

07

Влияние образования силицидов на удельное сопротивление кремния

© Б.Е. Умирзаков, Д.А. Ташмухамедова, Г.Х. Аллаярова, Ж.Ш. Содикжанов

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан
E-mail: ftmet@mail.ru

Поступило в Редакцию 21 декабря 2018 г.

В окончательной редакции 21 декабря 2018 г.

Принято к публикации 16 января 2019 г.

Впервые исследовано влияние образования тонких пленок силицидов никеля на миграцию собственных примесей p -типа кремния. Установлен существенный рост (до 3–4 раз) объемного сопротивления ρ_v монокристалла Si при формировании на его поверхности пленки NiSi₂ толщиной $\theta \geq 50$ –100 Å, что объясняется миграцией атомов бора в сторону силицидной пленки. Оценочная толщина слоя Si, при которой происходит интенсивная миграция бора, составляет 800–1000 Å.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.07.47539.17650

В настоящее время хорошо изучены состав, структура и свойства наноразмерных слоев, созданных на поверхности и в приповерхностных слоях монокристаллов кремния [1–6]. Между наноразмерным слоем и подложкой формируется переходный слой. Формирование пленки и переходного слоя во многих случаях приводит к миграции примесных атомов подложки, а следовательно, и к изменению ее электронных, оптических и магнитных свойств. Например, при контакте пленка–подложка на границе раздела в зависимости от их работы выхода и типа проводимости происходит искривление зон. В частности, в полупроводнике n -типа в области искривления зон число донорных электронов либо уменьшается, либо увеличивается. Уменьшение приводит к увеличению удельного сопротивления в этой области подложки. Дальнейшие исследования показали, что при контакте двух материалов вблизи границы раздела наряду с искривлением зон может происходить перераспределение примесных атомов. Для выяснения этого в работе [7] в пластины монокристаллического Si были специально введены примеси S, Tl, Ge, P и на поверхность этого образца осаждены атомы Pt. После прогрева при $T = 350^\circ\text{C}$ на поверхности Si образовалась пленка моносилицида Pt. Оже-профили, полученные при послонном травлении образца ионами Ar^+ , показали, что в процессе формирования силицида платины легирующие примеси перемещались либо в глубь кремния, либо в слой силицида. Обнаружено, что если сумма абсолютных величин разностей электроотрицательностей примеси и силицидообразующих элементов равна приблизительно 0,4, то атомы примеси смещаются в глубь кремния. При большем значении этой суммы примесь мигрирует в сторону силицида. Перемещение примесных атомов O и K наблюдается также при образовании тонких слоев BaSi_2 на поверхности Si [8]. Однако до настоящего времени не исследовалось влияние образования силицидных нанопленок на миграцию собственных (p - или n -типа) примесей и физические

свойства кремния. Результаты подобных исследований очень важны для создания слоистых структур, применяемых в приборах микро-, опто- и наноэлектроники, в частности для повышения эффективности солнечных элементов за счет увеличения стабильности их параметров при эксплуатации. В работах [9,10] показано, что коэффициент поглощения света кремния n -типа в области спектра 3–5 μm почти линейно зависит от удельного сопротивления.

Целью настоящей работы является изучение изменения профилей распределения примесных атомов бора по глубине кремния при формировании на его поверхности силицида никеля и их влияния на объемное удельное сопротивление Si.

