

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ДИСИЛИЦИДА ТИТАНА, ФОРМИРУЕМОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

В.А.Пилипенко¹⁾, В.Н.Пономарь¹⁾, В.В.Понарядов²⁾, И.В.Пилипенко²⁾

¹⁾ НПО «Интеграл», НИКТП «Белмикросистема», 220064, Минск, пл. Казинца, тел. 277-37-41

²⁾ Белорусский государственный университет, 220050, Минск, пр. Ф. Скорины 4, тел. 206-60-01

В данной работе представлены результаты исследования механических и электрофизических свойств пленок дисилицида титана, сформированного методом диффузионного синтеза между пленкой титана и кремния с применением быстрой термообработки путем импульсного облучения некогерентным излучением системы титан-кремний.

Введение

Одним из перспективных методов одностадийного формирования дисилицида титана для создания межсоединений в современных СБИС является применение импульсного облучения системы титан-кремний некогерентным излучением секундной длительности. Однако до настоящего времени практически отсутствовали исследования механических и электрофизических свойств дисилицида титана, полученного с применением такой обработки. В связи с этим изучение данных свойств дисилицида титана, являясь актуальной задачей как в области физики твердого тела, так и в микроэлектронике.

Основная часть

Одной из основных характеристик пленок металлов и их силицидов является их микротвердость, которая позволяет судить о совершенстве структуры тонкопленочной системы. В данной работе проводился анализ микротвердости пленок дисилицида титана формируемых с применением быстрой термообработки (БТО) путем облучения системы титан-кремний секундными импульсами некогерентного излучения.

Исследование микротвердости пленок силицида титана, формируемых с применением такой обработки показало, что данная величина с увеличением температуры обработки системы титан-кремний монотонно уменьшается и достигает постоянного значения при температуре выше 720°C. Такая закономерность полностью объясняется фазовыми переходами, имеющими место в системе титан-кремний при такой обработке. Так переход от Ti_5Si_3 к $TiSi_2$ сопровождается уменьшением микротвердости формируемого силицида от 1080 кГ/мм² до 965 кГ/мм². Данное уменьшение полностью объясняется увеличением пластичности при переходе от многофазной системы силицида, имеющей место в температурном диапазоне 620-720°C, к однофазной - дисилициду титана при $T > 720^\circ C$. Это объясняется тем, что уменьшение содержания различных силицидных фаз титана в формируемой пленке дисилицида титана с увеличением температуры обработки приводит к уменьшению сопротивления скольжению, т.е. к увеличению пластичности, а следовательно уменьшению микротвердости.

Сопоставление микротвердости дисилицида титана, полученного с применением дли-

тельной термообработки, величина которой составляет 1070 кГ/мм², с аналогичной величиной, полученной при импульсном облучении, показывает, что она на 105 кГ/мм² меньше. Это обусловлено тем, что при такой обработке формируется более совершенная равнозернистая структура без зерен, имеющих искаженную конфигурацию. Кроме того, структура таких пленок дисилицида титана имеет значительно меньше дефектов типа точечных и включений других фаз. Это приводит к тому, что пластичность таких пленок выше, а микротвердость меньше, чем у пленок дисилицида титана, сформированных с применением двухстадийной длительной термообработки.

Уменьшение пластичности за счет дефектов типа точечные дефекты, частицы других фаз и дислокаций объясняется тем, что в результате взаимодействия их друг с другом дислокации тормозятся и останавливаются. Для продолжения протекания деформации с постоянной скоростью требуется непрерывное рождение новых дислокаций, т.е. увеличение внешней нагрузки. Это приводит к постоянному увеличению плотности дислокаций, а следовательно растет их взаимное сопротивление скольжению, т.е. происходит деформационное упрочнение кристаллической решетки материала. В случае поликристаллических пленок металлов, межзеренные границы препятствуют распространению дислокаций и, как правило, также упрочняют кристаллическую решетку. Последний эффект проявляется в наибольшей степени для структур, имеющих искаженную конфигурацию зерен.

Таким образом, микротвердость силицида титана, формируемого с применением БТО, уменьшается с увеличением температуры обработки до 720°C из-за фазовых переходов, имеющих место в системе титан-кремний при таких температурах. Дальнейшее увеличение температуры не вызывает изменения микротвердости из-за отсутствия фазовых переходов и завершения формирования низкоомной фазы дисилицида титана с гранецентрированной структурой. Меньшее значение микротвердости дисилицида титана, сформированного с применением БТО, обуславливается его более совершенной структурой и низкой дефектностью по сравнению с аналогичными пленками, полученными с применением двухстадийной длительной термообработки.

