

ях, причем направления напряженности самого магнитного поля зачастую можно ограничить двумя направлениями. Рабочая частота поля каждого из направлений по градиенту должна отличаться друг от друга, желательно, в 2 раза и более.

Эта сама по себе довольно сложная задача в данной работе не проводилась и не рассматривалась. Однако для оценки возможности применения ГМР-микродатчиков нами была изготовлена упрощенная модель магнитной системы, состоящая из несимметричных по числу витков колец специального типа и геометрии, оси которых размещены перпендикулярно друг другу. Питание колец осуществляется синусоидальным напряжением от генератора звуковой частоты через усилитель, обеспечивающий силу тока до 20 А. Создаваемая максимальная напряженность магнитного поля в рабочей зоне с определяющим размером до 1 м составляет 3000 А/м при градиенте 1800 А/м². Рабочие частоты регулируются в диапазоне от 20 до 1000 Гц. Снимаемые с каждого из чувствительных элементов сигналы обеспечивают чувствительность 25 мкВ/мм на любой рабочей частоте.

Для реализации системы контроля положения выходные сигналы датчиков обрабатываются по специальной программе, учитывающей распределение в пространстве напряженностей магнитных полей раз-

ной заданной частоты, чувствительность элементов, составляющих ГМР-микродатчик и их размещение на микроплате.

Таким образом, показана возможность применения гальваномагниторекомбинационных микродатчиков с двумя чувствительными элементами на базе литого микропровода для использования в устройствах контроля положения объекта. Благодаря высокой чувствительности к переменным магнитным полям, малым размерам и, соответственно, высокой разрешающей способности представляется перспективным использование таких микродатчиков в биомедицинских исследованиях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Леонovich Э. Н., Жевелев Б. Я. Расчет и проектирование электромагнитных координатно-измерительных устройств. — Минск: Наука и техника, 1989.
2. Ioisher A., Kantser V., Leporda N. Magneto-sensors based on semiconductor microwires // Sensors and Actuators. — 1996. — Vol. A 59. — P. 119—123.
3. Иойшер А., Котрубенко Б. Полупроводниковые и полуметаллические микропровода. — Кишинев: Штиинца, 1987.
4. Бадинтер Е., Берман Н., Драбенко И. и др. Литой микропровод и его свойства. — Кишинев: Штиинца, 1973.

К. т. н. И. В. БЕЛОУСОВ, д. ф.-м. н. Е. В. БУЗАНЕВА,
д. ф.-м. н. Г. В. КУЗНЕЦОВ

Украина, Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко
E-mail: kuznetsov@uninet.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
25.07 2005 г.

Оппонент к. т. н. Ю. Н. МАКСИМЕНКО
(ЗАО "Укрналит", г. Киев)

ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ «СИЛИЦИД КОБАЛЬТА–ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ–КРЕМНИЙ»

Предложена технология формирования сетки металлического электрода на основе силицида кобальта для газочувствительных поверхностно-барьерных кремниевых структур — элементов газовых датчиков.

Комбинация в пористом кремнии его кристаллической структуры и значительной удельной площади поверхности (200—500 м²/см³) определяют интерес к использованию его в газовых сенсорах [1—3]. Одной из задач разработки сенсорных структур типа «металл—пористый кремний—кремний» является создание эффективного металлического электрода, обеспечивающего свободное проникновение молекул газа к поверхности пористого слоя и стабильную регистрацию электрических характеристик. Высокую надежность и стабильность металлизации поверхности кремния в газочувствительных структурах может обеспечить использование силицидов металлов, которые традиционно применяются в микроэлектронных приборах как ма-

териалы коммутационной разводки, барьерообразующих и омических контактов [4, с. 12—35].

Возможность создания упорядоченных структур при кристаллизации силицидного слоя CoSi₂ на поверхности монокристаллической кремниевой подложки исследовалась в работе [5]. Было обнаружено, что на структурных дефектах поверхности кремния в процессе экзотермической реакции происходит локальное зарождение силицидной фазы и наблюдается ее самоупорядоченный латеральный рост. Перспективность применения силицида кобальта в сенсорных структурах определяется также его высокими физико-химическими свойствами (термостабильность в кислородной среде, соответствие структурным параметрам кремния) и электрическими (отсутствие электромиграции, малые значения поверхностного удельного сопротивления).

