

УДК 621.3.049.77.002.5

НОВЫЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕМ БОКОВЫХ СТЕНОК ФОТОРЕЗИСТОВ

А.С. АГЕЙЧЕНКО, В.Е. МАТЮШКОВ

Конструкторское бюро точного электронного машиностроения
Партизанский пр., 2, Минск, 220033, Беларусь

Поступила в редакцию 14 февраля 2011

Рассмотрены способы управления профилем боковых стенок проявленных фоторезистов повышенной толщины, используемых в технологии передовой упаковки микросхем методом бампинга перевернутого чипа и МЭМС.

Ключевые слова: фотолитография, фоторезист, проекционный объектив, апертурная диафрагма.

Введение

Фотолитография играет критическую роль в технологии упаковки микросхем методом перевернутого чипа при формировании столбиковых выводов на полупроводниковой пластине и при изготовлении приборов электронной микромеханики (МЭМС). Высота столбикового вывода обычно лежит в пределах порядка от 5 до 100 мкм. Чтобы изготовить контактный бамп высотой до 100 мкм, толщина фоторезиста должна быть еще большей. Для качественного формирования контактных выводов необходимо, чтобы после проявления стенки фоторезиста были максимально вертикальные, поскольку полученные в резисте углубления заполняются пастой припоя и, в итоге, профиль резиста определяет конечную форму и размер (разномерность) столбикового вывода.

Новому методу управления профилем боковых стенок резистов в технологии современной упаковки микросхем посвящена данная статья.

Управление профилем резиста

К оборудованию для фотолитографии толстых пленок предъявляются специфические требования. Большая толщина и низкая чувствительность фоторезиста требует высокой интенсивности экспонирующего света и большой глубины фокуса устройства экспонирования. Для получения высокой производительности устройства экспонирования для толстых фоторезистов обычно используют широкий спектр излучения ртутной лампы высокого давления в диапазоне длин волн 350–450 нм (i, g, h – линии). Спектральная чувствительность большинства резистов также находится в этом спектральном диапазоне [1].

Значительное влияние на угол боковых стенок некоторых фоторезистов может оказывать длина волны экспонирования. При монохроматическом освещении на g -линии получены углы боковой стенки $>85^\circ$, тогда как широкополосное освещение (i, g, h – линии одновременно) давало $<75^\circ$ [2–4].

Это вызвано различной чувствительностью фоторезиста для света в диапазоне 360–440 нм. Если толстый резист экспонируется светом с длиной волны максимальной чувствительности резиста (i -линия), то свет с этой длиной волны поглощается хорошо уже верхним слоем резиста. Верхние слои резиста в процессе экспонирования получают большую дозу, чем нижние. Ввиду того, что верхние слои резиста будут переэкспонированы, профиль боковых стенок про-

явленного резиста будет иметь наклон. Если этот же резист экспонируется светом с длиной волны g -линии, которая не поглощается очень сильно верхними слоями резиста, то экспонирующий свет достигает нижних слоев с момента начала экспонирования и при этом формируется хороший профиль боковых стенок резиста. Однако в этом случае, когда экспонирующий спектр не соответствует максимальной чувствительности резиста, требуется существенно более высокая доза экспонирования и производительность устройства экспонирования снижается.

Управление профилем боковых стенок резиста для фотолитографии обычной кремниевой технологии с тонкими (порядка 1 мкм) фоторезистами имеет свою историю. Так, известны экспонирующие системы, в которых для получения в слое резиста требуемого пространственного изображения экспонируемой топологии в осветительной системе и проекционном объективе используется апертурная диафрагма переменного размера [4–6].

Известно решение, когда для увеличения разрешения и глубины фокуса проекционной экспонирующей системы используется кольцевая засветка апертурной диафрагмы [6–9].

Для получения требуемого профиля боковых стенок в толстых слоях резистов предлагается также использовать возможность проекционной экспонирующей системы изменять положение плоскости фокусировки во время экспонирования в пределах толщины резиста [10–12]. Однако такое решение не позволяет исключить неравномерность полученной фоторезистом дозы по глубине, и, следовательно, не может гарантировать получения требуемого профиля резиста.

