
INVESTIGATION OF ELECTROPHYSICAL AND ELECTROCHEMICAL MACHINING
WITH PLASMA CATHODE-TOOL

V.V. Lubimov, O.E. Grachev, D.V. Kozyr

A mathematical model to simulate electric parameters of electrochemical machining with plasma cathode-tool was designed. A modeling of the anodic dissolution of the sample material was performed. According to the results of analysis recommendations to choose efficient production performances of electrochemical machining were given.

Key words: pulsed plasma channel, electrochemical machining, plasma cathode-tool.

Lubimov Victor Vasilievich, doctor of technical science, professor, manager of department, lvv@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Grachev Oleg Evgenevich, candidate of technical science, grachevoleg@list.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kozyr Denis Vladimirovich, post graduate, Kozyr.D.V@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.0.047.4

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ИМПУЛЬСНО-ЦИКЛИЧЕСКИХ СХЕМ**

А.Ю. Веневцев

В работе приведены результаты усовершенствования экспериментальной электрохимической установки для возможности проведения электрохимической микрообработки полупроводниковых материалов. Произведен выбор необходимого оборудования, разработано специфическое программное обеспечение для установки, учитывающее особенности проводимости монокристаллического кремния.

Ключевые слова: микроформообразование, ультракороткие импульсы напряжения, электрохимическая обработка, экспериментальная установка, монокристаллический кремний, полупроводниковые материалы.

В работе [1] был рассмотрен вопрос создания экспериментальной электрохимической установки. Отличительная особенность разработанной автором технологии электрохимической обработки состоит в том, что электроды расположены в электролите на минимальном межэлектродном зазоре. При этом к ним синхронно прикладываются группы наносекундных (соизмеримых со временем заряда приэлектродных емкостей) импуль-

сов тока высокой плотности. Это приводит к значительной пространственной локализации электрохимических реакций в области микро- и нанометрических размеров. Так же это позволяет получать субмикронную точность обработки и шероховатость поверхности с нанометрическими параметрами. Данная технология была успешно апробирована при электрохимической обработке нержавеющей стали, например 18Х12Н10Т ГОСТ 9941-81.

Однако при попытках использовать данную установку для обработки полупроводниковых материалов, в частности монокристаллического кремния возник ряд ограничений, не позволяющих применить готовое решение в данной ситуации. Суть проблемы заключалась в определении координат поверхности заготовки. Для фиксации «нулевого» зазора на исходной экспериментальной установке использовалось вычисление падения напряжения. То есть в момент контакта электрода-инструмента с поверхностью заготовки происходило замыкание цепи контроллера, отвечающей за ограничение привода по концевому выключателю.

Модернизация экспериментальной установки с целью обеспечить возможность проведения экспериментов в области электрохимической микрообработки полупроводниковых материалов, в частности монокристаллического кремния p – типа. Так же задачей исследования стала разработка механизма определения нулевого зазора с целью управления межэлектродным зазорами порядка 1 мкм.

Особенностью монокристаллического кремния p – типа с кристаллической решеткой 110 ориентации является высокое омическое сопротивление. Вследствие этого падение напряжения, в момент контакта электрода-инструмента и кремниевой заготовки, было столь незначительно, что контроллер не воспринимал это как контакт и не давал команду остановки двигателя.

Для решения данной проблемы было разработано специальное программное обеспечение для управления двигателями постоянного тока. Так как такие двигатели под управлением контроллеров имеют датчики по току, то изменение этого показателя явно характеризует нагрузку на винт шарико-винтовой пары. Соответственно при холостом перемещении электрода-инструмента к поверхности заготовки ток будет минимален. Однако при контакте с заготовкой вследствие возникновения усилия на обмотках двигателя возрастет и ток, что будет явно сигнализировать о моменте касания. При этом использование низких скоростей, например 10 мм/мин, сила такого воздействия не превысит 1 Н. Учитывая предел прочности монокристаллического кремния данного типа 7 ГПа, что в 23 раза больше чем у стали 18Х12Н10Т ГОСТ 9941-81, можно утверждать, что данная нагрузка не будет оказывать сколь либо значительного влияния на заготовку.