В данной работе рассматривается возможность использования процессов силицидообразования для изготовления самоформирующейся сетки металлического электрода на поверхности пористого кремния.

В качестве подложек использовали кремниевые пластины с кристаллической ориентацией (100) *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением 1,0—4,5 Ом·см. Слои пористого кремния (ПК) толщиной 1,0—1,5 мкм формировали при анодной обработке поверхности пластин в электролите на основе плавиковой кислоты (раствор HF в этаноле). Гальваностатический режим позволил простым выбором режима травления регулировать толщину пористого слоя и размеры пор от нескольких нанометров до нескольких микрометров.

Слой силицида CoSi_2 формировали в электронно-лучевой вакуумной системе при давлении 10^{-8} мм рт. ст. На кремниевые подложки предварительно наносились пленки кобальта с рассчитанной толщиной 5—10 нм (скорость конденсации 60—70 нм/мин, время осаждения 5—10 с). Формирование слоя CoSi_2 осуществлялось путем отжига структур в вакууме при последовательном повышении температуры от 200 до 600°C (5—10 мин). На тыльной стороне подложки методом напыления Ni создавался омический контакт.

Морфологию пористых слоев, размеры кристаллитов и их расположение изучали методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Вольт-амперные характеристики изготовленных структур исследовались в туннельном спектрометре (Pt/Ir-зонд) при давлении $P=1$ атм газовой среды воздуха или CO_2 .

Особенности процесса силицидообразования на границе раздела Co/Si в системе с пористым кремнием показаны на рис. 1. Наличие слоя пористого кремния на поверхности монокристаллической пластины приводит к снижению механических напряжений при создании многослойной пленочной структуры. Взаимодействие нанесенной тонкой пленки Co с поверхностью ПК приводит к формированию наноразмерного пористого слоя силицида CoSi_2 с атомарно гладкой поверхностью (рис. 1, а). Морфология пористого слоя CoSi_2 определяется упорядоченной системой волнистых полосок, разделенных порами. Характерные поперечные размеры полосок — 200—300 нм, высота 100—200 нм. Типичные значения расстояния между полосками — 150—250 нм, что коррелирует

с горизонтальными размерами пор в слое пористого кремния. Как следует из рис. 1, б, в, профиль многослойных структур CoSi_2 -ПК-Si характеризуется значительной пористостью (светлые участки) и образованием наноконтактов между кристаллитами кремния и слоем силицида (темные участки). Эти участки хорошо просматриваются на увеличенном изображении границы раздела CoSi_2 -ПК (рис. 1, в). Над пористым слоем силицида CoSi_2 просматривается изображение технологического клея.

Процесс силицидообразования между тонкой пленкой кобальта и слоем пористого кремния позволяет без применения масочных технологий травления создавать на поверхности самоформирующуюся металлическую сетку силицида CoSi_2 с управляемой морфологией. Изменение свойств и состава исходной поверхности полупроводника определяется процессами расхода Si при твердофазных реакциях образования силицида, диффузией Co к границе раздела CoSi_2 -Si, автодиффузией атомов Si сквозь пористый слой CoSi_2 на поверхность, нарушением Si-Si связей и образованием связей Si-Co. При этом самоорганизующиеся субмикронные и наноразмерные объекты могут спонтанно развиваться как результат нескольких факторов: идущей на поверхности реакции, процессов диффузии и индуцированных осажденным веществом структурных изменений самой поверхности [5]. Их размеры контролируются конкурирующими процессами диффузии и уменьшения концентрации диффундирующих частиц Co в процессе силицидообразования. Маленькие островки растут из-за прихода новых частиц, но начинают уменьшаться, когда размеры становятся большими. В результате на поверхности пористого кремния возникают стабильные наноразмерные образования, размеры которых определяются соотношением длины диффузии и ширины области между двумя возможными поверхностными состояниями.

Для изготовленных структур в сканирующем туннельном спектрометре (Pt/Ir-зонд) наблюдались выпрямляющие диодные вольт-амперные характеристики (высота барьера Шоттки составляет $\phi_0=0,6\ldots 0,7$ эВ).

