

# Спреевое нанесение фоторезиста для создания равномерной пленки в полостях

В. Иванов<sup>1</sup>

УДК 621.37 | ВАК 2.2.2

Исследовался метод получения покрытий с помощью системы спреевого нанесения. В ходе проведения тестов были оптимизированы параметры процессов, такие как скорость вращения столика, скорость перемещения форсунки, поток смеси, угол наклона форсунки и т.д. Получены равномерные покрытия под различные требования к однородности по толщине.

**Т**ехнология нанесения равномерного фоторезистивного покрытия с помощью спреевого распыления начала зарождаться в 2000-х годах. Оборудование, поддерживающее данную технологию, состоит из нагреваемого вращающегося столика, ультразвуковой (УЗ) головки с форсункой и модуля ее перемещения. Конструкция зависит от множества параметров, но ключевыми являются: содержание твердых частиц в фоторезисте, диаметр распыляемых частиц, дозируемый объем (поток), скорость перемещения головки с форсункой и размеры пластины. Спреевое нанесение фоторезистов применяется при формировании структур для 3D-интегрированных устройств, в производстве микроэлектромеханических систем (МЭМС) и СВЧ полупроводниковой электроники, для нанесения оптических и защитных покрытий.

Постоянно ведутся исследования в областях 3D-интеграции, производства МЭМС и СВЧ-устройств, полупроводниковые структуры которых геометрически неоднородны и имеют полости, щели и отверстия. Метод центрифугирования – это устоявшийся подход для нанесения фоторезиста на плоскость или поверхность, имеющую небольшие неровности. Но при нанесении покрытий в глубоких полостях возникают проблемы, связанные с накоплением фоторезиста в нижнем углу полости и уменьшением толщины его слоя в верхнем углу. В результате центрифугирование не подходит для 3D-структур. Спреевое нанесение позволяет снизить расход фоторезиста более чем на 70%, по сравнению с центрифугированием, и обеспечить однородность слоя независимо от размера пластины и ее геометрической формы [1, 2].

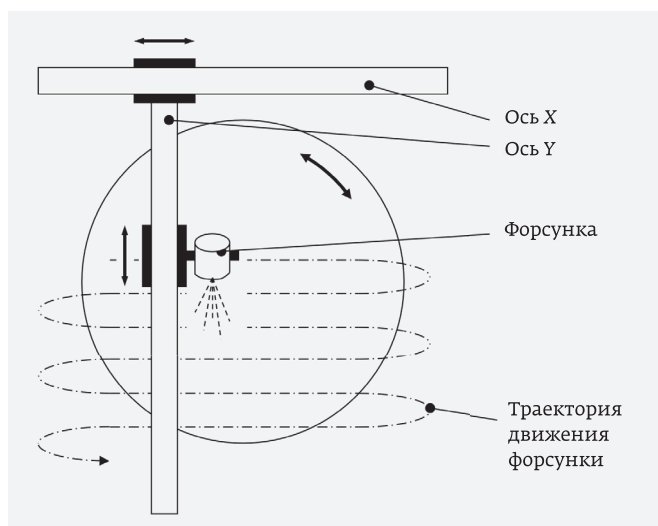
В отличие от технологии электроосаждения (ED – ElectroDeposition) фоторезиста спреевое нанесение не требует дополнительного изоляционного слоя на проводящем слое, что делает его универсальным для нанесения на любые поверхности. В ранних исследованиях спрей применялся для нанесения фоторезиста в сквозные отверстия, полученные методом травления в растворах [3]. В данной работе представлены результаты по спреевому нанесению фоторезистов в полости с высокими стенками.

## ТЕОРИЯ СПРЕЕВОГО НАНЕСЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА

При нанесении фоторезистивного покрытия спреем в результате УЗ-воздействия образуются капли размером не более 40–50 мкм, в зависимости от выбранного трансдюсера для УЗ-головки по частоте колебаний и форсунки по диаметру выходного отверстия. Фоторезист подается насосом в УЗ-головку и далее под давлением азота через форсунку. Распыляемые спреем частицы фоторезиста попадают на пластину, которая вращается на столике, форсунка тоже перемещается по определенной траектории и покрытие образуется за счет сил поверхностного натяжения. На рис. 1 показана принципиальная схема спреевого нанесения фоторезиста.

