

07

## Физико-технологические особенности процесса установки кристаллов на временный носитель в технологии внутреннего монтажа

© Д.В. Вертянов,<sup>1</sup> Н.Е. Коробова,<sup>1</sup> А.В. Погудкин,<sup>1</sup> В.Д. Кравцова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет „МИЭТ“,  
124498 Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт химических наук им. А.Б. Бектурова,  
Алматы, Казахстан  
e-mail: korobova0210@gmail.com

Поступило в Редакцию 11 сентября 2019 г.

В окончательной редакции 13 февраля 2020 г.

Принято к публикации 18 февраля 2020 г.

Изучены физико-технологические особенности установки кристаллов на временный носитель в технологии внутреннего монтажа. Проведен обоснованный выбор материала из различных растворов полиамидокислот (ПАК) для фиксации кремниевых кристаллов активной стороной вниз на временный носитель. Установлена экспериментальная зависимость адгезионной прочности кремниевых кристаллов от времени жизни растворов ПАК. Показаны возможные дефекты, образующиеся при имидизации ПАК в процессе создания высокоинтегрированных микросборок, многокристалльных модулей и электронных модулей уровня „система в корпусе“.

**Ключевые слова:** технология, внутренний монтаж, полиимид, дефекты, модуль.

DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49809.315-19

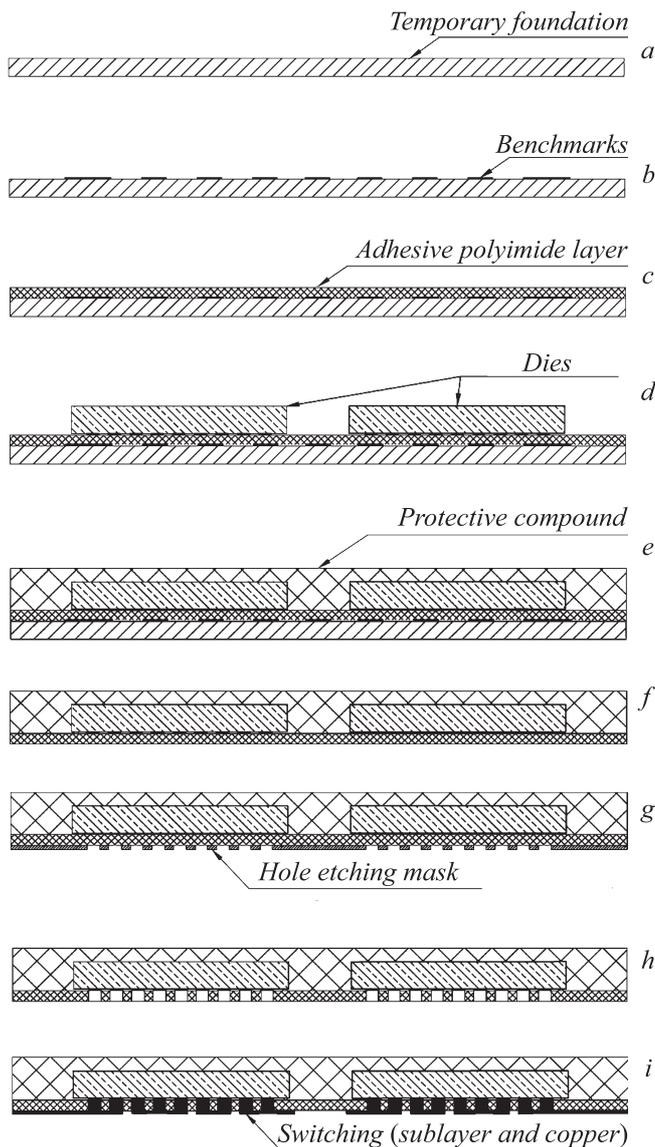
### Введение

С увеличением быстродействия, уменьшением массы и габаритов электронных устройств возрастают требования по минимизации паразитных электрических параметров межсоединений [1–3]. Сегодня наименьшие перекрестные помехи могут обеспечить безопасные и бессварочные методы, применяемые в технологиях внутреннего монтажа, которые позволяют значительно уменьшить габариты и повысить теплоотвод электронных устройств за счет более эффективного использования отводимого под устройства пространства [4]. Низкий уровень паразитных параметров в микросборках на основе безопасных и бессварочных технологий внутреннего монтажа объясняется особым способом получения межсоединений, который предполагает последовательное формирование диэлектрических слоев с несквозными (глухими) отверстиями и проводящих коммутационных слоев одновременно по всей поверхности заготовки (пластины или панели) [5]. В результате соединения между контактными площадками (КП) кристалла и внешней коммутацией формируются посредством процесса металлизации без применения промежуточных соединительных материалов (припоев, контактолов или анизотропных проводящих лент) и без использования высокотемпературных процессов сварки.

Важнейшим этапом в технологии внутреннего монтажа, от которого зависят последующие операции и качество безопасных и бессварочных межсоединений, является установка бескорпусных микросхем (кристаллов) на временное основание (носитель). Этап установ-

ки включает операции нанесения адгезива на временный носитель, позиционирование и фиксацию кристаллов. Вопрос выбора временного носителя является актуальной проблемой по причине того, что к материалу носителя предъявляется ряд достаточно значительных требований [6]. В частности, материал носителя должен быть тепло- и химически стойким, чтобы выдержать процесс отверждения адгезива и компаунда. Также носитель должен обладать минимальной шероховатостью поверхности и максимальной планарностью для минимизации рельефа формируемой впоследствии восстановленной пластины (пластины из отвержденного компаунда со встроенными компонентами, получаемой после отделения носителя). Минимальный рельеф восстановленной пластины позволяет формировать однородный слой коммутации с малыми значениями механических напряжений и, как следствие, минимальным количеством дефектов. Для получения планарной и гладкой поверхности материал носителя должен хорошо поддаваться обработке. Важным параметром является температурный коэффициент расширения (ТКЛР) материала носителя, который должен быть максимально близок к ТКЛР компаунда и кристаллов.

