

УДК 621.382.8.002

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИИМИДНОЙ ПЛЕНКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОУРОВНЕВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ СУБМИКРОННЫХ БИС

С.Ф. СЕНЬКО<sup>1</sup>, А.В. ЕМЕЛЬЯНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси  
Купревича, 10, Минск, 2201412, Беларусь,

<sup>2</sup>НПО "Интеграл"  
Корженевского, 12, Минск, 220108, Беларусь

Поступила в редакцию 5 февраля 2007

Исследованы кинетика имидизации полипиромеллитамидной кислоты в тонких пленках и влияние режимов ее термообработки на электрофизические характеристики многоуровневой системы металлизации ИС. Показано, что увеличение температуры процесса имидизации сокращает время операции, но при этом ухудшаются электрические характеристики формируемого межуровневого диэлектрика. Обеспечение приемлемой адгезии металла к полиимиду за счет ступенчатой термообработки сопровождается повышением устойчивости системы металлизации к электромиграции при одновременном снижении напряжения пробоя диэлектрика. Сохранение высоких диэлектрических характеристик полиимидной пленки достигается при одностадийной термообработке с последующей модификацией поверхности для обеспечения приемлемой адгезии между слоями. Для повышения устойчивости полученной системы металлизации к электромиграции рекомендуется проводить двухстадийную термообработку металлической пленки сначала во влажной атмосфере, а затем — в сухой.

*Ключевые слова:* многоуровневая металлизация, межуровневый диэлектрик, полипиромеллитимид, межфазное взаимодействие, надежность.

### Введение

Постоянное повышение сложности интегральных схем (ИС) характеризуется значительным уменьшением размеров активных элементов, что позволяет увеличить их количество на одном кристалле. В свою очередь, это требует соответствующего увеличения суммарной длины электрических межсоединений. Поскольку уменьшение площади поперечного сечения проводников приводит к недопустимому увеличению их электрического сопротивления, то площадь кристалла, занятая электрической разводкой, оказывается намного больше площади, занимаемой активными элементами [1,2]. Одним из возможных решений данной проблемы является создание многоуровневых межсоединений, представляющих собой чередующиеся проводящие и диэлектрические слои требуемой конфигурации.

В качестве межслойного диэлектрика систем металлизации ИС наиболее широко используются неорганические пленки (оксид кремния, силикатные стекла, нитрид кремния и др.), имеющие хорошую совместимость с соседними слоями: высокую адгезию, селективность травления и т.д. Однако сильно развитый рельеф не позволяет использовать их для изготовления многоуровневых системы металлизации. Это связано с необеспечением

планарности покрытия, так как пленка повторяет рельеф топологии ИС, что приводит к обрывам дорожек металлизации на ступеньках структуры.

Выходом из сложившейся ситуации является использование пленок органических диэлектриков. Они наносятся методом центрифугирования, что обеспечивает необходимую планарность и неразрывность покрытий. Это радикально решает проблему планаризации. В качестве таких диэлектриков в последнее время все чаще выступают полиимиды (ПИ), комплекс физико-химических свойств которых наиболее полно отвечает требованиям микроэлектроники [3–16]. Наибольшее распространение среди них получили пленки на основе полипиромеллитимида. Отличительной особенностью их получения является использование в качестве исходного материала полиамидокислоты (ПАК), которая в результате термообработки превращается в полиимид. С использованием полиимидного межуровневого диэлектрика можно получить до пяти уровней электрической разводки [7].

Полностью имидизированная пленка химически достаточно инертна и не вступает в реакции с контактирующими слоями, в то время как ПАК содержит функциональные группы  $-\text{COOH}$  и  $-\text{NH}-$ , которые обладают определенной химической активностью. Поэтому режимы термообработки ПАК оказывают существенное влияние не только на характеристики получаемой пленки, но и на характер протекающих реакций межфазного взаимодействия в многослойной системе металлизации, которые оказывают заметное влияние на электрофизические характеристики получаемых структур.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния режимов формирования полиимидной пленки на электрофизические характеристики многоуровневой системы металлизации ИС.

### Приготовление образцов и методики экспериментов

Исходным материалом для получения полиимидной пленки служил раствор полипиромеллитамидной кислоты в диметилформамиде (ДМФА). Концентрация раствора выбиралась из соображений получения необходимой вязкости 25–30 сСт. Полиамидную пленку формировали методом центрифугирования на автомате нанесения фоторезиста и высушивали в конвейерной печи технологической линии "Лада". Процесс имидизации полученной пленки полиамидокислоты проводили в печи СДО 3/15 в атмосфере азота. Толщина полиимидной пленки составила 1,0–1,1 мкм.

