

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ УСТРОЙСТВ ОПТОГЕНЕТИКИ

DEVELOPMENT OF THIN FILM TEMPERATURE SENSOR FOR OPTOGENETIC DEVICES

N. Shusharina
G. Kamyshov
V. Sapunov
A. Grunin
P. Prokopovich
M. Patrushev

Summary. This article devoted to description of design and manufacturing of thin layer temperature sensor for optogenetic devices. There is described complete technological process and analysis of data, collected during work.

Keywords: optogenetics, deposition, thin films, temperature sensor.

Шушарина Наталья Николаевна
К.п.н., доцент, Институт живых систем БФУ
им. И. Канта
nnshusharina@gmail.com

Камышов Глеб Владимирович
Институт живых систем БФУ им. И. Канта
gv.kamyshov@mail.ru

Сапунов Виктор Викторович
Аспирант, Институт живых систем БФУ им. И. Канта
wallowind@gmail.com

Грунин Алексей Игоревич
К.ф.-м.н., инженер НОЦ «Функциональные
наноматериалы», БФУ им. И. Канта
agrunin@innopark.kantiana.ru

Прокопович Павел Аликович
Заместитель директора инжинирингового центра,
БФУ им. И. Канта
pprokopovich@innopark.kantiana.ru

Патрушев Максим Владимирович
К.б.н., доцент, Институт живых систем БФУ им.
И. Канта (Калининград)
maxpatrushev@gmail.com

Аннотация. В настоящей статье описывается процесс создания тонкопленочного температурного датчика для устройств оптогенетики. Приводится описание полного технологического процесса и анализ данных полученных в ходе проведенных работ.

Ключевые слова: оптогенетика, напыление, тонкие пленки, температурный датчик.

Введение

Технологии оптогенетики на сегодняшний день являются лидирующим источником поставки новейшей информации о межклеточной коммуникации и специфичности отдельных функциональных единиц нервной ткани. В их основе лежит использование известной генетической информации о специфической функции, выполняемой ограниченной группой клеток, с целью воздействия именно на эту целевую группу заданным образом. В общем случае светочувствительный белок экспрессируется определенными клетками и встраивается в их наружную мембрану, при попадании света он меняет свою конформацию таким образом, что образуется ионный канал посредством изменения разности потенциалов на мембране, вследствие чего активность клетки активируется или ингибируется. Поскольку активация воздействия регулируется светом определенного спектра, в ряде задач оптогенетика расширяет

диапазон возможностей классических электрофизиологических методов, обеспечивая гибкое целевое воздействие на клетку [1].

Для передачи активационных сигналов используются имплантированные проникающих электроды или оптоволокно, соединенные с внешним электронным контролером или источником света. В настоящее время наиболее широко применяются проводные имплантируемые полупроводниковые устройства, однако, особенно ценными являются беспроводные устройства, поскольку позволяют производить исследования на свободно перемещающихся животных в естественных условиях.

Современные опытные образцы устройств для оптогенетики это беспроводные имплантируемые многокомпонентные оптоэлектронные системы, имеющие размеры сравнимые с клетками и обладающие возможностью

контролировать поведение подопытных животных [2]. Однако даже в самых совершенных прототипах направленная интеграция в биологическую систему сопровождается проблемами, связанными с повреждением ткани при введении зонда, постоянном раздражении, а также инженерными сложностями — поддержания оптимальных температурных параметров зонда, инкапсуляции, размерностью соединений и внешнего модуля для обеспечения беспроводного контроля, доставкой электропитания.

В настоящей работе была предпринята попытка решения задачи определения и поддержания оптимальных температурных параметров имплантируемого зонда. Для этого был разработан и сконструирован тонкопленочный датчик температуры, формируемый средствами фотолитографии и вакуумного напыления, чьи миниатюрные размеры позволят использовать его в составе беспроводных многослойных систем для оптогенетики.

Материалы и методы

Определение параметров датчика (материалы)

Критическая оценка конструкции классических подходов к реализации тонкопленочных температурных датчиков показала наличие трех основных моментов, которые необходимо учитывать при создании подобных устройств: тип материала, форма и толщина датчика, а также способ напыления на подложку.

Принцип действия тонкопленочного термометра основан на зависимости электрического сопротивления металлов, сплавов и полупроводниковых материалов от температуры и может описываться, например, уравнением Каллендара-Ван Дьюзена [3]. Наиболее часто в качестве материала применяется платина, так как она имеет стабильную и хорошо изученную терморезистивную зависимость, а также хорошую химическую стойкость к окислению, что обеспечивает хорошую воспроизводимость результатов. Платиновые термометры сопротивления, изготовленные путем вакуумного напыления на подложку тонкой пленки металла, также обладают повышенной вибропрочностью, хоть и несколько меньшим рабочим диапазоном температур по сравнению с не тонкопленочными устройствами [4]. Принимая во внимания преимущества платинового термосопротивления: высокая точность измерений, высокая стабильность измерений, компактность и технологичность изготовления, благодаря возможности тонкопленочного исполнения методом вакуумного напыления, а также химическая и биологическая инертность, — выбор был сделан в пользу **платины**.

