

УДК 621.793

## Экспериментальное исследование холодного газодинамического напыления за маской. Часть 1\*

С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, Н.С. Ряшин, В.С. Шикалов

*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: vkos@itam.nsc.ru

В работе представлены экспериментальные результаты по изучению образования покрытия при холодном газодинамическом напылении за маской с поперечным размером 0,3–1 мм, расположенной на различных расстояниях от подложки. Получены образцы покрытий и измерены их профили в окрестности затененной области на поверхности преграды. На примере напыления порошков алюминия и меди показано, что для получения четкой зоны без покрытия маска должна располагаться на расстоянии от подложки менее предельного, определяемого параметрами напыления. Наиболее четкая граница маскированной зоны получается при минимальном расстоянии установки маски, которое зависит, в первую очередь, от толщины покрытия. В зависимости от параметров напыления с увеличением дистанции установки маски может наблюдаться как монотонное уменьшение ширины маскированной зоны, так и ее увеличение на некоторых дистанциях. Экспериментальные данные могут быть обобщены нормировкой на поперечный размер маски при прочих равных условиях.

**Ключевые слова:** холодное газодинамическое напыление, маска, профиль покрытия, ширина маскированной зоны.

### Введение

Растущий спрос на надежные силовые полупроводниковые модули высокой мощности заставляет искать новые методы получения электропроводящих покрытий на подложках из керамических материалов, например, оксида и нитрида алюминия. Наибольшее распространение получили технологии АМВ (Active Metal Braze) и ДВС (Direct Bonded Copper). Альтернативным методом получения медных покрытий для силовых полупроводниковых модулей — покрытий с высокими адгезией [1–3], электро- и теплопроводностью [4, 5] — может стать холодное газодинамическое напыление (ХГН) [6]. Помимо производства покрытий и материалов важным приложением для порошковых методов напыления является создание с высокой точностью рисунка покрытия. Одним из способов решения этой задачи может быть применение микросопел [7], позволяющих формировать покрытия с высоким пространственным разрешением. Другим, более простым способом является применение маски [8].

Надо отметить, что при создании рисунка с помощью маски возникают две разные с физической точки зрения задачи. Одна из них заключается в получении проводящих

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-01-00352-а и № 15-08-04129-а).

дорожек, другая — в получении непроводящих дорожек. Результаты исследований по созданию методом ХГН проводящих дорожек с помощью масок с прорезями разной ширины впервые были представлены в работах [9, 10]. В работе [11] были опубликованы результаты напыления порошков алюминия, никеля и нержавеющей стали через маску в виде проволоочной сетки. Для решения второй задачи маска должна содержать нити, сравнимые по ширине с требуемой шириной маскированной зоны на подложке. При этом маска может быть расположена над подложкой без зазора или с некоторым зазором. Расположение с зазором предпочтительнее, поскольку после напыления маска легко убирается. В случае напыления без зазора возможно соединение маски с подложкой через покрытие, образующееся на краях маскирующих элементов. Таким образом, необходимо исследование процесса формирования покрытия методом ХГН в окрестности зоны, затененной маской, отстоящей от поверхности подложки на разных расстояниях.

Результаты исследований по созданию непроводящих дорожек с помощью нитей разного диаметра впервые были представлены в работах [12–14]. Настоящая работа является обобщением результатов этих исследований.

### Материалы и методы экспериментов

Эксперименты проводились с использованием порошков алюминия (АСД-1) и меди (ПМС-1). Функции распределения этих порошков по размерам, полученные с помощью анализатора размера частиц LS 13320 (Beckman Coulter, USA), представлены на рис. 1. Средний размер частиц ( $d_{pm}$ ) алюминия составляет примерно 30 мкм, средний размер частиц меди — около 60 мкм, стандартное отклонение (SD) — примерно 15 мкм для алюминия и около 33 мкм — для меди.