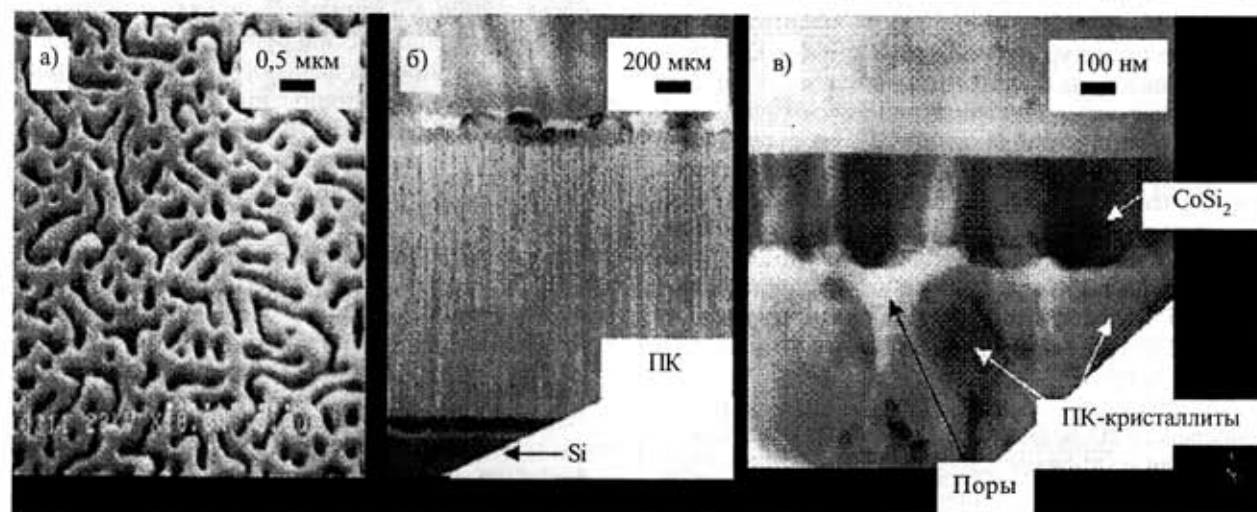


Рис. 1. Формирование силицидного контакта на поверхности пористого кремния: а — сформированная сетка силицидного контакта; б, в — профиль структуры CoSi_2 -ПК-Si

Структуры демонстрируют чувствительность к составу окружающей газовой атмосферы, в частности к присутствию CO_2 (как правило, пары H_2O являются обязательной компонентой контролируемых газовых смесей).

Для туннельных контактов с выпрямляющими характеристиками при приложенном постоянном напряжении наблюдаются воспроизводимые изменения тока при последовательных циклах адсорбции CO_2 . Типичные изменения тока показаны на рис. 2 (при приложенном к структуре обратном напряжении $U_{\text{обр}} = 1,2 \text{ В}$) для трех последовательных циклов адсорбции. Как видно из рисунка, при адсорбции CO_2 ток возрастает примерно на порядок (от 3 до 20 нА) за 10–20 с и стабилизируется во время экспозиции. После прекращения подачи CO_2 в результате десорбции ток понижается до первоначального значения за 30–50 с. Физическая адсорбция CO_2 приводит к обратимому изменению высоты потенциального барьера контактной структуры ($\Delta\phi_0 = 0,07 \text{ эВ}$). Незначительные различия между циклами адсорбции/десорбции обусловлены влиянием локальных процессов взаимодействия молекул газа с поверхностью пористого слоя.

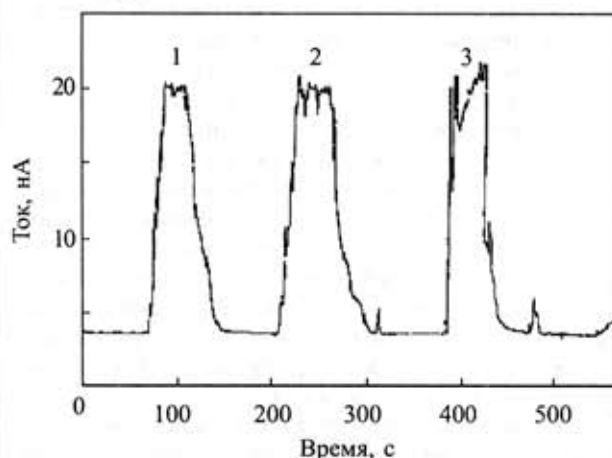


Рис. 2. Влияние последовательных (1, 2, 3) циклов адсорбции/десорбции CO_2 на зависимость тока Pt/Ir-зонда в структуре CoSi_2 -ПК-Si

Нагрев структур до $T = 30...40^\circ\text{C}$ приводит к увеличению амплитуды изменения тока и росту скорости адсорбционно-десорбционных процессов. При адсорбции CO_2 ток измерительного зонда возрастает от 3 до 130 нА и при десорбции уменьшается до первоначального значения за несколько секунд. При неизменной температуре наблюдается стабильное повторение изменений тока. Понижение температуры до 20°C приводит к обратимому уменьшению тока до исходных значений. Таким образом, изменяя температуру структуры можно управлять процессами адсорбции/десорбции CO_2 на поверхности пористого слоя.

