

дача падения лишь одной волны с положительного направления оси. Для двумерного случая таким образом получаем падение из первого квадранта. Взяв суперпозицию упомянутых выше решений с соответствующими коэффициентами, можно получить решение для любой структуры с ограниченной периодической частью.

Таким образом, примененный в работе аналитический метод позволяет точно рассчитать поля в периодических структурах, представляющих интерес для целей фотоники – например, для частотной и угловой фильтрации электромагнитного излучения, – и имеющих технологичную прямоугольную геометрию.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Корнейчик В. В.* Разделение переменных в неоднородных средах и расчет фотонных кристаллов // Труды междунар. конф. «Излучение и рассеяние ЭМВ – ИРЭМВ-2007». – Таганрог, 2007. С. 390-394.

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ СИЛИЦИДОВ ПЛАТИНЫ ДЛЯ СИЛОВЫХ ДИОДОВ ШОТТКИ

**Ф. Ф. Комаров¹, О. В. Мильчанин¹, И. В. Конопляник¹,
Е. П. Шабека¹, Я. А. Соловьев², А. С. Турцевич²**

¹*Институт прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко БГУ, KomarovF@bsu.by*

²*Унитарное предприятие «Завод Транзистор» НПО «Интеграл»*

ВВЕДЕНИЕ

Мировой рынок потребления диодов Шоттки в последнее время существенно расширяется. К настоящему моменту объем продаж диодов Шоттки составляет 15–20 % (в стоимостном выражении) от всех силовых диодов [1]. В большинстве случаев использование диодов Шоттки позволяет получить наилучшее сочетание технических и экономических характеристик. Диоды Шоттки обеспечивают ряд важных схемных преимуществ по сравнению с лучшими диодами с *p-n*-переходом (благодаря сравнительно малым прямым падениям напряжения и времени переключения), но при этом некоторые параметры диодов Шоттки существенно хуже. Так, диод Шоттки имеет сравнительно большую плотность обратного тока, который к тому же экспоненциально возрастает с увеличением температуры кристалла и приложенного обратного напряжения [2]. Но применение металлов с большим значением высоты барьера позволяет значительно уменьшить обратный ток диода Шоттки. К примеру, использование в качестве контактного металла платины позволяет иметь приемлемую плотность обратного тока вплоть до температуры 175 °С, а допустимое обратное напряжение при соответствующем выборе уровня легирования кремния может достигать 100, 150 или даже 200 В [2]. С другой стороны, при изготовлении диодов Шоттки особые требования должны предъявляться к технологии производства. Так как контакт Шоттки образуется на границе металла и полупроводника, необходимо обеспечить высокую чистоту и однородность свойств на поверхности последнего. В этой связи при производстве силовых диодов Шоттки силицидам переходных металлов отводится исключительно важная роль [3–6]. Силициды переходных металлов

обладают высокой проводимостью металлического характера и высокой температурной стабильностью. Формирование контактов силицид-кремний очищает границу раздела на атомарном уровне, предотвращая, таким образом, колебания контактных свойств, которые в противном случае могут иметь место – если поверхность загрязнена или имеет дефекты. В свою очередь, есть и ряд трудностей при формировании силицидов переходных металлов. Из-за несоответствия кристаллических решеток кремния и силицидов наблюдаются большие напряжения в контактных слоях и возможно формирование дефектов на границах раздела. Это является одной из важнейших проблем при производстве силовых диодов Шоттки. Так как размеры контактов элементов силовых диодов Шоттки достигают десятков миллиметров, то здесь принципиально важно получить максимально однородный как по составу, так и по толщине слой силицида, ввиду того что вероятность пробоя максимальна в областях, где кромка контактного слоя имеет наиболее острые края [2].