Для обеспечения возможности применения разработанной схемы определение «нулевого» зазора, экспериментальная установка [1], была

модернизирована применением другого привода перемещений электрода-инструмента. За основу был взят моторизованный линейный транслятор 8MT30-50, производства компании Vicon Standa [2] (рис. 1).



Рис. 1. Линейный транслятор 8MT30-50

Трансляторы серии 8MT173-DCE поставляются с двигателем постоянного тока, включая энкодер, что крайне необходимо для реализации предложенной схемы определения касания заготовки. Перемещение управляется контроллером (например, 8DCMC3). В комплект привода так же входят различные средства для разработки программного обеспечения и кроссплатформенная библиотека для использования встроенных команд и работы с приводом. Основные характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1
Основные характеристики используемого линейного привода

№ п/п	Параметры	Значение
1	Тип двигателя	Постоянного тока (номиналом 3 В, 1,2 Вт)
2	Кодировщик	Магнитный цифровой (2 канала)
3	Разрешение	0,1 мкм
4	Минимальный шаг перемещения	0,23 мкм
5	Двухнаправленная повторяемость	0,4 мкм
6	Концевые выключатели	Левый, правый
7	Горизонтальная	5 кг (изменяется со скоростью)
8	Вертикальная	1,5 кг (изменяется со скоростью)
9	Масса	0,33-0,38 кг

Данный линейный транслятор работает в любой ориентации, что делает возможным различные варианты монтажа. Вертикальная нагрузка 3 кг. Платформа подпружинена по отношению к ведущему винту для обеспечения высокого разрешения, малого мёртвого хода, плавного и точного движения. Функциональные части сделаны из стали.

Основные достоинства:

компактный дизайн;

узкий (30 мм);

диапазон перемещения 50 мм;

возможна XYZ конфигурация;

Для проведения экспериментальной электрохимической обработки монокристаллического кремния была разработана программа управления данным линейным позиционером. Интерфейс программы представлен на рис. 2.

