха. Поэтому в данном процессе не достигнуто минимальное переходное сопротивление контактов.

Литература

1. Красников, Г. Я. Начальный этап термического окисления кремния и формирование пограничного слоя в системе Si-SiO₂ / Г. Я. Красников, Н. Я. Зайцев, И. В. Матюшкин. – Текст : непосредственный // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2003. – № 2. – С. 98–104.
2. Низкоэнергетическая ионная имплантация бора в кремний в низкотемпературной, плотной $Ar + BF_3$ плазме / И. И. Амиров, С. А. Кривелевич, С. Г. Симакин [и др.]. – Текст : непосредственный // Микроэлектроника. – 2000. – Т. 29, № 3. – С. 163–169.
3. Влияние технологических режимов формирования невыпрямляющих контактов на качество СВЧ-транзисторов / В. А. Зеленин, Ю. Л. Бобченко, Л. Я. Портнов, Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, метрология, стандартизация, надежность. – 1987. – Вып. 2. – С. 31–38.
4. Патент № 1292628 СССР, МПК H01L (2006.01) Способ формирования омических контактов к кремнию : № 3886882/25 : заявл. 19.04.1985 : опубл. 20.03.2012 / С. А. Шепурев, Ю. П. Снитовский, Г. В. Принцев. – 1 с. – Текст : непосредственный.
5. Патент № 1709864 СССР, МПК H01L 21/28 (2006.01), H01L 21/285 (2006.01) Способ создания омических контактов к кремнию : № 2817649/25 : заявл. 17.09.1979 : опубл. 20.03.2012 / Ю. П. Снитовский, С. Ф. Сенько, О. А. Воробьев, И. Л. Баранов. – 1 с. – Текст : непосредственный.
6. Сенько, С. Ф. Влияние качества переходного слоя на величину контактного сопротивления системы $Mo - p^+Si$ / С. Ф. Сенько, Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Современные средства связи : материалы V Международной научно-технической конференции, 25-29 сентября 2000 г., Нарочь, Беларусь : специальный выпуск журнала «Известия белорусской инженерной академии». – 2000. – № 1(9)/2. – С. 36.
7. Snitovskii, Yu. P. The Effect of Window Cleaning and Doping in $BF_3 + H_2$ and $BF_3 + H_2 + CF_4$ Plasmas on the $Mo - p^+Si$ Contact Resistance / Yu. P. Snitovskii, S. F. Sen'ko // Russian Microelectronics. – 2001. – Vol. 30, № 5. – P. 335–338.
8. Snitovsky, Yu. P. A new technology of fabricating ohmic metal – silicon contacts / Yu. P. Snitovsky, S. F. Sen'ko // Interaction of radiation with solids: proc. of the Fourth Int. conf., Minsk, Belarus, October 3-5, 2001. – Minsk, 2001. – P. 89.
9. Borodina, K. Thermal analysis of reaction producing $KXTiO_2$ / K. Borodina, S. Sorokina, N. Blinova. – DOI: 10.1007/s10973-017-6840-0 // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2018. – Vol. 131, № 1. – P. 561–566.
10. In situ cleaning of silicon substrate surfaces by remote plasma-excited hydrogen / V. Anthony [et al.] // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1989. – Vol. B7, № 4. – P. 621–626.
11. Incidence angle effect of hydrogen plasma beam for the cleaning of semiconductor surfaces / I. Suemune [et al.] // Applied Physics Letters. – 1989. – Vol. 55, № 8. – P. 760–762.
12. Кагадей, В. А. Травление окисных пленок полупроводниковых материалов в потоке атомарного водорода / В. А. Кагадей, Д. И. Проскуровский, Л. М. Ромась. – Текст : непосредственный // Микроэлектроника. – 1998. – Т. 27, № 2. – С. 114–119.