Анализ зависимости изменения толщины силицида титана от температуры БТО или другими словами от плотности мощности облучения показал, что с увеличением температуры обработки происходит на начальном этапе практически линейный рост толщины силицида, а затем начинается отклонение от линейной зависимости и переход ее в параболическую. Этот переход обусловлен увеличением диффузионного пути реагирующих компонент через образовавшуюся пленку силицида к непрореагировавшему металлу. Следует отметить, что как и в случае традиционной термообработки толщина сформированного дисилицида титана значительно превышает толщину напыленной пленки титана. Это объясняется тем, что при формировании силицида путем реакции между пленкой металла и кремнием количество кремния, потребляемого формирующимся силицидом значительно выше, чем самого металла. Используя теоретические значения плотностей титана, кремния и дисилицида титана, можно легко рассчитать, что на 1 нм металла расходуется 2,27 нм кремния и образуется 2,51 нм дисилицида титана. Таким образом, при нанесении 50 нм титана на кремний, что имеет место в нашем случае, должно образоваться 125 нм дисилицида титана [1]. Как видно, в нашем случае с 50 нм титана образовалось 96 нм дисилицида титана. Данный факт связан с тем, что при проведении импульсного облучения в азотной атмосфере происходит азотирование титана с образованием на его поверхности нитрида титана. Поскольку около 25% титана используется на образование нитрида титана при температуре 700°C [2], то толщина образующегося дисилицида титана должна составлять 95 нм. Данный результат полностью согласуется с толщиной дисилицида титана, полученного в нашем случае. При этом пленки дисилицида титана достаточно равномерны по толщине, что подтверждает ранее сказанное о равномерности фронта диффузии при силицидообразовании.

Тонкая пленка, нанесенная на кремниевую пластину, всегда находится в напряженном состоянии, при этом напряжения могут носить как растягивающий, так и сжимающий характер. Напряжения могут возникать вследствие различных факторов, таких, как несоответствие решеток, различия линейных коэффициентов термического расширения материалов пленки и подложки, внутренние напряжения, связанные со структурой и свойствами пленки. Образование силицида, вследствие взаимодействия металл-кремний, приводит к большему уменьшению объема, что могло бы приводить к возникновению напряжений необычайно высокого уровня. Например, 25% уменьшение объема, имеющее место при формировании дисилицида титана [1], соответствует возникновению растягивающих напряжений в данной пленке 63 ГПа. Однако, для всех силицидов, образующихся при реакции взаимодействия металла с кремнием, измеренная при комнатной температуре величина напряжений составляет лишь 1-2 ГПа. Поэтому напряжения, существующие в силицидах при комнатной температуре, вызваны, по-видимому, не эффектами сжатия.

Напряжения, связанные с уменьшением объема силицидов, скорее всего релаксируют в процессе высокотемпературной обработки. Поскольку термические коэффициенты линейного расширения дисилицида титана и кремния отличаются в 4 раза, т.е. у силицида титана он существенно выше, то это различие, как показывают литературные данные [3], и обуславливает наблюдаемые напряжения в дисилициде титана, сформированного с использованием длительной термообработки. Следует также отметить, что вклад структурных дефектов в полную величину напряжений в пленках силицидов, сформированных с использованием длительной термообработки, является незначительным. Учитывая, что возникающие напряжения в силицидах могут достигать большой величины, приводящей к угрозе механической стабильности структур при температурах их образования или во время протекания последующих процессов, необходимо исследование напряжений в дисилицидах титана, полученных с применением импульсного облучения.

Исследование зависимости напряжений при комнатной температуре от температуры обработки пленки титана, т.е. от плотности мощности облучения, показало, что напряжения носят растягивающий характер и практически линейно увеличиваются с увеличением температуры от 0,15 до 1,00 ГПа. Такая величина напряжений практически полностью соответствует термическим напряжениям, возникающим в системе дисилицид титана-кремний за счет разницы в коэффициентах термического расширения данных материалов. Простейший расчет данных напряжений в такой системе при температуре 720°C, являющейся температурой формирования дисилицида, показал что они составляют ~0,8 ГПа, т.е. хорошо совпадают с величиной, замеренной экспериментально.

Поверхностное (или удельное) сопротивление токопроводящей пленки является одной из ее важнейших электрофизических характеристик. Оно определяет быстроедействие прибора, потери мощности тока, нагревание прибора и т.д. Исследование изменения поверхностного сопротивления силицидных слоев от температуры обработки показало, что увеличение температуры БТО приводит к его монотонному уменьшению. Минимальное значение поверхностного сопротивления, равное 1,75 Ом/□, что соответствует удельному сопротивлению 16 мкОм·см (толщина дисилицида титана 95 нм), достигается после обработки при температуре 720°C [4, 5]. Дальнейшее увеличение температуры не приводит к изменению поверхностного сопротивления сформированного дисилицида титана, что свидетельствует о достижении системой своего равновесного состояния. Такой ход зависимости говорит о том, что формирование силицида титана с высоким удельным сопротивлением при низких температурах БТО обусловлено, как показано выше, синтезом силицида, представляющего собой смесь фаз силицидов титана обогащенных металлом и имеющих более высокое удельное сопротивление, чем силицид, состоящий из фазы обогащенной кремнием. С увеличением температуры, на-

