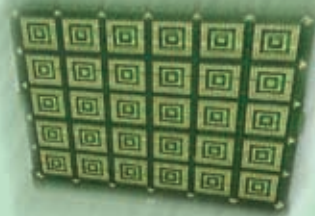


## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ УПАКОВКИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ. ФОТОЛИТОГРАФИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ. ЧАСТЬ II\*



А.Агейченко  
ageich@kbtm.avilink.net

Передовая технология упаковки СБИС с большим числом выводов трансформировалась из последовательного процесса приварки проволочных перемычек между контактными площадками полупроводникового чипа в групповой метод создания матрицы контактных бампов по всей площади кристалла. Для формирования матрицы контактных шариков на полупроводниковом чипе и промежуточной печатной плате используется литографическое оборудование, которое традиционно применялось в кремниевой технологии. Возрастающие требования к плотности упаковки стимулируют переход от контактных методов переноса изображения топологии в передовой упаковке (Mask Aligners) к использованию проекционных методов переноса изображения – степперов.

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ БАМПИГ-ФОТОЛИТОГРАФИИ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИНАХ

В процессе формирования столбиковых выводов, как и во всем полупроводниковом производстве, выход годных – это основной критерий при выборе оборудования. Особенно важен этот показатель при обработке пластин большого диаметра, где стоимость каждой пластины на этапе формирования столбиковых выводов достигает нескольких тысяч долларов. Снижение выхода годных даже на одну десятую долю процента для финишных операций неприемлемо.

Сегодня для формирования столбиковых выводов используют два основных типа экспонирующего оборудования: контактное для экспонирования с зазором и оборудование для проекционного переноса изображения.

При экспонировании с зазором между маской с топологией столбиковых выводов и покрытой фоторезистом пластиной поддерживается небольшой зазор 20–30 мкм. После совмещения полупроводниковая пластина (включая и 300-мм) экспонируется целиком (1X-full-field lithography – 1XFFL). Примером могут служить установки Mask Aligners моделей IQ компании EV Group или MA300Plus компании Süss MicroTec. Глав-

ное достоинство такого метода – отсутствие зависимости между полем изображения и разрешающей способностью, т.е. периферия пластины экспонируется без потери качества. Основные недостатки – это низкий срок службы масок и генерация дефектов на пластине в местах возможного ее контакта с маской. Стоимость 360-мм (14") маски из кварца, которая используется в этих контактных машинах, очень высока. Получить высокую точность совмещения на Mask Aligners сложно, так как нет возможности изменить масштаб топологии в соответствии с изменением размера пластины.

Наличие зазора между маской и пластиной приводит к тому, что размеры элементов искажаются из-за конечной апертуры источника света. Так, при апертуре осветителя 3–8° образующаяся область полутени увеличивает размер элемента на 0,5–5 мкм при изменении зазора между маской и поверхностью резиста 5–20 мкм.

При экспонировании с зазором нельзя также получить вертикальные боковые стенки в проявленном резисте из-за полутеневого размытия края и эффекта дифракции света. Из-за кривизны пластины и маски зазор между маской и пластиной будет различный, следовательно, и размытие края в резисте по площади пластины тоже будет не одинаковым.

Изменения размера элементов и угла наклона боковой стенки резиста определяют количество осажденного материала контактного бампа. В результате – после оплавления контактных столбиков бампинг-шарики на пластине будут иметь различную высоту. С увеличением размера полупроводниковых пластин и уменьшением размера столбиковых выводов относительная разноразмерность бампов, изготовленных на установках экспонирования с зазором, будет возрастать.

Уменьшение размера столбиковых выводов и шага предъявляют более жесткие требования к погрешности совмещения. Использование установки Mask Aligners для пластин 300 мм (12") уже сегодня сопряжено с большими трудностями. Переход в будущем к пластинам 450 мм (18") ставит под сомнение перспективы метода 1X-full-field lithography, когда пластина экспонируется целиком.

\* Часть I см.: ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2008, №4, с. 98–102.

Тем не менее, на сегодняшний день в мире около половины всего парка экспонирующих машин для создания матрицы столбиковых выводов на чипах неразрезанной кремниевой пластины – это Mask Aligners компании Süss MicroTec.