В качестве объектов исследования использовались пластины монокристаллического Si (111) p -типа (КДБ-10) с толщиной $\sim 0.5 \mu\text{m}$. Пленка NiSi₂/Si(111) толщиной $\theta = 50$ –150 Å получена путем имплантации ионов Ni^+ в Si в сочетании с отжигом, а пленки толщиной $\theta = 100$ –500 Å — твердофазным осаждением атомов Ni в Si с последующим прогревом. Перед получением пленок NiSi₂ поверхность Si (111) очищалась прогревом до $T = 1300$ –1500 K в сочетании с распылением поверхности ионами Ar^+ . Для исследования были подготовлены шесть одинаковых пластинок кремния. На поверхности пяти образцов сразу после очистки выращены пленки NiSi₂/Si (111) разной толщины и измерены объемные и поверхностные удельные сопротивления системы. Для более точной оценки миграции бора в шестой образец Si после очистки дополнительно введены ионы бора с энергией $E_0 = 40 \text{ keV}$ при дозе $D = 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. После прогрева при $T = 700$ –800 K этой системы концентрация B в приповерхностной области Si толщиной 500–600 Å составляла ~ 0.5 –1 at.%. Затем на поверхности этого образца выращена пленка NiSi₂. Основные исследования по определению миграции примесных атомов в Si в процессе образования NiSi₂ проводились на образце № 6. Ионная имплан-

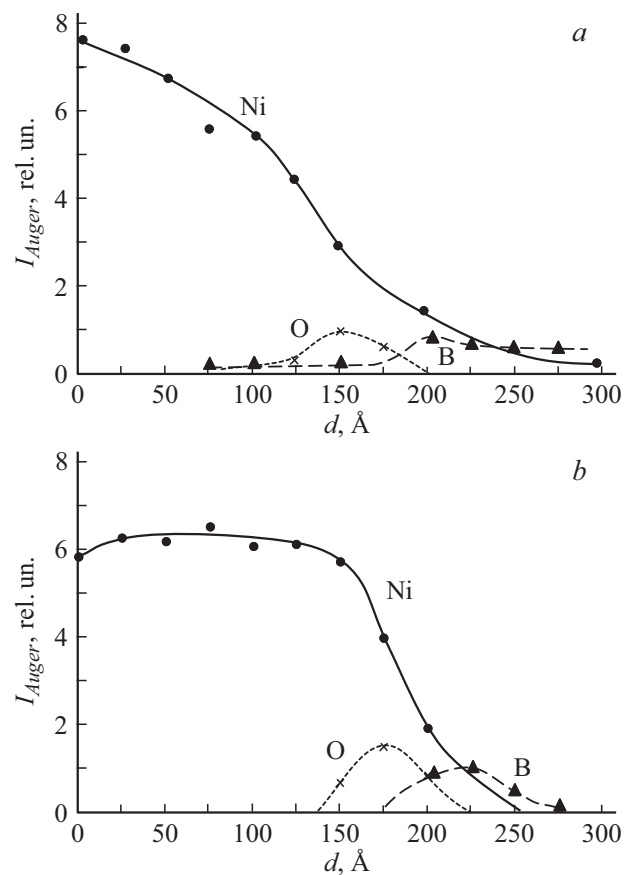
Таблица 1. Значения ρ_v ($\Omega \cdot \text{cm}$) для чистого и ионно-имплантированного кремния (образец № 2)

Si (111), <i>p</i> -тип	Si, имплантированный ионами Ni ⁺	
	до прогрева	после прогрева
9–10	10–11	13–14

тация, твердофазное осаждение и термический отжиг осуществлялись при вакууме не хуже чем 10^{-6} Па, а исследования состава и структуры — при вакууме 10^{-7} Па. Элементный и химический состав поверхности определялся методом оже-электронной спектроскопии (ОЭС), а профили распределения примесных атомов по глубине — методом ОЭС в сочетании с послойным травлением поверхности ионами Ar⁺ с $E_0 = 2$ keV под углом $5-10^\circ$ относительно поверхности образца. Все исследования проводились при комнатной температуре.

В табл. 1 приведены значения объемного удельного сопротивления ρ_v для Si, имплантированного ионами Ni⁺ с вариацией энергии $E_0 = 10, 5$ и 1 keV при дозе насыщения $D = D_{sat} = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, до и после прогрева при $T = 1000$ К. Видно, что после ионной имплантации значение ρ_v заметно не меняется, а после прогрева существенно увеличивается. Для выяснения этого эффекта использовался образец № 6, имплантированный ионами Ni⁺ с $E_0 = 10, 5$ и 1 keV при дозе насыщения.