Нанесение спреем влияет на однородность и толщину слоя фоторезиста в зависимости от таких переменных, как вязкость фоторезиста, скорость перемещения форсунки, скорость вращения столика, угол наклона форсунки, величина потока фоторезиста в минуту и температурный режим столика для нагрева пластины. Во-первых, вязкость фоторезиста влияет на размеры образующихся частиц, которые формируют слой на поверхности пластины за счет поверхностного натяжения, поэтому для регулирования вязкости фоторезисты разводят ацетоном, иногда можно использовать другие виды

<sup>1</sup> ООО «ТТМ», начальник технического отдела, vi@ttmicro.ru.



**Рис. 1.** Принципиальная схема спреевого нанесения фоторезиста

растворителей. Скорость перемещения форсунки и скорость вращения столика оказывают наибольшее влияние на толщину наносимого покрытия. Толщина уменьшается при более высоких скоростях вращения столика и перемещения форсунки [4].

Когда форсунка равномерно и прямолинейно перемещается от краев пластины к центральной области, нанесение производится на одинаковом расстоянии в направлении радиуса пластины и под углом в направлении ее вращения независимо от радиуса. Таким образом, распыление концентрируется в центре, и слой становится

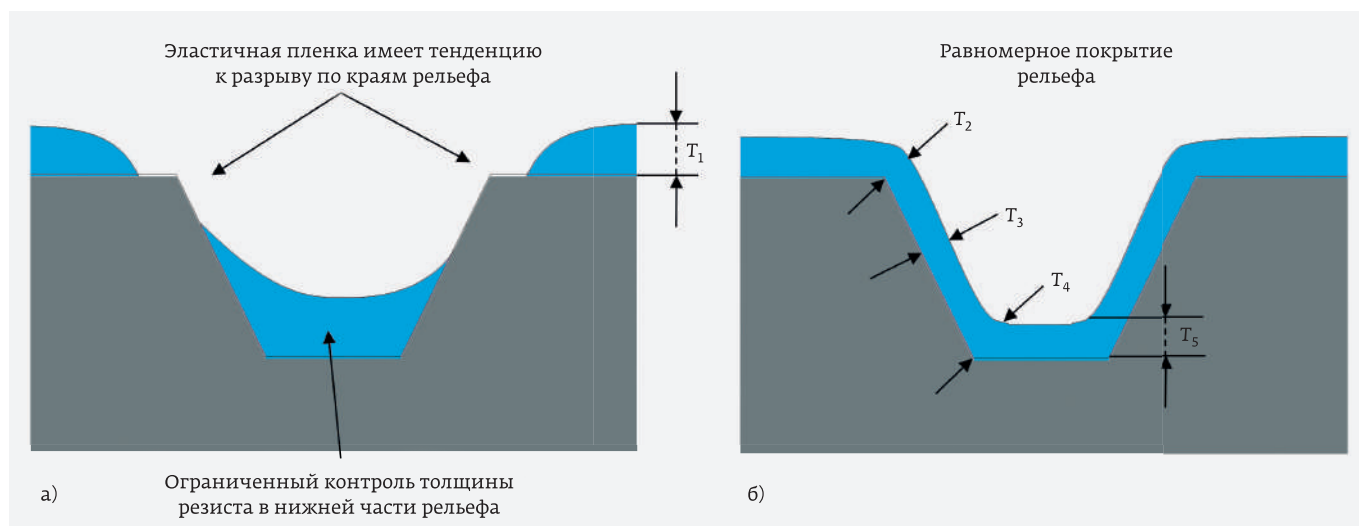
толще в центре пластины. С другой стороны, когда форсунка равномерно перемещается в определенную область от края пластины, которая вращается с определенной скоростью, поток движется по спирали. Если необходимо добиться одинаковой толщины покрытия фоторезиста, радиус пластины должен быть разделен пропорционально площади распыления форсунки таким образом, чтобы время распыления на каждую часть пластины было разным.

Для равномерного нанесения на 3D-структуру, фоторезист следует распылять не вертикально, а под наклоном. Если высота ступеньки не превышает 10 мкм, обычное нанесение центрифугированием может быть равномерным. 3D-структуру, имеющую высоту ступени или стенки 10 мкм и более, покрыть фоторезистом методом центрифугирования сверху, сбоку и снизу не удастся (рис. 2а).

