

СВОЙСТВА ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ Mo/Si, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ БОРА, ФОСФОРА, АРГОНА

Ю.П. Снитовский

ОАО «Интеграл», ул. Казинца, 121А, Минск, 220108, Беларусь
 yu.snitovsky@tut.by

Приведены результаты исследований влияния ионного облучения бором, фосфором, аргоном и термообработки в вакууме на величину удельного переходного сопротивления контактов Mo/Si. Показано, что отжиг при температуре 400-500 °С облученных ионами бора контактов Mo/p⁺Si и ионами фосфора контактов Mo/n⁺Si приводит к снижению величины контактного сопротивления по сравнению с необлученными в 5-10 раз и на 2-2,5 порядка соответственно, а облучение ионами аргона приводит к необратимому увеличению контактного сопротивления.

Введение

Повышение плотности компоновки элементов при разработке сверхбольших и сверхскоростных интегральных схем сдерживается, прежде всего, увеличением погонного сопротивления межсоединений, обусловленным малой их шириной и высокими переходными сопротивлениями омических контактов металл – полупроводник, обусловленными субмикронными размерами контактных окон. В результате сильно ограничивается быстродействие ИС увеличением постоянной времени RC-цепей [1]. Поэтому первостепенное значение приобретает поиск новой технологии изготовления омических контактов субмикронных размеров, воздействуя ионными пучками на сформированные структуры металл – полупроводник [2-4].

Цель работы изучение влияния облучения ионами В, Р, Аг на величину удельного переходного сопротивления (ρ_k) контактов Mo/Si до и после низкотемпературного отжига в вакууме. Система Mo/Si выбрана в данном случае как одна из самых распространенных при производстве приборов, имеющих мелкозалегающие p-n-переходы (0,1-0,2 мкм), в частности СВЧ-транзисторов.

Методика проведения исследований

Для исследований использовали эпитаксиальные однослойные структуры Si 7КЭФ1,5/380ЭКС0,01(111), на которых формировали тестовые структуры для измерения ρ_k . Тестовые структуры для контактов Mo/p⁺Si готовили в такой последовательности. После химической обработки Si окисляли при температуре ~1150 °С в сухом, влажном и снова в сухом O₂ до толщины SiO₂ ~400 нм. Имплантировали В с E₁=40 кэВ в окна, полученные в SiO₂ методами фотолитографии и травления. Дозу легирования для формирования p-n-перехода в тестовой структуре варьировали от 6,25·10¹³ до 6,25·10¹⁵ см⁻². Пиролитические пленки SiO₂ осаждали при 720°С до толщины 300 нм. Отжигали пластины и окончательно формировали p⁺-слои с необходимыми параметрами при температуре ~940 °С в течение 600 с в атмосфере O₂. В пиролитической пленке SiO₂ вскрывали контактные окна и наносили пленку Мо, как и для создания контактов Mo/n⁺Si [5]. Измерение ρ_k и исследование структуры переходного слоя контактов проводили по методике [6].

Результаты исследований

Установлено, что характер изменения ρ_k контактов Mo/p⁺Si с возрастанием температуры отжига существенно зависит как от дозы легирования кремния D₁, так и от дозы облучения контактов D₂. Для образцов с дозой легирования кремния В D₁ = 6,25·10¹³ см⁻², не подвергнутых облучению, ρ_k уменьшается почти в 2 раза (рис. 1, кривая 1), в то время как для доз легирования 6,25·10¹⁴ и 6,25·10¹⁵ см⁻² оно возрастает в 20 и 100 раз соответственно (рис. 1, кривые 3, 5).

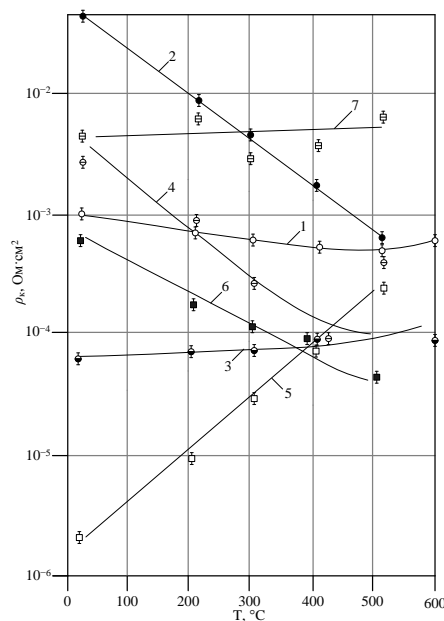


Рис. 1. Зависимость ρ_k контактов Mo/p⁺Si от температуры отжига. Доза легирования кремния В D₁: 1, 2, 7 – 6,25·10¹³ см⁻²; 3, 4 – 6,25·10¹⁴ см⁻²; 5, 6 – 6,25·10¹⁵ см⁻². Доза облучения контактов D₂: 2, 4, 6 – 6,25·10¹⁴ см⁻² (В); 7 – 6,25·10¹⁴ см⁻² (Аг).