Анализ процессов, происходящих в полиамидокислоте при ее нагревании, и определение температурных интервалов проведения реакции имидизации, проводили на основании термогравиметрических исследований ПАК на дериватографе OD-102. Для этого были получены зависимости изменения массы образца от температуры (термогравиметрическая кривая ТГ) и поглощаемое или выделяемое при этом количество тепла (кривая дифференциального термического анализа ДТА).

ИК-спектроскопическое исследование процесса имидизации ПАК проводили с помощью спектрометра SPECORD IR75. С этой целью использовали пленки, сформированные на кремниевых пластинах КЭФ20, прозрачных в ИК-диапазоне. Образцы отжигали при разных температурах в течение различного времени в инертной атмосфере (азот). Степень имидизации пленки определяли на основании изменения интенсивности полос поглощения в ИК-диапазоне [17]:

725  $\text{см}^{-1}$  — деформационные колебания  $\text{C}=\text{O}$  в цикле;

1380  $\text{см}^{-1}$  — валентные колебания  $\text{C}-\text{N}$ ;

1780  $\text{см}^{-1}$  — симметричные валентные колебания  $\text{C}=\text{O}$ ;

1550  $\text{см}^{-1}$  — колебания связи  $\text{C}-\text{NH}$ .

При расчете промежуточных значений степени имидизации  $i$  в качестве эталонных образцов ( $i=100\%$ ) использовали пленки после термообработки при 350°C в течение 60 мин.

Измерение электрофизических характеристик полученной системы металлизации проводили на тестовых элементах, изготовленных стандартными методами в соответствии с действующим технологическим процессом. В качестве материала металлизации использовали алюминий с добавкой 1% кремния.

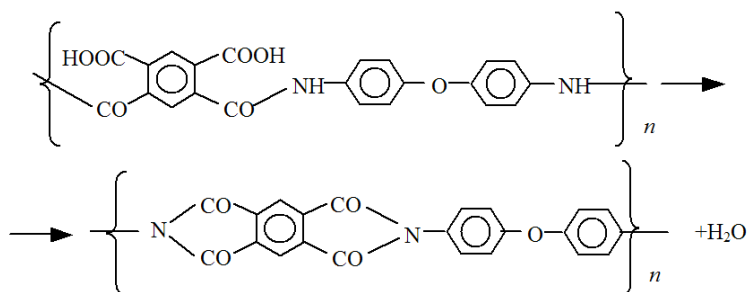
Оценку устойчивости системы металлизации к электромиграции проводили на основании зависимости времени наработки на отказ  $t_p$  от условий испытаний:

$$\frac{S}{t_p} = Fj^2 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right),$$

где  $S$  — поперечное сечение проводника;  $F$  — эмпирический коэффициент, зависящий от характеристик токопроводящей системы, удельного сопротивления материала пленки, условий теплоотвода, особенностей микрорельефа тестовой структуры и т.п.;  $j$  — плотность тока через структуру;  $E_a$  — энергия активации процесса электромиграции;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура [18]. Испытания проводили при температурах 398 и 523 К и плотности тока  $10^6$  А·см<sup>-2</sup>. По полученным экспериментальным значениям  $t_p$  строили зависимости  $\ln(S/t_p Fj^2) - 1000/T$  и на основании тангенса наклона полученной прямой определяли  $E_a$ .

### Полученные результаты и их обсуждение

Процесс имидизации ПАК протекает при ее нагревании согласно реакции [15]:



Образование имидных циклов сопровождается выделением имидизационной воды и способствует заметному повышению жесткости макромолекул полимера.

На рис. 1, а, б приведены термогравиметрические кривые, отражающие изменение веса ПАК при нагревании (кривая ТГ) и поглощаемое (пик вниз) или выделяемое (пик вверх) при этом количество тепла (кривая ДТА) соответственно.