Хроматическая апертура

Возможность получения в резисте максимально вертикальных стенок – одна из главных характеристик литографического оборудования для технологии передовой упаковки микросхем. Поэтому этот параметр является зачастую определяющим фактором при выборе заказчиком экспонирующего оборудования той или иной компании.

Для обеспечения конкурентоспособности степпера ЭМ-5434М в сравнении с японскими степперами для подложек микросхем на рынке ведущих мировых изготовителей передовой упаковки чипов была поставлена задача получения в проявленных слоях толстых резистов максимально вертикальных боковых стенок при максимальном сохранении производительности устройства экспонирования. Такая возможность обусловлена тем, что отсутствие необходимости анизотропного изменения масштаба, для обеспечения точного совмещения, позволяет использовать в степпере ЭМ-5434М широкий спектр экспонирования – одновременно трех длин волн спектра ртутной лампы.

Для управления профилем толстых фоторезистов было найдено оригинальное решение – хроматическая апертура. Полихроматический проекционный объектив степпера и осветительная система снабжается двумя интерференционными фильтрами, один из которых расположен в плоскости апертурной диафрагмы (зрачка) осветительной системы, а второй в плоскости апертурной диафрагмы (зрачка) проекционного объектива, которые создают заданный размер и форму апертурной диафрагмы для каждой длины волны света экспонирования. Новизна этого технического решения подтверждена пионерским патентом [11].

Интерференционные фильтры в плоскости апертурной диафрагмы осветительной системы и в плоскости зрачка проекционного объектива представляют собой тонкую кварцевую пластину с тонкопленочным интерференционным покрытием на одной или обеих сторонах пластины. В случае использования для экспонирования одновременно трех спектральных линий ртути: 365 нм (i -линия), 405 нм (h -линия) и 436 нм (g -линия), площадь фильтра разбита на три зоны, как показано на рис. 1.

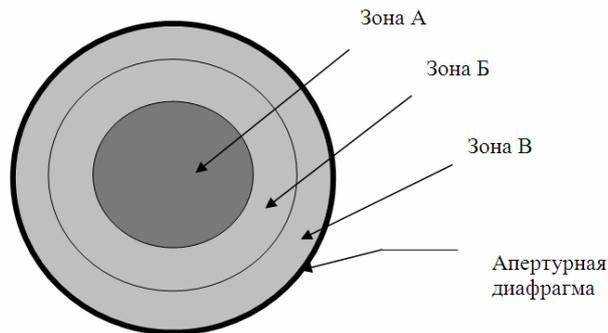


Рис. 1. Хроматическая апертурная диафрагма

В каждой зоне оптические параметры фильтра различны. В этих зонах коэффициент преломления материала пленочного покрытия фильтра и толщина пленки выбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальное пропускание или, наоборот, отражение света конкретной длины волны.

Например, если для получения максимально вертикальных стенок в конкретном фотолитографическом процессе нужно использовать больше света с длиной волны g -линии [2], то для фильтра в осветительной системе и фильтра в зрачке проекционного объектива центральная зона А фильтра апертурной диафрагмы изготовлена так, что пропускает свет всех главных длин волн экспонирования i , g , h -линии.

В этой зоне фактически выполнено просветление для трех длин волн. Зона Б пропускает свет только двух длин волн: g , h -линии. Зона В пропускает только одну g -линию.

Таким образом, площадь апертурной диафрагмы (зрачка) проекционного объектива для g -линии максимальна и будет представлять собой круг наружного диаметра зоны В. Площадь апертурной диафрагмы для h -линии будет представлять собой средний круг наружного диаметра зоны Б. Площадь апертурной диафрагмы для i -линии будет представлять собой минимальный круг с диаметром зоны А.