При вертикальном спреевом нанесении характерно что  $T_1 > T_5 > T_4 > T_3 > T_2$ , толщина покрытия в верхней части равна  $T_1$ , толщина покрытия на дне полости –  $T_5$ , толщина покрытия нижнего угла полости –  $T_4$ , толщина покрытия стенки полости –  $T_3$ , а толщина покрытия верхнего угла полости –  $T_2$ . Таким образом, фоторезист не наносится равномерно сверху, снизу и сбоку 3D-структуры. Толщина фоторезистивного покрытия при спреевом нанесении под наклоном показана на рис. 2б и иллюстрирует возможность получения высокой степени равномерности  $T_1 \approx T_2 \approx T_3 \approx T_4 \approx T_5$ .

## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СПРЕЕВОГО НАНЕСЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА

Любая установка спреевого нанесения состоит из вращающегося столика с регулируемой температурой



**Рис. 2.** Проблемы при нанесении фоторезиста в полости методом центрифугирования (а), равномерное покрытие полости слоем фоторезиста при спреевом нанесении (б)

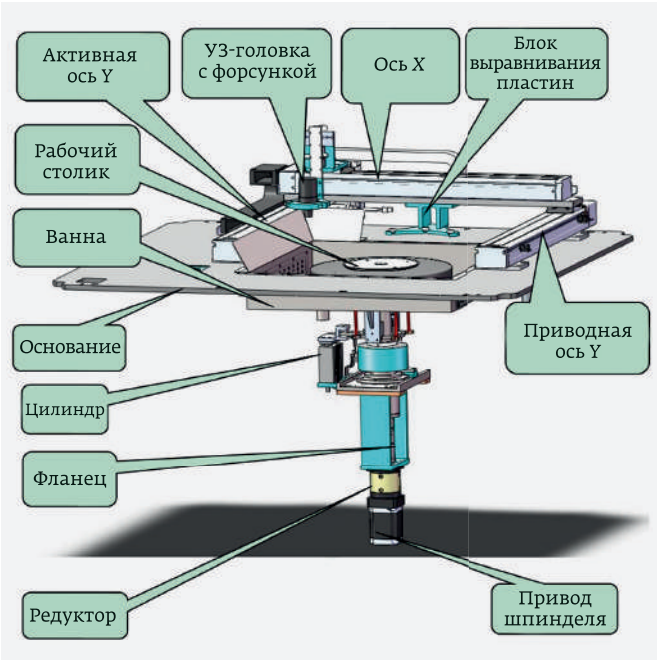


Рис. 3. Схема основного модуля установки спреевого нанесения фоторезиста

нагрева, УЗ-головки, механизма перемещения форсунки, регулятора угла наклона форсунки и системы подачи фоторезиста. Конструкция разрабатывается

с учетом вязкости фоторезистов и других технологических параметров, под которые подбираются: система подачи, трансдюсер УЗ-головки, форсунки и т.д. Структурная схема основного модуля установки спреевого нанесения фоторезиста представлена на рис. 3.

Пластины выравниваются и фиксируются на рабочем столике для равномерного нанесения фоторезиста. Столик может вращаться с постоянной скоростью в диапазоне от 1 до 30 оборотов в минуту с точным контролем, обороты специально снижены, чтобы избежать паразитного эффекта центрифугирования. Чем быстрее вращается пластина, тем тоньше получается фоторезист, но в центре наносится гораздо больше фоторезиста, чем в других областях, поскольку центробежная сила, создаваемая скоростью вращения, оказывает меньшее влияние на центр пластины. Нагрев столика предназначен для стабилизации текучести фоторезиста и поддержания температуры пластины на уровне 60–80 °С во время нанесения покрытия.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

В ходе экспериментальной работы [1] коллеги проводили тесты на оборудовании EVG101 spray coating system (Австрия), в котором контролировались скорость перемещения форсунки, угол ее наклона, скорость вращения столика и поток фоторезиста, чтобы разработать технологию спреевого нанесения фоторезистивного

Таблица 1. Оптимизированные параметры процесса спреевого нанесения фоторезиста AZ4620

| Параметр                                     | Значение  |
|----------------------------------------------|-----------|
| Радиус пятна распыления                      | 100 мм    |
| Поток фоторезиста                            | 2 мл/мин  |
| Скорость перемещения форсунки по оси X       | 120 мм/с  |
| Скорость перемещения форсунки по оси Y       | 40 мм/с   |
| Шаг по оси Y                                 | 3,3 мм    |
| Температура нагрева столика при нанесении    | 75 °С     |
| Скорость вращения столика                    | 10 об/мин |
| Наклон форсунки                              | 60°       |
| Высота форсунки                              | 55 мм     |
| Давление N <sub>2</sub>                      | 0,15 МПа  |
| Расход N <sub>2</sub>                        | 15 л/мин  |
| Температура нагрева столика при стабилизации | 75 °С     |
| Время стабилизации                           | 60 с      |

