

Направленная латеральная кристаллизация силицидной фазы кобальта на поверхности кремния

© И.В. Белоусов, Г.В. Кузнецов, О.П. Пчеляков*

Киевский национальный университет им. Т. Шевченко,
01033 Киев, Украина

* Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 18 октября 2005 г. Принята к печати 21 декабря 2005 г.)

Показано, что центрами локального зарождения силицидной фазы CoSi_2 являются структурные дефекты поверхности кремния. В таких дефектах за счет преимущественной диффузии кобальта реализуется локальная экзотермическая реакция, которая инициирует процесс последующей самоподдерживающейся латеральной кристаллизации фазы CoSi_2 . Показана возможность использования процессов направленного формирования силицидной фазы для изготовления наноразмерных структур без применения операций традиционной литографии и химического травления.

PACS: 68.35.Dv, 65.55.Ln, 81.05.Cy, 81.10.Aj

1. Введение

Дальнейшее уменьшение размеров элементов больших интегральных схем на кремнии методами литографии представляется весьма сложной технологической задачей. В настоящее время значительное внимание уделяется исследованию процессов создания наноразмерных самоупорядочивающихся структур — составных частей определенной микросхемы [1]. При этом основной задачей является как экспериментальное изучение таких процессов, так и разработка моделей, адекватно описывающих формирование развивающихся в пространстве и во времени самоупорядочивающихся структур. Дальнейшего изучения требуют проблемы определения геометрической структуры и эволюции во времени периодических состояний в многофазных системах, существования в случайной среде структурности явлений переноса.

Силициды металлов традиционно используются как материалы межсоединений, барьерообразующих и омических контактов в микроэлектронных приборах, что определяет актуальность исследований процессов формирования наноразмерных самоупорядочивающихся структур на их основе [2,3]. В частности, ранее изучалась возможность создания упорядоченных структур при кристаллизации силицидного слоя CoSi_2 на поверхности кремниевой подложки [4]. Было обнаружено, что на структурных дефектах поверхности кремния в процессе экзотермической реакции происходит локальное зарождение силицидной фазы, и наблюдается ее самоупорядоченный латеральный рост.

В настоящей работе рассмотрены особенности самоорганизующихся процессов силицидообразования в системе кобальт–кремний. Изучены процессы локального зарождения, последующей направленной латеральной кристаллизации и наноструктурирования фазы CoSi_2 на поверхности монокристаллического кремния. Разработан метод формирования упорядоченных элементов, использующий явление направленной кристаллизации и позволяющий создавать наноразмерные самоформирующиеся мостиковые структуры.

2. Результаты и их обсуждение

Эпитаксиальные слои CoSi_2 выращивали в электронно-лучевой вакуумной системе с базовым давлением $7 \cdot 10^{-9}$ мм.рт.ст. Скорость осаждения металлических пленок кобальта составляла 60–70 нм/мин. В качестве подложек использовались кремниевые пластины *p*- и *n*-типа проводимости с кристаллическими ориентациями (100) и (111). Перед нанесением пленки Co проводилась очистка поверхности подложек Si путем отжига в вакуумной камере при $T = 950^\circ\text{C}$. Во время и после осаждения пленок Co подложки нагревались вплоть до 950°C при помощи галогенных ламп. Для рекристаллизационной зонной плавки и процесса латеральной кристаллизации использовалась электронно-лучевая пушка с узким протяженным пучком $0.5 \cdot 20 \text{ мм}^2$ и мощностью 3 кВт.

Кристаллическая структура и морфология поверхности слоев CoSi_2 и границы раздела исследовались методами атомно-силовой микроскопии (AFM), сканирующей электронной микроскопии (SEM), рентгеновской дифракции (XRD). Микрорельеф и шероховатость поверхности изучалась при помощи профилометра (Alpha Step 200).

Исследование свойств реакционных слоев Co–Si показывает, что их электрические параметры, кристаллическая структура и фазовый состав изменяются по мере повышения температуры реакции силицидообразования. В интервале $T = 300\text{--}673 \text{ K}$ величина слоевого электросопротивления пленки Co снижается с ростом температуры, что является известным эффектом для чистых металлических пленок [2].