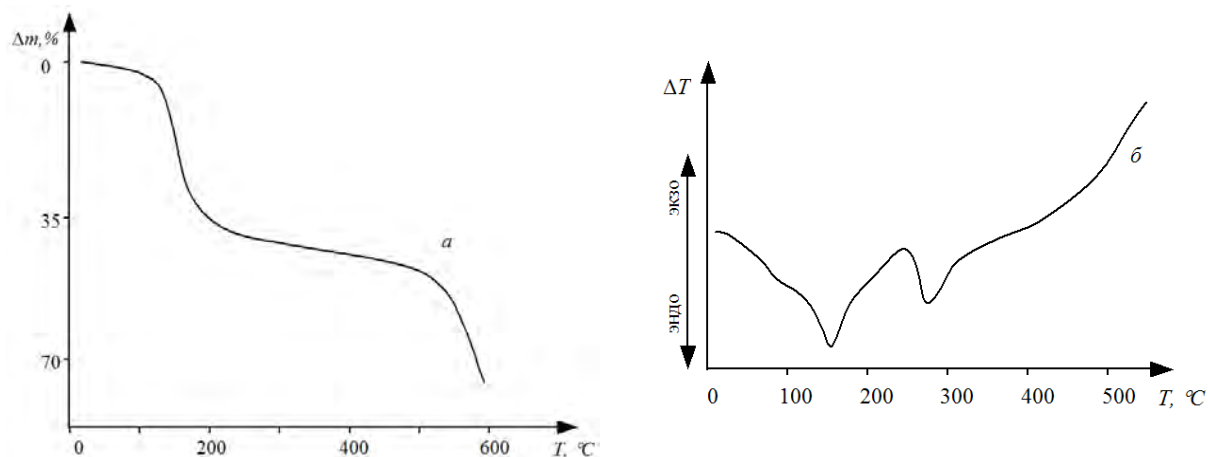


Рис. 1. Термогравиметрические характеристики раствора полипиромеллитамидной кислоты в диметилформамиде

Первая ступенька потери массы на кривой ТГ, наблюдаемая в интервале температур примерно 120–150 $^\circ\text{C}$ , свидетельствует об интенсивном испарении растворителя из раствора ПАК. Этот факт хорошо согласуется с температурой кипения ДМФА, равной 153 $^\circ\text{C}$ , и наличием эндотермического пика на кривой ДТА. Пик на кривой ДТА является сдвоенным с максимумами при температурах около 80 и 150 $^\circ\text{C}$ . Первый пик не сопровождается

дополнительной ступенькой на кривой потери массы и, вероятно, связан с разрушением ассоциатов ПАК и ДМФА.

Начало процесса имидизации и выделения имидизационной воды совпадает с выделением растворителя, так как потеря массы характеризуется наличием только одной ступеньки. Пик на кривой ДТА в интервале температур 240–300°C не сопровождается изменением массы образца, что характерно для фазовых переходов. В данном случае его можно определить как переход полимера в вязкотекучее состояние, что характерно для большинства высокомолекулярных соединений. Подтверждением этого является резкое изменение модуля Юнга для полипиромеллитимида в этом же температурном интервале [6]. Потеря массы продолжается с ростом температуры, что, вероятно, связано с постепенным испарением имидизационной воды. Температура примерно 510°C является критической для полипиромеллитимида — начинается его горение. Этот процесс сопровождается резкой потерей веса на кривой ТГ и сильным экзотермическим эффектом на кривой ДТА.

На рис. 2 приведено изменение степени имидизации ( $i$ ) от времени обработки ( $t$ ) при разных температурах, выбранных их всего возможного интервала. Из приведенных зависимостей видно, что окончание процесса имидизации зависит от температуры и времени процесса. Если температура недостаточно высока, то величина  $i$  достигает некоторого промежуточного значения и далее практически не меняется независимо от времени. При температурах 180 и 250°C степень имидизации не достигает 100% вне зависимости от времени обработки. При температурах 300 и 475°C пленка имидизируется полностью за технологически удобное время — до 30 мин.

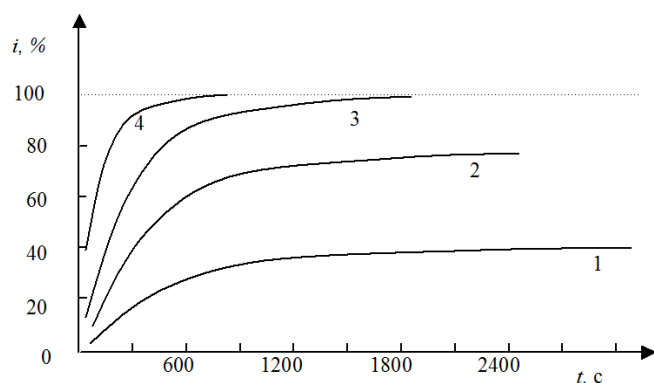


Рис. 2. Зависимость степени имидизации ( $i$ ) от времени обработки ( $t$ ) при температуре (°C): 1 — 180; 2 — 250; 3 — 300; 4 — 475

Данное явление связано с увеличением жесткости макромолекул полимера по мере его имидизации и возникающими в связи с этим пространственными затруднениями для сближения реагирующих функциональных групп [6]. Повышение температуры способствует увеличению подвижности макромолекул, что приводит к повышению степени имидизации. Этот факт хорошо согласуется с обнаруженной предельной температурой полной имидизации, равной примерно 300°C, соответствующей полному переходу полимера в вязкотекучее состояние, что

отчетливо видно по верхнему краю второго эндотермического пика на кривой ДТА. Верхний предел температуры имидизации при этом составляет примерно 500°C. При более высоких температурах, как следует из термогравиметрических характеристик, начинается термодеструкция полимера.

