

Александр Сидоров
micro@ostec-smt.ru

Особенности нанесения фоторезиста при производстве МЭМС-устройств

Технология производства микроэлектромеханических систем (МЭМС) – одна из наиболее передовых технологий, позволяющая не только значительно улучшать характеристики электронной аппаратуры, но и создавать устройства для решения задач в совершенно новых областях. МЭМС-устройства представляют собой электронные схемы, механические узлы и чувствительные элементы, выполненные в виде одного компонента с использованием технологических приемов, примененных для производства микросхем. Технология МЭМС позволяет дополнять традиционную электронную схему датчиками и исполнительными механизмами, достигая тем самым интегрированного изготовления законченного изделия.

Основной конструктивной особенностью МЭМС-устройств является наличие развитых трехмерных поверхностей. Эта особенность накладывает свой отпечаток на технологический процесс производства МЭМС, особенно на этапе литографии. Так, при применении типового процесса нанесения фоторезиста – центрифугирования, возникают сложности, связанные с образованием «лучей» и непокрытых фоторезистом участков подложки, вызванные высокой топологией подложки. Избежать этих проблем возможно только при медленном вращении подложки, что делает невозможным сам процесс центрифугирования.

Для решения задач, связанных с нанесением фоторезиста на подложки с развитыми трехмерными структурами, фирма EV Group предлагает использовать другой метод нанесения фоторезиста – нанесение фоторезиста распылением.

В основе процесса нанесения фоторезиста распылением лежит применение специального ультразвукового сопла, создающего направленную струю фоторезиста из микроскопических капель, размер которых составляет приблизительно 20 мкм. Перемещение этого сопла над поверхностью подложки в сочетании с её медленным вращением создает на всей поверхности равномерный слой фоторезиста.

На различные поверхности распылением можно наносить как фоторезист, так и другие жидкости – кремний, оксид кремния, арсенид галлия, стеклянные подложки, металлы.

Для создания в сопле направленной струи вязкость фоторезиста должна быть менее 20 сСт, что обеспечивается добавлением в фоторезист растворителя, который химически не взаимодействует с материалом фоторезиста.

Одной из основных особенностей самого процесса нанесения фоторезиста распылением является сложный профиль скорости перемещения распыляющего сопла над поверхностью подложки (рис. 1). Эта особенность вызвана тем, что на разном удалении от центра подложки необходимо покрыть различную ее площадь (чем дальше от края, тем больше площадь), поэтому время распыления над центром подложки должно быть меньше, чем при распылении на краю. Этого можно добиться увеличением скорости перемещения сопла при его движении над центром подложки. Типовым профилем скорости перемещения сопла над поверхностью подложки является профиль, показанный на рис. 2.

Толщина и равномерность нанесенного слоя

фоторезиста зависят от ряда параметров:

- вязкость фоторезиста;
- скорость распыления фоторезиста;
- профиль скорости перемещения сопла;
- скорость вращения подложки.

Правильно используя перечисленные выше параметры, можно добиться равномерного нанесения слоя фоторезиста на поверхность подложки. В таблице 1 приведены результаты измерения толщины слоя фоторезиста, нанесенного на шесть кремниевых подложек диаметром 150 мм с одними и теми же параметрами процесса. При этом применяли следующий раствор фоторезиста: AZ 6612 (1 часть) + MEK (1,5 части) + PGMEA (0,5 части), а сам процесс нанесения проводили на установке EVG 101, разработанной специально для нанесения фоторезиста в условиях мелкосерийного и опытного производств (рис. 3).

В отличие от технологического процесса производства интегральных микросхем с низкими структурами (высота топологии существенно меньше толщины слоя фоторезиста) при производстве МЭМС-устройств необходимо наносить фоторезист на подложки с высокими структурами. При этом необходимо:

- 1 покрыть равномерным слоем фоторезиста всю поверхность подложки;
- 2 покрыть только контуры топологии подложки, без заполнения полостей фоторезистом.

При решении этих двух задач возникают определенные проблемы.