В экспериментах использовалось коническое керамическое сопло с диаметрами критического сечения 3 мм и выходного сечения  $D_{ex} = 5,5$  мм, с длиной сверхзвуковой части 100 мм. Форкамерно-сопловой узел с нагревателем газа крепился на шестиосевом роботе Кука KR 16-2 (Германия) (рис. 2а). Измерение ширины маскированной зоны  $w_m$  проводилось с помощью оптического Axio Scope.A1 и электронного EVO M16 микроскопов (Carl Zeiss, Германия), а также бесконтактного интерференционного оптического профилометра ContourGT-K1 (Bruker, США).

Напыление порошков проводилось при давлении воздуха в форкамере  $p_0 = 1,6$  МПа и температуре, равной  $T_0 = 500$  К для алюминия и  $T_0 = 600$  К для меди. В качестве подложек использовались шлифованные стальные пластины размером  $30 \times 70 \times 3$  мм. Перед напылением поверхность подложек очищалась спиртом.

В качестве маски использовались стальные нити диаметром  $d_m = 0,3, 0,5$  и 1 мм, натянутые параллельно поверхности подложки. Дистанция установки маски от поверхности

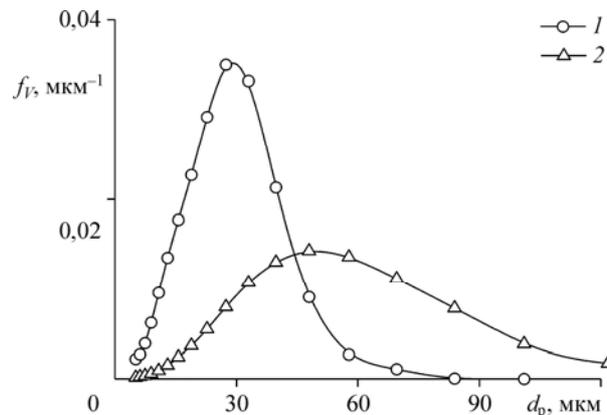


Рис. 1. Функции распределения по размеру частиц порошков АСД-1 и ПМС-1.

1 — Al,  $d_{pm} = 32,13$  мкм,  $SD = 15,61$  мкм, 2 — Cu,  $d_{pm} = 59,53$ ,  $SD = 33,29$  мкм.

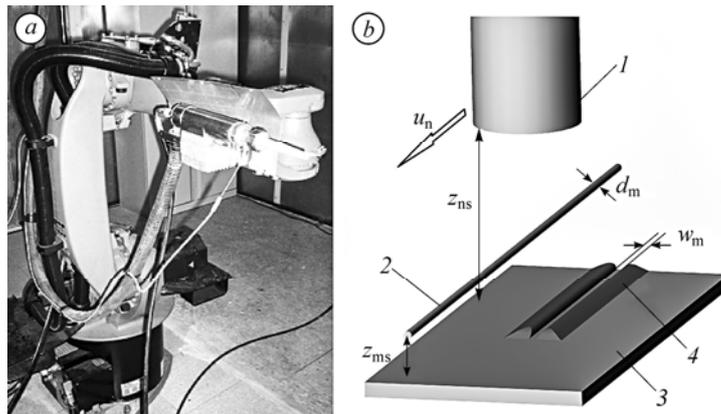


Рис. 2. Фотография соплового узла и нагревателя на роботе-манипуляторе КУКА KR 16-2 (а) и схема экспериментов с напылением (b).

1 — сопло, 2 — маска, 3 — подложка, 4 — покрытие,  $w_m$  — ширина маскированной зоны.

подложки  $z_{ms}$  варьировалась в пределах 2–14 мм. Дистанция от среза сопла до поверхности подложки  $z_{ns}$  была одинакова во всех экспериментах и равна 30 мм. Поток из сопла направлялся перпендикулярно поверхности подложки, ось сопла пересекалась с осью маски. Сопло двигалось вдоль маски со скоростью  $u_n = 10$  мм/с (рис. 2b).