Возможны также и другие варианты хроматической диафрагмы в осветительной системе и проекционном объективе степпера. Например, зоны А и Б фильтра апертурной диафрагмы пропускают свет только одной g -линии. Зона В пропускает свет двух длин волн экспонирования: h - и g -линий. В этом случае площадь апертурной диафрагмы для g -линии также максимальна и будет представлять собой круг наружного диаметра зоны В. Площадь апертурной диафрагмы для h -линии будет представлять собой кольцо (зона В), то есть для h -линии будет использоваться кольцевая засветка апертурной диафрагмы. Площадь апертурной диафрагмы для i -линии также будет представлять собой кольцо, но большего диаметра (зона В).

На рис. 2 показаны фотографии различных вариантов хроматической апертуры.

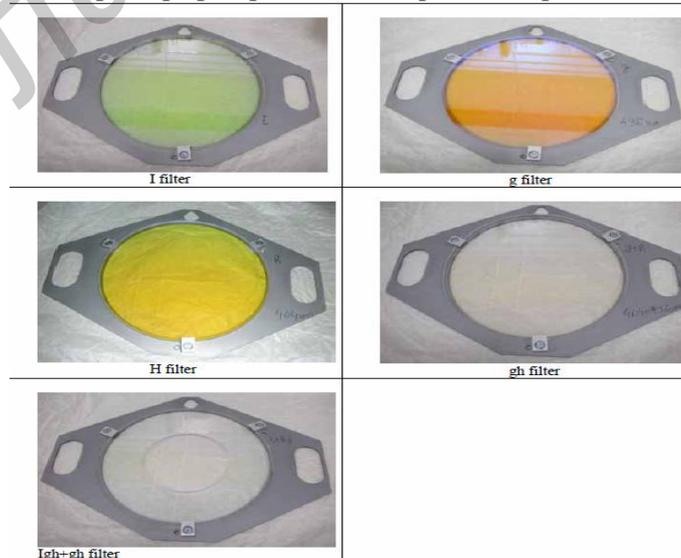


Рис. 2. Хроматическая апертурная диафрагма (нижний)

На нижнем снимке центральная зона А, пропускающая три длины волны, выполнена в виде сквозного отверстия определенного диаметра. Конкретная форма и размер апертурной диафрагмы для трех главных длин волн экспонирования выбирается из спектральной чувствительности, толщины и контрастных свойств используемого фоторезиста.

Для получения максимально вертикальных боковых стенок в толстых слоях фоторезиста площадь апертурной диафрагмы для света каждой длины волны обычно должна быть обратно пропорциональна чувствительности фоторезиста для этой длины волны и интенсивности данной линии в спектре используемой ртутной лампы [13].

Минимальный размер апертурной диафрагмы для каждой длины волны экспонирования определяется величиной требуемого разрешения проекционного безаберрационного объектива, например, из критерия Релея:

$$NA = 0,61\lambda / \delta,$$

где NA – числовая апертура объектива; λ – длина волны экспонирования, мкм; δ – разрешение, мкм.

Максимальный размер апертурной диафрагмы проекционного объектива для каждой длины волны экспонирования определяется требуемой глубиной резкости проекционного объектива (глубина фокуса). Величину глубины резкости можно приблизительно оценить по формуле:

$$\Delta Z = \pm \lambda / 2(NA)^2,$$

где ΔZ – глубина резкости, мкм; NA – числовая апертура объектива; λ – длина волны экспонирования, мкм.

Для обеспечения требуемого разрешения проекционного объектива, апертура для i -линии может быть на 20% меньше, чем апертура для g -линии. При этом, глубина фокуса для i -линии будет на 20% больше чем, для g -линии (квадратичная зависимость от апертуры).

С другой стороны, для обеспечения одинаковой глубины фокуса и для i – линии и для g -линии, диаметр апертурной диафрагмы для более коротковолнового света i – линии (365 нм) может быть большим, чем рассчитанный по критерию Релея.

Устройство экспонирования с полихроматическим объективом и хроматической апертурой для экспонирования толстых фоторезистов реализовано на предприятии УП «КБТЭМ-ОМО» в степпере ЭМ-5434М.