Увеличение площади "собирающей" структуры при непосредственном контактировании измерительного Pt/Ir-зонда со слоем CoSi_2 обуславливает рост амплитуды изменений тока при адсорбции CO_2 (рис. 3). В этом случае пористый слой CoSi_2 является «металлической сеткой» для газового сенсора, уменьшая

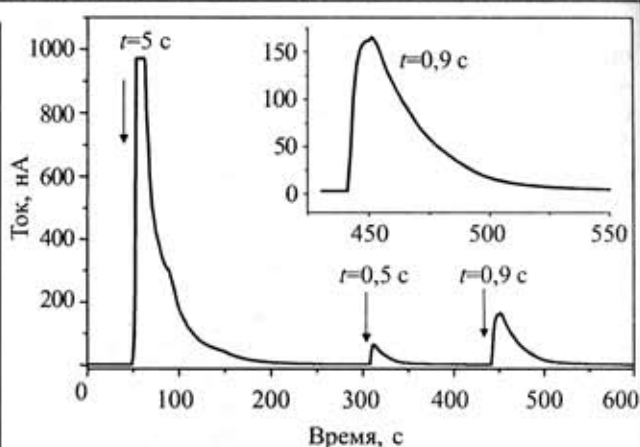


Рис. 3. Временные зависимости тока через структуру CoSi_2 -ПК-Si при различном времени экспозиции t в атмосфере CO_2 . На вставке показана форма максимума тока при $t = 0,9 \text{ с}$

влияние локальных различий свойств поверхности на повторяемость адсорбционных циклов.

Как следует из рис. 3, временные зависимости тока ($U_{\text{обр}} = 1,2 \text{ В}$, $T = 20^\circ\text{C}$) существенно зависят от времени выдержки контактной структуры в атмосфере CO_2 . При достаточно большой экспозиции в CO_2 ($t = 5 \text{ с}$) ток зонда приводит к перегрузке измерительного прибора (динамический диапазон изменения сигнала сенсора составляет не менее 4 порядков). При экспозициях $t = 0,5 \text{ с}$ и $t = 0,9 \text{ с}$ наблюдаются максимумы со временем нарастания 10 с (адсорбция CO_2) и временем релаксации 25 с (десорбция CO_2).

Таким образом, анализ вольт-амперных характеристик структуры CoSi_2 -ПК-Si показывает, что она может быть чувствительным элементом при создании газочувствительных сенсоров, а влияние адсорбции хорошо описывается в рамках модели контакта «металл—промежуточный слой пористого кремния—кремний». В процессе силицидообразования на поверхности пористого кремния создается самоформирующаяся тонкопленочная металлическая сетка силицида кобальта. Силицидный слой в таких структурах выполняет роль пассивирующего покрытия для пористого кремния и барьерообразующего материала, при адсорбции проникновение молекул газа в пористый слой происходит на границе с металлическим слоем и диффузии по порам.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Hamilton B. Porous silicon. Topical review // *Semicond. Sci. Technol.*— 1995.— Vol. 10.— P. 1187—1207.
2. Емельянов Ю. Л., Томченко А. А. Твердотельные газовые сенсоры: перспективные направления исследований // *Приборы и системы управления.*— 1998.— № 7.— С. 37—40.
3. Kilchitskaya T. S., Kozinetz V. V., Kuznetsov G. V. et al. Gas sensing properties of metal—nanocrystalline silicon—silicon heterostructures // *Photoelectronics.*— 2004.— N 13.— P. 25—29.
4. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС.— М.: Мир, 1986.
5. Belousov I., Grib A., Linzen S., Seidel P. Cobalt silicide formation inside surface defects of a silicon substrate // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.*— 2002.— Vol. 186.— P. 61—65.