

А. Э. ИВАНЧИКОВ, А. М. КИСЕЛЬ, А. Б. МЕДВЕДЕВА,
В. И. ПЛЕБАНОВИЧ

Республика Беларусь, г. Минск, Завод полупроводниковых приборов
НПО «Интеграл»
E-mail: office@bms.by

Дата поступления в редакцию
03.06 2008 г. — 16.03 2009

Оппонент к. т. н. Л. В. ЗАВЬЯЛОВА
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ ПЛЕНОК КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТОК

Установлено, что оценка качества пленки после различных технологических операций изготовления ИС может проводиться по изменению спектра пропускания пленки. Это позволяет исключить брак ИС, обусловленный обрывом слоя металла.

Основная закономерность развития микроэлектроники на современном этапе состоит в стремительном увеличении степени интеграции при уменьшении линейных размеров элементов схемы с одновременным увеличением их количества. Рост степени интеграции сопровождается увеличением количества металлизированных топологических слоев и количества контактных окон в слоях металла.

При формировании топологии СБИС с субмикронными активными элементами и высокой плотностью их монтажа необходимо решить три технологические задачи:

- обеспечить омический контакт между металлизированными слоями;
- исключить обрывы металлических шин на рельефе микросхемы;
- исключить обрывы пленки металла в контактных окнах.

Проблема плохого контакта между топологическими слоями в большинстве случаев связана с полимерными остатками в области контакта, которые образуются во время плазмохимического травления (ПХТ) при формировании контактных окон в слоях диэлектрика, изолирующего слои металла друг от друга [1]. Эта проблема чаще всего решается путем обработки поверхности микросхем в различных растворах: органических с добавлением аминов; водно-органических, содержащих фторид-ионы [2]; неорганических, содержащих перекись водорода.

Наилучшим способом решения технологической задачи по исключению обрывов металлических шин на рельефе микросхемы является межслойная планаризация поверхности микросхемы при помощи диэлектрических материалов перед созданием каждого уровня металлизации. Одним из способов межслойной планаризации является формирование диэлектрического слоя кремнийорганического стекла (SOG-

материала) методом центрифугирования. Такие материалы характеризуются простотой и экономичностью технологического процесса, хорошими адгезионными свойствами, низким уровнем усадки SOG-пленки и напряжения в ней, хорошей воспроизводимостью характеристик пленки, отличной способностью заполнять узкие зазоры между шинами металла, высокой экологичностью из-за отсутствия выделения токсичных веществ и т. д.

SOG-материалы, которые представляют собой растворенные в органическом растворителе разветвленные полимеры со связями Si–O, можно разделить на три группы: соединения на основе силикатов, кремнийорганические соединения и органические соединения, содержащие легирующие примеси. Формирование твердой диэлектрической планаризирующей пленки из SOG-материала происходит за счет реакции гидролиза-конденсации, т. е. по золь-гелевой технологии. Планаризация поверхности происходит при заполнении углублений рельефа микросхемы SOG-материалом во время нанесения его на горизонтально расположенную пластину, вращающуюся со скоростью в несколько тысяч оборотов в минуту.

В технологии изготовления СБИС с несколькими уровнями топологических слоев наиболее часто применяются кремнийорганические соединения (силоксановые SOG-материалы), которые содержат группы $-\text{CH}_3$ или $-\text{C}_2\text{H}_5$ и при нанесении на поверхность пластины формируют пленку со структурой, приведенной на рис. 1.

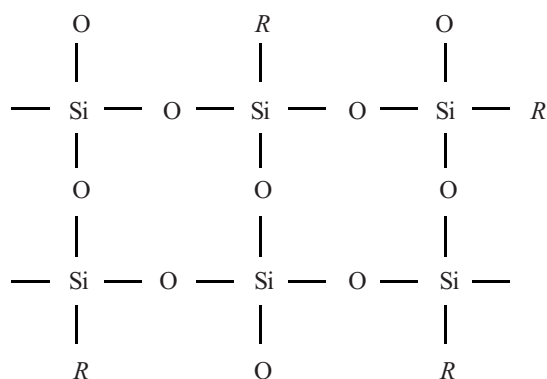


Рис. 1. Молекулярная структура пленки SOG, полученной из силоксанового SOG-материала



Рис. 2. Схема технологического маршрута для контрольных пластин

Технологический маршрут создания слоя диэлектрика между двумя слоями металла включает в себя, как минимум, четыре операции:

- осаждение пленки плазмохимического оксида кремния (ПХО);
- нанесение пленки SOG-материала;
- термический отжиг SOG-материала;
- осаждение пленки ПХО.