К материалу адгезива предъявляются противоречивые требования. С одной стороны, он должен обеспечивать надежную фиксацию кристаллов на своих позициях (обладать достаточной адгезионной прочностью), с другой стороны, не должен препятствовать дальнейшим процессам формирования слоев коммутации. При этом важно, чтобы адгезив был оптически прозрачным материалом (иначе реперные знаки на временном носителе не будут



**Рис. 1.** Последовательность этапов маршрута внутреннего монтажа: подготовка временного носителя (a); формирование реперных знаков (b); нанесение адгезионного слоя (c); установка кристаллов (d); заливка пластины компаундом (e); удаление временного носителя (f); формирование маски для травления отверстий (g); травление отверстий (h); металлизация и формирование коммутации (i).

видны), обладал термо- и химической стойкостью. Целью настоящей работы являлось установление физико-технологических особенностей процесса установки кристаллов в технологии внутреннего монтажа.

## 1. Маршрут технологии внутреннего монтажа

Рассмотрим типовой маршрут технологии внутреннего монтажа [7]. На первом этапе маршрута подготавливается временный носитель, затем следует этап форми-

рования реперных знаков для точного позиционирования кристаллов на нем. В предлагаемом варианте реперные знаки на временном основании формируются с помощью стандартных методов фотолитографии по наращенному на носитель слою металла. После формирования реперных знаков временное основание покрывается слоем адгезива, на котором закрепляются кристаллы, при этом на адгезиве могут закрепляться также малогабаритные корпусированные компоненты. Варианты адгезива могут быть различными. В предполагаемом маршруте роль адгезива выполняет полиимид, который также является диэлектриком первого слоя коммутации. Когда все элементы и/или компоненты установлены, полученная заготовка герметизируется специализированным компаундом (композиционным материалом на основе полимера с наполнителем). После отверждения герметизирующей композиции временный носитель удаляется, оставляя восстановленную пластину из компаунда с включенными в нее элементами. Последующие операции технологического процесса производятся с восстановленной пластиной (рис. 1).

После отделения носителя на ранее закрытой им активной стороне восстановленной пластины формируются беспаячные и безсварочные соединения. Для этого сначала на пластине создается маска для плазмохимического травления отверстий в первом слое диэлектрика, причем отверстия травятся до контактных площадок элементов. После травления маска удаляется, а на полученную структуру напыляются слои металла: адгезионно-барьерный слой и проводящий слой меди. Далее выполняется литография и травление проводящего рисунка, после чего либо производится формирование оставшихся коммутационных слоев по методике, аналогичной описанной, либо создаются внешние выводы микросборки путем нанесения финишного покрытия и формирования бампов.

## 2. Материалы для временного носителя и адгезива

Временный носитель в технологиях внутреннего монтажа представляет собой подложку в виде круглой пластины или прямоугольной панели, на которой по заданным координатам размещаются элементы, как правило, бескорпусные микросхемы. В результате получается заготовка, которую в иностранных источниках называют „повторно собранной пластиной“ (reconstructed wafer) [8]. Основная цель этой заготовки — зафиксировать элементы на их местах при герметизации компаундом, обеспечить планарность поверхности после отделения носителя, а также гарантировать механическую прочность в ходе процесса герметизации. Для реализации всех указанных задач важно правильно подобрать материал носителя и адгезива. При этом выбор конкретного материала необходимо производить

не только исходя из его параметров, но также из параметров других используемых материалов и требований технологического процесса.

В настоящее время среди мировых лидеров в сфере корпусирования нет единства относительно оптимального материала носителя и оптимального адгезива [9–11]. Это объясняется тем, что для различных технологий внутреннего монтажа, исходя из мирового опыта, подходящими могут быть различные материалы. Так, например, в технологии UTCSP используемый в качестве герметизирующего материала светочувствительный полиимид имеет высокую адгезию к любым материалам носителя. Поэтому для его отделения необходимо предварительно наносить на временный носитель тонкий слой водорастворимого хлорида калия [12]. В технологии, описанной в [13], носителем служит зафиксированная на жесткой оснастке (металлическом кольце) полиимидная пленка, так как технология направлена на создание гибких микросборок минимальной толщины. Применение более традиционных кремниевых, стеклянных и металлических оснований также зависит от используемого варианта технологии внутреннего монтажа.