Поскольку электрические свойства полиамида значительно уступают свойствам полиимида, то для достижения наилучших характеристик системы металлизации заключительная стадия термообработки ПАК должна обеспечивать полную ее имидизацию. Однако полностью имидизированная пленка химически инертна и не взаимодействует с нанесенной на нее пленкой алюминиевого сплава, используемого для формирования электрической разводки. Это приводит к неудовлетворительной адгезии пленки металла к межуровневому диэлектрику. Дорожки металлизации отделяются от полиимида уже на стадии формирования фотолитографического рисунка.

Решение данной проблемы достигается двумя путями. Первый из них основан на использовании частично имидизированных пленок, по существу, полиамидоимидов [19]. Термообработка ПАК при этом проводится в несколько стадий. До нанесения пленки сплава алюминия максимальная температура термообработки не превышает 300°C. Достигнутые при этом физико-механические свойства пленки полиамидоимида позволяют проводить ее

дальнейшую технологическую обработку, в частности, процессы фотолитографии. После нанесения пленки металла проводится заключительная стадия имидизации при температуре выше 300°C. При этом макромолекулы полимера приобретают необходимую подвижность для завершения имидизации, а часть функциональных групп затрачивается на образование адгезионных связей.

Второй путь основан на модификации поверхности полностью имидизированной пленки путем ее обработки в щелочной среде [4, 16, 20]. Имидные циклы, находящиеся на поверхности пленки, гидролизуются с образованием исходных функциональных групп –COOH и –NH–. Последующее нанесение пленки металла и формирование рисунка электрической разводки происходит без затруднений.

Таким образом, формирование межуровневой диэлектрической изоляции на основе полиимидной пленки может быть осуществлено различными способами. Для исследования влияния условий термообработки полиимидной пленки на характеристики изготавливаемой системы металлизации и выбора оптимальных режимов ее формирования были изготовлены тестовые структуры в соответствии с требованиями [18] и проведены их испытания. При этом были рассмотрены следующие варианты термообработки ПАК:

а) двухстадийная имидизация в различных технологических циклах с проведением заключительной стадии непосредственно после нанесения металлической пленки при температуре не выше 350°C (верхний температурный предел в данном случае ограничен рекристаллизацией металлической пленки, приводящей к невозможности получения фотолитографического рисунка требуемого качества из-за растратов токопроводящих дорожек в областях более крупных зерен);

б) одностадийная имидизация при температуре 350°C с последующей модификацией поверхности в полиамид;

в) одностадийная имидизация при температуре 475°C с последующей модификацией поверхности в полиамид;

г) двухстадийная имидизация в одном технологическом цикле при повышении температуры от 350 до 475°C с последующей модификацией поверхности в полиамид;

д) двухстадийная имидизация в одном технологическом цикле при понижении температуры с 475 до 350°C с последующей модификацией поверхности в полиамид.

В качестве контролируемых параметров были приняты адгезия металлической пленки к полиимиду, переходное сопротивление контактов между различными уровнями металла, напряжение пробоя изоляции и устойчивость металлизации к электромиграции.

Контроль адгезии дорожек металлизации к полиимидному межуровневому диэлектрику проводили методами оптической микроскопии при увеличении от  $120\times$  до  $1000\times$ . Для всех вариантов термообработки не обнаружено отслоения дорожек металлизации. Результаты контроля адгезии в соответствии с [18] также являются положительными. Сопротивление контактов определяли на основании измерения сопротивления цепочек из 100 контактов. Полученные значения для варианта *а* составили 0,024 Ом/контакт, а для вариантов *б–д* — 0,022 Ом/контакт. Это свидетельствует о полноте вскрытия контактных окон и отсутствии побочных эффектов, влияющих на контактное сопротивление.

За напряжение пробоя  $U_{\text{проб}}$  принимали напряжение на структуре, при котором ток утечки составлял 1 нА. По полученным значениям напряжений строили гистограммы, которые приведены на рис. 3, *а–д*. Индексы гистограмм соответствуют выбранному режиму имидизации. Из приведенных данных видно, что напряжение пробоя меняется в интервале от 225 до 325 В, и в принципе все режимы позволяют получать приемлемые характеристики структур. Тем не менее, для структур *а* максимальное количество значений  $U_{\text{проб}}$  лежит в интервале от 275 до 300 В. То же самое относится и к структурам типов *в* и *д*, хотя доля значений  $U_{\text{проб}}$  в интервале от 300 до 325 В в данном случае выше, чем для структур типа *а*. Для структур типов *б* и *г* наибольшее количество значений  $U_{\text{проб}}$  находится в интервале 300–325 В.