Для обеспечения требуемого профиля боковых стенок проявленного резиста для экспонирования каждого конкретного типа резиста необходимо использовать оптимальное освещение по спектру и форме засветки зрачка.

Экспериментальные результаты

Время жизни большинства жидких резистов (паяльных масок) передовой упаковки после нанесения и сушки составляет всего несколько суток. Для обеспечения требуемого профиля резиста необходимо проведение специальной термообработки непосредственно перед экспонированием и сразу после экспонирования перед проявлением. Эти режимы термообработки каждая компания изготовитель подложек для бампинга держит в строжайшем секрете. Поэтому проведение экспериментов по поиску оптимальных хроматических апертур для разных типов резистов возможно только на заводе компании, использующей степпер. Такие эксперименты на степпере ЭМ-5534М были проведены специалистами в Тайване на заводе компании заказчика «Nanya», с участием специалистов компании «С Sun».

По существующей на заводе «Nanya» серийной технологии были проведены также эксперименты с экспонированием паяльной маски (Solder Resist) Taiyo AUS 303, толщина резиста 35 мкм. Практически вертикальные боковые стенки и минимальная доза 400 мДж/см² получены для фильтра, где центральная зона (отверстие) в фильтре пропускала только 10% интенсивности i -линии. Интенсивность h - и g -линии при этом была максимальной. Результаты экспонирования солдер резиста Taiyo AUS 303 показаны на рис. 3.

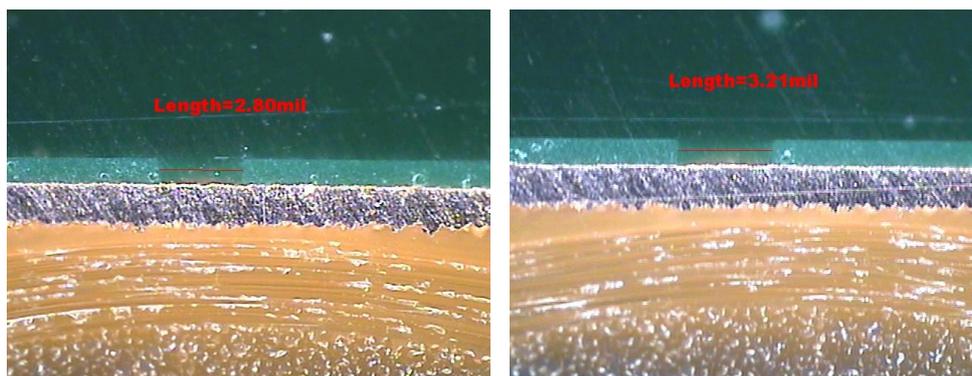


Рис. 3. Вскрытие окон в паяльной маске Taiyo AUS 303

Лучший угол наклона боковой стенки резиста и более высокое разрешение получены при использовании степпера, в спектре экспонирующего излучения которого присутствует g -линия. Причем интенсивность g -линии максимальная – зрачок в осветителе был заполнен на 100 %. Хроматические aberrации объективов японских степперов Adtec и Ushio с анизотропным изменением масштаба вынудили японских разработчиков ограничить экспонирующий спектр только двумя $i+h$ -линиями (табл.).

Оптические параметры степперов для подложек микросхем

	КБТЭМ-ОМО ЭМ-5434М	Ushio UX-54SR	ADTEC APEX3061
Масштаб объектива	1:1	1:1,4	1:2
Объектив	Зеркально линзовый	Линзовый	Линзовый
Спектр экспонирования	i, h, g	i, h	i, h
Оптическое разрешение	8 мкм	16 мкм	10 мкм
Глубина резкости	± 100 мкм	± 50 мкм	± 75 мкм
Рабочее поле объектива	250×70 мм	250×250 мм	250×200 мм
Плотность мощности экспонирования	220 мВт/см ²	98 мВт/см ²	48 мВт/см ²
Изменение масштаба	Изотропное	Изотропное +X,Y независимо	Изотропное +X,Y независимо
Дисторсия	2,5 мкм	5 мкм	5 мкм

Наличие возможности адаптировать спектр экспонирования к конкретному типу фоторезиста для обеспечения требуемого профиля боковых стенок в резисте при максимально возможной производительности, является серьезным преимуществом степпера ЭМ-5434М по сравнению с японскими конкурентами.