Например, анизотропно вытравленная полость – это типовой пример топологии МЭМС. При травлении кремния в плоскости <111> угол травления составляет

54,7° (рис. 4), и образуется V-образная полость. Таких полостей на поверхности подложки может быть большое количество, поэтому при нанесении фоторезиста центрифугированием неизбежно будут образовываться «лужицы», а на углах топологии возникнут проблемы (рис. 5, а), вызванные поверхностным натяжением фоторезиста. Его толщина в одних местах подложки будет больше, а в других – меньше. В результате фоторезист будет нанесен с очень низкой равномерностью.

При нанесении фоторезиста распылением эти проблемы не возникают (рис. 5, б), т.к. скорость вращения подложки во время процесса очень низкая, а равномерность слоя фоторезиста не зависит от наличия сквозных отверстий на подложке. Кроме того, нет необходимости в использовании вакуумных держателей подложек, применяемых на установках нанесения фоторезиста центрифугированием.

При решении первой задачи неравномерность слоя фоторезиста при процессе центрифугирования может составлять до 50%, а при решении второй центрифугирование неприменимо вовсе.

С помощью процесса распыления можно получать слой фоторезиста с неравномерностью менее 10% и покрывать фоторезистом боковые поверхности топологий, что позволяет проводить обработку любых поверхностей топологий. (рис. 6). Примером структуры, для изготовления которой необходимо решать обе задачи, является твердотельная индуктивность (рис. 7).

Необходимо отметить, что при нанесении фоторезиста центрифугированием

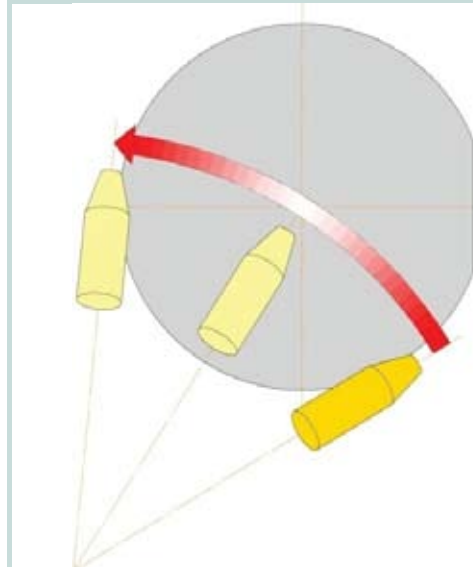


Рис. 1 Схема процесса нанесения фоторезиста распылением

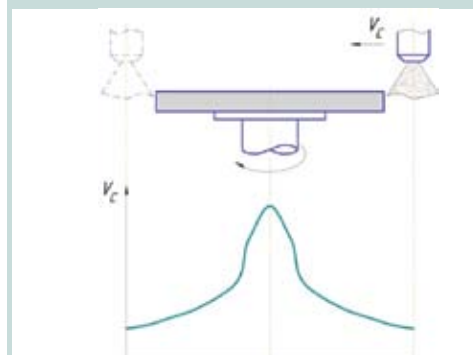


Рис. 2 Типовой профиль скорости перемещения распыляющего сопла



Рис. 3 Установка нанесения фоторезиста распылением EVG 101

Таблица 1 Результаты измерения неравномерности слоя фоторезиста

Точка измерения	Толщина слоя фоторезиста, мкм						Среднее значение в партии
	Номер подложки в партии						
	1	2	3	4	5	6	
1	2,50	2,56	2,56	2,39	2,63	2,42	
2	2,49	2,56	2,57	2,46	2,60	2,62	
3	2,43	2,57	2,58	2,51	2,57	2,61	
4	2,49	2,54	2,59	2,58	2,53	2,61	
5	2,48	2,50	2,49	2,59	2,53	2,61	
6	2,41	2,50	2,43	2,51	2,59	2,46	
7	2,47	2,47	2,42	2,47	2,61	2,43	
8	2,47	2,47	2,52	2,54	2,50	2,43	
9	2,46	2,48	2,52	2,52	2,56	2,60	
Среднее, мкм	2,47	2,52	2,52	2,51	2,57	2,53	2,52
Разброс, мкм	0,09	0,10	0,16	0,19	0,12	0,20	0,14
Неравномерность, %	1,81	2,06	3,16	3,81	2,39	3,95	2,86