Вторая, непрерывно растущая часть парка, – это установки проекционного переноса изображения. Основным поставщиком оборудования проекционного переноса изображения для бампинг-технологии считается американская компания Ultratech. Она продвигает на рынок для бампинг-технологии степпер с единичным масштабом переноса изображения серии Prisma-ghi или Saturn Spectrum 300e<sup>2</sup> с рабочим полем примерно 25x50 мм.

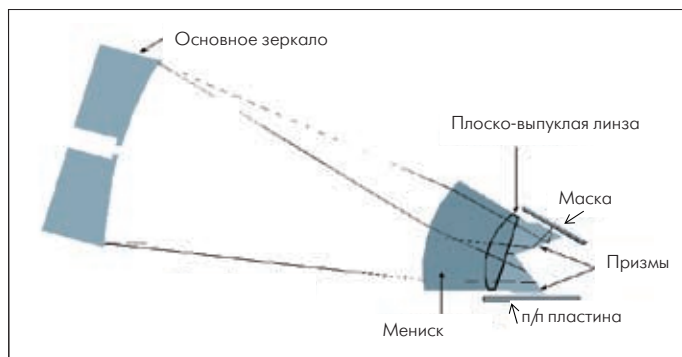
Сегодня эта компания в качестве новой разработки предлагает степперы серии Ultratech Unity AP200 и Unity AP300. Только на рынок Тайваня для компаний, продвигающих бампинг-технологии, таких как ChipBond, ChipMos, Fu-Pao, TSMC, SPI, ASE, фирма Ultratech, начиная с 2003 года, поставила более 30 бампинг-степперов.

Безусловно, степпер обладает определенными преимуществами по сравнению с установками контактного (или с зазором) экспонирования. Использование степпера позволяет решить проблемы, связанные со сроком службы масок, добиться более точного совмещения топологии, получить более высокую воспроизводимость размеров бампов по всей площади пластины. Недостатки степперов – более низкая производительность и более высокая цена по сравнению с установками совмещения. По информации компании Ultratech, на мировом рынке количество бампинг-степперов уже в 2004 году превысило количество Mask Aligners.

Остановимся на некоторых конструктивных особенностях бампинг-степперов Ultratech. Ключевым элементом любого степпера является проекционный объектив. В рекламных материалах о бампинг-степперах Ultratech утверждается, что их проекционный объектив специально разрабатывался для бампинг-технологии. На самом деле это не совсем так. Еще в 1983 году американская компания General Signal Corporation запатентовала степпер с объективом Wynne Dyson для кремниевой технологии с тонкими резистами. Эти степперы должны были заменить установки контактного экспонирования традиционной кремниевой технологии.

Когда метод перевернутого кристалла стали применять в массовом производстве, инженеры из Ultratech использовали уже известный объектив Wynne Dyson (рис.1.) в линейке степперов (Prism, Spectrum, Unity) для бампинг-технологии.

Чтобы адаптировать установки к экспонированию толстых резистов, применяемых в бампинг-технологии, инженеры Ultratech уменьшили числовую апертуру объектива до 0,16. И самое главное: благодаря тому, что основной оптический элемент построения изображения объектива Wynne Dyson представляет собой сферическое зеркало, а длина волны от-



**Рис. 1. Wynne Dyson объектив степперов Ultratech**

ражаемого света не имеет большого значения, объектив удалось адаптировать для трех длин волн ртутной лампы в диапазоне 350–450 нм (i-, g-, h-линии). Наличие широкого спектра экспонирования нужно не только для повышения производительности. Многие бампинг-резисты требуют различного сочетания экспонирующего спектра для получения максимально вертикальных боковых стенок проявленного резиста, поэтому осветительная система степпера оснащена сменными фильтрами.

Размер рабочего поля и величина освещенности в плоскости пластины определяют производительность степпера. Новая модель степпера Ultratech Unity AP200 с полем 55x28 мм и двумя лампами в осветителе мощностью 1,2 кВт имеет несколько лучшую производительность, чем предыдущие модели Spectrum 300e, благодаря большей плотности экспонирующего света. Однако очень высокая плотность энергии в плоскости пластины – 3000 мВт/см<sup>2</sup> (например у Unity AP200) – может вызвать проблемы с экспонированием некоторых резистов – они начинают плохо работать, когда подвергаются воздействию слишком высокоинтенсивного облучения в течение коротких периодов времени. В частности, системы diazo/povolak-резистов при экспонировании высвобождают азот, потенциально вызывая потерю выхода годных из-за «вздутия» или отслаивания резиста от пластины.