Наблюдаемые зависимости могут быть объяснены образованием на границе раздела Mo/p⁺Si силицидов молибдена, скорость роста которых существенно зависит от совершенства структуры приповерхностных слоев Si. Большая доза легирования Si влечет за собой большее количество структурных дефектов, сохраняющихся при «безразгочном» отжиге, что приводит к повышенной диффузии атомов Si в Мо с границ зерен поликристаллической фазы Si, образовавшейся после рекристаллизации аморфизованного слоя [2]. Возможно также образование боридов

молибдена или тройных соединений Mo с В и Si, вероятность образования которых повышается с увеличением дозы легирования Si бором. Так как электропроводность боридов невысока, то их образование также приведет к росту ρ_k .

Облучение ионами В и Ar контактов Mo/ p^+ Si приводит к возрастанию величины ρ_k . При этом с увеличением дозы легирования кремния В от $6.25 \cdot 10^{13}$ до $6.25 \cdot 10^{15}$ см⁻² в случае облучения контактов В ρ_k возрастает соответственно на 1.5-2,5 порядка. При облучении контактов ионами при дозе легирования Si $D_1 = 6.25 \cdot 10^{13}$ см⁻² величина ρ_k возрастает только в 4.2 раза.

Увеличение ρ_k может быть объяснено каскадным перемешиванием атомами отдачи Мо и потоком ионов В (Ar) границы раздела Mo/Si [7], что приводит к сильному разупорядочению приповерхностных слоев Si. При этом, как показано в работе [8], образуется слой с пониженной электропроводностью, что и приводит к увеличению ρ_k . Меньшее влияние на величину ρ_k облучения ионами Ar по сравнению с ионами В может быть объяснено образованием при бомбардировке более тяжелыми ионами Ar большего количества атомов отдачи Мо и формированием вследствие этого более тесного контакта Mo/Si.

Термообработка в вакууме после облучения контактов ионами В приводит к снижению величины ρ_k контактов Mo/ p^+ Si для всего диапазона доз легирования Si (рис. 1). В этом случае (рис. 1, кривые 2, 4, 6) наклон кривых примерно одинаков, что указывает на один и тот же механизм превращений, протекающих на границе Mo/ p^+ Si под действием температуры отжига.

Для дозы легирования кремния В $6.25 \cdot 10^{15}$ см⁻² после облучения контактов ионами В дозой $6.25 \cdot 10^{14}$ см⁻² с $E_2 = 60-100$ кэВ при толщине пленки Мо ~100 нм после отжига при температуре 450-550 °С величина ρ_k оказывается примерно в 5-10 раз меньше для облученных контактов, чем для необлученных (рис. 1, кривые 5, 6).

Эффект снижения сопротивления при облучении контактов Mo/ p^+ Si в случае, когда средний проективный пробег ионов В, не меньше толщины пленки Мо, может быть объяснен протеканием следующих процессов.

Разрушением пленки естественного SiO₂ на границе раздела Mo/ n^+ Si и установлением тесного контакта металл – полупроводник. Насыщением приповерхностного слоя Si дополнительным количеством, внедряемой примеси того же типа, которой легирован Si. Образованием атомов отдачи Мо, которые переходят в Si и насыщают приповерхностный слой. Образованием большого количества радиационных дефектов под действием, как основного потока ионов Р, так и атомов отдачи Мо, которые при достаточной дозе легирования образуют аморфизованный слой Si. Отжиг приводит к рекристаллизации аморфизованного слоя, активизации ~50 % примеси, внедренной через пленку Мо, и атомов отдачи Мо. При этом атомы Мо создают примесные центры с глубокими уровнями, что в совокупности с остаточной дефектностью приповерхностных слоев Si должно повышать скорость рекомбинации неос-

новных носителей в зоне контакта и вести к повышению быстродействия прибора, в состав которого включены данные контакты. Наряду с этим происходит образование силицидов молибдена на границе раздела Mo/Si [2]. По-видимому, изменение электронной структуры границы раздела вследствие установления тесного контакта Mo/Si и увеличение концентрации носителей заряда за счет внедрения дополнительного количества примеси превалирует над процессами увеличения ρ_k за счет образования слоя силицидов молибдена. Это подтверждается результатами измерения поверхностного сопротивления Si (ρ_s) до и после облучения контактов и последующего отжига, представленными на рис. 2.