В нашей предыдущей работе [7] при формировании контакта на основе PtSi, в режимах принятых для СБИС технологии (550 °С, 15–30 мин), формируемый силицидный слой имел большую неоднородность по толщине, а также были зарегистрированы различные дефекты на границе раздела силицид-кремний. Все это привело как к невоспроизводимости технологической операции формирования контактного силицидного слоя, так и, в свою очередь, низкому проценту выхода годных приборов. Существует ряд работ (например [8]), где отмечалось, что уже при комнатной температуре идет процесс образования силицида платины некоторого переходного состава. В данной работе, исходя из анализа литературных источников и наших предыдущих исследований, было предложено провести исследования режима формирования контактных силицидных слоев платины при низких температурах (в диапазоне 200–500 °С). Предполагалось, что снижение температуры приведет к более медленному и равномерному протеканию процесса силицидообразования, что в свою очередь обеспечит большую однородность по толщине и составу силицидного слоя.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Нанесение тонких слоев платины (40 нм) на подложки *p*- и *n*-кремния (111) – ориентации проводилось при давлении менее $5 \cdot 10^{-5}$ Па в установке «МВР 603» (НПО «Интеграл»). Предварительно в камере установки проводилась плазменная обработка пластин с целью удаления загрязнений с поверхности, а также удаления оксидных пленок. Дальнейший отжиг образцов проводился при температурах 200–500 °С. Длительность термообработок, в зависимости от используемых температур, варьировалась в диапазоне 0–360 мин.

Структурные исследования проводились с использованием методов Резерфордского обратного рассеяния (РОР) и просвечивающей электронной микроскопией (ПЭМ) в сочетании с электронной дифракцией (ЭД). Электрические характеристики структур определялись методом Ван-дер-Пау.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходная пленка платины имеет однородную поликристаллическую структуру с мелким размером зерен (рис. 1, а). Для всех используемых температур термообработок зарегистрировано формирование поликристаллических силицидных фаз платины с произвольной ориентацией зерен. При этом с увеличением температуры силицидо-

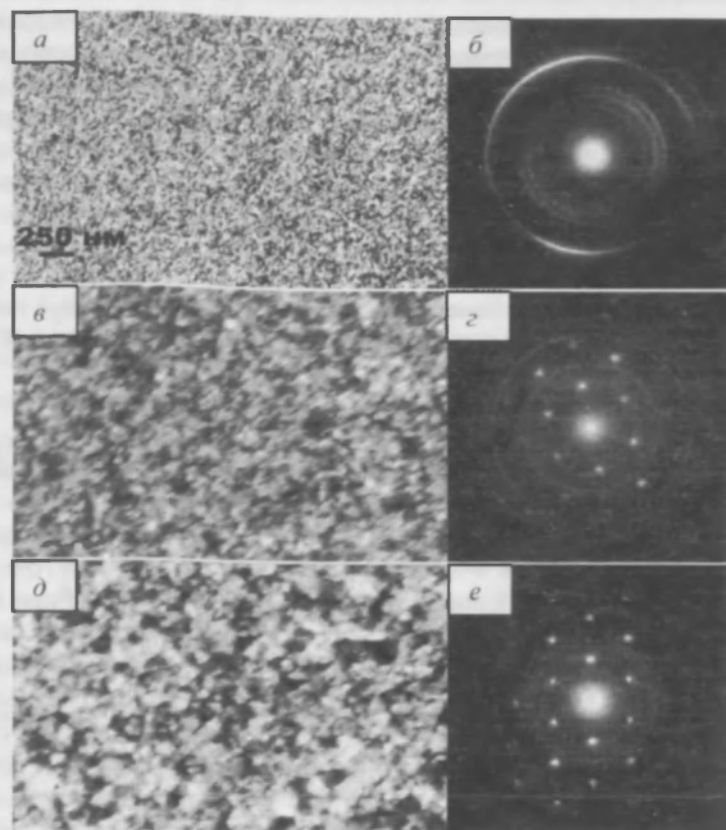


Рис. 1. Светлопольные ПЭМ-микрофотографии (а, в, д) и картины микродифракции (б, з, е) от исходной пленки Pt (а, б), а также после термообработок: 300 °С, 120 мин (в, з); 500 °С, 30 мин (д, е)

образования происходит и рост зерен в силицидных слоях (см. рис. 1). При отжиге в диапазоне 400–500 °С в формируемых силицидных слоях можно отметить большой разброс в размерах зерен (от 10 до 270 нм). Структура слоев силицидов, сформированных при более низких температурах (200–300 °С) характеризуется более однородным размером зерен, не превышающим 140 нм. Не было установлено влияния типа легирования подложек кремния на структуру формируемых силицидных слоев платины. По результатам анализа ЭД установлено, что формирование силицидов происходит от чистой пленки Pt к фазе Pt₂Si, а затем к фазе PtSi, для температур термообработок 300–500 °С. При этом для более низких температур необходимо гораздо большее время отжига для полного перехода в конечную фазу. Для термообработок при 200 °С формирование фазы PtSi не зарегистрировано даже для 6-часового отжига.