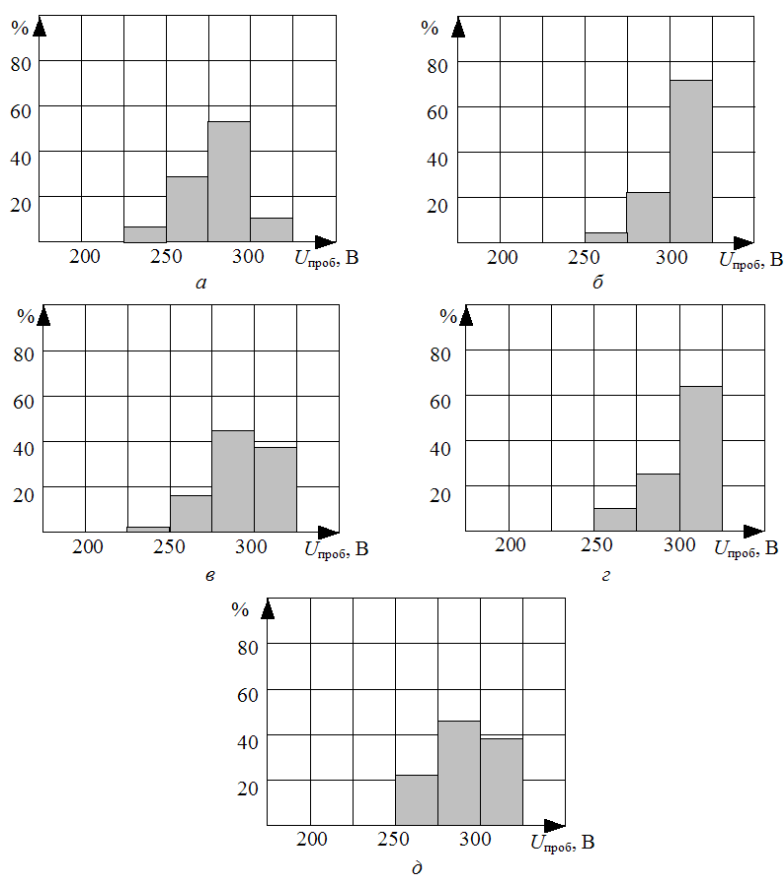


Рис. 3. Гистограммы распределения напряжения пробоя межуровневой изоляции, полученной при различных режимах имидизации

Предполагаемыми причинами наблюдаемой картины являются следующие. Для варианта *а* наиболее вероятным является проращение образующегося под действием выделяющейся имидизационной воды оксида алюминия в полиимидную пленку. При этом наличие воды и замкнутое пространство способствуют образованию солей алюминия и ПАК, что приводит к повышению электропроводности полиимидной пленки.

Для варианта *б* получены наилучшие результаты, что свидетельствует о наиболее полном протекании процессов имидизации и отсутствии побочных реакций.

Для варианта *в* напряжение пробоя несколько ниже. На первый взгляд, можно предположить, что характеристики пленок, полученных при более высокой температуре, будут лучше. Однако в действительности оказалось все наоборот. Данный факт можно объяснить тем, что при температуре 475°C процесс имидизации не является сугубо внутримолекулярным. Из-за высокой подвижности макромолекул при высокой температуре возможно сближение реагирующих функциональных групп, принадлежащих различным цепям или звеньям одной и той же макромолекулы, вследствие чего происходит межмолекулярная сшивка. При этом часть функциональных групп может остаться непрореагировавшими из-за того, что ближайшая к ним функциональная группа того же звена прореагировала с функциональной группой другой макромолекулы. Наличие таких групп способствует повышению электропроводности пленки, что снижает напряжение ее пробоя.

Для варианта *г* также получены отличные результаты. Это свидетельствует о том, что при температуре 350°C произошла полная внутримолекулярная имидизация пленки, и дальнейший нагрев до температуры до 475°C не привел к изменению ее характеристик.

Характеристики структур, полученных по варианту *д*, близки к характеристикам структур варианта *в*. Недостатки межмолекулярной сшивки макромолекул при температуре 475°C не устраняются последующей термообработкой при более низкой температуре, что вполне закономерно.

На рис. 4 приведены зависимости напряжения пробоя межуровневой изоляции от времени термообработки при температурах 350°C (кривая 1) и 475°C (кривая 2). Из них видно, что максимальное напряжение пробоя при температуре 475°C достигается быстрее, но оно заметно ниже. Для полной стабилизации пробивного напряжения при температуре 350°C необходим нагрев формируемой пленки в течение, по крайней мере, 1 ч. Наиболее вероятной причиной наблюдаемого явления является удаление имидизационной воды.

