

Микрофлюидные чипы: перспективы, проблемы, материалы и исследования

Е. А. Севрюгина, С. В. Сидорова
Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-ая Бауманская, д.5, кафедра МТ-11
E-mail: katesevr@gmail.com

Рассмотрены и проанализированы методы получения электропроводящего слоя в структуре микрофлюидного чипа. Проанализированы материалы основания и электропроводящего слоя. Приведены результаты эксперимента по нанесению проводящего медного слоя и построена математическая модель зависимости толщины слоя меди от параметров технологического процесса.

Microfluidic chips: perspectives, problems, materials and research. E.A.Sevryugina, S.V.Sidorova. The methods of obtaining an electro-conductive layer in the microfluidic chip structure are considered and analyzed. The base and conductive layer materials are analyzed. The results of the experiment on the application of a conductive copper layer and a mathematical model of the copper layer thickness dependence on the process parameters are given.

Введение

Одно из перспективных направлений развития микроэлектромеханических систем – лаборатория на чипе, основой для которой являются микрофлюидные чипы (МЧ). Микрофлюидные чипы – это устройства, которые позволяют описать поведение малых, порядка микро- и нанолитра, объемов жидкостей.

Данные чипы нашли свое применение в различных областях: промышленности, медицине, биологии, фармацевтике, ветеринарии и др.

У данной технологии есть ряд преимуществ, которые делают ее перспективным направлением на многие годы вперед: низкий расход реагентов для исследования; высокая точность управления температуры, концентрации и смешивания жидкостей; высокое значение отношения площади поверхности к объему исследуемой жидкости или газа, что приводит к быстрой передаче тепла; получение высокоточных результатов; высокая чувствительность; маленькие размеры исследовательского оборудования; более высокая безопасность при заборе материала; уменьшение длительности и снижение стоимости исследования [1].

Широкое внедрение устройств на основе микрофлюидных модулей способно существенно повысить качество жизни. Так, использование микрофлюидных устройств для анализа крови позволяет оперативно проводить исследования вне лабораторий, делая медицинскую помощь доступнее и качественнее в малых населенных пунктах, а также в развивающихся странах.

Назначение у микрофлюидных чипов может быть различным, в зависимости от области их применения. Например, в медицине "цифровых" микрофлюидные чипы, основанные на эффекте электросмачивания, используются для исследования белков, секвенирования ДНК, количественного анализа ДНК и РНК. В химии – в качестве микрореакторов, например, для изучения кинетики реакций [1].

Существует большое количество методов получения данных чипов, которые зависят от материала основания и способа изготовления штампа или вставки. Это позволяет использовать под их основу различные типы материалов [2].

Кроме кремния в производстве микрофлюидных чипов используются преимущественно полимеры, реже стекло, иногда металлы и керамика. В число наиболее часто используемых полимеров входят полиметилметакрилат, циклоолефиновый сополимер, полиметилсилоксан, полиэфирэфиркетон. Материал существенно влияет на параметры модулей [2].

Для производства микрофлюидных чипов на разных этапах их создания применяются в том числе методы нанолитографии и технологии тонких пленок. Одним из ключевых этапов

формирования структур микрофлюидных чипов является создание металлизированных слоев размерами от 5 до 50 нм из титана, хрома и золота [3].

Для отработки операций создания металлизированных слоев микрофлюидных чипов применимы методы вакуумного нанесения тонких пленок: дуговое осаждение, термическое испарение и магнетронное распыление. Для всех методов рекомендуется построение математических моделей толщин полученных покрытий в зависимости не только от метода, но и от технологических параметров формирования: время и скорость нанесения покрытия, ток на источнике, скорость испарения/распыления материала и др. [4].

Анализ и выбор материалов корпуса и электродов

Микрофлюидные модули производятся преимущественно из полимеров, реже из стекла и кремния, иногда из металлов и керамики. В число наиболее часто используемых полимеров входят полиметилметакрилат, циклоолефиновый сополимер, полиметилсилоксан, полиэфирэфиркетон. Материал существенно влияет на параметры модулей (таблица 1).

Таблица 1. Анализ материалов корпуса для МЧ.

Параметр	Полимер	Стекло	Кремний
	Оценка параметра		
Оптические свойства	Хорошие	Отличные	Хорошие
Механические свойства	Удовлетворительные	Очень хорошие	Отличные
Химическая стойкость	Неудовлетворительная (в большинстве случаев)	Отличная	Хорошая
Температурные свойства	Неудовлетворительные	Очень хорошие	Очень хорошие
Эффективность затрат	Неудовлетворительная-для прототипирования, отличная-для крупносерийного производства	Отличная-для прототипирования, удовлетворительная-для крупносерийного производства	Отличная-для прототипирования, удовлетворительная-для крупносерийного производства
Повторное использование	Как правило, одноразовые	Очень хорошее	Удовлетворительное
Срок службы	Удовлетворительный	Очень хороший	Очень хорошее

По данным из таблицы 1 можно сделать вывод, что в условиях лаборатории лучше и экономичнее применять стекло. Однако, если, в дальнейшем, планируется выпускать данный образец на рынок, следует заранее проводить все исследования сразу на полимере.