При температурах вблизи $T = 723 \text{ K}$ наблюдается увеличение сопротивления реакционного слоя, что отражает формирование смеси фаз Co_xSi_y и непрореагированного Co. Исследование структуры и фазового состава на низкотемпературной стадии силицидообразования выявило локальное формирование кристаллитов CoSi_2 , окруженных слоем непрореагировавшего Co и

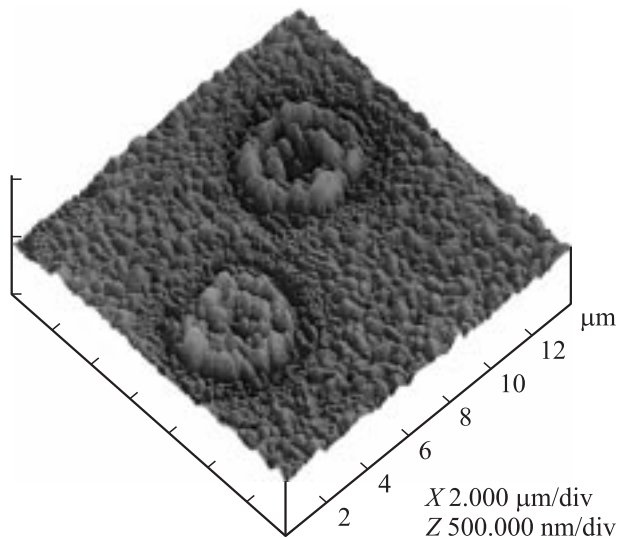


Рис. 1. AFM-изображение поверхности структуры Co/Si после отжига в вакууме ($T = 650^\circ\text{C}$, 15 мин).

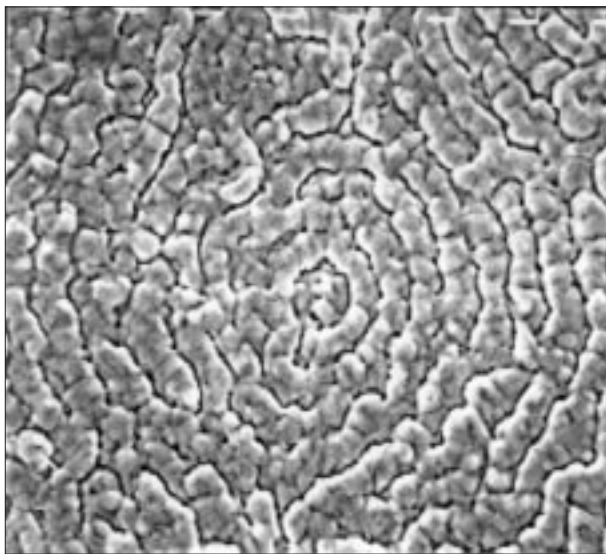


Рис. 2. SEM-изображение поверхности структуры Co/Si после двух циклов отжига в вакууме ($T = 650^\circ\text{C}$, 15 мин и $T = 950^\circ\text{C}$, 3 мин).

смесью силицидных фаз. Характерным является корреляция плотности силицидных зародышей с плотностью структурных дефектов на поверхности кремния. На выходах дислокаций формируются поля в пленке, причиной возникновения которых является стимулированная локальная диффузия кобальта в месте выхода дислокации и последующая экзотермическая реакция $\text{Co} + \text{Si}$.

На рис. 1 показано AFM-изображение начальной стадии формирования такого самоорганизованного процесса формирования силицидных кристаллов. В результате локального саморазогрева реакционной зоны формируется расплав, который выбрасывается из зоны реакции, смачивает прилегающую поверхность, формируется по-

ра и латеральный кристаллит силицидной фазы. Явление локального зарождения объясняется моделью формирования аморфного состояния на кристаллических дефектах на начальной стадии взаимодействия Co и Si [4]. Можно предположить наличие локального выделения тепла в результате экзотермической реакции и перехода аморфной фазы в кристаллическую, что и объясняет существование зоны рекристаллизации реакционного слоя вокруг центра зарождения.

С увеличением температуры отжига структур в зоне реакции возникает неоднородное тепловое поле. Неоднородность протекания реакций отражается в морфологии реакционного слоя и ориентации кристаллитов силицидной фазы. Исследование морфологии силицидных слоев показало, что после формирования зародышей силицидной фазы следует стадия их латерального разрастания и последующей коалесценции. Образование силицидного слоя происходит не однородно по поверхности кремния, а преимущественно латерально. Отжиг структур при температурах более чем 973 K позволяет получить однородные низкоомные слои силицида CoSi_2 с удельным сопротивлением $\rho_v \approx 20\text{ мкОм} \cdot \text{см}$. Методы рентгеновской дифракции подтверждают, что при таких температурах формируются монокристаллические слои CoSi_2 .