Результаты РОР анализа хорошо согласуются с ПЭМ данными. Отметим некоторые особенности, вытекающие из анализа РОР спектров экспериментальных образцов (рис. 2 и 3) было установлено:

1. Независимость протекания процесса силицидообразования от типа проводимости кремниевой подложки.

2. Скорость процесса силицидообразования сильно зависит от температуры.

3. Скорость формирования фазы Pt_2Si выше, чем для фазы $PtSi$ при заданной температуре. Так, при температуре 300 °C уже при длительности 60 мин был зафиксирован полный переход пленки платины в фазу Pt_2Si с дальнейшим формированием $PtSi$. Полный переход слоя в фазу $PtSi$ наблюдался после 180-минутного отжига.

4. В ходе термообработки при 200 °C формируется только фаза Pt_2Si . Полный переход слоя в фазу Pt_2Si происходил после 240-минутного отжига.

Дальнейшее увеличение длительности до 360 мин не приводило к изменению фазового состава силицидного слоя.

Полученные результаты согласуются с литературными источниками. Так, в работе [5] показано, что необходимым условием формирования фазы $PtSi$ является температура термообработки – 300 °C и более. Независимость процесса формирования силицидов от проводимости подложки отмечалась в работе [6].

Полученные зависимости слоевых сопротивлений от длительности термообработок при 200 °C и 300 °C представлены на рис. 4. Как было отмечено выше, в ходе термообработки при 200 °C единственной формируемой фазой силицида является Pt_2Si . Слоеое сопротивление в процессе формирования данной фазы существенно не изменяется. Для 300 °C отжига наблюдается линейный рост слоевого сопротивления с увеличением длительности термообработки.