Из-за выделения фоторезистом различных газов и частиц в процессе экспонирования с очень высокой плотностью излучения, а также из-за очень малого расстояния между объективом и пластиной (менее 10 мм) в установке Ultratech Unity AP200 быстро загрязняется ближайшая к пластине поверхность нижней призмы проекционного объектива. Для защиты поверхности призмы установлена тонкая защитная пленка. По мере загрязнения ее необходимо заменять или протягивать в промежутке между объективом и пластиной. Такая вынужденная защита объектива удорожает эксплуатацию степпера.

В процессе производства полупроводниковые пластины изменяют линейные размеры в пределах  $\pm 20$  ppm и, если не компенсировать эти изменения масштабом изображения, неизбежно возникнет погрешность совмещения. Телецентрический объектив Wynne Dyson принципиально не может изменить масштаб изображения!

Конечно, для Mask Aligners проблема изменения масштаба пластины еще более серьезна и может привести на 300-мм (12") пластинах к ошибке совмещения в несколько микрон. Рабочее поле степпера существенно меньше, поэтому и ошибка совмещения вследствие несоответствия масштаба изображения в несколько раз меньше. Однако получить декларируемую фирмой Ultratech погрешность совмещения менее 0,5 мкм для реальной технологии очень сложно. Если размер рабочего поля 25 x 55 мм, то в общей ошибке совмещения только доля ошибки, возникающей при вариациях масштаба пластины на 20 ppm, составит  $\pm 0,55$  мкм. К этой величине следует добавить тепловые изменения масштаба топологии ретикла (плотность энергии в плоскости маски до 5000 мВт/см<sup>2</sup>, масштаб объектива однократный) в процессе его нагрева излучением при экспонировании низкочувствительных бампинг-резистов. Отсутствие возможности изменения масштаба проекционного объектива – серьезный недостаток степперов Ultratech для более плотной упаковки в перспективе.

Обычно на рабочем столе установки полупроводниковая пластина закрепляется нижней стороной с помощью вакуума. Для устранения влияния кривизны (и клина) поверхности пластины и ее изменений по толщине на точность операции совмещения степперы снабжены датчиками фокусировки для определения положения поверхности пластины. Обычно в степперах положение поверхности пластины для каждого кадра измеряется в центральной зоне рабочего поля проекционного объектива. После измерения положения поверхности пластины датчиком фокусировки механизм фокусировки степпера помещает поверхность пластины в плоскость резкого изображения проекционного объектива.

Возможность размещения датчика фокусировки степпера и его функционирование обусловлены величиной переднего отрезка проекционного объектива. У степперов Ultratech расстояние между объективом и пластиной составляет менее 10 мм. В такой зазор трудно встроить оптический датчик фокусировки, измеряющий положение поверхности пластины в центре рабочего поля объектива. Поэтому Ultratech, как и 25 лет назад, использует в своих степперах предложенный General Signal Corporation метод измерения плоскости пластины при помощи трех воздушных сопел, расположенных вок-

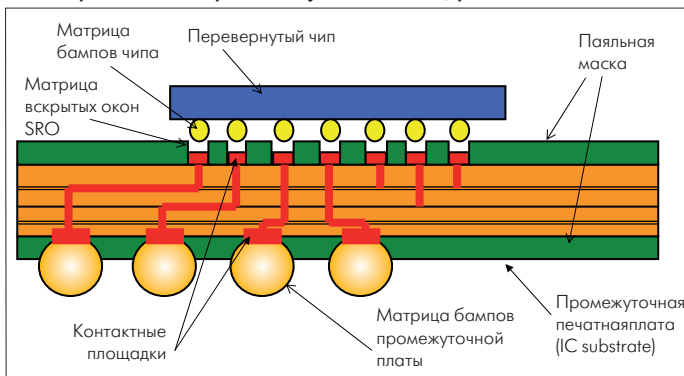


Рис.2. Современная упаковка микросхем

руг рабочего поля. Для кадров, которые размещены недалеко от края пластины, возникает ситуация, когда один или даже два датчика фокусировки находятся вне площади пластины. Фокусировка таких кадров ведется только по одному датчику фокусировки, который, к тому же, измеряет положение поверхности пластины вне рабочего поля объектива.