В полученной таким образом составной ПХО–SOG–ПХО диэлектрической межслойной пленке, которая сглаживает практически все неровности рельефа микросхемы, методами фотолитографии и плазмохимического травления формируются контактные окна к нижележащему слою металла. При этом профиль сформированного окна должен обеспечивать качественное «запыление» его металлом верхнего уровня. Однако при использовании SOG-материалов для планаризации достаточно часто наблюдаются случаи обрыва металла в области контактных окон из-за подтравливания пленки SOG и искажения вертикального профиля окна. Выявить и исключить причины этого явления — очень актуальная задача.

Настоящая работа посвящена исследованию причин изменения свойств SOG-пленок в процессе выполнения фотолитографии и плазмохимического травления, установлению влияния операций плазмохимического удаления фоторезиста (ПХУФ) на скорость химического травления SOG-пленки и влиянию скорости травления на искажение профиля контактного окна.

Методика исследований

Исследования проводились в типовом технологическом процессе изготовления интегральных КМОП-микросхем с двухуровневой топологией на пластинах КДБ-12 диаметром 150 мм. На всех пластинах формировалась трехслойная диэлектрическая пленка ПХО–SOG–ПХО. В качестве SOG-материала использовался метилсилоксановый SOG марки 315F (фирма Filmtronics).

Пластины были разделены на две группы. При выполнении технологических операций на второй группе первая использовалась в качестве контрольной (в ней формирование топологического рисунка не проводилось, **рис. 2**)

На пластинах второй группы в составной диэлектрической пленке ПХО–SOG–ПХО формировались контактные окна в соответствии со схемой, представленной на **рис. 3**.

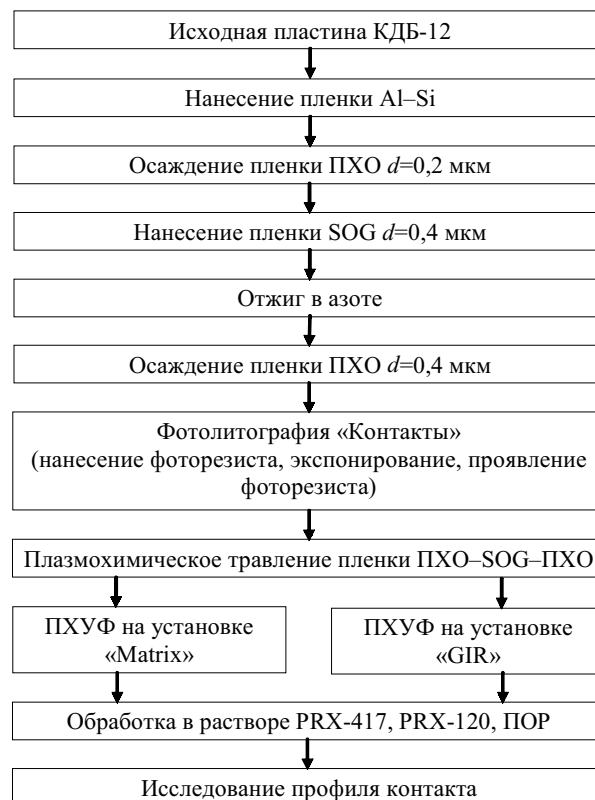


Рис. 3. Схема технологического маршрута для пластин второй группы

Таблица 1
 Параметры процессов плазмохимического удаления фоторезиста

Параметр процесса	Установка Matrix-108	Установка GIR-260S
Частота ВЧ-генератора	2,45 ГГц	13,56 МГц
Температура пластины на столике, °C	250	25
Метод удаления фоторезиста	СВЧ-плазма	Реактивно-ионное травление (ВЧ-плазма)

Операции плазмохимического травления (ПХТ) пленки ПХО–SOG–ПХО выполнялись на установке GIR-260SO фирмы Alcatel при мощности ВЧ-генератора 700 Вт и объемном соотношении компонентов травителя $\text{Ar}:\text{CF}_4:\text{CHF}_3=30:4:3$.