В целом все используемые при внутреннем монтаже временные носители можно разделить на две категории: носители, в которых адгезивом служит клей или размягчающийся термопластичный полимер, и носители, в которых для присоединения кристаллов используются неотделяемые адгезивы, например, как в случае с полиимидом в технологии UTCSP [12]. Преимущества первого варианта: легкость отделения носителя и технологичность — нет необходимости в дополнительных операциях обработки адгезива и носителя или дополнительных слоях, а также возможность использовать носитель несколько раз. Однако при установке кристаллов на удаляемый термопластичный адгезив значительно увеличивается вероятность смещения кристаллов при заливке пластины компаундом. Необходимо решить проблему очистки восстановленной пластины от остатков клеящего адгезива. При использовании неудаляемого адгезива он сам, как правило, является частью будущей микросборки. Для того чтобы отделить такой адгезив от носителя, можно применить два подхода. Один из них — покрыть пластину носителя, помимо адгезива, еще одним слоем специализированного вещества, которое потом можно будет удалить химическим путем, не навредив остальным элементам сборки (как в технологии UTCSP). Второй вариант — удалить сам носитель или адгезив химическим путем. Второй вариант может навредить поверхности кристаллов, но при правильном выборе реагентов и параметров травления, данный риск сводится к минимуму. Преимуществом же этого варианта является минимизация количества используемых материалов и технологических операций. Кроме того, травление носителя не предполагает воздействия высоких температур на восстановленную пластину и гарантирует его полное удаление. Выбор неотделяемого адгезива при последующих операциях

внутреннего монтажа осуществлялся из класса синтетических термостойких полимеров, к которым относятся полиимиды. Применение полиимидов, получаемого путем реакции имидизации раствора полиамидокислоты (ПАК), связано с такими свойствами, как высокие термические и механические параметры, устойчивость к проникающей радиации, хорошие диэлектрические свойства при создании многоуровневой коммутации [14].

### 3. Экспериментальная часть

Важными параметрами, влияющими на выбор материала для фиксации кристаллов на временном носителе в процессе сборки, являются его адгезионная прочность и время жизни. Для определения адгезионной прочности растворов ПАК было проведено экспериментальное исследование, состоящее из 4 этапов: 1) подготовки образцов временного носителя; 2) нанесения раствора ПАК на образцы временного носителя и установки кристаллов; 3) имидизации ПАК; 4) определения адгезионной прочности.

На первом этапе временный носитель из сплава 29НК закреплялся в технологической оснастке из нержавеющей стали. Для основания и кольца оснастки была выбрана нержавеющая сталь марки 12Х17, обладающая необходимыми физико-механическими свойствами при температурных режимах технологического процесса и достаточной химической стойкостью для выдерживания воздействий химических реагентов в процессе травления сплава 29НК. Затем методом магнетронного напыления осаждалась пленка из меди толщиной  $100 \pm 5$  nm. Реперные знаки на носителе создавались методом фотолитографии. Далее формировался первый слой полиимидов из раствора полиамидокислоты АД-9103 ИС (промышленно выпускаемый полиимидный лак) путем нанесения на центрифуге и двухстадийной имидизации до температуры  $220 \pm 2^\circ\text{C}$  в сушильном шкафу.

На втором этапе на полученные образцы наносились растворы полиамидокислот методом центрифугирования, выдерживались на воздухе в течение  $17 \pm 0.2$  min, а затем с помощью прецизионного оборудования SUSS MicroTech FC150 последовательно устанавливались расчетные кристаллы. Топология временного носителя рассчитана на установку 11 тестовых кристаллов. Промежуток времени, в течение которого раствор полиамидокислоты не теряет своих адгезионных свойств, определен как время жизни. Данный параметр влияет на количество кристаллов, которые можно приклеить с помощью ПАК на временный носитель. Тестовые кристаллы представляют собой прототипы бескорпусных микросхем из монокристаллического кремния. Габаритные размеры кристаллов  $5 \times 5 \times 0.46$  mm. Контактные площадки из алюминия в количестве 64 штук расположены по периферии поверхности кристалла. В качестве пассивации используется оксид кремния. Размеры контактных площадок  $170 \times 170$   $\mu\text{m}$ , шаг КП  $250$   $\mu\text{m}$ .

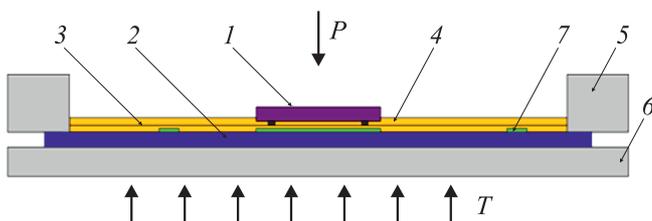
Из-за разной исходной вязкости (условная вязкость от 600 до 1500 при  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$  по вискозиметру ВЗ-246) используемых в эксперименте растворов ПАК режимы нанесения подбирались с учетом получения толщины в  $3 \mu\text{m}$ . Режимы нанесения ПАК на центрифуге: скорость вращения от 2000 до  $3500 \text{ min}^{-1}$ ; время нанесения от 30 до 45 s; время растекания лака до вращения центрифуги от 5 до 20 s. Режим установки кристаллов: температура столика плавно поднималась со скоростью  $2^\circ\text{C}/\text{min}$  от комнатной температуры до  $95 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ; сила давления на кристалл во время выполнения температурного профиля 0.98 N. Установка кристаллов осуществлялась при нормальных климатических условиях: температура воздуха от 15 до  $35^\circ\text{C}$ , относительная влажность воздуха от 45 до 75%, атмосферное давление от 86 до 106 kPa. Толщину полиимидного слоя контролировали с помощью профилометра по высоте ступеньки и микрометра. Предварительную оценку толщины слоя раствора проводили с помощью формулы [15]:

$$h_{sl} = A\sqrt{(v/\omega)} + v_{doz}/S,$$

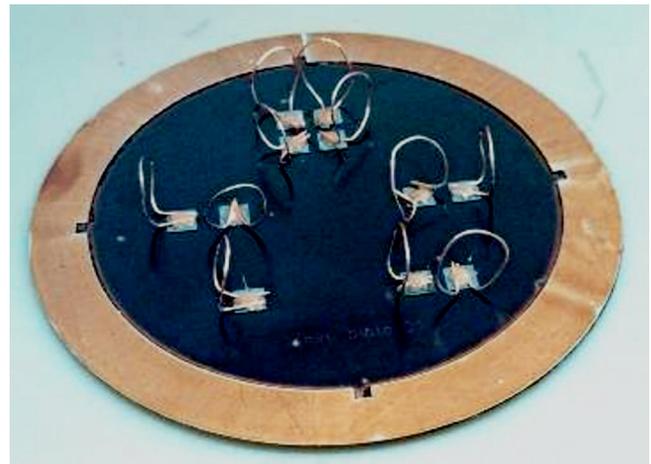
где  $h_{sl}$  — толщина слоя,  $A$  — константа,  $v$  — кинематическая вязкость раствора,  $\omega$  — угловая скорость ротора центрифуги,  $V_{doz}$  — объем дозы нанесенного раствора,  $S$  — площадь подложки.

Эскиз структуры экспериментального образца в процессе установки кристалла показан на рис. 2. На третьем этапе проводилась имидизация растворов ПАК в три стадии при следующих экспериментально подобранных режимах. Первая стадия проходила от комнатной температуры до  $120^\circ\text{C}$  при скорости подъема  $(dT_1/dt_1) = 3^\circ\text{C}/\text{min}$  и выдерживании 30 min, вторая стадия от 120 до  $200^\circ\text{C}$  при скорости подъема  $(dT_2/dt_2) = 2.6^\circ\text{C}/\text{min}$  и выдерживании 60 min при температуре  $160^\circ\text{C}$ , третья стадия от 200 до  $250^\circ\text{C}$  при скорости подъема  $(dT_3/dt_3) = 1.25^\circ\text{C}/\text{min}$  и выдерживания 30 min при температуре  $250^\circ\text{C}$ . Процессы температурной обработки проводились в программируемом термошкафу типа СНОЛ.

На четвертом этапе проводились исследования адгезионной прочности структуры „кристалл–полиимид“.



**Рис. 2.** Эскиз образца с установленным кристаллом на второй слой полиимидного лака, где 1 — тестовый кристалл, 2 — временный носитель, 3 — слой полиимидного лака из раствора ПАК (АД-9103 ИС), 4 — адгезионный слой из ПАК (слой № 2), 5, 6 — технологическое кольцо и основание из нержавеющей стали, 7 — реперные знаки.



**Рис. 3.** Временный носитель с зафиксированными в полиимиде тестовыми кристаллами, подготовленный для проверки адгезионной прочности.

В основу методики исследования взят метод определения адгезионной прочности покрытий нормальным отрывом по ГОСТ 27890-88. Данный метод основан на измерении силы, необходимой для отрыва покрытий в направлении, перпендикулярном его поверхности [16]. Подготовка образцов заключалась в приклеивании на верхнюю сторону кристаллов медной проволоки в форме петли с помощью эпоксидного клея К-300 (рис. 3). Оценка адгезионной прочности проводилась на динамометре РСЕ-FM50 с ценой деления 0.001 kg. К каждому кристаллу на временном носителе прилагалось определенное усилие до образования отрыва кристалла. Последовательность отрыва кристаллов соответствовала порядку их установки. По результатам исследований вычисляли среднее арифметическое значение предела адгезионной прочности покрытия.

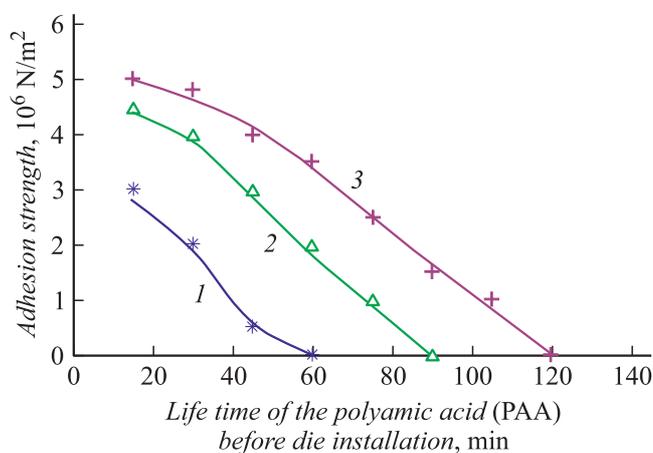
#### 4. Результаты и обсуждение

Наиболее оптимальным материалом в качестве временного носителя для установки бескорпусных микросхем на растворы ПАК выбран магнитный сплав 29НК (ковар) из-за совокупности параметров — близкого ТКЛР ( $5.5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  в диапазоне температур имидизации ПАК) с кремнием, сохранением магнитных свойств от комнатной температуры до температуры Кюри в  $420^\circ\text{C}$ , высокой адгезии к полиимиду и теплопроводности ( $17 \text{ W/mK}$ ). Структуру „полиимид–кристалл“ с минимальными напряжениями и наименьшим количеством дефектов удалось получить, благодаря применению полиамидокислоты ПИ–ЛК Радуга 6 в растворителе N–метил–2–пирролидоне с подобранными режимами установки и трехстадийным процессом имидизации. Для уменьшения механических напряжений по периметру границы кремниевый кристалл–полиимид, возникающих из-за разных ТКЛР и усадки в процессе удаления

растворителя и летучих продуктов реакции из раствора ПАК, на временном носителе формировались два слоя полиимида. Первый в качестве основного материала (лак АД9103 ИС), который задает основную толщину полиимидной структуры (от 5 до  $25 \mu\text{m}$ ) и второй модифицированный ПИ–ЛК Радуга 6, который выполняет роль адгезива с толщиной порядка  $2.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$ .