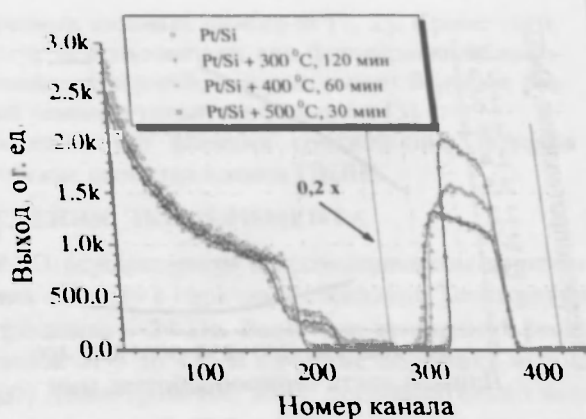


Рис. 2. Спектры POP от пленки Pt на Si до и после отжига

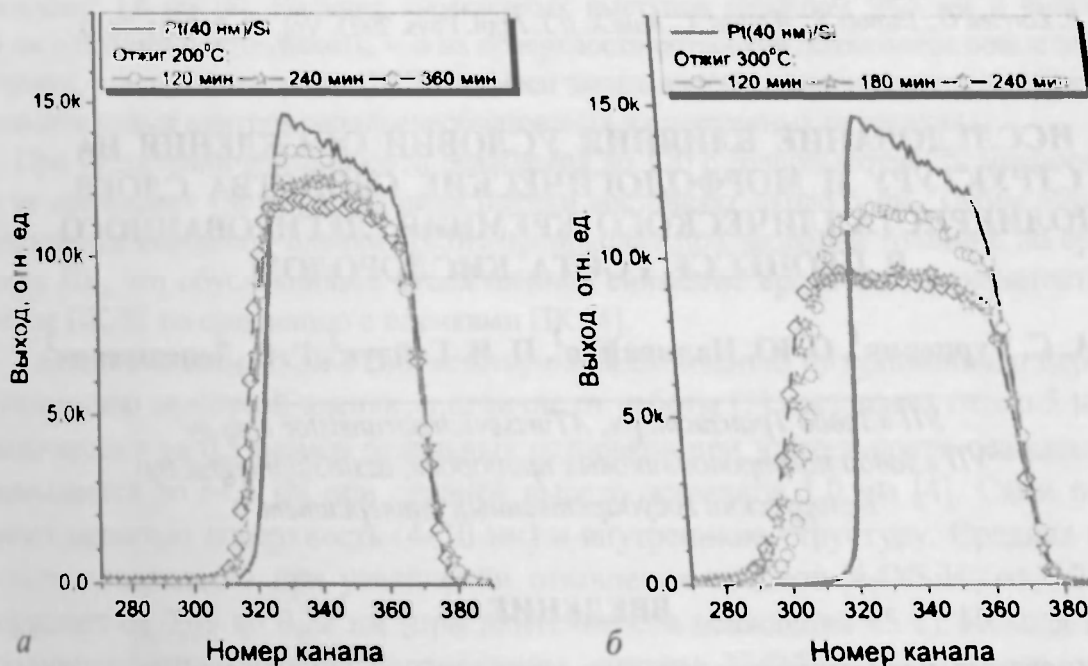


Рис. 3. Спектры POP от пленки Pt на Si до и после отжига. 200 °C (а), 300 °C (б)

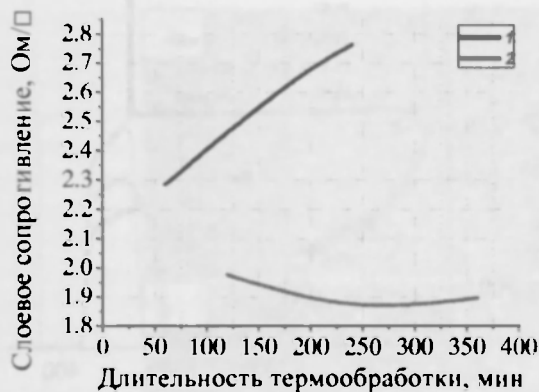


Рис. 4. Зависимости слоевого сопротивления формируемых силицидных структур от длительности термообработки:
1 – 300 °C; 2 – 200 °C

По-видимому, это связано с увеличением доли силицида PtSi в измеряемом слое (сопротивление для фазы PtSi выше, чем для Pt₂Si [3]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенных исследований можно заключить, что низкотемпературный отжиг более предпочтителен с позиции структурной однородности формируемых силицидных слоев. Было подтверждено, что процесс протекания силицидообразования не зависит от типа проводимости кремниевой подложки. Установлено, что в ходе термообработки при 200 °C единственной формируемой силицидной фазой является Pt₂Si.

ЛИТЕРАТУРА

1. Флоренцев С. // СТА. 2004. № 2. С. 20–30.
2. Попов С. // Электронные компоненты. 2002. № 3. С. 35–38.
3. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС. М.: Мир. 1986. 176 с.
4. Snyder John P., Helms C.R., Yoshio Nishi // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67. P. 1420–1422.
5. Тонкие пленки: взаимная диффузия и реакция // Под ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера. М.: Мир. 1982. 676 с.
6. Достанко А. П., Баранов В. В., Шаталов В. В. Пленочные токопроводящие системы СБИС. Минск: Высш. шк., 1989. 238 с.
7. Турцевич А. С., Ануфриев Д. Л., Соловьев Я. А., Мильчанин О. В. // Вакуумная техника и технология. 2006. Т. 16, С. 271–275.
8. Larrieu G., Dubois E., Wallart X., Baie X. // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 94. P. 7801–7810.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ОСАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО В ПРОЦЕССЕ РОСТА КИСЛОРОДОМ

А. С. Турцевич¹, О. Ю. Наливайко², П. И. Гайдук³, Г. В. Лепешкевич²

¹УП «Завод Транзистор», ATurtsevich@transistor.com.by

²УП «Завод полупроводниковых приборов», dzsto3@integral.by

³Белорусский государственный университет

ВВЕДЕНИЕ

Использование пленок поликристаллического кремния, легированного кислородом (ПКЛК), позволяет исключить образование паразитных каналов и обеспечить