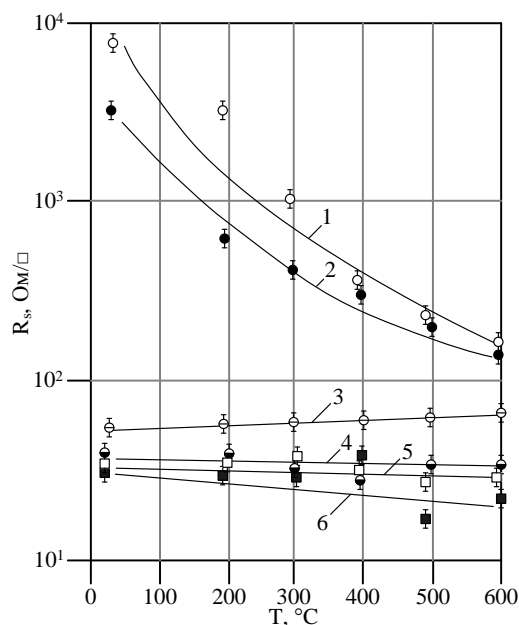


Рис. 2. Зависимость ρ_s Si от температуры отжига контактов Mo/ p^+ Si и Mo/ n^+ Si, облученных ионами В, Р, Ar (при $D_1 = 6.25 \cdot 10^{15}$ см⁻²): 1 – Mo/ p^+ Si, $D_2 = 6.25 \cdot 10^{14}$ см⁻² (Ar); 2 – Mo/ p^+ Si, $D_2 = 6.25 \cdot 10^{14}$ см⁻² (В); 3 – Mo/ p^+ Si; 4 – Mo/ n^+ Si; 5 – Mo/ n^+ Si, $D_2 = 6.25 \cdot 10^{14}$ см⁻² (Ar); 6 – Mo/ n^+ Si, $D_2 = 6.25 \cdot 10^{14}$ см⁻² (Р).

После облучения контактов (рис. 2, кривая 2) ρ_s Si увеличивается на 2 порядка по сравнению с исходным значением (рис. 2, кривая 3), а затем под действием отжига при 600 °С снижается до уровня, только в 2 раза превышающего исходное значение ρ_s Si до облучения контактов. Аналогичная зависимость ρ_s Si от температуры отжига была получена и в случае облучения контактов Mo/ p^+ Si ионами Ar (рис. 2, кривая 1), в то время как ρ_k для этого случая остается постоянным во всем диапазоне температур отжига (рис. 1, кривая 7). Указанные эффекты наблюдаются во всем исследованном диапазоне энергий и доз ионного облучения контактов. При этом ВАХ контактов, исключая образцы с дозой легирования В $D_1 = 6.25 \cdot 10^{13}$ см⁻², были линейными и симметричными относительно начала координат, т. е. контакты были омическими.

Зависимости ρ_k контактов Mo/ n^+ Si от температуры отжига представлены на рис. 3.

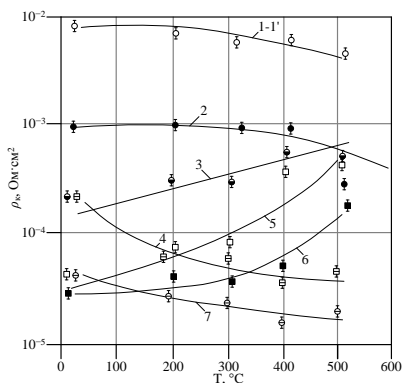


Рис. 3. Зависимость ρ_k контактов Mo/n⁺Si от температуры отжига. Доза легирования кремния P: 1–1', 2 – $6.25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; 3, 4 – $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; 5, 6 – $6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; 7 – $4.375 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Доза облучения контактов D_2 : 1, 4, 6, 7 – $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (P); 1' – $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (Ar).

До облучения ионами изменение ρ_k контактов имеет такой же характер, как и в случае контактов Mo/p⁺Si. При дозе $6.25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ρ_k контактов при отжиге уменьшается в 2.5 раза (рис. 3, кривая 2), а при дозах $6.25 \cdot 10^{14}$ и $6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ увеличивается в 3.0 и 12.5 раз (рис. 3, кривые 3, 5). Однако по сравнению с контактами Mo/p⁺Si облучение контактов Mo/n⁺Si ионами P приводит к несколько иным зависимостям изменения их ρ_k от температуры отжига.