Для получения вертикальных боковых стенок в толстых резистах плоскость резкого изображения объектива в момент экспонирования располагают в глубине резиста на некотором расстоянии от поверхности. Зазор между поверхностью резиста и соплом датчика фокусировки степперов Ultratech составляет примерно 100 мкм. Такой малый зазор может вызвать проблемы при экспонировании резистов толщиной более 200 мкм.

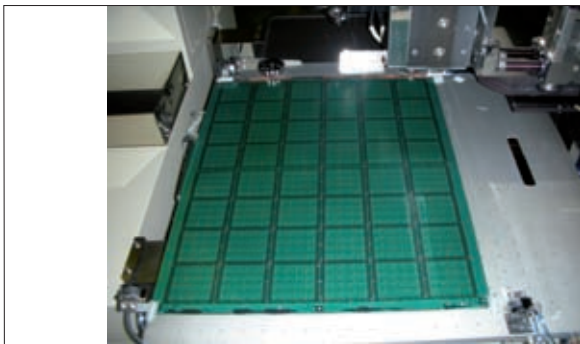
Возникает резонный вопрос: каким образом при наличии многих конструктивных недостатков степперы американской компании Ultratech монополизировали рынок установок проекционного переноса изображения для бампинг-технологии? После многих дискуссий с различными бампинг-изготовителями из континентального Китая и Тайваня напрашивается только одно объяснение: американские компании-продавцы запатентованной бампинг-технологии в другие страны, такие как ASE Group, Kulicke & Soffa, настоятельно рекомендуют использовать в технологии передовой упаковки только это «проверенное» американское оборудование, несмотря на конструктивные недостатки и монопольную цену. Контрактные производители, создающие матрицу контактных бампов на «чужих» пластинах, должны получить одобрение на использование нового оборудования в своей технологической цепочке от конечного заказчика (например, от Intel). На всестороннюю проверку конечного изделия по параметрам и надежности, на различные согласования уходят многие месяцы. И этот период времени может превышать цикл обновления вида продукции.

## ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Итак, матрица контактных шариков на чипах неразрезанной пластины создана, пластина разрезана на отдельные чипы. Теперь нужна небольшого размера печатная плата (IC substrate), на которую будет установлен перевернутый кристалл методом термокомпрессии, или, другими словами, упакован (рис. 2).

В технологии изготовления IC substrate используются установки контактного экспонирования, которые традиционно использовались для изготовления печатных плат еще до широкого распространения бампинг-технологии. В последние годы все чаще передовые изготовители IC substrate начинают использовать степперы.

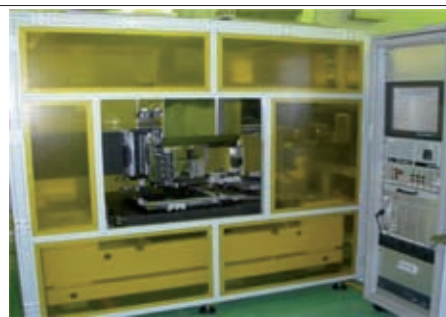
Главные поставщики контактных экспонирующих машин для печатных плат – японские компании ORC, Uchio, Adtec и тайваньская компания C Sun.



**Рис.3. Печатная плата 550 x 450 мм для промежуточных подложек на столе стейпера**

Уменьшение шага и размера бампов в матрице контактов на кремниевом кристалле требует высокой точности изготовления матрицы вскрытых окон SRO (Solder Resist Opening) в паяльной маске (Solder Mask). Возрастают также требования к погрешности совмещения окна в паяльной маске и медной контактной площадки под слоем паяльной маски.

До разрезания подложки на отдельные IC substrate используется печатная плата размером примерно 500x500 или даже 600x600 мм (рис.3). В процессе производства печатная плата нагревается и изменяет свои размеры в диапазоне сотен ppm. Но главный недостаток технологии заключается в том, что масштаб по осям X и Y может изменяться неодинаково. Анизотропия масштаба может достигать 100 ppm и более. С ужесточением допусков на погрешность совмещения обеспечить хоро-



**Рис.4. Стейпер ЭМ-5434М**

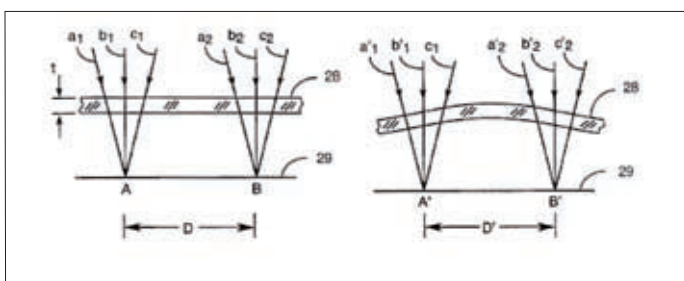
шее совмещение по всей площади большой платы на установке контактного экспонирования становится все сложнее. Чтобы увеличить выход годных, для экспонирования ответственных слоев передовые производители IC substrate все чаще используют вместо контактных установок экспонирования стейперы.