### Экспериментальные результаты

На рис. 3 в качестве примера приведены фотографии внешнего вида образцов с покрытием (рис. 3a–3c) и поверхности в окрестности маскированной области при нанесении покрытия из алюминия в присутствии маски диаметром 0,3 мм (рис. 3d–3f). Видно, что при малых дистанциях  $z_{ms}$  под маской формируется четкая зона без покрытия. При дистанции  $z_{ms} = 15d_m$  наблюдаются частицы, закрепившиеся на поверхности внутри маскированной области, однако сплошного заполнения еще не происходит. На более дальних дистанциях происходит сплошное заполнение частицами маскированной области. С увеличением диаметра маски запыление маскированной области начинается на более дальних дистанциях (см. ниже).

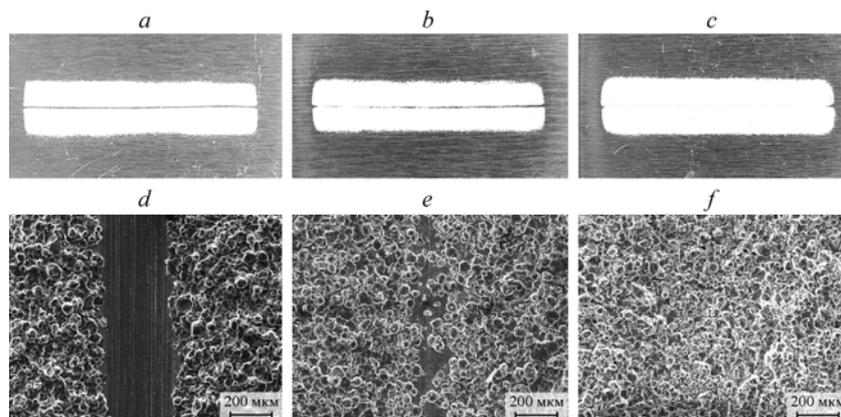


Рис. 3. Внешний вид дорожек напыления алюминия (a, b, c) и электронные микрофотографии поверхности маскированной области этих дорожек (d, e, f) при увеличении расстояния между маской и поверхностью подложки.

$d_m = 0,3$  мм,  $z_{ns} = 30$  мм; a, d —  $z_{ms} = 10d_m$ , b, e —  $z_{ms} = 15d_m$ , c, f —  $z_{ms} = 20d_m$ .

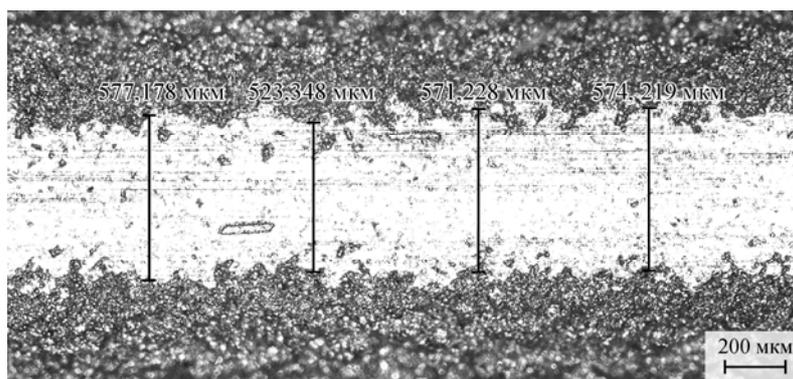


Рис. 4. Иллюстрация метода измерения ширины маскированной зоны по фотографии зоны напыления под маской диаметром 1 мм.  
 $z_{ms} = 15d_m$ , алюминий, оптический микроскоп Zeiss Axio Scope.A1.