Операции плазмохимического удаления фоторезиста проводились на установках Matrix-108 и GIR-260S при параметрах процесса, представленных в табл. 1.

Операция удаления полимера выполнялась в одном из растворов:

— PRX-417 (фирма Shipley, США) — водно-органический раствор, содержащий фторид-ионы, время обработки 30 минут при комнатной температуре;

— PRX-120 (фирма Shipley, США) — водно-органический раствор, не содержащий фторид-ионы, время обработки 30 минут при комнатной температуре;

— перекисно-очищающий раствор (ПОР) — водный раствор перекиси водорода, время обработки 10 минут при температуре $70 \pm 5^\circ\text{C}$.

После выполнения каждой технологической операции на пластинах первой группы для SOG-пленки определялись показатель преломления, качественный состав пленки, скорость травления в растворе для удаления полимерных остатков после ПХТ.

Показатель преломления определяли на лазерном эллипсометре ЛЭФ-3М-1 с компьютерной обработкой полученных результатов.

Качественный состав SOG-пленки оценивался с помощью спектрофотометра Specord M80 (Германия).

Скорость травления определялась по уменьшению толщины SOG-пленки после обработки в растворах различного состава. Толщина пленки определялась на автоматизированном измерителе толщины LTS-M/SP фирмы Leica.

Параллельно на пластинах второй группы контролировался профиль контактного окна и качество его очистки от полимерных остатков после ПХТ межслойного диэлектрика. Для исследования профиля контактных окон использовался растровый электронный микроскоп фирмы Hitachi.

Анализ результатов исследований

Основной причиной отсутствия контакта между двумя слоями металлов Me-1 и Me-2 при использовании SOG-материалов для планаризации рельефа микросхемы являются обрывы напыляемого металла Me-2 верхнего уровня в контактных окнах, сформированных в межслойном диэлектрике ПХО–SOG–

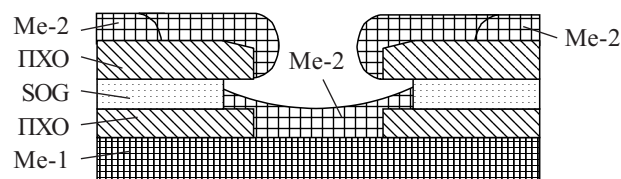


Рис. 4. Обрыв слоя «Me-2» при искажении вертикального профиля контактного окна

ПХО (рис. 4). Это связано с искажением вертикального профиля контактного окна вследствие значительного бокового подтравливания пленки SOG при удалении полимерных остатков в органических растворах, содержащих F^- -ионы.

При сопоставлении технических характеристик SOG-материала типа 315F и скорости его травления в растворе PRX-417 было установлено, что структурное изменение пленки SOG, в результате которого значительно увеличивается скорость ее травления может произойти при выполнении операций, предшествующих химической обработке. Это и приводит к возникновению боковых полостей в контактных окнах.

Типовой маршрут формирования контактных окон в диэлектрической пленке ПХО–SOG–ПХО включает в себя следующие технологические операции:

- формирование топологического рисунка контактных окон в слое фоторезиста;
- плазмохимическое травление пленки ПХО–SOG–ПХО через маску фоторезиста;
- плазмохимическое удаление фоторезиста;
- отжиг в среде кислорода при температуре 425°C ;
- удаление полимерных остатков в химических растворах различного состава.

Очевидно, что первая и последняя операции не влияют на структуру пленки SOG, но она может измениться при выполнении любой из трех операций: плазмохимического травления, плазмохимического удаления фоторезиста, отжига в среде кислорода.