Установлена экспериментальная зависимость адгезионной прочности кремниевых кристаллов от времени жизни до установки трех ПАК: АД-9103 ИС, ПИ–ЛК Радуга 5, ПИ–ЛК Радуга 6 (рис. 4). Данные результаты получены для кремниевых кристаллов с планарными размерами  $5 \times 5 \text{ mm}$  и толщиной  $0.46 \text{ mm}$  при исходном давлении на установке монтажа FC-150 в  $0.98 \text{ Н}$  и толщине слоя лака в  $3 \mu\text{m}$ . До установки кристаллов все заготовки с нанесенными полиимидными лаками находились на воздухе при нормальных климатических условиях. Из графика видно, что максимальную адгезионную прочность кремниевых кристаллов, достигающую  $4.9 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ , обеспечивает ПИ–ЛК Радуга 6.

Особое внимание было уделено исследованию структурных превращений полимеров во время сушки и имидизации. На структурообразование тонких полимерных пленок могут влиять такие факторы, как соотношение линейных коэффициентов термического расширения пленки и подложки (существенно для релаксационных явлений в пленках), микрогеометрия подложки, температура, состав среды, возможность реакции исходного полимера с адсорбированными на подложке остаточными продуктами имидизации [17]. Естественно, что на структуру и морфологию пленки могут оказывать влияние несколько факторов одновременно. В настоящей работе была сделана попытка выделить наиболее существенные и связать с ними характерные структурные и морфологические признаки покрытия. Толщина полиимидного покрытия для раствора с определенной концентрацией зависит от скорости и времени центрифугирования [18]. Количество распределяемого раствора



**Рис. 4.** Зависимость адгезионной прочности кремниевых кристаллов от времени жизни ПАК, где  $\times$  — АД-9103 ИС;  $+$  — ПИ–ЛК Радуга 6;  $\Delta$  — ПИ–ЛК Радуга 5.

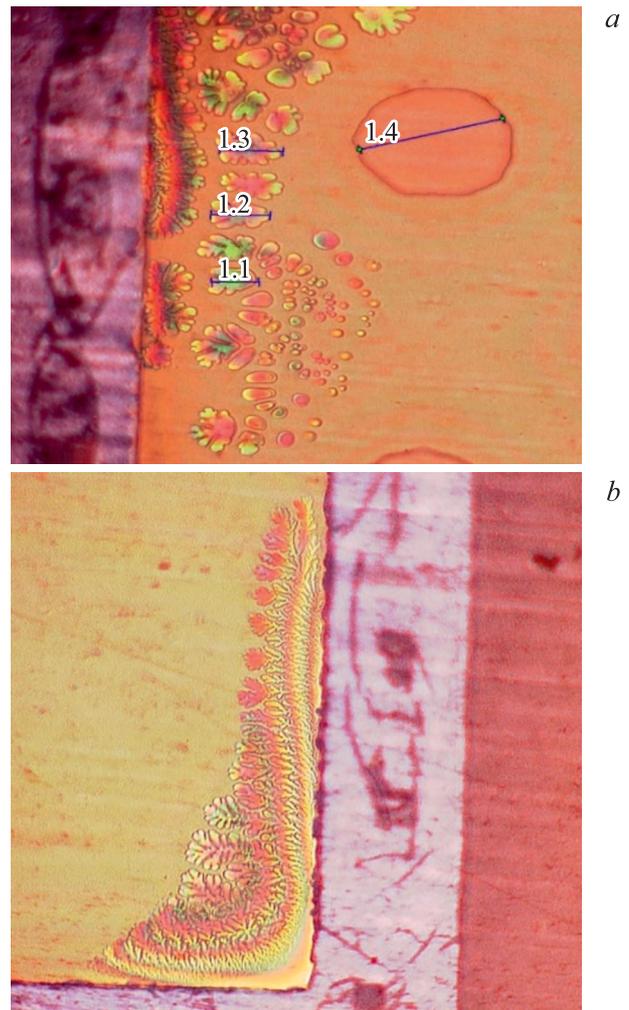
во всех сериях эксперимента оставалось постоянным для каждой подложки, чтобы обеспечить однородность покрытия при подборе оптимального режима с учетом скорости вращения, времени вращения, условий окружающей среды — температуры, влажности, расхода вытяжного воздуха и т.д. Перед процессом имидизации раствор ПАК, нанесенный на подложку, подвергался термической сушке для удаления остаточного растворителя, которая проходила при температуре в диапазоне от  $25$  до  $120^\circ\text{C}$  в течение  $45$ – $60 \text{ min}$ . Недостаточная обработка покрытий как по времени, так и по температуре, может привести к разрушению покрытия некоторыми загрязняющими веществами, такими как остаточный разбавитель, органический растворитель, вызывая дефекты на поверхности покрытия и/или образование отверстий. Первый этап термообработки очень важен, поскольку при высокой температуре может инициироваться частичное сшивание и/или имидизация. Необходимо учитывать, что полиамидокислоты получены в разных растворителях АД-9103 ИС в диметилформамиде (ДМФА), вторая — в N-метил-2-пирролидоне (МП), и имеют разные температуры кипения, скорости испарения. Имидизация начинается при нагревании полиамидокислот уже с невысоких температур, в том числе и при  $25$ – $120^\circ\text{C}$ , а выделение растворителей завершается к  $160$ – $165$  (ДМФА — температура кипения  $152$ – $153^\circ\text{C}$ ) и  $210$ – $220^\circ\text{C}$  (МП — температура кипения  $202^\circ\text{C}$ ).