На рис. 2 показано SEM-изображение образца, на поверхности которого из одного центра вырос радиальный кристаллит с поперечными размерами порядка 400 мкм . Латеральный рост зерен CoSi_2 из центров зарождения и последующая их коалесценция отражает радиальное распределение локально выделяемого тепла реакции в местах зарождения силицидной фазы и приобретает характер самоподдерживающего процесса. Подобное явление ранее наблюдалось при рекристаллизации аморфных кремниевых пленок под локальным воздействием лазерного излучения [5].

Взаимосвязь между толщиной первоначально осажденной пленки Co , размерами зерен силицидной фазы, шероховатостью поверхности слоя CoSi_2 изучалась для реакционных слоев, сформированных на кремнии различной кристаллографической ориентации — (100) и (111) . Взаимодействие с пленкой Co толщиной 200 нм приводит к образованию шероховатого мелкозернистого реакционного слоя CoSi_2 со средним размером зерен 0.5 мкм . В случае пленки Co толщиной 20 нм поверхность реакционного слоя более гладкая, а размер зерен значительно возростал. Это указывает на то, что при малых толщинах первоначально осажденной пленки Co подавляются процессы агломерации и образования островков в слое CoSi_2 [6]. Исходя из модели выделения дополнительной теплоты реакции можно предположить, что при уменьшении толщины пленки Co (т.е. уменьшении количества реагирующего вещества на поверхности подложки) уменьшается количество выделенной теплоты при постоянном его рассеянии и, следовательно, снижается температура в зоне реакции. При этом не создаются условия для локального расплавления участков реакционного слоя и жидкофазной агломерации кристаллитов.

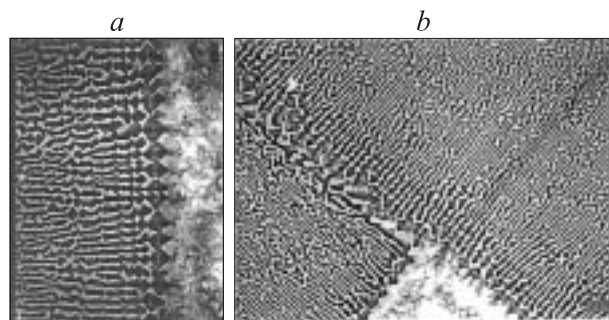


Рис. 3. Латеральный рост силицидной фазы CoSi_2 (a) и направленная кристаллизация пленки CoSi_2 с заданной положением электронного луча разориентацией 90° (b).

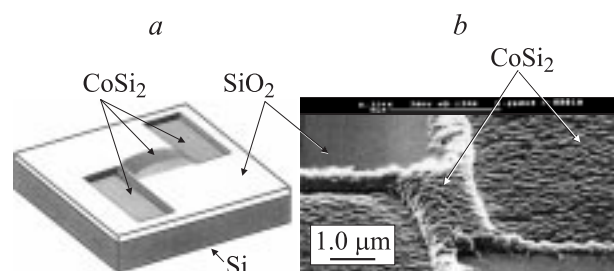


Рис. 4. Схема (a) и SEM-изображение (b) самоформирующегося микромостика между двумя частями пленки CoSi_2 .

Самоорганизация процесса кристаллизации силицидной фазы CoSi_2 может быть стимулирована кратковременной (5–10 с) обработкой поверхности структуры Co/Si узким и протяженным электронным пучком $0.5 \cdot 20 \text{ мм}^2$. В результате формировалась локальная зона расплава на поверхности Co/Si структуры и наблюдался направленный рост CoSi_2 кристаллитов, ориентированный перпендикулярно к электронному лучу (рис. 3). Направленность роста определяется позиционированием электронного луча. Изменение направления роста кристаллитов обусловлено, видимо, особенностью распределения теплового поля в области ступеньки в момент кристаллизации. Если предположить, что в момент реакционного взаимодействия формируется жидкая фаза, то на краю полоски затвердевание происходит в последний момент и, следовательно, за счет разной плотности жидкого расплава и твердой силицидной фазы формируется бугорок. Этот метод латерально направленного роста из расплава Co–Si позволяет с помощью позиционирования электронного луча управлять ориентацией формируемых монокристаллических зерен CoSi_2 . При этом размеры таких кристаллитов составляют приблизительно 2–3 мкм по ширине и 30–50 мкм в длину.