чинает превалировать синтез силицида титана обогащенного кремнием, что приводит к уменьшению поверхностного сопротивления. После формирования при 720°C силицида, представляющего собой лишь одну фазу силицида титана обогащенную кремнием, а именно, дисилицид титана, поверхностное сопротивление достигает своего минимума. Дальнейшее увеличение температуры не приводит к изменению фазового состава получаемого силицида, а следовательно, не изменит его поверхностное сопротивление. Данный факт, по-видимому, можно объяснить тем, что удельное сопротивление силицида будет определяться своего рода d-s-p-гибридизацией с участием d-электронов титана (переходного металла) и s- p-электронов кремния. Это означает, что в случае наличия фазы силицида, обогащенной металлом, основную роль в удельном сопротивлении будут играть d-электроны металла, увеличение которых, как установлено в [1], приводит к увеличению удельного сопротивления формируемого силицида. Следовательно, при низких температурах, когда в основном образуется фаза силицида титана обогащенная металлом, формируемый силицид будет иметь более высокое удельное сопротивление, что и наблюдается в нашем случае. При более высоких температурах происходит формирование силицида титана обогащенного кремнием, в котором основную роль в удельном сопротивлении играют s- p-электроны кремния, т.е. такой силицид должен иметь минимальное удельное сопротивление, что и подтверждается полученными результатами.

Заключение

1. Микротвердость силицида титана, формируемого с применением БТО, уменьшается с увеличением температуры обработки (до 720°C) из-за протекания в нем фазовых переходов и остается постоянной при дальнейшем увеличении температуры из-за завершения формирования конечной фазы дисилицида титана с границей структурой. Меньшее значение его микротвердости обуславливается более совершенной

структурой и низкой дефектностью данных пленок по сравнению с пленками, полученными с применением длительной термообработки.

2. Напряжения в дисилициде титана, полученного с применением БТО, имеют такую же величину и знак, как и при формировании дисилицида титана с применением длительной термообработки и в основном определяются разницей в коэффициентах термического расширения дисилицида и кремния.

3. При температурах БТО ниже 720°C, когда в основном образуется фаза силицида титана обогащенная металлом и основную роль в удельном сопротивлении играют d-электроны металла, формируемый силицид имеет более высокое удельное сопротивление. При температурах 720°C и выше происходит формирование силицида титана обогащенного кремнием, в котором основную роль в удельном сопротивлении играют s- p-электроны кремния, что обуславливает минимальное значение его удельного сопротивления.

Список литературы

1. Мьюрарка. Силициды для БИС. - М.: Мир, 1986.
2. Технология СБИС. Под ред. С.Зи. Т.2. - М.: Мир, 1986.
3. Таруи Я. Основы технологии СБИС. - М.: Радио и связь, 1985.
4. Пилипенко В.А., Пилипенко И.В., Пономарь В.Н., Горущко В.А. Особенности формирования силицида титана при быстрой термообработке. // Вакуумная техника и технология. Т. 10, №1. - 2000. - С. 21.
5. Пономарь В.Н., Пилипенко В.А., Горущко В.А., Пилипенко И.В. Формирование дисилицида титана с применением быстрой термообработки. // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники: Труды седьмой международной научно-технической конференции / Таганрогский Государственный радиотехнический университет - Таганрог, 2000. - С. 100.

MECHANICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF DISILICID TITANIUM, WHICH IS FORMED BY THE RAPID THERMAL TREATMENT

V.A.Pilipenko¹⁾, V.N.Ponomar¹⁾, V.V.Ponariadov²⁾, I.V.Pilipenko²⁾

¹⁾ Integral, Belmicrosystem, Kazintsa Sq., Minsk, 220064, belms@belms.belpak.minsk.by

²⁾ Byelorussian State University, F. Scoryna 4, Minsk, 220050, AV.SSP@phys.bsu.unibel.by

In this work we observe mechanical and electrophysical properties of disilicid titanium, which is generated by rapid thermal treatment (RTT).

It is shown, that the microhardness of disilicid titanium, which is formed by RTT, decreases with increasing of processing temperature (up to 720°C) because of phase transitions in the system and remains to a stationary value during the further increasing of temperature.

The voltages in the disilicid titanium, received with the application of RTT, have the same quantity and sign, as the disilicid titanium, which is received with the application of the long thermal treatment.

At last, when the temperature of RTT is lower then 720°C the silicid has higher specific resistance, then when the temperature of RTT is higher then 720°C.