Таблица 2. Оптимизированные параметры процесса спреевого нанесения смеси KMP-BP212:ACE:PGMEA:IPA

| Параметр                                     | Значение  |
|----------------------------------------------|-----------|
| Радиус пятна распыления                      | 60 мм     |
| Поток смеси                                  | 1 мл/мин  |
| Скорость перемещения форсунки по оси X       | 120 мм/с  |
| Скорость перемещения форсунки по оси Y       | 40 мм/с   |
| Шаг по оси Y                                 | 7 мм      |
| Температура нагрева столика при нанесении    | 17,5 °C   |
| Скорость вращения столика                    | 10 об/мин |
| Наклон форсунки                              | 0°        |
| Высота форсунки                              | 45 мм     |
| Давление N <sub>2</sub>                      | 0,04 МПа  |
| Расход N <sub>2</sub>                        | 5 л/мин   |
| Температура нагрева столика при стабилизации | 75 °C     |
| Время стабилизации                           | 90 с      |

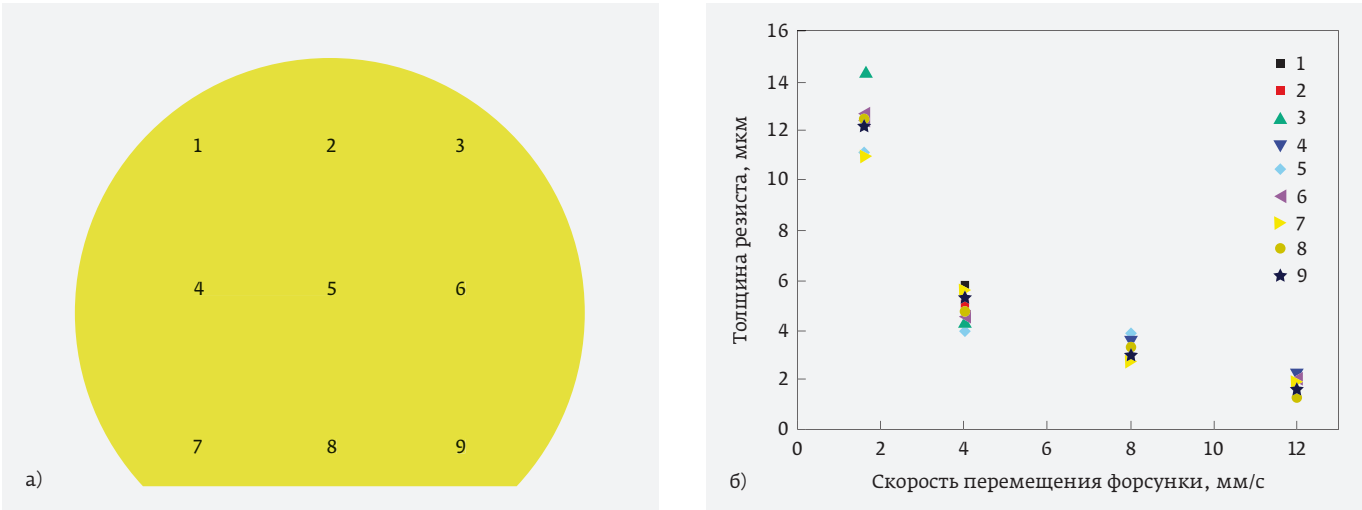
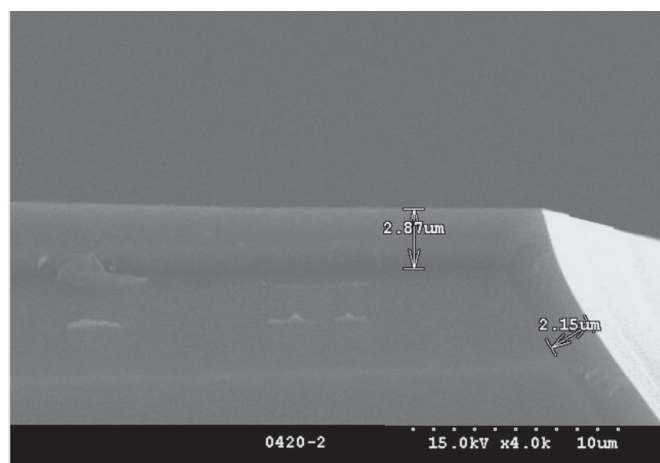