С помощью программного пакета Zeiss ZEN blue на фотографиях, полученных с помощью оптического микроскопа, была измерена ширина маскированных зон для использованных материалов, различных диаметров маски и дистанции маска–подложка  $z_{ms}$ . Средняя ширина маскированной зоны рассчитывалась по четырем значениям, измеренным на равноудаленных дистанциях от краев изображения (см. рис. 4). В качестве крайних точек выбирались границы частиц, за которыми не наблюдалась поверхность подложки. Отдельно лежащие частицы, окруженные участками открытой поверхности подложки, в расчет не принимались.

Верификация данных, полученных с помощью оптического микроскопа, проводилась выборочным измерением ширины маскированной зоны на профилометре. Для этого снимался профиль участка поверхности в окрестности маскированной зоны шириной 1,73 мм (пример представлен на рис. 5a), На рис. 5b показан профиль вдоль одной из линий, перпендикулярных оси маски, а на рис. 5c изображен усредненный по всем линиям профиль, на котором и измерялась ширина маскированной зоны. Результаты измерений, полученные с помощью профилометра, отличались от результатов, полученных на оптическом микроскопе, не более чем на 10 %. Поэтому в работе основным был выбран более быстрый и простой метод измерения с помощью оптического микроскопа.

На рис. 6a представлены данные измерений ширины маскированной зоны для частиц алюминия в зависимости от дистанции от маски до подложки. Величины нормированы на диаметр маски. На рис. 6b представлены данные для частиц меди. Видно, что есть участок увеличения ширины затененной зоны с увеличением дистанции от маски до подложки, что качественно отличается от результатов для алюминия. Можно отметить, что данные как для алюминия, так и для меди неплохо обобщаются в нормированных координатах.

Обратим внимание на практическую значимость полученных результатов. Из них следует, что можно проводить напыление с помощью масок, располагаемых на некотором расстоянии от подложки. Предельное расстояние зависит от условий напыления. Например, в условиях проведенных экспериментов по напылению алюминия это расстояние следует выбирать не более  $\sim 10d_m$ , а в условиях напыления меди оно может быть увеличено до 25–30 $d_m$ . Более четкая граница получается при минимальных расстояниях, которые определяются, в первую очередь, толщиной покрытия, т.е. расстояние от маски до подложки должно быть больше толщины покрытия. С другой стороны,