Также было установлено, что скорость травления пленки SOG 315F практически не изменяется после выполнения операций отжига и плазмохимического травления (табл. 2).

В то же время, операция плазмохимического удаления фоторезиста, выполняемая в кислородной плазме, оказывает значительное влияние на свойства пленки SOG. Установлено, что скорость травления пленки SOG во фторсодержащих растворах зависит от энергетических параметров плазмы и, соответственно, от типа установки ПХУФ. Так, после выполнения операции ПХУФ на установке Matrix-108 скорость травления пленки SOG 315F в растворе PRX-417 возрастает в несколько раз, причем последующий отжиг в среде азота (425°C , 20 мин) не приводит к восстановлению свойств пленки и снижению скорости травления (табл. 2). Из фотографий на рис. 5, а, б видно, что после выполнения операции ПХУФ на установке Matrix-108 и удаления полимера в растворе PRX-417 профиль контактного окна изменяется. При этом появляется полость из-за сильного бокового подтравливания пленки SOG. Такой профиль контактного окна в дальнейшем приводит к обрыву слоя металла.

Скорость травления пленки SOG 315F в растворе PRX-417 после выполнения различных операций

Выполненные операции	Раствор для удаления полимера	Скорость травления SOG-пленки, нм/мин
Нанесение SOG	PRX-417	9
Нанесение SOG — отжиг в N ₂	PRX-417	0,3
Нанесение SOG — отжиг в N ₂ — ПХТ SOG	PRX-417	0,5
Нанесение SOG — отжиг в N ₂ — ПХТ SOG — ПХУФ на установке Matrix	PRX-417	3,88
Нанесение SOG — отжиг в N ₂ — ПХТ SOG — ПХУФ на установке GIR	PRX-417	0,93
Нанесение SOG — отжиг в O ₂ — ПХТ SOG	PRX-417	0,59
Нанесение SOG — отжиг в N ₂ — ПХТ SOG — ПХУФ на установке Matrix — обработка в PRX-417 — отжиг в N ₂	PRX-417	3,62
Нанесение SOG — отжиг в O ₂	PRX-417	0,3
Нанесение SOG — отжиг в N ₂ — ПХТ SOG	PRX-120	0
Нанесение SOG — отжиг в N ₂ — ПХТ SOG	ПОР	0

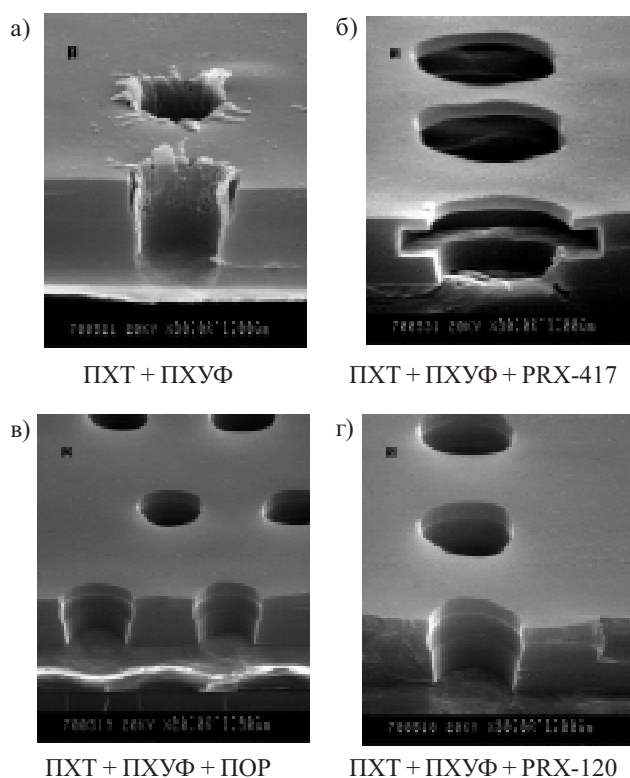


Рис. 5. Вид контактных окон в слое ПХО–SOG–ПХО после удаления фоторезиста на установке Matrix для различных режимов удаления полимера

При удалении полимерных остатков в растворах, не содержащих ионы F⁻ (рис. 5, в, г) профиль контакта не нарушается, т. к. не происходит травления пленки SOG. Однако при этом полимер удаляется не полностью.