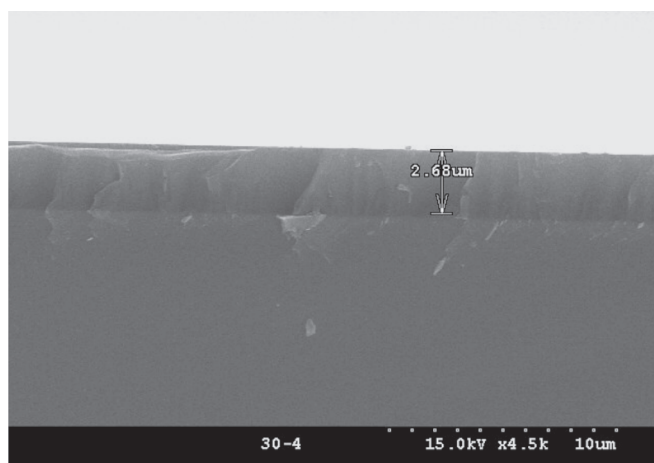
Рис. 4. Разделение пластины на девять участков для измерений толщины фоторезиста (а), толщина фоторезиста при различных скоростях перемещения форсунки при скорости вращения столика 30 об/мин (б)

покрытия для 3D-структур с полостями 100 мкм. Работа велась с фоторезистом AZ1512 вязкостью 20 сПз, толщина измерялась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Кремниевая пластина диаметром 100 мм была условно разделена на девять участков для определения толщины фоторезиста и проверки однородности (рис. 4а). Распределение толщины фоторезиста при скоростях перемещения форсунки от 2 до 12 мм/с

показано на рис. 4б. При фиксированной скорости вращения столика толщина покрытия фоторезистом была обратно пропорциональна скорости перемещения форсунки. Результаты измерений толщины фоторезиста с помощью СЭМ на поперечном сечении угла полости, поперечном сечении дна полости, полученные при нанесении форсункой под наклоном в 45°, представлены на рис. 5.

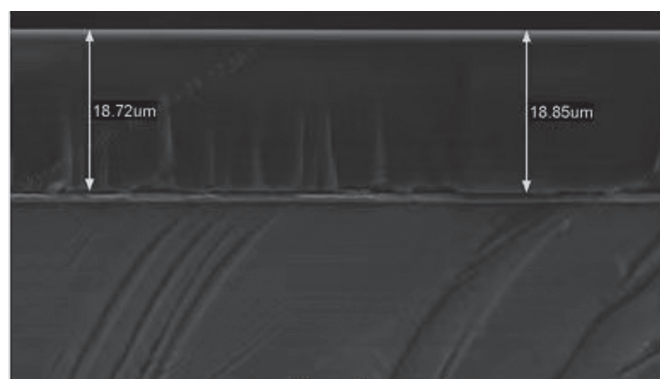


a)

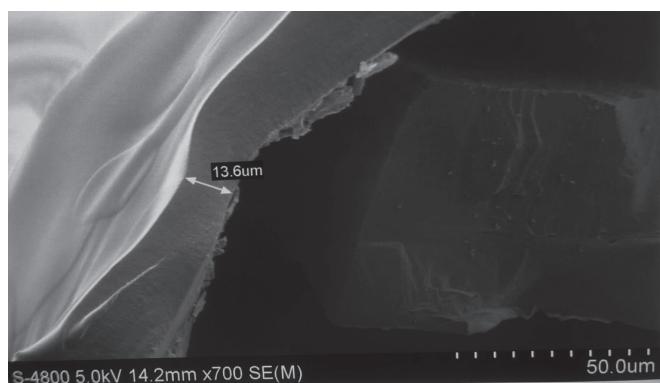


б)

**Рис. 5.** Измерение толщины слоя фоторезиста с помощью СЭМ на поперечном сечении угла полости (а), поперечном сечении дна полости (б)