Во-первых, при дозе легирования Si $D_1 = 6.25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ионами P облучение контактов, как ионами P, так и ионами Ar дозой $D_2 = 6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при $E_2 = 100 \text{ кэВ}$ приводит к увеличению ρ_k почти на порядок, а после отжига при температурах до 500 °C – лишь к некоторому снижению величины ρ_k на 20-30% (рис.3, кривая 1), как и в случае легирования контактов Mo/p⁺Si ионами Ar. Во-вторых, в диапазоне доз легирования Si $D_1 = 6.25 \cdot 10^{14}$ – $4.375 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ионами P, после облучения контактов ионами P увеличения ρ_k не наблюдается. Отжиг в диапазоне температур 200-500 °C приводит к уменьшению ρ_k в 2-5 раз (рис. 3, кривые 4, 7). На графике ρ_s Si (рис. 2) в этом случае отсутствует скачок сопротивления после облучения Mo/n⁺Si контактов ионами Ar и P (рис. 2, кривые 5, 6). Снижение ρ_k контактов Mo/n⁺Si после облучения ионами P было также подтвер-

ждено в работе [3]. Разница состоит в том, что в данном случае аналогичный эффект был получен при гораздо меньших дозах облучения и температурах отжига контактов. При дозе легирования Si ионами P $D_1 = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ после отжига контактов, облученных ионами P, происходит увеличение ρ_k приблизительно в 6 раз (рис. 1, кривая 6). В результате исследования структуры переходного слоя контактов Mo/Si установлено, что облучение контактов B, P и Ar приводит к появлению размытых рефлексов от пленки Mo и от поверхностного слоя Si, что свидетельствует о сильном разупорядочении структуры пленки Mo и поверхностного слоя Si, в результате чего значительно возрастает сопротивление контактов. В процессе отжига происходит упорядочение структуры и формирование в переходном слое контактов новых фаз – силицидов и, по-видимому, боридов молибдена, при этом сопротивление контактов уменьшается.

Заключение

В ходе экспериментов установлено, что в диапазоне доз легирования Si ионами P от $6.25 \cdot 10^{14}$ до $4.375 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ путем облучения контактов Mo/n⁺Si P и последующего низкотемпературного отжига достигается эффект существенного снижения контактного сопротивления, который может быть использован при изготовлении приборов с мелкозалегающими p–n-переходами.

Список литературы

1. Елинсон М.И., Суханов А.А. // Микроэлектроника. 1984. Т. 13. № 3. С. 179-195.
2. Гурский Л.И., Зеленин В.А., Бобченко Ю.Л. // Физика и химия обработки материалов. 1984. № 5. С. 72-75.
3. Chiang S.W., Chow T.P., Reihl R.F., Wang K.L. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. № 6. P. 4027-4032.
4. Tokuyama T., Miyao M., Yoshihiro N. // Japan. J. Appl. Phys. 1978. V. 17. № 8. P. 1301-1315.
5. Солодуха В.А., Снитовский Ю.П. // Доклады НАН Беларуси. 2015. Т. 59, № 1. С. 112-117.
6. Снитовский Ю.П. // Электрон. промышленность. 1992. № 1. С. 59-60.
7. Lau S.S. et al // Nuclear Instruments and Methods. 1981. V. 182/183. P. 97-105.
8. Аброян И.А., Дубро В.В., Ильин И.А. и др. // Электрон. техника. Сер. 2. 1981. Вып. 4. С. 36-40.

PROPERTIES OF Mo-SILICON OHMIC CONTACTS BY THE B, P, Ar IONS IRRADIATION

Yu.P. Snitovsky
 ОАО «Integral», Kazinka I.P. 121A, Minsk, 220108, Belarus,
 yu.snitovsky@tut.by

Semiconductor devices are composed of stacked structure of various thin films. The interfaces among thin films play important roles in the operation of the device. Therefore the formation of high quality films having ideal interfaces characteristics is most essential in fabricating high performance devices. In this article, a method for changing the electrophysical properties of molybdenum – silicon contacts, by modifying the chemical composition at the molybdenum – silicon boundary, by the B, P and Ar ions irradiation of generated ohmic molybdenum – silicon contacts is proposed. The possibilities of this method are investigated and confirmed experimentally.