На рисунке приведены профили распределения атомов Ni, O и B по глубине системы, полученные до и после прогрева при $T = 1000$ К. Отметим, что до прогрева приповерхностные слои Si полностью аморфизуются и в этих слоях содержатся соединения типа Ni_xSi_y и свободные атомы Ni и Si. После прогрева формируется монокристаллическая пленка NiSi₂ с резкой границей. Из рисунка, *a* видно, что в сильно легированной области кремния ($d \leq 100-120 \text{ \AA}$) практически не обнаруживаются атомы кислорода и бора. Атомы кислорода в основном накапливаются в переходном слое границы ионно-легированный слой/кремний. Концентрация бора немного увеличивается вблизи этой границы и при $d > 200-225 \text{ \AA}$ практически не меняется и сохраняется на уровне $0.5-0.6 \text{ at.}\%$, следовательно, не происходит существенного изменения ρ_v кремния. После прогрева этой системы при $T = 1000$ К формируется эпитаксиальная пленка NiSi₂ с толщиной $\theta = 130-150 \text{ \AA}$, и ширина переходного слоя резко уменьшается (см. рисунок, *b*). В переходном слое общая концентрация O практически не меняется (площадь под кривой не изменяется), однако его концентрация в максимуме увеличивается в 1.5 раза. Что касается атомов B, то его концентрация в пленке NiSi₂ уменьшается до нуля (в пределах чувствительности ОЭС). В переходном слое концентрация B существенно увеличивается, проходит через максимум при $d = 200-225 \text{ \AA}$, а затем уменьшается и при $d > 250 \text{ \AA}$ не превышает $0.2-0.3 \text{ at.}\%$. Анализируя



Профили распределения атомов Ni, O и B по глубине Si (111), последовательно имплантированного ионами Ni⁺ с $E_0 = 10, 5$ и 1 keV при $D = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. *a* — до прогрева, *b* — после прогрева при $T = 1000$ К в течение 30 min.

эти данные, можно полагать, что существенная миграция примесных атомов на границе пленка–подложка в основном происходит после кристаллизации разупорядоченных слоев и формирования эпитаксиальной системы силицид–кремний со сравнительно резкой границей. По-видимому, миграция B в сторону силицида приводит к уменьшению концентрации B и увеличению ρ_v кремния в слоях ниже переходных.

В табл. 2 приведены значения ρ_v и ρ_s для образцов системы NiSi₂/Si (111) с разной толщиной NiSi₂, полученных методами ионной имплантации и твердофазного осаждения в сочетании с отжигом (ρ_s — поверхностное сопротивление).

Из табл. 2 видно, что удельное сопротивление поверхностных слоев, т.е. пленки NiSi₂, составляет $\sim 60 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, что хорошо согласуется с литературными данными [11]. Объемное удельное сопротивление ρ_v в случае образца № 1 (толщина пленки NiSi₂ $\sim 50 \text{ \AA}$) практически не меняется. По-видимому, при малых толщинах пленки еще не происходит заметной миграции бора. Существенный рост ρ_v для пленок, полученных разными методами, происходит начиная с $\theta = 150-200 \text{ \AA}$ (образцы № 2 и 3). Увеличение ρ_v системы наблюдается

Таблица 2. Значения ρ_v и ρ_s системы NiSi₂/Si (111)

Номер образца	Толщина пленки NiSi ₂ (θ), Å	Метод получения	T^* , К	ρ_v , $\Omega \cdot \text{cm}$	$\rho_s \cdot 10^{-6}$, $\Omega \cdot \text{cm}$
1	50	Ионная имплантация	900	9–10	–
2	150	То же	1000	13–14	60
3	150	Твердофазная эпитаксия	900	14–15	60
4	400	То же	1000	35–40	60
5	500–550	»	1000	35–40	50

* Прогрев при каждой T проводился в течение 30 min.