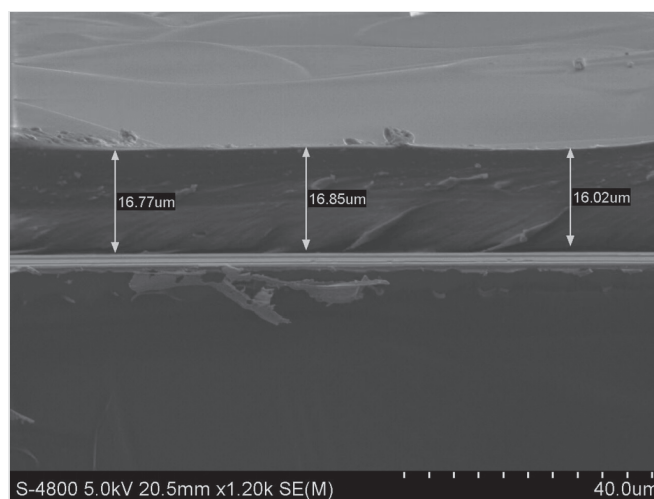
a)



б)

Толщина на верхней части пластины и стенке полости составила 2,87 и 2,15 мкм соответственно, а толщина на дне полости – 2,68 мкм, она в меньшей степени зависела от поверхностного натяжения.

В рамках данной работы на китайском оборудовании были проведены испытания спреевого нанесения фоторезиста AZ4620, разбавленного ацетоном в соотношении



в)

**Рис. 6.** Измерение толщины слоя фоторезиста с помощью СЭМ на пластине (а), поперечном сечении угла полости (б), поперечном сечении дна полости (в)

1:10, в полости 300 мкм на пластинах диаметром 200 мм. Требовалось достигнуть следующей толщины фоторезиста: на верхней части пластины  $18 \pm 2$  мкм, на стенке и дне полости  $15 \pm 2$  мкм. Понадобилась оптимизация параметров процесса, чтобы получить покрытие желаемой толщины. Оптимизированные параметры процесса представлены в табл. 1.

Результаты измерений с помощью СЭМ показаны на рис. 6, толщина слоя фоторезиста на пластине составила 18,72–18,85 мкм, на стенке полости – 13,6 мкм и на дне полости – 16,02–16,85 мкм. Результаты демонстрируют,

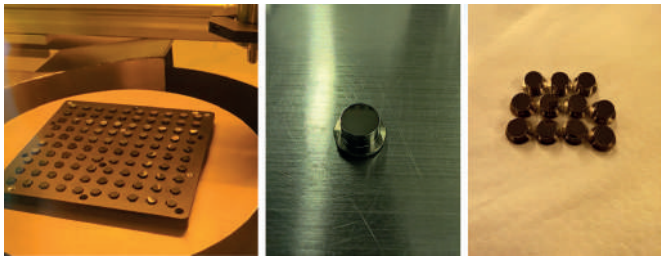


Рис. 7. Оптические детали с нанесенным покрытием

что при оптимальных параметрах процесса решается поставленная задача по достижению толщины фоторезиста в пределах допуска.

Помимо решения задач для 3D-структур, спрей активно применяют для нанесения оптических и защитных покрытий. Совместно с китайским производителем оборудования для спреевой обработки дополнительно проводились тесты по нанесению на оптические детали смеси фоторезиста KMP-BP212 с эфиром уксусной кислоты, пропиленгликоль метил эфир ацетатом и изопропиловым спиртом, разбавленной в соотношении 1:0,5:0,5:0,5 (KMP-BP212:ACE:PGMEA:IPA), вязкостью 37 сПз. Требовалось получить равномерное покрытие толщиной  $1,7 \pm 0,3$  мкм с усадкой по краям детали в пределах 0,5 мм. Чтобы достичь заданных значений толщины параметры процесса были оптимизированы как

в табл. 2, а на рис. 7 представлены фотографии оптических деталей с нанесенным покрытием в соответствии с требованиями.