Толщина тонкопленочного датчика определяет его электрофизические характеристики и возможность использования в составе миниатюрных устройств для оптогенетики. Известно, что платиновые тонкие пленки проявляют особенности кластерного роста, не образуя сплошной слой при достаточно больших толщинах (в некоторых условиях до 50 нм). Подобный островковый рост приводит к тому, что полученное покрытие будет иметь неудовлетворительные механические и электрофизические параметры в силу своей неоднородности, а так как любые неравномерности, несплошности или градиент по толщине сделают невозможным расчет электрофизических характеристик датчика, было принято решение об ограничении предельной толщины значением в **15 нм**.

При заданной толщине форма покрытия будет определять основные электрофизические параметры, включая полное сопротивление терморезистивного элемента. Процедура измерения сопротивления связана с пропусканием тока через терморезистивное покрытие, что неизбежно приводит к самонагреву из-за выделения джоулева тепла. При этом с одной стороны, самонагрев растет квадратично с увеличением сопротивления, а с другой — повышение полного сопротивления повышает точность проводимых температурных измерений. Компромиссным решением стал выбор **змеевидной** формы дорожки, что позволило минимизировать локальность нагрева окружающих тканей при одновременном сохранении большой величины сопротивления.

Существуют различные техники напыления, потенциально пригодные для изготовления тонкопленочного температурного датчика [5]. Однако наиболее подходящими методами являются молекулярно-лучевая эпитаксия и импульсное лазерное осаждение (ИЛО), дающие схожие результаты с точки зрения контроля толщины и качества получаемых пленок. При этом, ИЛО является более приемлемым за счет своей простоты, отсутствия необходимости изготовления специальных мишеней и более низкого расхода материала. Учитывая основные требования к равномерности толщины, сплошности и чистоты осаждаемой платины, был выбран метод **импульсного лазерного осаждения**.

Изготовление датчика (методы)

Для синтеза тонких пленок платины использовался высоковакуумный комплекс импульсного лазерного осаждения и магнетронного распыления Smart NanoTool PLD-1 [6]. К подложкам, используемым для осаждения пленок, предъявлялись следующие требования: биосовместимость и возможность получения пленок с хорошей адгезией.

В качестве подложек были выбраны пластины термически окисленного кремния. Это было сделано по двум причинам: во-первых, аморфный слой SiO_2 с малой шероховатостью на поверхности подложки оказывает наименьшее влияние на физические и химические свойства образцов; во-вторых, кремний и оксид кремния являются биоинертными материалами. В качестве возможных методов задания формы элемента сопротивления были проверены несколько вариантов, отличающихся материалом маски: полимерная маска из стиренакрилового полимера и металлические маски из алюминия и железа.

Формирование тонкой пленки проводилось поэтапно:

1. Предварительная подготовка подложек.

Очистка подложки осуществлялась в ультразвуковой ванне смесью изопропилового спирта и ацетона. После удаления остатков спирта и ацетона на подложку наносилась маска. В случае металлической маски, она закреплялась механически непосредственно на подложке. Для нанесения маски из стиренакрилового полимера подложка предварительно нагревалась до температуры 180°C .

2. Загрузка подложек в комплекс.

В загрузочную камеру напускался азот до выравнивания давления в камере с атмосферным. Подготовленные на предыдущем этапе подложки закреплялись на держателе образцов. Предварительная камера откачивалась до уровня вакуума не менее $5 \cdot 10^{-7}$ Торр с использованием форвакуумного и турбомолекулярного насосов. С помощью магнитного штока подложки закреплялись в системе крепления мишеней основной камеры.

3. Установка рабочих параметров ИЛО.

Для осаждения платины на подложках использовался лазер LS-2136 с настройками, которые варьировались для получения различных образцов: длина волны 532 нм, энергия накачки от 16 до 18 Дж, задержка 110 мкс, частота повторения импульсов от 10 до 50 Гц.

4. Процесс роста пленки.

Перед запуском процесса напыления включалось вращение образца, для получения равномерного слоя на всей поверхности подложки. После этого запускался процесс ИЛО. При правильном выборе параметров эксперимент полностью автономен и не требует участия оператора.

5. Извлечение подложек и постобработка.

После завершения процесса ИЛО производилось извлечение готового образца из камеры роста в предварительную камеру и напуск предварительной камеры уже описанным ранее способом. При использовании полимерной маски её остатки смывались ацетоном ОСЧ.