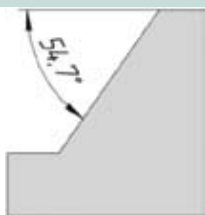


Рис. 4 Типовой профиль структуры после анизотропного травления

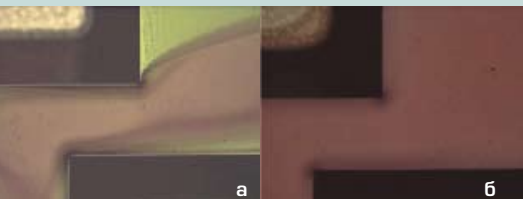


Рис. 5 Изображение фоторезиста на подложке с высокой топологией (вблизи угла топологии) в зависимости от метода нанесения: а – центрифугирование; б – распыление



Рис. 6 Примеры обработки различных поверхностей топологии: а – травление большой поверхности подложки; б – травление полостей на нижней плоскости полости; в – травление полостей на боковых поверхностях топологии

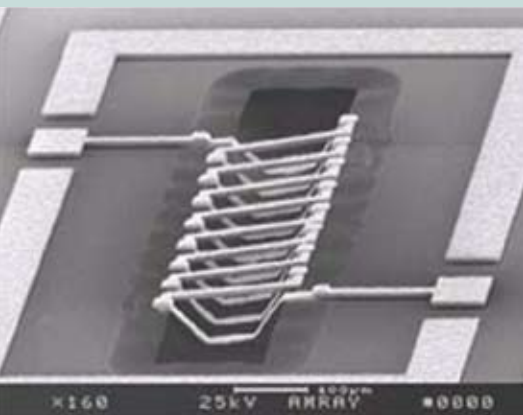


Рис. 7 Твердотельная индуктивность

Таблица 2 Оценка стоимости нанесения слоя ВСВ толщиной 4 мкм

Этап процесса	Используемое вещество	Цена за миллилитр (\$)	Миллилитров на подложку		Цена за подложку (\$)	
			Центрифугирование	Распыление	Центрифугирование	Распыление
Активатор	AP3000	0,05375	3,0	3,0	0,16125	0,16125
BCB	BCB4024-40	1,60000	1,4	-	2,24000	-
	BCB4026-46	1,60000	-	0,4	-	0,64000
Растворитель для распыления	-	0,02939	-	3,2	-	0,09405
Краевой валик	T1100	0,05046	15,0	-	0,75690	-
Стоимость процесса на одной подложки					2,9969	0,7340

на подложке остается менее 10% фоторезиста, а при нанесении фоторезиста распылением – более 70%. Следовательно, используя процесс нанесения распылением можно добиться существенной (в семь и более раз) экономии материала, что особенно важно при нанесении на подложки дорогостоящих материалов.

Одним из таких дорогостоящих материалов является бензоциклобутан (BCB), производимый компанией Dow Corporation под названием циклотан (Cycloctane). Этот материал стал стандартным материалом при производстве многокристалльных модулей, где BCB применяется в качестве материала для создания межуровневого изолятора. В компании EV Group проведена оценка стоимости одной операции нанесения слоя BCB толщиной 4 мкм на подложку диаметром 200 мм (таблица 2). Из таблицы видно, что есть существенная экономия при использовании процесса распыления вместо центрифугирования.

Еще одним способом снижения расхода материала является использование системы подачи резиста из шприца-дозатора. В такой конфигурации существенно уменьшается «паразитный объем», представляющий собой объем системы подачи фоторезиста. Так, при использовании шприца-дозатора этот объем составляет около 1 миллилитра, а низкий расход материала при распылении позволяет избежать частых смен шприца с наносимым материалом.

Процесс распыления позволяет решать не только задачи по нанесению, типичные для производства интегральных микросхем, но и ряд задач, не решаемых при использовании центрифугирования. Всё это, в сочетании с экономией материала, делает процесс нанесения фоторезиста распылением более универсальным и удобным как в условиях мелкосерийного и опытного производств интегральных микросхем и МЭМС-устройств, так и в условиях их массового производства.

Типовое комплексное решение для производства микро-электро-механических систем (МЭМС)