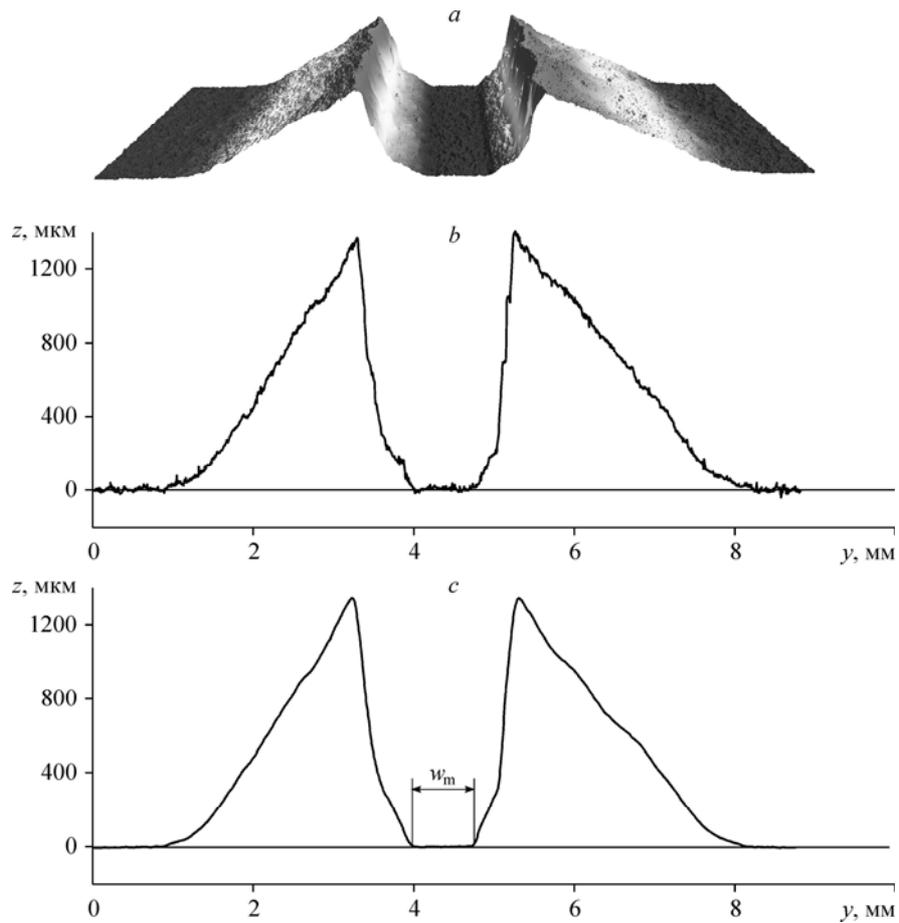


Рис. 5. Профиль поверхности в окрестности маскированной зоны.

*a* — трехмерный вид, *b* — профиль, соответствующий одной из линий, перпендикулярных оси маски, *c* — профиль, усредненный по всем линиям; алюминий,  $d_m = 1$  мм,  $z_{ms} = 4d_m$ .

поперечный размер маски накладывает ограничение на максимальную толщину покрытия. Так, например, при поперечном размере маски 0,3 мм и предельном расстоянии ее установки от подложки 3 мм ограничение на толщину покрытия составляет менее 3 мм.

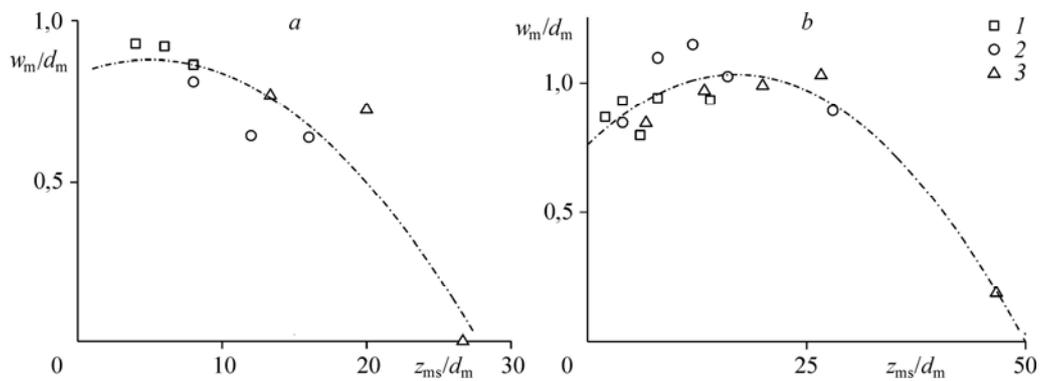


Рис. 6. Обобщенные данные экспериментов.

$d_m = 1$  (1), 0,5 (2), 0,3 (3) мм; *a* — частицы алюминия, *b* — частицы меди.

### Заключение

Экспериментально изучено образование покрытия при холодном газодинамическом напылении за маской с поперечным размером 0,3–1 мм, расположенной на различных расстояниях от подложки. Получены образцы покрытий и измерены их профили в окрестности затененной области на поверхности преграды.

На примере напыления порошков алюминия и меди показано, что для получения четкой зоны без покрытия маска должна располагаться на расстоянии от подложки менее предельного, определяемого параметрами напыления. Наиболее четкая граница маскированной зоны получается при минимальном расстоянии установки маски, которое зависит, в первую очередь, от толщины покрытия. В зависимости от параметров напыления с увеличением дистанции установки маски может наблюдаться как монотонное уменьшение ширины маскированной зоны, так и ее увеличение на некоторых дистанциях. Экспериментальные данные могут быть обобщены нормировкой на поперечный размер маски при прочих равных условиях.