При выполнении операции ПХУФ на установке GIR-260 (рис. 6) профиль контактного окна в меньшей мере подвержен изменениям в процессах химической обработки. Однако в этом случае во всех исследуемых растворах не наблюдалось полного удаления полимера из области контакта.

При анализе параметров процесса ПХУФ (табл. 1), скорости травления пленки SOG после различных

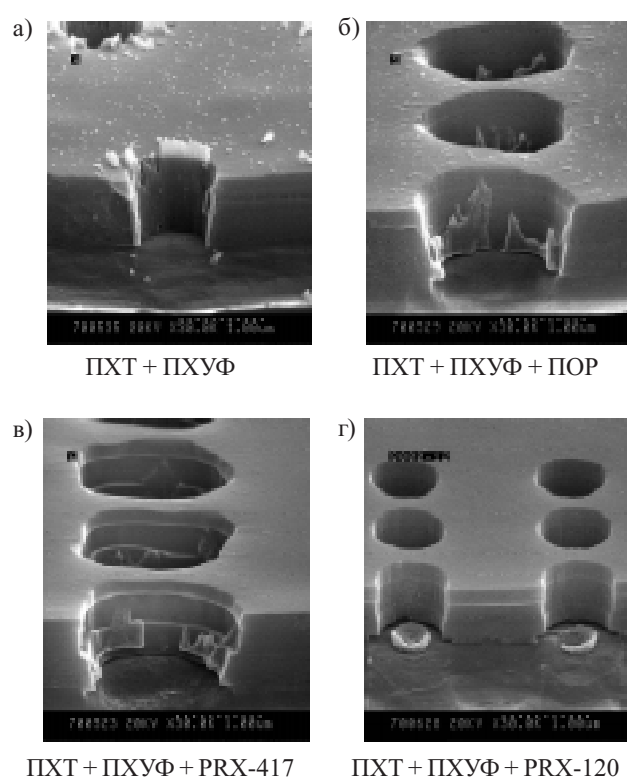


Рис. 6. Вид контактных окон в слое ПХО–SOG–ПХО после удаления фоторезиста на установке GIR для различных режимов удаления полимера

обработок (табл. 2) и полученных профилей контактных окон (рис. 5, 6) было установлено, что радикалы кислорода, образующиеся в СВЧ-плазме на установке Matrix-108, обладают высокой проникающей способностью и энергией, достаточной для изменения химического состава пленки SOG по всей глубине проникновения радикалов. Это приводит к повышению скорости травления пленки SOG в растворах, содержащих F⁻-ионы. Кроме того, под воздействием радикалов кислорода модифицируется полимер, что способствует его полному удалению в растворах PRX-417, PRX-120 и ПОР.

Таблица 3
Значения показателя преломления пленок SOG после обработки

Вид обработки SOG	<i>n</i>
Отжиг в N ₂	1,402
Отжиг в N ₂ + ПХУ SOG	1,413
Отжиг в N ₂ + ПХУ SOG + ПХУФ на установке Matrix	1,419
Отжиг в N ₂ + ПХУ SOG + ПХУФ на установке GIR	1,433
Пленка SOG без обработки	1,424
Отжиг в O ₂	1,419

Что касается радикалов кислорода, образующихся в ВЧ-плазме на установке GIR-260, то их проникающая способность и энергия значительно ниже. Вследствие этого практически не происходит изменения состава пленки SOG и состава полимерных загрязнений при удалении фоторезиста, что значительно ухудшает качество очистки контактных окон от полимера в химических растворах.

Для оценки качества пленки SOG необходимо выбрать параметр, отражающий ее структурные изменения. Из приведенных в табл. 3 результатов эллипсометрических измерений видно, что показатель преломления пленки SOG после различных обработок находится практически на одном уровне (1,4—1,42). Следовательно, по изменениям показателя преломления невозможно отслеживать структурные изменения в пленке.