Микроскопическое исследование покрытий осуществлялось по специальной методике кинокамерой западногерманской фирмы „Оптон“, дающей  $102$  снимков в секунду. Покрытие сразу же просматривалось с помощью оптической системы на базе металлографического микроскопа МИМ-8, которая обеспечивала увеличение  $2000\times$ . Подсветка осуществлялась снизу предметного стекла, нагревая образец со скоростью  $0.5^\circ\text{C/min}$ . При изучении развитого рельефа поверхности применялась стереоскопия (одновременное рассматривание двух изображений одного и того же участка, снятых при различных углах наклона объекта). Результаты исследования показали, что на первом этапе термообработки — испарении влаги (главным образом растворителя, к которому потом добавляется вода из полиамидокислоты при ее переходе в полиимид) — появляются мениски. Отступление фронта испарения влаги вглубь образца увеличивает компактность поверхностного слоя вследствие капиллярных сил. Установлено, что в полимерных слоях, полученных с использованием ДМФА, в зоне отступающих капиллярных менисков развиваются большие внутренние напряжения, хотя в центре образца их рост незначителен. Различный темп усадки по сечению образца, а также повышенная сопротивляемость материала усадке вследствие образования из компактных агрегатов по мере десорбции ДМФА коагуляционных структур, приводят к возникновению дефектов, обуславливающих низкое качество пленки.

Исследование покрытия, полученного с использованием МП, показало, что усадка материала происходит

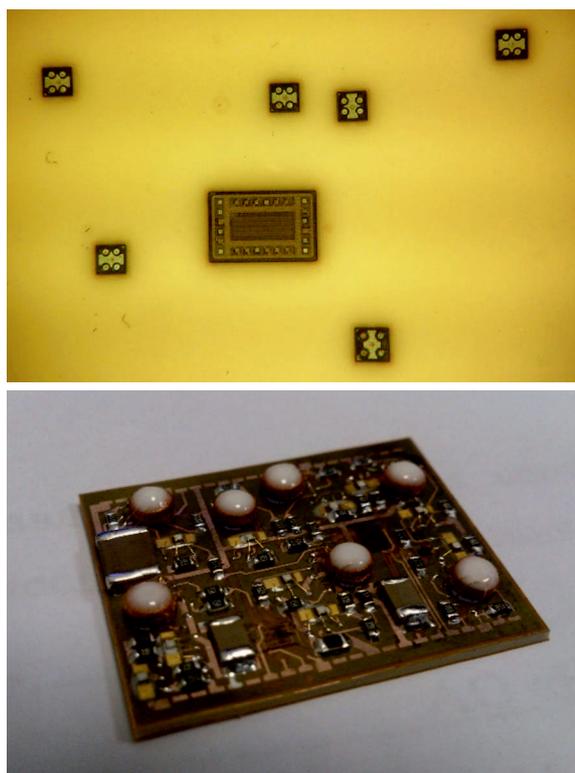
практически равномерно во всем объеме и обуславливает малодофектное развитие структур, повышающее качество пленок. Нарастание внутренних напряжений до максимального значения заканчивается для покрытий из ПАК с МП через 30–45 min, а для ПАК с ДМФА через 10–15 min. На характер изменения внутренних напряжений влияет вязкость растворителя. На стадии удаления растворителя из покрытия быстрее протекают релаксационные процессы в покрытиях, полученных с растворителями более низкой вязкости. Для изучения специфики структурообразования полимерных покрытий исследовали их надмолекулярную структуру на различных этапах термообработки. Найдено, что после удаления растворителя в покрытиях наблюдается неоднородная структура. Можно полагать, что причина этого явления заключалась в неодинаковой скорости высушивания, которое начиналось в поверхностных слоях. Средние слои пленки при этом оставались пластичными. Затем отверждение проходило внутри, а наружные слои тормозили протекание релаксационных процессов. В результате оптических исследований было установлено, что полимерные пленки толщиной менее  $3\ \mu\text{m}$  отличаются малой величиной внутренних напряжений и низкой скоростью их релаксации, обусловленной потерей системой высокоэластичных свойств, возможно, из-за взаимодействия с подложкой и снижения подвижности структурных элементов. С увеличением толщины покрытия (более  $5\ \mu\text{m}$ ) внутренние напряжения возрастают, образуются микротрещины. Следовательно, существует оптимальная толщина, в которой при сушке возможны малые внутренние напряжения с высокой скоростью релаксации. Причину нарастания напряжений с увеличением толщины покрытий можно связать с тем, что модуль упругости покрытий для слоев, граничащих с подложкой, в несколько раз больше, чем для наружных слоев покрытия. Это приводит к нарастанию внутренних напряжений от наружной к внутренней поверхности.