Еще одним объектом исследования стали пластиковые детали, на которые наносилось защитное покрытие TRA100, разбавленное 1:2 со специальным растворителем для получения вязкости 20 сПз. Требовалось получить на поверхности образцов слой толщиной около  $3,3 \pm 0,2$  мкм с усадкой по краям в пределах 0,5 мм. Оптимальные параметры процесса (табл. 3) удалось подобрать только после предварительной плазменной обработки поверхности образцов, покрытие

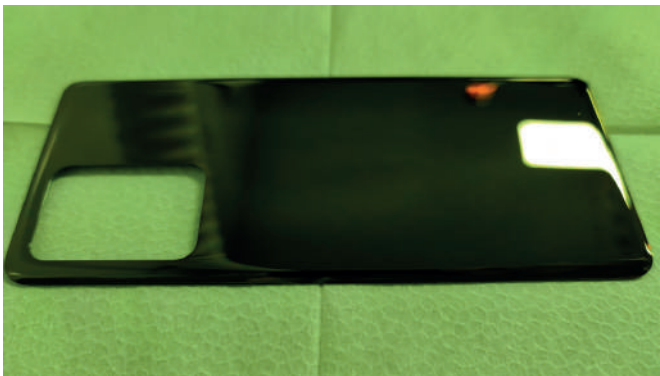


Рис. 8. Пластиковая деталь с нанесенным защитным покрытием

Таблица 3. Оптимизированные параметры процесса спреевого нанесения защитного покрытия TRA100

| Параметр                                     | Значение |
|----------------------------------------------|----------|
| Радиус пятна распыления                      | 110 мм   |
| Поток смеси                                  | 1 мл/мин |
| Скорость перемещения форсунки по оси X       | 120 мм/с |
| Скорость перемещения форсунки по оси Y       | 40 мм/с  |
| Шаг по оси Y                                 | 7 мм     |
| Температура нагрева столика при нанесении    | 19 °C    |
| Скорость вращения столика                    | 0 об/мин |
| Наклон форсунки                              | 0°       |
| Высота форсунки                              | 60 мм    |
| Давление N <sub>2</sub>                      | 0,05 МПа |
| Расход N <sub>2</sub>                        | 5 л/мин  |
| Температура нагрева столика при стабилизации | 75 °C    |
| Время стабилизации                           | 120 с    |

получилось ровным (рис. 8), включая боковые стенки, толщина и усадка по краям в результате оказались в пределах допусков.

\*\*\*

Спрей превосходит традиционную технологию центрифугирования при нанесении фоторезистов на рельефные поверхности, особенно в глубоких полостях. За рубежом технология спреевого нанесения различных материалов сделала значительные успехи за прошедшие два десятилетия и применяется при решении множества задач. В связи с этим возрос интерес отечественных производителей микросхем к этой технологии.

В данной работе был исследован метод получения покрытий с помощью системы спреевого нанесения. В ходе проведения тестов были оптимизированы параметры процессов, такие как скорость вращения столика, скорость перемещения форсунки, поток смеси, угол наклона форсунки и т.д. Удалось получить равномерные покрытия под различные требования к однородности по толщине. Для 3D-структур определено, что требуется распыление фоторезиста под наклоном, чтобы получить более равномерное покрытие. В частности, в эксперименте с наклонным спреевым нанесением фоторезиста AZ1512 погрешность по толщине слоя

составила менее 1 мкм, а для AZ4620 менее 2 мкм. Данная технология может быть использована для обеспечения равномерности толщины фоторезиста даже в глубоких и сложных 3D-конструкциях, например, при производстве МЭМС-элементов, 3D-интегрированных устройств и СВЧ-электроники.

В дополнение были представлены параметры процессов и результаты по нанесению покрытий на оптические детали и пластиковые изделия, чтобы продемонстрировать гибкость применения спреевой технологии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Duk-Soo Eun, Do-Wok Kim et al.** Photoresist Spray Coating for Resist Film Performance of Deep Silicon Cavities // Journal of the Korean Physical Society. Vol. 50. No. 6. June 2007. PP. 1947–1951.
2. **Tonnies D.** Spray coating & lithography technology for 3D topological structures // 5th SECAP seminar. Nov. 2004.
3. **Pham, N.P. et al.** Spray coating of photoresist for pattern transfer on high topography surfaces // J. Micromech. Microeng. 15 (2005). PP. 691–697.
4. **Park H. et al.** Design and Fabrication of the Double-Sided Silicon Microstrip Sensor // J. Korean Phys. Soc. 49. 1401 (2006).

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 3700 руб.  
за два тома

### ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ. СПРАВОЧНИК. В 2-х КНИГАХ.

Под ред. К. Кумбза

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. – 2032 с.,  
ISBN 978-5-94836-258-8  
Т. 1. – 1016 с. Т. 2. – 1016 с.