13. Dolmatov, A. V. Investigation of structure formation in thin films by means of optical pyrometry / A. V. Dolmatov, I. V. Milyukova, P. Y. Gulyaev. – DOI: 10.1088/1742-6596/1281/1/012010 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1281. – P. 012010.
14. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method / A. V. Dolmatov, I. P. Gulyaev, P. Yu. Gulyaev, V. I. Jordan. – DOI: 10.1088/1757-899X/110/1/012058 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 110, № 1. – P. 012058.
15. Рейви, К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / К. Рейви. – Москва : Мир, 1984. – 475 с. – Текст : непосредственный.
16. Орликовский, А. А. Плазменные процессы в микро- и нанoeлектронике. Ч. I. Реактивное ионное травление / А. А. Орликовский. – Текст : непосредственный // Микроэлектроника. – 1999. – Т. 28, № 5. – С. 344–369.
17. Очистка пластин кремния перед первым окислением / М. И. Бакулина [и др.]. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1974. – Вып. 8. – С. 88–93.
18. Методы и средства контроля чистоты и качества поверхности полупроводников : обзоры по электронной технике / О. А. Фестваль [и др.]. – Москва : ЦНИИ Электроника, 1976. – 35 с. – Текст : непосредственный.
19. Старшинов, И. П. Использование метода светящихся точек для оценки загрязненности поверхности кремниевых пластин ионами / И. П. Старшинов, И. Г. Ерусалимчик. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1982. – Вып. 5. – С. 41–46.
20. Cui, H. Z. Influence of micropores on structural instability of the combustion wave / H. Z. Cui, A. A. Grigoryevskaya, P. Yu. Gulyaev // Yugra State University Bulletin. – 2019. – № 4 (55). – P. 33–40.
21. Киселев, В. Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках / В. Ф. Киселев. – Москва : Наука, 1970. – 400 с. – Текст : непосредственный.
22. Surface Treatment of (1102) Sapphire and (100) Silicon for Molecular Beam Epitaxial Growth / A. Christon, E. P. Richmond, B. R. Wilkins, A. R. Knudson // Applied Physics Letters. – 1984. – Vol. 44, № 8. – P. 196–198.
23. Коробцов, В. В. Влияние химической очистки поверхности кремния на эпитаксиальный рост кремния / В. В. Коробцов, А. П. Шапоренко, В. В. Балашов. – Текст : непосредственный // Микроэлектроника. – 1998. – Т. 27, № 5. – С. 367–369.
24. Влияние режимов плазменного напыления на структуру и свойства покрытий / Е. Е. Корниенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, № 6 (102). – С. 957–966.
25. Готлиб, С. О. Вакуумно-плазменное травление двуоксида кремния в скрещенном электрическом и магнитном полях / С. О. Готлиб, Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Тонкие пленки в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем : тезисы докладов VI отраслевой конференции, октябрь 1986 г. – 1986. – Вып. 4. – С. 235.
26. Готлиб, С. О. Вакуумно-плазменное травление диоксида кремния в скрещенных электрическом и магнитном полях / С. О. Готлиб, Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование. – 1990. – Вып. 2. – С. 42–46.
27. Снитовский, Ю. П. Влияние магнитного поля на скорость травления диоксида кремния в $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ плазме / Ю. П. Снитковский. – Текст : непосредственный // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79, Вып. 6. – С. 141–145.
28. Correction factor in temperature measurements by optoelectronic systems / N. Bikberdina, R. Yunusov, M. Boronenko, P. Gulyaev // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 917. – P. 052031.
29. Бобченко, Ю. Л. Формирование омических контактов тугоплавкий металл – кремний при ионной имплантации в область границы раздела : автореферат диссертации на соискание

ученой степени кандидата технических наук / Ю. Л. Бобченко. – Минск, 1987. – 16 с. – Текст : непосредственный.

30. Tsaur, B. Y. Ion-beam-induced silicide formation / B. Y. Tsaur, Z. L. Liao, J. W. Mayer // Applied Physics Letters. – 1979. – Vol. 34, № 2. – P. 168–170.