Анализ спектров пропускания пленок SOG в диапазоне длин волн 2,5—50 мкм после различных технологических операций позволил установить изменение химического состава пленок. Все исследуемые образцы SOG-пленок, кроме образца, обработанного на установке ПХУФ Matrix, имеют полосы поглощения на длинах волн 7,8; 9,1 и 9,5 мкм, соответствующие поглощению связей Si—CH₃, Si—O и гидроксильной группы —O—H (рис. 7, а). Образец, обработанный на установке ПХУФ Matrix (рис. 7, б) не имеет полос поглощения, соответствующих связи Si—CH₃ и гидроксильной группе. Однако спектр этого образца имеет полосу поглощения с $\lambda=9,3$ мкм, соответствующую поглощению связи Si—O. Отсутствие в пленке SOG связей Si—CH₃ и Si—OH после обработки ее в кислородной СВЧ-плазме максимально приближает химический состав пленки SOG к составу диоксида кремния, что и обуславливает травление пленки в растворе PRX-417 в соответствии с уравнением реакции



Проведенные исследования показали, что основной причиной изменения структуры пленки SOG, используемой для планаризации рельефа в межслойном диэлектрике, является воздействие на пленку кис-

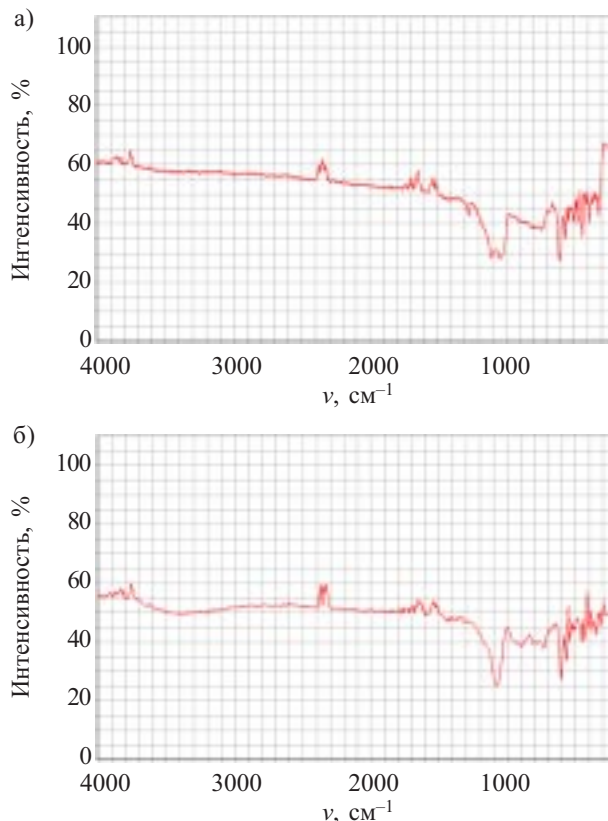


Рис. 7. ИК-спектры пропускания пленки SOG 315F до и после обработки:

а — после нанесения SOG-пленки и отжига в N₂; б — после ПХУФ на установке Matrix

лородной СВЧ-плазмы при плазмохимическом удалении фоторезиста.

Обработка в кислородной ВЧ-плазме не приводит к модификации пленки SOG. Однако при этом происходит неполное удаление полимера из контактных окон.

При изучении взаимосвязи между качественным составом пленок SOG и их техническими характеристиками было установлено, что оценка качества пленки после различных операций технологического процесса изготовления интегральных микросхем может проводиться по изменению спектра пропускания пленок.

Использование результатов данной работы позволит исключить брак ИМС, обусловленный обрывом слоя металла и отсутствием контактов между слоями.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Плазменная технология в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. — М.: Мир, 1987.
2. Иванчиков А. Э., Кисель А. М., Медведева А. Б. и др. Методы удаления полимерных загрязнений, вызванных плазмохимическим травлением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — № 5. — С. 46—50.