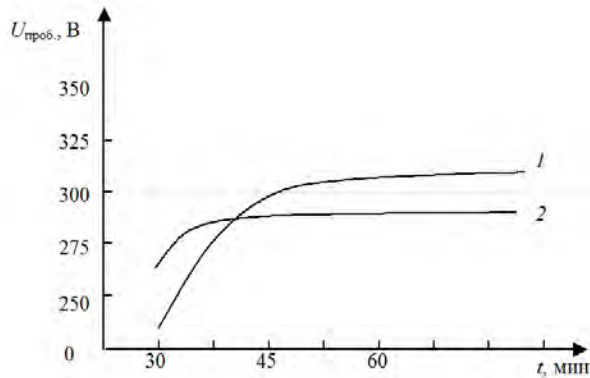


Рис. 4. Зависимость напряжения пробоя межуровневой изоляции от времени термообработки при различных температурах: 1 — 350°C; 2 — 475°C

Сравнение полученных значений  $U_{\text{проб}}$  с величинами, характерными для диоксида кремния (360–450 В для толщины  $\sim 0,6$  мкм) показывает, что в последнем случае напряжение пробоя заметно выше. Для анализа данного явления с поверхности структур были удалены второй уровень металлизации и межуровневый диэлектрик. Поверхность первого уровня металлизации исследовали методом электронной микроскопии. На рис. 5 приведены фотографии поверхности металла первого уровня после удаления полиимида (а) и диоксида кремния (б). В том и другом случае поверхность металла характеризуется наличием бугорков (монокристаллических зерен аномально большого размера). В случае использования полиимида размеры бугорков в высоту больше, они выглядят заостренными, а в случае использования диоксида кремния — размеры бугорков в плане превышают размеры в высоту, а их вершина относительно плоская. Образование бугорков металлизации широко известно, их возникновение связано с наличием сжимающих напряжений в пленках металла [21–23]. В данном случае их особенностью является заметный рост в направлении, перпендикулярном поверхности, так как эластичность полимера не создает заметного сопротивления их росту. Диоксид кремния является довольно плотным и твердым, что затрудняет рост зерен алюминия в высоту. Это и приводит к возникновению в полиимидном диэлектрике локальных участков меньшей толщины, снижающих напряжение его пробоя.

Результаты контроля устойчивости системы металлизации к электромиграции для различных режимов формирования полиимидной пленки приведены на рис. 6 в виде зависимостей  $\ln(S/t_p F j^2) - 1000/T$ . Варианту а соответствует зависимость 1 и значение  $E_a = 0,99$  эВ, вариантам б–д — зависимость 2 и значения  $E_a$  от 0,85 до 0,87 эВ.

Полученные значения энергии активации составляют вполне приемлемую величину, хотя и меньше ожидаемой. Это заметно больше значений, полученных для структур с неорганическим диэлектриком (низкотемпературный SiO<sub>2</sub>) и сильно развитым рельефом, но меньше, чем для таких же структур со слабо развитым рельефом [21, 22]. Причем пленки, имидизированные в две стадии (вариант а), характеризуются большими значениями  $E_a$ . Это можно объяснить тем, что в данном случае протекает побочная реакция окисления алюминия имидизационной водой. Процесс протекает преимущественно по границам зерен, что приводит к повышению удельного сопротивления металла и одновременно к повышению его стойкости к электромиграции. Выше было отмечено, что переходное контактное сопротивление между различными уровнями металла для данного режима имидизации немного выше. Скорее всего, это связано именно с повышением удельного сопротивления дорожек металлизации.



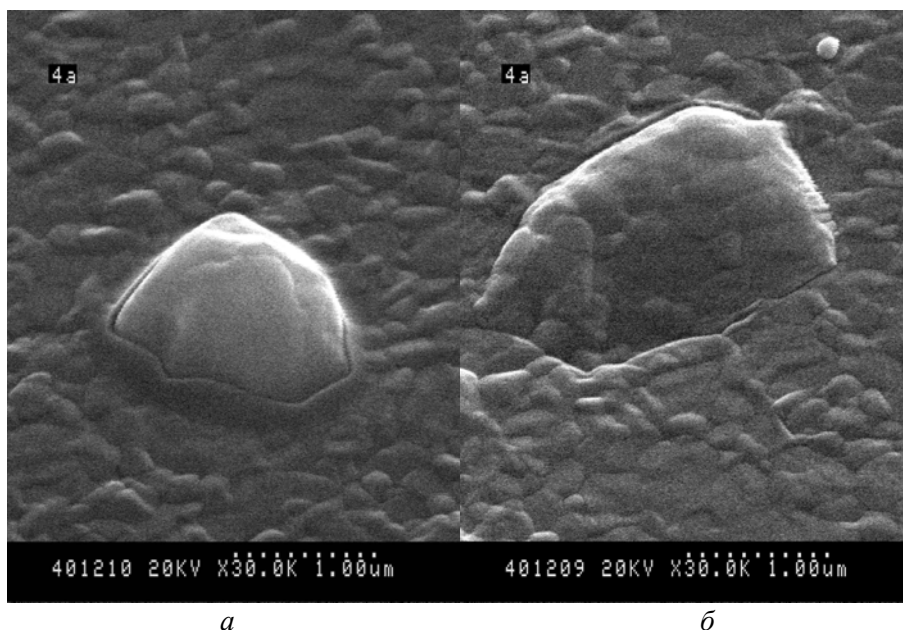


Рис. 5. Поверхность металлической пленки первого уровня после удаления полиимидного (а) и оксидного (б) диэлектриков