Авторы выражают благодарность Ф.В. Орленко за помощь в получении части экспериментальных данных.

### Список литературы

1. Grund W.T., Rupprecht C., Kuemmel S., Wielage B. New method for producing power electronic circuit boards by cold-gas spraying and investigation of adhesion mechanisms // *Surface & Coatings Technology*. 2010. Vol. 205, No. 4. P. 1115–1118.
2. Непочатов Ю., Дейс Г., Богаев А., Каширин А., Шкодкин А. Разработка технологии изготовления металлизированных подложек для изделий силовой электроники // *Современная электроника*. 2010. № 9. С. 12–15.
3. Ernst K.-R., Braeutigam J., Gaertner F., Klassen T. Effect of substrate temperature on cold-gas-sprayed coatings on ceramic substrates // *J. of Thermal Spray Technology*. 2013. Vol. 22, No. 2–3. P. 422–432.
4. Rastjagaev E., Wilde J., Wielage B., Grund T., Kuemmel S. Development and testing of cold gas sprayed circuit boards for power electronics applications // *Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*. 2012 7th Intern. Conf. on Date 6–8 March 2012. P. 154–159.
5. Donner K.-R., Gaertner F., Klassen T. Metallization of thin Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers in power electronics using cold gas spraying // *J of Thermal Spray Technology*. 2011. Vol. 20, No. 1–2. P. 299–306.
6. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Метод “холодного” газодинамического напыления // *Докл. АН СССР*. 1990. Т. 315, № 5. С. 1062–1065.
7. Sova A., Klinkov S., Kosarev V., Ryashin N., Smurov I. Preliminary study on deposition of aluminium and copper powders by cold spray micronozzle using helium // *Surface and Coating Technology*. 2013. Vol. 220. P. 98–101.
8. Sova A., Doubenskaia M., Grigoriev S., Okunkova A., Smurov I. Parameters of the gas-powder supersonic jet in cold spraying using a mask // *J. of Thermal Spray Technology*. 2013. Vol. 22, No. 4. P. 551–556.
9. Patent 8 852 681 B2 US. Mask for kinetic cold gas compacting. Jakimov A., Hertter M., Schneiderbanger S. Oct. 7, 2014.
10. Kim D.-Y., Park J.-J., Lee J.-G., Kim D., Tark S.J., Ahn S., Yun J.H., Gwak J., Yoon K.H., Chandra S., Yoon S.S. Cold spray deposition of copper electrodes on silicon and glass substrates // *J. of Thermal Spray Technology*. 2013. Vol. 22, No. 7. P. 1092–1102.
11. Cormier Y., Dupuis Ph., Jodoin B., Ghaei A. Finite element analysis and failure mode characterization of pyramidal fin arrays produced by masked cold gas dynamic spray // *J. of Thermal Spray Technology*. 2015. Vol. 24, Iss. 8. P. 1549–1565.
12. Клинков С.В., Ряшин Н.С., Орленко Ф.В., Косарев В.Ф. Формирование покрытия ХГН за маской // *Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: докл. V Всерос. конф. Т. 1. Новосибирск: Параллель, 2013. С. 157–161.*
13. Orlenko F.V., Shikalov V.S., Klinkov S.V., Ryashin N.S., Kosarev V.F. Application of mask for cold spray coating production // *17 th Intern. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Abstracts, Part 1. Novosibirsk, 2014. P. 164–165.*
14. Клинков С.В., Косарев В.Ф. Формирование покрытия ХГН за маской // *Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: докл. V Всерос. конф. Т. 2. Новосибирск: Параллель, 2015. С. 40–44.*

*Статья поступила в редакцию 2 декабря 2015 г.*