Для напыляемого слоя (электрода) были выбраны материалы: медь, золото. С золотом следует напылять титан, для улучшения адгезии.

Анализ и выбор метода металлизации

Металлизацию слоев электродов МЧ решено было проводить на установке для напыления тонких пленок в вакууме УВН-1М, которая была разработана на кафедре МТ-11 МГТУ им. Н. Э. Баумана. Данное оборудование содержит 2 модуля: термическое испарение и магнетронное распыление. Сравнение обоих методов представлено в таблице 2.

Таблица 2. Анализ методов металлизации для МЧ

Метод / Параметр	Магнетронное распыление	Термическое испарение
Наносимые материалы	Сплавы, металлы, диэлектрики	Сплавы, металлы, диэлектрики
Загрязнение	Существенно	Минимально
Однородность толщины пленки	Хорошая	Удовлетворительная
Адгезия пленки	Хорошая	Удовлетворительная
Коэффициент использования материала	Низкий	Высокий
Скорость осаждения, мкм/ч	2-6	50-100
Температура подложки	300°C	700°C

Термическое испарение (рис. 1) применяется для напыления золота и меди. Скорость испарения при данном методе достигает 100 мкм/ч. Он имеет высокий коэффициент использования материала и несет мало загрязнений. Но данный метод обладает более плохой адгезией, в сравнении с магнетронным модулем. Также, пленка получается менее равномерная.

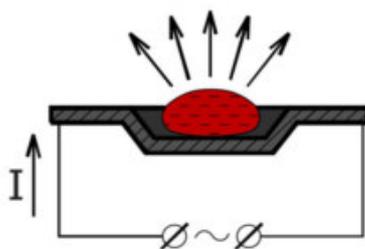


Рис. 1. Схема термического испарения.

Магнетронное испарение (рис. 2) также применяется для сплавов, металлов и диэлектриков. Но скорость осаждения гораздо ниже, в сравнении с термическим испарением, примерно 2-6 мкм/ч. Следующими недостатками данного метода является низкий коэффициент использования материала и более высокий уровень загрязнения. Но, при данном способе, пленка получается равномерной и с хорошей адгезией. Данный способ можно применить для напыления меди, золота, титана.

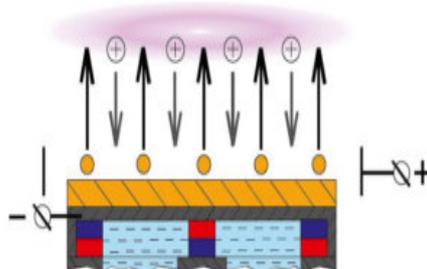


Рис. 2. Схема магнетронного распыления.

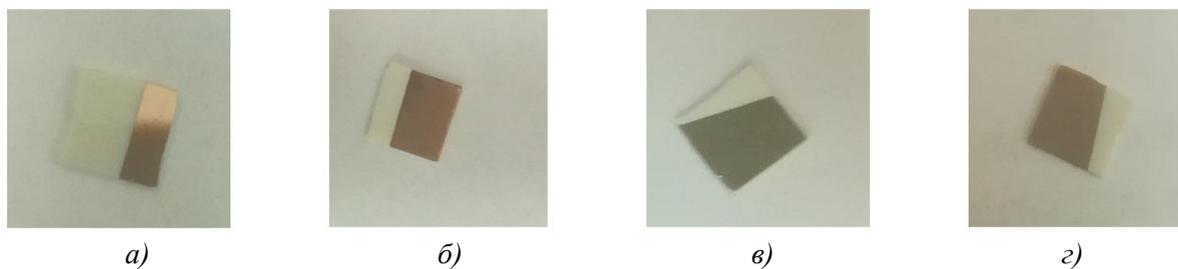
Рекомендуется использовать данный способ напыления, для дальнейшей работы надмикрочипом, так как хорошая адгезия и равномерность пленки являются более приоритетными факторами при выборе метода нанесения пленки. Адгезию можно улучшить с помощью дополнительного нанесения титана, но данный материал можно нанести только магнетронным способом.

Постановка и проведение эксперимента

В силу необходимости получения менее загрязненного покрытия из меди, обработку режимов формирования металлизированных слоев электродов МЧ сначала проводили для метода термического испарения.

В качестве подложки для образцов выбран ситалл марки СТ-50-1, который отвечает требованиям по шероховатости поверхности и легко может быть поделен на образцы необходимого размера. Предварительно очищенные подложки ситалла были помещены в вакуумную камеру таким образом, чтобы часть образца была закрыта маской (для формирования ступеньки, толщину которой впоследствии надо измерить).

Напыление производилось по заданным значениям времени и расстояния от подложки до источника. В результате были получены 4 образца (рис. 3) с разными параметрами процесса нанесения. Первый образец располагали на расстоянии 20 мм от источника и проводили нанесение 30 с. Второй образец располагали на том же расстоянии 20 мм от источника и проводили нанесение 60 с. Третий образец располагали на расстоянии 50 мм от источника и проводили нанесение 30 с. Четвертый образец располагали на расстоянии 50 мм от источника и проводили нанесение 60 с.