Сегодня стейперы применяют в основном на операции вскрытия матрицы контактных площадок в паяльной маске IC substrate со стороны контакта бампов перевернутого кремниевого кристалла.

Основные производители стейперов для печатных плат высокой плотности соединений – японские компании Ushio, ORC, ADTEC. Минское предприятие КБТЭМ-ОМО и тайваньская компания C Sun с 2003 года продвигают на рынок IC substrate изготовителей PCB стейпер совместного производства ЭМ-5434М (рис.4). Сравнительные характеристики стейперов для печатных плат IC substrate приведены в таблице.

**Сравнительные характеристики степперов для печатных плат IC substrate**

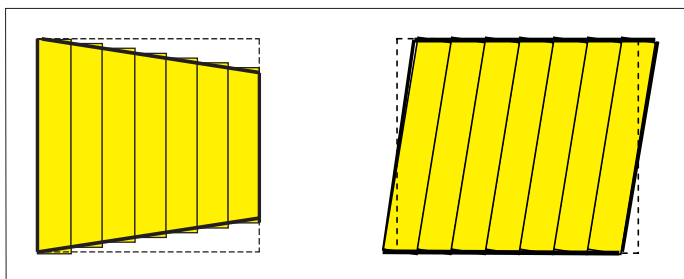
Компания	КБТЭМ-ОМО/С Sun	ORC imaging	Ushio	ADTEC
Модель	ЭМ-5434М	EXP-2431	UX5248SC	APEX 2061/3061
ПАРАМЕТРЫ				
Разрешение L/S, мкм	10	10	12	10/20
Рабочее поле объектива, мм	70x250; 85x228	100x200;	177x177 Ø 250	200x250, Ø 320
Максимальное поле с фотомонтажом, мм	210x250	Нет	Нет	Нет
Погрешность совмещения слоев, мкм	2,5	6	7,5	3
Масштаб объектива	1 : 1	1 : 1	1 : 1.25	1 : 2
Коррекция масштаба, ppm	± 1000	± 200 +100; X/Y измен.	± 500	± 800 +120; X/Y измен.
Глубина фокуса, мкм	± 100	± 50	± 40	± 100 / ± 75
Длина волны экспонирования	i(365nm); h(405nm); g(436nm);	i(365nm); h(405nm); g(436nm);	i(365nm);	i(365nm) или i(365nm) + h(405nm);
Плотность облучения, мВт/см <sup>2</sup>	270 (5 кВт)	150 (5кВт)	38 (4,3 кВт)	25/ 60 (5 кВт)
Максимальный размер подложки, мм	610x610	510x610	510x610	510x610
Размер фотошаблона, дюйм	10x12	12	7, 8	6



**Рис.5. Изменение масштаба проекционного объектива**

Для компенсации анизотропных изменений геометрии печатных плат разработчики японских степперов APEX A2061/A3061 и EXP-2431 предусмотрели конструктивную возможность изменения масштаба по X- и Y-направлениям (см. таблицу). Еще 1996 году Ultratech запатентовала способ анизотропного изменения масштаба проекционного объектива путем механического изгибания плоской стеклянной пластины, расположенной в переднем или заднем отрезке проекционного объектива (рис.5). При изгибании плоской пластины в виде части цилиндра изображение отрезка D станет короче. Вдоль оси цилиндра (нормально к плоскости рисунка) масштаб изображения меняться не будет.

Именно такой принцип различного изменения масштаба по осям X и Y реализован в японских степперах. При этом, однако, ни одна из компаний не приводит достоверной информации о величине дисторсии изображения и погрешнос-



**Рис.6. Компенсация искажений в степпере ЭМ-5434 М**

ти совмещения при анизотропном изменении масштаба объектива.