Наиболее явно явление латеральной кристаллизации проявляется при взаимодействии пленки Co с поверхностью Si на участке, окруженном слоем SiO_2 . В этом случае наблюдается „вынос“ материала через ступеньку SiO_2 и боковой рост кристаллитов CoSi_2 на по-

верхность окружающего слоя диоксида кремния. Размеры латерально выросших кристаллитов могут достигать 5–7 мкм от края ступеньки SiO_2 при высоте ступеньки и толщине пленки Co приблизительно 100 нм. Причем для реакционного формирования этих кристаллитов расходуется кремний вблизи края ступеньки, в результате чего и формируется углубление, аналогичное ямке в центре отдельного силицидного зародыша. Такой „вынос“ кремния подтверждает предположение о том, что кремний в реакционный слой поступает неоднородно, преимущественно из дефектов или участков с механической деформацией (на краю ступеньки разнородных материалов Si и SiO_2).

На основе явления самоорганизующегося латерального роста фазы CoSi_2 была разработана технология получения самоформирующихся мостиковых структур, которая позволяет коммутировать две полупроводниковые области, разделенные пленкой окисла, без применения операций традиционной литографии и химического травления металлического слоя. На рис. 4 представлены схема и SEM-изображение подобного мостика. Такой метод латеральной направленной кристаллизации из зоны локального расплава позволяет формировать кристаллиты CoSi_2 шириной 2–3 нм и длиной 30–50 нм с заданной ориентацией межкристаллитных границ. Следует отметить, что управлять размерами мостика можно, изменяя взаимное расположение окон в слое SiO_2 , где протекает реакция силицидообразования, а также толщиной исходной пленки кобальта.

3. Заключение

В работе приведены доказательства того, что процесс силицидообразования отображает информацию, содержащуюся в реальной кристаллической структуре монокристаллической подложки кремния. Продемонстрировано, что центрами локального зарождения силицидной фазы CoSi_2 являются структурные дефекты поверхности кремния (выходы дислокаций). В таких дефектах за счет преимущественной диффузии кобальта реализуется локальная экзотермическая реакция, которая носит высокоскоростной характер и инициирует процесс последующей самоподдерживающейся латеральной кристаллизации фазы CoSi_2 . Полученные результаты могут иметь прикладное значение в плане целенаправленного и управляемого создания наноразмерных структур, которые возникают путем самоорганизации и воспроизводятся с достаточной точностью.

Список литературы

- [1] L. Aleksandrov. *Thin Films Sci. Technol.*, **5**, 233 (1984).
- [2] Ш. Мьюрарка. *Силициды для СБИС* (М., Мир, 1986).
- [3] J. Pelleg, S. Zalkind, L. Zevin, B.M. Ditchek. *Thin Solid Films*, **249**, 126 (1994).

- [4] I. Belousov, A. Grib, S. Linzen, P. Seidel. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **186**, 61 (2002).
- [5] В.Ю. Баландин, А.В. Двуреченский, Л.Н. Александров. Поверхность: физика, химия, механика, вып. 1, 53 (1986).
- [6] A. Kumar, J. Narayan. Appl. Phys. Lett., **59**, 1785 (1991).

Редактор Л.В. Беляков

Directional lateral crystallization of silicide cobalt phases on silicon surface

*I.V. Belousov, G.V. Kuznetsov, O.P. Pcheliakov**

T. Shevchenko Kiev National University,
01033 Kiev, Ukraine

* Institute of Semiconductors Physics,
Russian Academy of Sciences,
Siberian Branch,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract Local nucleation centers of silicide phase at silicon surface have been shown to be surface structural defects. In these points due to preferential Co diffusion a local exothermic reaction proceeds and initiates subsequent process of self-supported lateral crystallization of CoSi_2 phase. A possibility of directional silicide phase formation for nanostructure manufacturing without lithography and chemical etching has been shown.