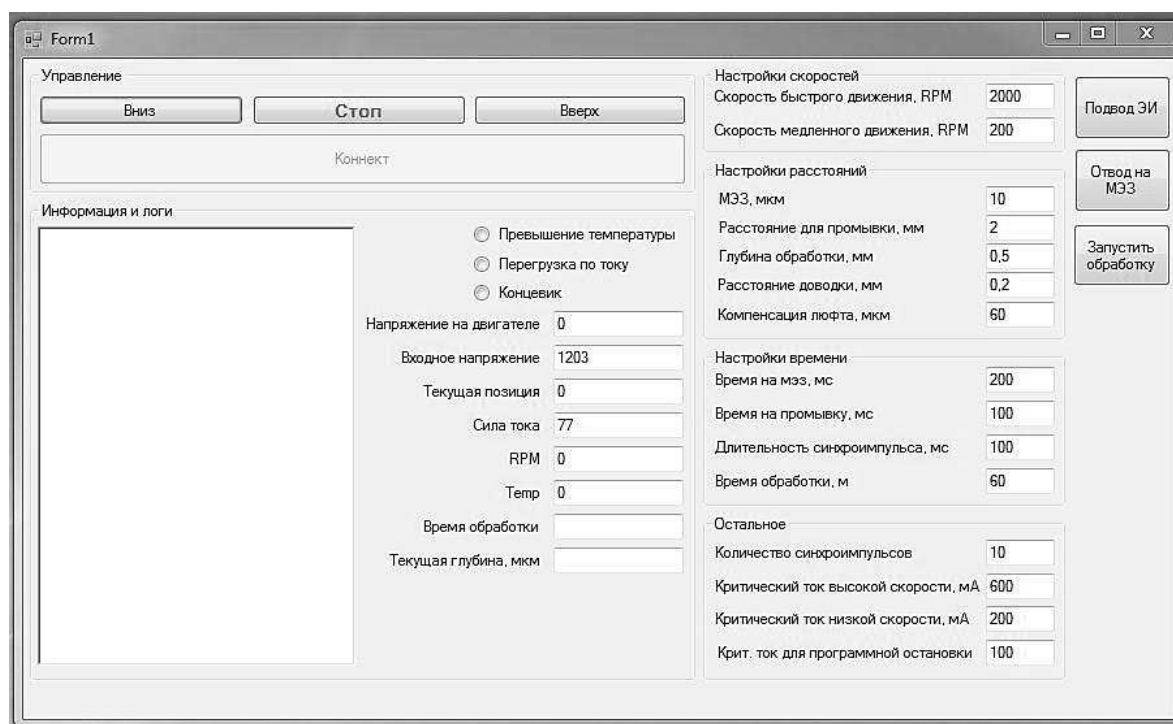


Рис. 2. Интерфейс программы для работы с экспериментальной установкой

Программное обеспечение позволяет определять нулевую координату путем ощупывания поверхности. Момент касания определяется по возрастающему току в обмотках двигателя постоянного тока. За счет изменения данного показателя возможна остановка привода, и электрода-инструмента в частности, с точностью до 0,4 мкм. Величина люфта, возникающего при давлении на пластину кремния, составляет ~ 1,2 мкм.

Так же в работу контроллера линейного привода заложена, посред-

ством разработанного программного кода, функция отправки синхроимпульсов в необходимый момент нужной длительности. Такой синхроимпульс в свою очередь запускает генератор рабочих импульсов напряжения с возможностью изменения любых частотных характеристик, а так же возможностью пакетирования.

Данное программное обеспечение позволило использовать импульсно-циклические схемы во время обработки. Так, например, имеется возможность запрограммировать работу контроллера со следующими переменными:

- Межэлектродный зазор;
- Расстояние отвода на промывку;
- расстояние точной доводки до МЭЗ;
- Глубину обработки;
- Компенсацию люфта;
- Скорость подвода на МЭЗ;
- Скорость отвода на промывочный зазор;
- Время задержки на МЭЗ;
- Время задержки на промывочном зазоре;
- Время обработки;
- Длительность синхроимпульса;
- Количество синхроимпульсов;
- Критические токи для высокой и низкой скорости (защитная функция);

Ток обмоток для остановки во время касания заготовки.

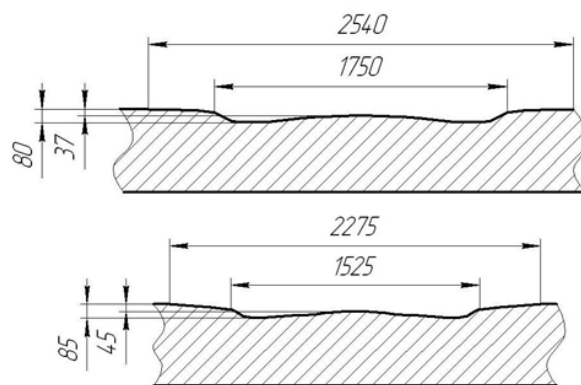
Для энергообеспечения электрохимической ячейки использовался разработанный генератор рабочих импульсов на базе полевых транзисторов MOSFET. Данный источник импульсов наносекундной длительности позволяет получать следующие характеристики импульсов:

- Длительность импульса: от 100 нс до 1 с;
- Частота следования импульсов: от 10 МГц до 10 мГц;
- Амплитуда напряжения: от 1,5 до 16 В;
- Коэффициент заполнения: от 1 до 99 %;