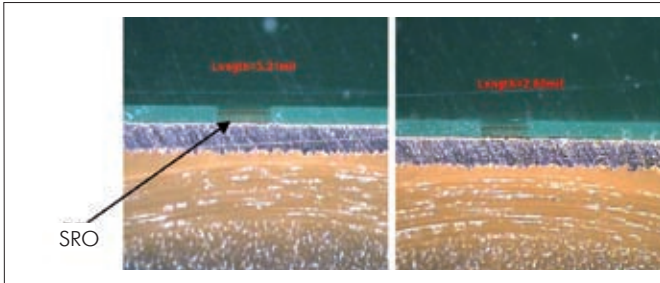
К недостаткам степперов UX5248SC и APEX 2061 для экспонирования толстых резистов (Solder Mask) можно отнести узкий спектр (одна линия i) экспонирующего излучения. Если принять во внимание возможные искажения формы PCB, например в виде ромба или трапеции, то наличие только одной возможности изменять масштаб независимо по двум координатам не является достаточным условием для уменьшения погрешности совмещения на таких пластинах.



**Рис.7. Степпер ЭМ-5434**

Как решена задача обеспечения высокой точности совмещения в PCB степпере ЭМ-5434М с изотропным изменением масштаба объектива? Рабочее поле этого степпера представляет узкую и длинную полосу размером 250x70 мм. Это позволяет измерять и компенсировать масштаб пластины только по одной координате даже для пластин с разным изменением масштаба по X и Y, так как из-за малого размера поля по короткой стороне (по которой масштаб даже не измеряется) анизотропные изменения масштаба не могут привести к большим ошибкам совмещения.

При расположении знаков совмещения на оси рабочего поля погрешность совмещения по всему полю не превышает 3,5 мкм из-за разности масштабов пластины по осям X и Y, равной 100 ppm. Такая погрешность соответствует обычной

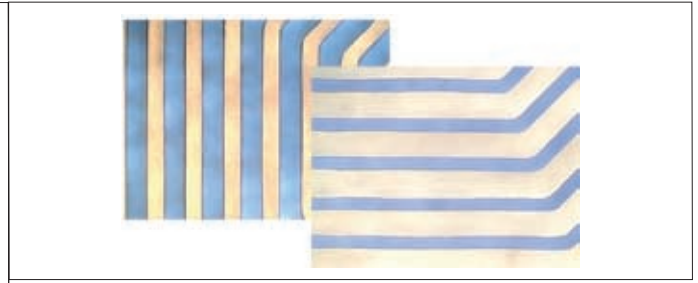


**Рис.8. Угол наклона в паяльной маске Резист – Taiyo ASU303**  
**SRO – вскрытое в паяльной маске окно**

величине дисторсии широкопольных проекционных объективов. Поэтому, при использовании рабочего поля в виде узкой полосы нет необходимости ни измерять, ни изменять масштаб объектива независимо по двум направлениям.

Более того, такая форма рабочего поля и обычное изотропное изменение масштаба объектива позволяет компенсировать неортогональные искажения пластины, например в виде трапеции или ромба (рис.6). Пунктирные линии показывают величину погрешности совмещения для объектива с анизотропным изменением масштаба, но с почти квадратным рабочим полем.

Производственные испытания степперов ЭМ-5434 (рис.7) и ЭМ-5434М проводились ведущими тайваньскими компаниями-производителями IC substrate, входящими в десятку мировых лидеров – Kinsus Interconnect Technology Corp. и Nan Ya Printed



**Рис.9. Разрешение в сухом резисте.**  
**Шаг 30 мкм, линия/промежуток = 12/18 мкм**

Circuit Board Corp. Тайваньские технологи, принимавшие участие в испытаниях, отметили приемлемую погрешность совмещения даже для пластин с анизотропным изменением масштаба до  $\pm 150$  ppm. При испытаниях на производстве (по существующей в компаниях серийной технологии) были получены практически вертикальные боковые стенки в проявленных Solder Mask-резистах (рис.8) и высокое разрешение в слоях стандартных сухих пленочных резистов (рис.9).

Объем одной статьи не позволяет показать преимущества системы совмещения и проекционной оптики степперов ЭМ-5434М по сравнению с японскими конкурентами.

Результаты испытаний, сравнение стоимости степперов, приведенных в таблице, позволяют утверждать, что сегодня ЭМ-5434М – это лучший в мире степпер для изготовления IC substrate. ○