Результаты

В ходе экспериментов был получен ряд синтезированных экспериментальных образцов, отличающихся по различным параметрам. Основной целью изготовления разных образцов был поиск технологического процесса, который позволил бы получить тонкопленочный температурный датчик, обладающий наилучшими характеристиками. Всего было изготовлено семь образцов:

1. Образец № 3089 — полимерная маска;
2. Образец № 3090 — полимерная маска, вдвое большее число импульсов (100000 против 50000);
3. Образец № 3147 — механическая маска;
4. Образец № 3155 — механическая маска из нержавеющей стали, меньшее число импульсов (20000 против 75000);
5. Образец № 3157 — механическая маска из нержавеющей стали, изготовленная методом электроэрозии, 75000 импульсов;
6. Образец № 3162 — с защитным слоем SiO_2 ;
7. Образец № 3165 — с защитным слоем SiO_2 , на порядок большее число импульсов (120000 против 12000)

Прежде всего, было обнаружено, что изготовление маски сложной формы из тонкой алюминиевой фольги можно считать нецелесообразным ввиду малой жесткости, сложности изготовления и возможности теневого осаждения под маску. Дальнейшие исследования включали в себя проверку наличия дефектов и неоднородностей, химического состава покрытия и вольтамперных характеристик (ВАХ) термосопротивления.

У образца № 3089 наблюдались проблемы с ВАХ, выражающиеся в плавающей нелинейности для различных значений напряжения и нестабильность измерений вблизи нуля, кроме того на поверхности покрытия присутствовало большое число дефектов. Образец № 3090, имеющий вдвое большую толщину (24 нм против 12 нм) имел стабильную линейную ВАХ для всех значений напряжения, однако сохранил проблему дефектов поверхности покрытия.

Образцы № 3147 и № 3155 обладали конформным платиновым покрытием без дефектов и качественными ВАХ. Однако, в них наблюдались неравномерности ширины платиновой дорожки, возникшие из-за использо-

вания составной механической маски. Решить данную проблему позволило использование механических масок, изготовленных методом электроэрозионной обработки. Такая маска использовалась для формирования образца № 3157.

Наконец, образцы № 3162 и № 3165 продемонстрировали эффективность формирования защитной пленки оксида кремния методом ИЛО. Использование кремниевой мишени при распылении в атмосфере кислорода позволило получить защитную плёнку достаточного качества.

Заключение (Discussion)

Характеристики прототипов тонкопленочных температурных датчиков, созданных в рамках исследований, описанных в настоящей статье, удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к подобным устройствам и подходят для использования в составе беспроводных многослойных систем для оптогенетики. Их тонкопленочная конструкция может быть эффективно использована в структуре существующих устройств, а высокая точность измерений температуры и надлежащее теплораспределение платиновой подложки обеспечивают определение и поддержание оптимальных температурных параметров имплантируемого зонда.

В ходе экспериментов был получен ряд сведений, которые могут быть использованы при выборе и отладке технологических процессов для изготовления тонкопленочных температурных датчиков методом ИЛО:

- ◆ Данные исследования образцов № 3089 и № 3090 показали, что формирование терморезистивного слоя платины при помощи полимерной маски неприемлемо для решения поставленных задач;
- ◆ Создание резистивных слоев сложных форм с использованием составной механической маски сопряжено с технологическими трудностями, либо невозможно. Ввиду этого, можно сделать вывод о неприменимости составных металлических масок для создания резистивного слоя температурного датчика.
- ◆ Защитная пленка из оксида кремния обладает достаточно высоким качеством и может быть эффективно получена с помощью метода ИЛО.
- ◆ Наилучшим способом задания требуемой формы элемента сопротивления будет использование металлических масок, изготовленных при помощи электроэрозионной обработки.

Полученные результаты и сконструированные прототипы тонкопленочных температурных датчиков будут использоваться в дальнейших работах, направленных на улучшение технических и качественных характеристик устройств для оптогенетики. Проведенные исследования оставили некоторые вопросы, касающиеся точности измерений температуры изготовленных прототипов в составе реальных устройств, а также ряд инженерных задач, касающихся принципов интеграции датчика в состав многослойной системы для оптогенетики. Эти проблемы также будут решены в ходе дальнейших работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fenno L., Yizhar O., Deisseroth K. The development and application of optogenetics //Annual review of neuroscience. — 2011. — Т. 34.
2. Kim T. et al. Injectable, cellular-scale optoelectronics with applications for wireless optogenetics //Science. — 2013. — Т. 340. — №. 6129. — С. 211–216.
3. Lacy F. « 2 Thin Film Resistance Temperature Detectors //Smart Sensors for Industrial Applications. — 2017. — С. 195.
4. Korvink J., Paul O. MEMS: A practical guide of design, analysis, and applications. — Springer Science & Business Media, 2010.
5. Kern W. Thin film processes II. — Academic press, 2012. — Т. 2.
6. <https://www.svta.com/pulsed-laser-deposition-systems.html> [дата обращения: 01.02.2018]

© Шушарина Наталья Николаевна (nnshusharina@gmail.com), Камышов Глеб Владимирович (gv.kamyshov@mail.ru), Сапунов Виктор Викторович (wallowind@gmail.com), Грунин Алексей Игоревич (agrunin@innopark.kantiana.ru), Прокопович Павел Аликович (pprokopovich@innopark.kantiana.ru), Патрушев Максим Владимирович (maxpatrushev@gmail.com).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»