а) – 20 мм, 30 с; б) – 20 мм, 60 с; в) – 50 мм, 30 с; з) – 50 мм, 60 с
Рис. 3. Фотографии полученных образцов с медным покрытием на ситалле для разных параметров процесса.

Получение и обработка результатов

Полученные образцы были исследованы на атомно-силовом микроскопе (АСМ) SolverNEXT и профилометре TR-200.

После получения скана (рис. 4) топологии поверхности образца были измерены толщины в трех точках поверхности подложки (рис. 5) на границе ступеньки.

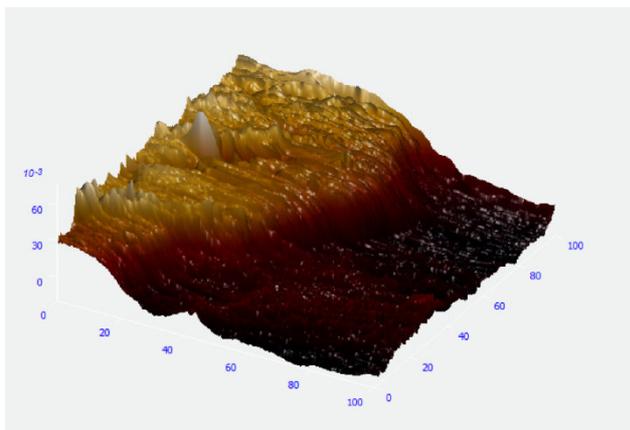


Рис. 4. АСМ-скан ступеньки на образце №4.

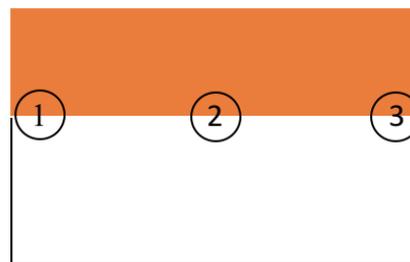


Рис. 5. Схема измерения толщины покрытия в нескольких точках поверхности.

После проведения всех измерений были получены следующие данные на SolverNEXT:
– для образца 1 (30с, 20мм) толщины 130,140,190 нм;

- для образца 2 (60с, 20мм) толщины 550,590,640 нм;
- для образца 3 (60с, 50мм) толщины 460,490,510 нм;
- для образца 4 (30с, 50мм) толщины 50,70,80 нм.

Полученные образцы были исследованы на профилометре TR-200 и данные по толщинам покрытий были подтверждены:

- для образца 1 (30с, 20мм) толщина 150 нм;
- для образца 2 (60с, 20мм) толщина 590 нм;
- для образца 3 (60с, 50мм) толщина 480 нм;
- для образца 4 (30с, 50мм) толщина 60 нм.

По данным измерений на АСМ была построена математическая модель зависимости толщины покрытия меди от времени нанесения и расстояния от подложки до источника:

$$H = 325 - 48 \cdot h - 215 \cdot t \cdot h,$$

где h – расстояние от источника до подложки, t – время процесса.

Проанализировав полученную математическую модель процесса, можно сделать вывод о том, что расстояние от источника до подложки влияет намного существеннее, чем время осаждения. Значение времени осаждения в отдельности влияет незначительно. Это может быть связано с небольшим интервалом варьирования данного параметра. Математическая модель подтвердила свою адекватность, эксперименты оказались воспроизводимы.

Заключение

В результате проведенной работы проанализированы и подобраны материалы для электропроводящего слоя микрофлюидного чипа, которые обладают необходимыми свойствами, и методы металлизации. Проведены экспериментальные исследования, на основе которых была построена математическая модель. В дальнейшей работе планируется разработка ответственных операций создания микрофлюидных чипов, в том числе защита чипа от окружающей среды и биологических объектов.

Литература

1. Евстапов А. А. Микрофлюидные чипы для биологических и медицинских исследований. [Электронный ресурс] / Евстапов А. А. // Журн. Российского химического общества им. Д. И. Менделеева – 2011.— № 2. – Режим доступа <http://chem.msu.ru/rus/jvho/2011-2/99.pdf> – (Дата обращения: 19.02.2018).
2. Нисан А. Микрофлюидные модули: области применения и технологии производства [Электронный ресурс] / Нисан А. // Электроника: НТБ науч.-метод. Журн. – 2015.— № 5. – Режим доступа: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/3/article_3789_593.pdf– (Дата обращения: 25.02.2018).
3. Beebe D. J. MICROFLUIDICS: THEORY AND APPLICATIONS. 2015. Available at: <https://www.amazon.com/Microfluidics-Applications-Physics-Research-Technology/dp/1616685700> (дата обращения: 21.03.2018)
4. Yeo L. Y, Microfluidic Devices for Bioapplications. 2011. Available at: <https://www3.nd.edu/~changelab/documents/SmallRev.pdf>(дата обращения: 02.03.2018).