В издании рассматриваются все процессы создания и применения печатных плат: проектирование и выбор базовых материалов, изготовление, обеспечение качества и оценки надежности печатных плат и печатных узлов, монтаж плат, включая особенности бессвинцовых технологий пайки, а также методы и средства испытаний применительно к специальным требованиям. Шестое издание дополнено информацией по ценообразованию, количественной оценке технологичности плат, управлению производством и решению экологических проблем.

Справочник рассчитан на широкий круг специалистов-технологов, конструкторов, схемотехников и специалистов по надежности, поскольку печатные платы являются фундаментом проектирования и производства изделий электроники.

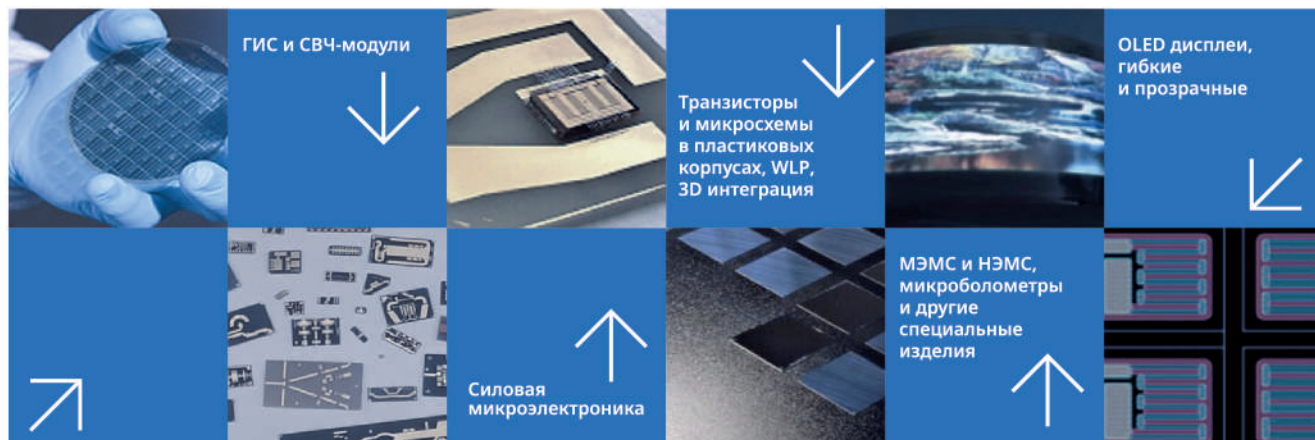
Данная книга может служить учебным пособием для студентов и аспирантов вузов соответствующих специальностей.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)

# ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Заказные решения и экспертные услуги  
для производств микроэлектроники  
и полупроводниковой техники

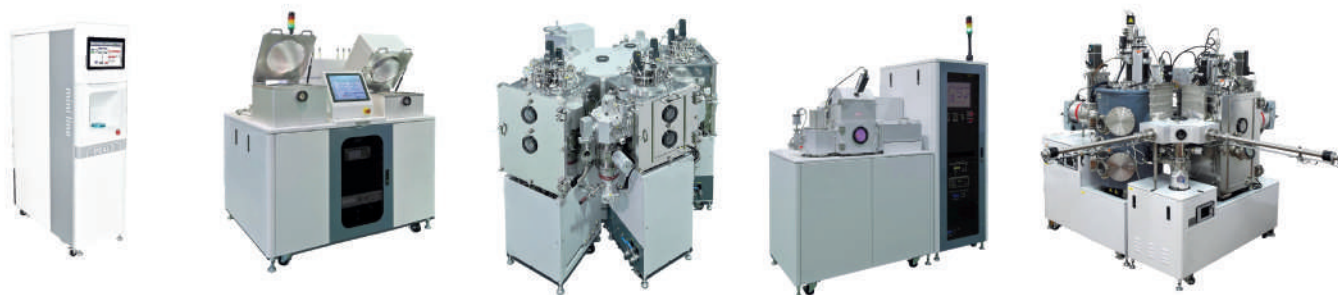


Полупроводники

Органическая электроника

Фотоника

Разработка и трансфер технологий  
Поиск и привлечение финансирования  
Поставка и обслуживание оборудования  
Повышение квалификации инженеров



ООО «ТТМ»  
[www.ttmicro.ru](http://www.ttmicro.ru)

Москва,  
Каширское шоссе, 3к2с4  
+7 495 150 95 46