Таким образом, рассмотрев результаты экспериментального изучения процессов переноса жидкости (растворителя и имидизационной воды) в полиимидных микроструктурах при сушке и последующей имидизации, были найдены следующие особенности, которые в дальнейшем были использованы в технологии установки кристаллов на временный носитель и их герметизации: начальная скорость термообработки первого периода и изменение скорости удаления жидкости во время имидизации в лаке со сложной капиллярной сетчатой структурой. Знание этих скоростей дает возможность, хотя и ориентировочно, но просто определить длительность сушки и имидизации лака при любом способе термообработки (конвективном, радиационном, контактном и др.). Проведя анализ некоторых видов термообработки, можно прийти к следующим выводам. При термообработке с внешним подводом тепла (излучение, конвекция) найдено, что все периоды термообработки в вакууме протекают так же, как и на воздухе. В соответствии с направлением передачи тепла высушивание начинается



**Рис. 5.** Дефекты под кристаллами из кремния, зафиксированным с помощью ПИ–ЛК Радуга 5: *a* — кристалл № 1 ( $L_1 = 34.15\ \mu\text{m}$ ,  $L_2 = 42.93\ \mu\text{m}$ ,  $L_3 = 45.72\ \mu\text{m}$ ); *b* — кристалл № 2 с фрактальной формой дефекта.

с той стороны, с которой подводится тепло, т.е. при конвективной и радиационной сушке у поверхности, примыкающей к сушильному агенту, а при контактном сушке у поверхности, противоположной той, которая примыкает к сушильному агенту. Перенос влаги в жидком состоянии и диффузия ее пара подчиняются здесь тем же закономерностям, что и при конвективной сушке. Используя способы термообработки полимерных материалов, при которых выделение тепла происходит внутри материала (высокочастотная и периодическая термообработка в вакууме) и при соблюдении известных условий, можно добиться того, чтобы испарение влаги происходило одинаково во всех точках материала при равномерном поле влажности в нем. Скорость высушивания при этом оказывается зависящей от интенсивности подвода тепла. Проведенный анализ экспериментальных результатов выявил влияние формы образцов на скорость сушки: чем больше отношение поверхности



**Рис. 6.** Микросборка со встроенными бескорпусными микросхемами: *a* — фрагмент гибко-пластичной подложки со встроенными кристаллами после операции удаления временного носителя; *b* — внешний вид микросборки, изготовленной по технологии внутреннего монтажа.

материала к объему, тем быстрее происходит сушка. При одинаковой скорости термообработки в первом ее периоде скорость высушивания на протяжении всего процесса при большом значении отношения поверхности материала к его объему получается больше по следующим причинам: 1) чем больше отношение поверхности материала к его объему, тем меньше критическая влажность. Это значит, что максимальная скорость высушивания имеет место в большем интервале влажности материала. 2) чем больше отношение поверхности материала к его объему, тем меньше получается влагосодержание материала в начале периода имидизации. Известно, что минимальная конечная температура отверждения зависит от типа используемой ПАК [19]. Для большинства лаков имидизация может происходить, когда температура превышает  $100^{\circ}\text{C}$ , температура отверждения для имидизации может находиться в широком диапазоне от  $150$  до  $350^{\circ}\text{C}$ . Для достижения максимальной степени имидизации полиамидокислоту обычно отверждают при  $200^{\circ}\text{C}$  в течение 1 ч. Температура отверждения может влиять на поверхностную свободную энергию конечной полиимидной пленки из-за корреляции степени имидизации с температурой отверждения. Из литературных источников известно, что степень имидизации увеличивается с температурой отверждения [20–22]. Влияние

степени имидизации на рассеянную часть свободной энергии, которая относится к дальнедействующим молекулярным взаимодействиям, невелико и может быть проигнорировано. По мере осуществления имидизации более полярные функциональные группы, такие как кислотные из амидокислоты, становятся менее полярными имидными группами, и это вызывает значительное уменьшение силы свободной энергии полярной части. В результате уменьшается поверхностная свободная энергия получаемой полиимидной пленки. Выявлено, что в процессе имидизации растворов ПАК под кристаллами образуются дефекты. Дефекты представляют собой пузырьки воздуха и/или органические образования разного вида и формы от простых круглых до сложных фрактальных, с разной толщиной, что подтверждается эффектом интерференции (рис. 5). Дефекты располагаются в основном по периметру близко к краю кристаллов. Например, для кристаллов размером  $0.9 \times 0.95 \text{ mm}$  площадь дефектов занимала от 4.4 до 11% площади всего кристалла. Предполагается, что дефекты фрактальной формы образуются после второй стадии имидизации в результате удаления растворителя, остатков воды, и летучих продуктов реакции и зависят от совокупности факторов: типа растворителя в ПАК, режимов имидизации и способов подготовки поверхности кристаллов. Фрагмент основания микросборки со встроенными бескорпусными микросхемами с применением двух типов ПАК АД-9103-ИС и ПИ–ЛК Радуга 6 после операции удаления временного носителя показан на рис. 6. При среднем времени, затрачиваемым оператором на ручную установку одного кристалла, 5 min ПИ–ЛК Радуга 6 позволяет устанавливать до 16 кристаллов, что является достаточным для изготовления высокоинтегрированных и многофункциональных микросборок.

## Заключение

Материалом для фиксации кремниевых кристаллов выбран раствор ПАК на основе ароматического диамина и диангирида ароматической тетракарбонной кислоты в растворителе N–метил–2–пирролидоне, а в качестве временного носителя сплав 29НК. Установлено, что остаточное напряжение и механические свойства полиимида зависят от условий процесса превращения полиамидокислоты в полиимид. Предполагается, что структура изменяется в зависимости от количества остаточного растворителя в процессе имидизации, что приводит к разнице в остаточном напряжении. Выявлено, что в процессе имидизации растворов ПАК под кристаллами могут образовываться дефекты. Для уменьшения механических напряжений по периметру границы кремниевый кристалл–полиимид, возникающих из-за разных ТКЛР и усадки в процессе удаления растворителя и летучих продуктов реакции из раствора ПАК, на временном носителе формировались два слоя полиимида. Первый слой, который задавал основную