31. Snitovsky, Yu. P. The formation of ohmic contacts of molybdenum/silicon at ion implantation into the interface region / Yu. P. Snitovsky // 6th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. (EFRE 2018). Sept. 16-22, 2018. – Tomsk : Abstracts. – P. 372.

32. Snitovsky Yu.P. The formation of ohmic contacts of molybdenum/silicon at ion implantation into the interface region // 6th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. (EFRE 2018). Sept. 16 – 22, 2018. Tomsk, Russian: Abstracts. – P. 372.

33. Снитовский, Ю. П. Формирование омических контактов молибден/кремний при ионной имплантации в область границы раздела / Ю. П. Снитовский. – Текст : непосредственный // Известия вузов. Физика. – 2018. – Т. 61, № 8/2. – С. 155–159.

34. Солодуха, В. А. Управляемые процессы трансформации параметров кремниевых биполярных СВЧ-транзисторов ионными пучками / В. А. Солодуха, Ю. П. Снитовский, Я. А. Соловьев. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2018. – Вып. 4 (51). – С. 23–37.

35. Ли, Д. Имплантированные полупроводниковые приборы / Д. Ли, Дж. В. Мейер. – Текст : непосредственный // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. – 1974. – Т. 62, № 9. – С. 70–87.

36. Дехтяр, И. Я. Электронная структура и электронные свойства переходных металлов и их силицидов / И. Я. Дехтяр, В. В. Немошкаленко. – Киев : Наукова думка, 1984. – 304 с. – Текст : непосредственный.

37. Зайцев, А. А. Генераторная СВЧ-транзисторы / А. А. Зайцев, Ю. Н. Савельев. – Москва : Радио и связь, 1985. – 48 с. – Текст : непосредственный.

38. Свойства омических контактов молибден – кремний, облученных ионами бора, фосфора, аргона / Л. И. Гурский, Ю. Л. Бобченко, В. А. Зеленин [и др.]. – Текст : непосредственный // Спецэлектроника. Сер. Полупроводниковые приборы. – 1985. – Вып. 1. – С. 55–61.

39. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей : теория, метод расчета, таблицы / О. Н. Буренков, Ф. Ф. Комаров, М. А. Кумаков, М. М. Темкин. – Минск : Издательство БГУ, 1980. – 348 с. – Текст : непосредственный.

40. Berger, H. H. Contact resistance and contact resistivity / H. H. Berger // Journal of the Electrochemical Society. – 1972. – Vol. 119, № 4. – P. 507–514.

41. Гурский, Л. И. Особенности фазовых превращений в системе молибден – кремний, подвергнутой ионной бомбардировке / Л. И. Гурский, В. А. Зеленин, Ю. Л. Бобченко. – Текст : непосредственный // Физика и химия обработки материалов. – 1984. – № 5. – С. 72–75.

42. Ивановский, Г. Ф. Ионно-плазменная обработка материалов / Г. Ф. Ивановский, В. И. Петров. – Москва : Радио и связь, 1986. – 232 с. – Текст : непосредственный.

43. Данилин, Б. С. Вакуумно-плазменные процессы травления микроструктур. Ч. II. Рабочие газы и их влияние на параметры процесса травления / Б. С. Данилин, В. Ю. Киреев, В. И. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. – 1982. – Вып. 4. – С. 3–8.

44. Бороненко, М. П. Измерение скорости и температуры частиц в потоке низкотемпературной плазмы / М. П. Бороненко, И. П. Гуляев, А. Е. Серегин. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 3-2. – С. 70–73.

45. Ohmi, T. Ultra clean processing / T. Ohmi // Microelectronic Engineering. – 1991. – Vol. 10, № 3-4. – P. 163–176.

46. Ohmi, T. Requirements of CAM in IC technology / T. Ohmi, T. Shibata // Microelectronic Engineering. – 1991. – Vol. 10, № 3-4. – P. 177–196.