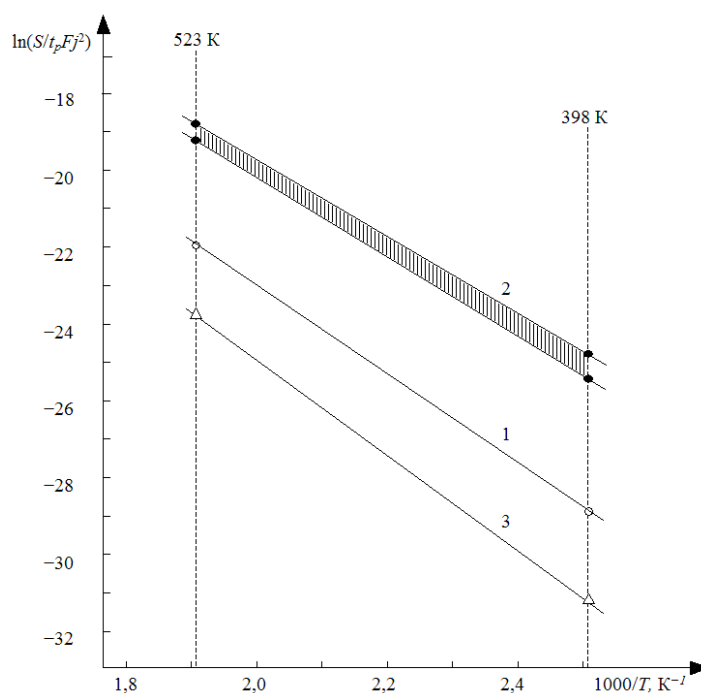


Рис. 6. Зависимость  $\ln(S/t_p F j^2)$  от обратной температуры  $1000/T$  для различных режимов формирования полиимидной пленки: 1 — вариант а, 2 — варианты б–д, 3 — вариант с окислительной термообработкой металлизации

Отсюда следует, что пленки алюминия и его сплавов по-разному взаимодействуют с межуровневым диэлектриком. Для пленок, нанесенных на диоксид кремния, характерно межфазное взаимодействие с образованием оксида алюминия и кремния, поглощаемых металлом, что приводит к повышению миграционной стойкости металлизации. В случае использования полиимида межфазное взаимодействие протекает с образованием солей, которые вряд ли способствуют повышению устойчивости металла к массопереносу.

В связи с этим для повышения миграционной стойкости металлизации с использованием полиимидного диэлектрика была исследована возможность применения



окислительной термообработки для получения омических контактов. Окисление алюминия происходит преимущественно по границам зерен, что создает энергетический барьер для массопереноса и повышает устойчивость пленки к электромиграции. Такие процессы давно исследованы и в данном случае не требуют дополнительного изучения. В качестве окислителя использовали воду, так как кислород может привести к деградации характеристик полиимидных пленок за счет их окисления. Вода также приводит к некоторым изменениям, однако они являются обратимыми, поскольку связаны преимущественно с адсорбцией влаги и гидролизом ПИ. Характеристики полностью восстанавливаются после кратковременной термообработки в сухой атмосфере в том же технологическом цикле. Значение энергии активации электромиграции при термообработке металлизации в окисляющей атмосфере (5 мин в аргоне с добавкой 3% воды плюс 20 мин в сухом аргоне при температуре 475°C), полученное на той же топологической структуре при прочих равных условиях, составило 1,07 эВ (рис. 6, зависимость 3).

### **Заключение**

Таким образом, оптимальным режимом имидизации полипиромеллитамидной кислоты в тонких пленках, нанесенных на полупроводниковую подложку, является термообработка в инертной атмосфере в течение 1 ч при температуре 350°C с последующей модификацией поверхности для обеспечения адгезии металлической пленки. Это позволяет получить максимальные напряжения пробоя за счет наиболее полного протекания внутримолекулярной циклизации. Более высокие температуры имидизации приводят к несколько меньшим значениям напряжения пробоя, что связано с внутримолекулярной сшивкой полимера и наличием непрореагировавших функциональных групп. Эластичность полиимида не создает заметных препятствий образованию бугорков первого уровня металлизации, что приводит к снижению напряжения пробоя структур независимо от режимов имидизации. Характер взаимодействия алюминия с полиимидом является причиной относительно невысокой устойчивости системы металлизации к электромиграции. Для ее повышения можно рекомендовать двухстадийную термообработку металлической пленки сначала во влажной атмосфере, а затем — в сухой.

Полученные результаты исследований могут быть использованы в технологии изготовления ИС с многоуровневой электрической разводкой.