толщину полиимидной структуры (от 5 до 25  $\mu\text{m}$ ), был выполнен из АД-9103 ИС, второй слой — из модифицированного ПИ–ЛК Радуга 6, который выполнял роль адгезива с толщиной порядка 2  $\mu\text{m}$ . Установлено, что сила адгезии кремниевых кристаллов понижается с увеличением времени жизни ПАК. При увеличении времени до установки кристаллов на раствор ПАК ПИ–ЛК Радуга 6 с 20 до 100 min адгезионная прочность уменьшается с  $4.9 \cdot 10^6$  до  $1.0 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ . Применение в качестве полярного растворителя материала с температурой кипения выше, чем у N,N'-диметилформамида и N,N'-диметилацетамида существенно повышает количество устанавливаемых кристаллов. При среднем времени в 5 min, которое оператор затрачивает на ручную установку одного кристалла, ПИ–ЛК Радуга 6 позволяет устанавливать до 16 кристаллов. Это достаточно для изготовления высокоинтегрированных и многофункциональных микросборок.

### Финансирование работы

Источник финансирования — договор № 9/1251/2019 о предоставлении гранта на государственную поддержку центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Chen. A.* // IPC APEX EXPO Conf. Exhibition. San Diego, USA. 2013. P. 934–961.
- [2] *Kravtsova V.D., Umerzakova M.B., Korobova N.E., Vertyanov D.V.* // Russ. Microelectron. 2018. Vol. 47. N 7. P. 455–459. DOI: org/10.1134/S1063739718070077
- [3] *Кравцова В.Д., Умерзакова М.Б., Коробова Н.Е., Сариева Р.Б.* // ЖПХ. 2017. Т. 90. № 11. С. 1528–1534. [*Kravtsova V.D., Umerzakova M.B., Korobova N.E., Sarieva R.V.* // Russ. J. Appl. Chem. 2017. Vol. 90. N 11. P. 1833–1839. DOI: 10.1134/S1070427217110167]
- [4] *Yu P.Y., Cardona M.* Fundamentals of semiconductors. Physics and materials properties. London, NY: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 778 p.
- [5] *Вертянов Д.В., Назаров Е.С., Тимошенко С.П., Петров В.С., Коробова Н.Е.* Патент на изобретение № 2572588 от 14.12.2015. Способ изготовления электронных узлов на гибком носителе без процессов пайки и сварки.
- [6] *Tyler P., Nulman K., Fowler M., Molenhour S.* // Chip Scale Rev. 2019. N 1. P. 26–30.
- [7] *Тимошенко С.П., Вертянов Д.В., Назаров Е.С.* Патент на изобретение № 2597210 от 17.08.2016. Способ изготовления микроэлектронного узла на пластичном основании.
- [8] *Huetmoeller R., Zwenger C.* // Chip Scale Rev. 2015. N 2. P. 34–37.
- [9] *Xuejun Fan.* Proc. 11th. Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, EuroSimE 2010. DOI: 10.1109/ESIME.2010.5464548
- [10] *Wally Rhines.* // Chip Scale Rev. January/February. 2019. P. 7–9.
- [11] *Bezuk S.* // ECTC 2017, The 67th Electronic Components and Technology Conference. Orlando, USA. 2017. P. 6
- [12] *Wang L., Sterken T., Cauwe M., Cuypers D., Vanfleteren J.* // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2012. P. 1099–1105. DOI: 10.1109/tcpmt.2012.2188402
- [13] *Gustina B.* Collins Laser Processing of Polymer on Copper. Master of science thesis in electrical engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia, USA, 2001. 64 p.
- [14] *Грушевский А.М.* Сборка и монтаж многокристалльных модулей. М.: МИЭТ, 2003. 137 с.
- [15] *Жуков А.А.* Метод получения и свойства малонапряженных толстых полиимидных покрытий и свободных пленок и технология элементов МЭУ на их основе. Автореф. канд. дис. 1997.
- [16] ГОСТ 27890–88. Покрытия лакокрасочные защитные дезактивируемые. Метод определения адгезионной прочности нормальным отрывом. М.: Изд-во стандартов, 1988. 17 с.
- [17] *Nishino T., Kotera M., Inayoshi N., Miki N., Nakamae K.* // Polymer. 2000. Vol. 41. N 18. P. 6913–6918. DOI: 10.1016/S0032-3861(00)00002-1
- [18] *Chang Y., Wu W.C., Chen W.C.* // J. The Electrochem. Society. 2001. Vol. 148. N 4. DOI: 10.1149/1.1357183
- [19] *Xing Chen, Jingfa Yang, Jiang Zhao* // Polymer. 2018. Vol. 143. May. P. 46–51. DOI: org/10.1016/j.polymer.2018.04.005
- [20] *Ying Wang, Yang Yang, Zhenxing Jia, Jiaqiang Qin, Yi Gu.* // Polymer. 2012. Vol. 53. N 19. P. 4157–4163. DOI: org/10.1016/j.polymer.2012.07.034
- [21] *Wenjuan Chen, Wei Chen, Baoqing Zhang, Shiyong Yang, Chen-Yang Liu.* // Polymer. 2017. Vol. 109. 27 January. P. 205–215. DOI: org/10.1016/j.polymer.2016.12.037
- [22] *Byoung-Hyoun Kim, Huijung Park, Heeyong Park, Dong Cheul Moon* // Thermochim. Acta. 2013. Vol. 551. P. 184–190. DOI: org/10.1016/j.tca.2012.10.029