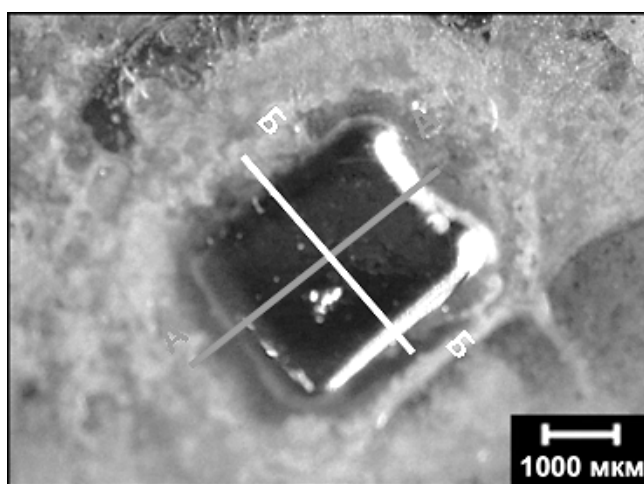
Во время экспериментальных исследований по электрохимическому формообразованию в кремнии использовались следующие показатели:

- Длительность импульсов: 200 нс, 1 мкс, 10 мкс;
- Коэффициент заполнения: 1, 5, 10, 20, 30;
- Амплитуда напряжения: 1,5, 3, 8, 12, 16 В;
- Частота следования импульсов: 10, 100, 300, 500 кГц;
- Электролит: 5, 10, 20, 30% HF;
- Межэлектродные зазоры: 1, 5, 20 мкм.

Для апробирования модернизированной экспериментальной электрохимической установки была проведена серия опытов. Результаты обработки в одном из экспериментов приведены на рис. 3.



а



б

**Рис. 5. Профили полученных углублений:
а - схематичное изображение; б - фотография поверхности
после обработки. Размеры приведены в мкм**

По итогам обработки можно сделать вывод о полной работоспособности предложенной схемы определение «нулевого» зазора. Программно обеспечивается подвод и контроль межэлектродного промежутка, источник питания синхронизирован с приводом электрода инструмента. Все это, вкупе с верно подобранными энергетическими характеристиками, должно обеспечить высокое качество микрообработки монокристаллического кремния.

Список литературы

1. Веневцев А.Ю. «Создание экспериментальной электрохимической установки для получения микро- и нанорельефов импульсами наносекундной длительности»// Материалы докладов XI Всероссийской науч-

но-технической конференции студ., маг., асп. и молодых ученых «Техника XXI глазами молодых ученых и специалистов» Тула: ТулГУ 2012. С. 380

2. Поставка научного оборудования для лабораторий и промышленных компаний [сайт]. [2013]. URL: <http://standa.vicon-se.ru/> (дата обращения: 01.08.2013).

Веневцев Алексей Юрьевич, аспирант, ассистент, venevtsev@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет.

IMPROVEMENT DEVICES FOR ELECTROCHEMICAL PROCESSING OF SEMICONDUCTOR MATERIALS USING PULSE-ROUND-ROBIN SCHEME

A.Y.Venevtsev

The paper presents the results of an experimental improvement of electrochemical systems for the possibility of electrochemical micromachining of semiconductor materials. Material selection of the necessary equipment, developed specific software to install, especially taking into account the conductivity of monocrystal silicon.

Key words: micromachining, ultrashort pulses voltage, electrochemical machining, experimental device, monocrystalline silicon, semiconductor materials.

Venevtsev Alexey Yurievich, post graduate, assist, venevtsev@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.9.047

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМЫ ТОКА
ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В ДИАПАЗОНЕ
ЧАСТОТ 10 Гц – 1 МГц**

В.В. Любимов, С.Н. Веневцева

В статье отображена разработанная методика измерения токов в диапазоне частот 100 Гц – 1 МГц при электрохимической обработке. Описан процесс изготовления электродов-инструментов, а так же приведены результаты исследований.

Ключевые слова: электрохимическая обработка, импульсная обработка, плотность тока, сверхмалые зазоры.

Достоинствами электрохимической обработки (ЭХО) являются возможность обработки материалов без приложения механических усилий, высокая эффективность процесса, практическое отсутствие износа электрода-инструмента, низкая шероховатость обработанной поверхности ($R_a \leq 0,13 \div 1,52$ мкм) [1,2], а так же минимальное влияние на физико-механические характеристики поверхностного слоя обработанной заготовки, незначительная зависимость производительности процесса от механических свойств обрабатываемого материала.