Несмотря на то, что степпер ЭМ-5434М разрабатывался специально для технологии изготовления подложек для упаковки микросхем, были проведены эксперименты по экспонированию кремниевых пластин с бампинг резистом. 200 мм кремниевые пластины с бампинг резистами AZP 4620 и TOK 1300 были предоставлены Тайваньской компанией «Unitive Semiconductor Taiwan Corp».

В слое фоторезистов для формирования столбиковых выводов из припоя AZP 4620 толщиной 54 мкм и TOK 1300 толщиной 44 мкм были получены элементы топологии с размерами до 7 мкм.

Получено высокое соотношение размера минимального элемента к толщине резиста (aspect ratio) – примерно 1:7. Измеренный угол наклона боковых стенок проявленного фоторезиста при оптимальной дозе экспозиции находился в диапазоне 86°–88° градусов. Полученные результаты экспонирования бампинг резистов позволяют сделать вывод о возможности приме-

нения катодиоптического проекционного объектива степпера ЭМ-5434М для технологии формирования бампов на кремниевых пластинах.

Выводы

Оригинальные технические решения в проекционной системе степпера ЭМ-5434М обеспечили серьезное преимущество в качестве формирования изображения (управление профилем резиста) для технологии литографии передовой упаковки микросхем.

Использование полихроматической апертурной диафрагмы позволяет управлять углом наклона боковых стенок в толстых слоях фоторезистов путем выбора оптимального размера и формы фильтра апертурной диафрагмы для создания оптимальной спектральной интенсивности света экспонирования и формы засветки зрачка проекционной системы для каждого конкретного фоторезиста.

AN ADVANCED SIDEWALLS PROFILE CONTROL METHOD FOR THICK PHOTORESIST

A.S. AGEICHENKO, U.E MATJUSHKOV

Abstract

The methods of sidewalls profile control for thick photo resists used in technology of advanced packaging by the Bumping of Flip Chip and MEMS are considered.

Литература

1. MicroChemicals GmbH – Exposure of Photoresists [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.microchemicals.com/technical_information/exposure_photoresist.pdf
2. James Hermanowski, Elmar Cullman // Microlithography World. 2004.
3. Flack, Nguyen, Capsuto // Proc. SPIE 5039. 2003. P. 1257–1271.
4. Warren W. Flack, Ha-Ai Nguyen. Ultratech [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.ultratech.com/pdf/05/SPIE_05_AZ_Solder_Paper.pdf
5. Rainer Pelzer, Markus Wimplinger, Alois Malzer, Chad Brubaker EV Group // Fawer Level Packaging Chip Scale Review. 2004.
6. Patent of Japan No JP5299321(A). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19931112&CC=JP&NR=5299321A&KC=A
7. United States Patent No 5,622,418 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://patft.uspto.gov/netacgi/nphParser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=/netahtml/PTO/srchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=5,622,418.PN.&OS=PN/5,622,418&RS=PN/5,622,418>
8. Patent of Japan No JP5082414 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19930402&CC=JP&NR=5082414A&KC=A
9. Patent of Japan No JP5315226 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19931126&CC=JP&NR=5315226A&KC=A
10. Patent of Japan No JP6333802 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19941202&CC=JP&NR=6333802A&KC=A
11. Пат. 11179 Респ. Беларусь // Афіцыйны бюл. Вынаходствы. Карысныя мадэлі. Прамысловыя узоры. 2008. №5. С. 135.
12. Manish Ranjan, Scott Zafiropoulo u Steven Kay // Chip Scale Review. 2004.
13. Martin Tupper // Thick Photoresist Patterning for Wafer Level Packaging and Bumping. 2002.