## **EFFECT OF POLYIMIDE FILM FORMATION CONDITIONS ON ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF MULTILEVEL METALLIZATION OF SUBMICRON LSI**

S.F. SIANKO, A.V. EMELIANOV

### **Abstract**

The investigation is made of imidization kinetics of polypyromellitic acid in thin films and effect of the acid heat treatment conditions on electrophysical characteristics of LSI multilevel metallization system. The increase of imidization process temperature is shown to shorten the operation time but this leads to degrading the electrical characteristics of a formed interlevel dielectric. The acceptable metal-polyimide adhesion is ensured due to a two-stage heat treatment which is accompanied by increasing the electromigration stability of metallization system with simultaneous decrease of dielectric breakdown voltage. The retention of high dielectric characteristics of polyimide film is achieved during single-stage treatment with subsequent surface modifying for the purpose of ensuring an acceptable adhesion between layers. In order to increase electromigration stability of obtained metallization system it is recommended to carry out a two-stage heat treatment of a metal film first in a wet atmosphere and then in a dry one.

## Литература

1. *Валиев К.А., Орликовский А.А., Васильев А.Г., Лукичев В.Б.* // Микроэлектроника. 1990. Т. 19, № 2. С. 116–131.
2. *Zu C.* Технология СБИС: В 2-х кн. Пер. с англ. М., 1986.
3. *Wilson A.M.* // Thin solid films. 1981. Vol. 83, №2. P. 145–163.
4. *Сенько С.Ф., Снитовский Ю.П.* // Микроэлектроника. 2002. Т. 31, №3. С. 201–210.
5. *Narada Y., Matsumoto F., Nakakado T.* // Solid State Science and Technology. 1983. Vol. 130, N 1. P. 129–134.
6. *Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А.* Полиимиды — класс термостойких полимеров. Л., 1983.
7. *Takashi N., Atsushi S., Yashio H., Kiichiro M.* // Int. Electron Devices Meet., San Francisco. Calif., 13–15 Dec., 1982. Techn. Dig. New York. N.Y., 1982. P. 552–555.
8. *Котон М.М., Бессонов М.И., Сазонов Ю.Н.* // Пласт. массы. 1981. № 5. С. 22 – 26.
9. *Mittal K.L.* Polyimides: Synthesis, Characterization and Applications. Plenum. New York. 1984.
10. *Feger C., Khojasth M.M., McGrath J.E.* Polyimides: Materials, Chemistry and Characterization. Elsevier. Amsterdam. 1989.
11. *Wilson D., Stenzenberger H.D., Hergenrother P.M.* Polyimides. Blackie. Glasgow. 1990.
12. *Jie Yin, Yu-Feng Ye, Zong-Gvang Wang* // Eur. Polym. J. 1998. Vol. 34, N 12. P. 1839–1843.
13. *Lee Y.K., Craig J.D., Pye W.E.* // Proc 4<sup>th</sup> Bien. Univ. Gov. Int. Microelectron. Symp., Starkville, 1981, New York. N.Y., 1981. P. 30–39.
14. *Сенько С.Ф., Снитовский Ю.П.* // Труды XI-го Межнционального совещ. "Радиационная физика твердого тела". Севастополь. 25–30 июня 2001 г. М., 2001. С. 310–311.
15. *Выгодский Я.С.* Полиимиды // Химическая энциклопедия. В пяти томах. Том 3. Меди–Полимерные. Редкол.: Кнунянц И.Л. (гл. ред.) и др. М., 1992. С. 627–629.
16. *Сенько С.Ф., Снитовский Ю.П.* // Журнал прикладной химии. 2006. Т. 79. Вып. 10. С. 1701–1705.
17. *Лайус Л.А., Бессонов М.И., Калистова Е.В.* // Высокомолекулярные соединения. 1967. Т. А-9, № 10. С. 2185–2192.
18. Стандарт отрасли ОСТ 1114.1012–99. Микросхемы интегральные. Технические требования к технологическому процессу. Система и методы операционного контроля.
19. *Bährle D., Frasch P., König W. et al.* Verfahren zur Verbesserung der Haftung von metallischen Leiterzügen auf Polyimidschichten. IBM Deutschland GmbH. Заявка ФРГ, Кл. H01L 21/94, № 2638799, заявлено 27.08.76, опубл. 2.03.78.
20. *Сенько С.Ф., Емельянов В.А., Белоус А.И.* Способ изготовления системы металлизации полупроводниковых приборов. Пат. РБ № 7756 от 27.10.2005 г. МПК7 H01L 21/02, 21/28, 21/02, G01B 9/00.
21. *Достанко А.П., Баранов В.В., Шаталов В.В.* Пленочные токопроводящие системы СБИС. Минск, 1989.
22. *Олешко В.М., Белицкий В.Ф.* Массоперенос в тонких пленках. Минск, 1980.
23. *Стриха В.И., Бузанева Е.В.* Физические основы надежности контактов металл–полупроводник в интегральной электронике. М., 1987.