до $\theta = 400\text{--}500$ Å, а затем с ростом толщины пленки силицида заметно не меняется.

Наши дальнейшие исследования были направлены на оценку толщины слоя Si, при которой происходит интенсивная миграция атомов В в сторону силицида. Для этого поверхностные слои образца № 4 вытравливались ионами Ag⁺ до толщины 1000 Å, а образца № 5 до толщины 1500 Å и в течение 30 min нагревались при $T = 1000$ К, а затем измерялись ρ_v . В случае образца № 4 значение $\rho_v = 10\text{--}12 \Omega \cdot \text{cm}$, а в случае образца № 5 $\rho_v = 9\text{--}10 \Omega \cdot \text{cm}$, что практически совпадает с ρ_v чистого Si. Исходя из этого можно полагать, что толщина слоя, при которой происходит миграция В, составляет 800–1000 Å.

Таким образом, результаты экспериментальных данных показывают, что формирование силицидной пленки на поверхности Si приводит к миграции атомов собственной примеси p -типа в сторону силицида, следовательно, объемное удельное сопротивление Si при комнатной температуре увеличивается в 3–4 раза. Толщина обедненного слоя, при которой наблюдается увеличение ρ_v , составляет $\sim 800\text{--}1000$ Å.

Список литературы

- [1] Cho W.S., Kim J.Y., Park N.G., Lyo I.W., Jeong K., Kim S.S., Choi D.S., Whang S.N., Chae K.H. // Surf. Sci. 2000. V. 453. N 1–3. P. L309–L314. [https://doi.org/10.1016/S0039-6028\(00\)00344-7](https://doi.org/10.1016/S0039-6028(00)00344-7)
- [2] Гомоюнова М.В., Пронин И.И., Малыгин Д.Е., Галль Н.Р., Вялых Д.В., Молодцов С.Л. // ФТТ. 2005. Т. 47. В. 10. С. 1901–1906. <http://journals.ioffe.ru/articles/4014>
- [3] Watanabe M., Iketani Y., Asada M. // Jpn. J. Appl. Phys. 2000. V. 39. N 10A. Pt 2. P. L964–L967. <http://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.39.L964>
- [4] Сутурин С.М., Банищиков А.Г., Соколов Н.С., Тягинов С.Э., Векслер М.И. // ФТП. 2008. Т. 42. В. 11. С. 1333–1338. <http://journals.ioffe.ru/articles/6694>
- [5] Мурадкабилов Д.М., Ташмухамедова Д.А., Умирзаков Б.Е. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 10. С. 58–62.
- [6] Умирзаков Б.Е., Ташмухамедова Д.А., Рузубаева М.К., Ташатов А.К., Донаев С.Б., Мавлянов Б.Б. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 9. С. 146–149. <http://journals.ioffe.ru/articles/11015>
- [7] Vasiliev S.V., Gerasimenko N.N., Altukhov A.A., Ivanov V.V. // Phys. Status Solidi A. 1986. V. 96. N 2. P. K163–K167. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssa.2210960253>
- [8] Умирзаков Б.Е., Ниматов С.Ж., Болтаев Х.Х. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 9. С. 87–90.
- [9] Sze S.M., Irvin J.C. // Solid-State Electron. 1968. V. 11. N 6. P. 599–602. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(68\)90012-9](https://doi.org/10.1016/0038-1101(68)90012-9)
- [10] Несмелова И.М., Астафьев Н.И., Кулакова Н.А. // Опт. журн. 2012. Т. 79. № 3. С. 87–90. <http://www.opticjourn.ru/download/private/0-1203-87.pdf>
- [11] Самсонов Т.В., Дворина Л.А., Рудь Б.М. Силициды. М.: Металлургия, 1979. 372 с.