

УДК 621.357.7; 544.653.23; 544.654.2

А.М. Гиро, в.н.с., канд. физ.-мат. наук  
(БГУИР, г. Минск)

## **ПРОГРАММНО АППАРАТНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СИНТЕЗИРУЮЩИЙ ИМПУЛЬСЫ СТАБИЛЬНОГО ТОКА ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА**

Электрохимическое заполнение металлом монтажных отверстий с высоким аспектным числом в промежуточной кремниевой пластине является одной из ключевых операций при создании TSV технологии (технология создания сквозных межсоединений через кремниевую подложку) используемой в производстве 2,5D-микросборок, содержащих несколько кристаллов [1].

Электрохимическое осаждение металлов на постоянном токе не позволяет производить равномерное по глубине заполнение монтажных отверстий. Концентрация солей осаждаемого металла в электролите в глубине отверстия обедняется и происходит первоочередное зарастивание отверстий в областях близких к поверхности подложки. В глубине отверстий покрытие не осаждается. Для изменения условий массопереноса, процесс заполнения отверстий ведется в условиях нестационарного электролиза с использованием импульсных токов. В паузах или стадиях реверса происходит выравнивание концентрации электролита в отверстиях и некоторое подтравливание осажденного металла в приповерхностных областях, что позволяет осаждать металл более равномерно по глубине отверстия [2].

Наиболее изученными в настоящее время являются процессы, использующие импульсные токи прямоугольной и синусоидальной формы. Большой интерес представляет изучение влияния других форм импульсов тока на процессы массопереноса и равномерность осаждаемого покрытия по глубине отверстия. Для реализации такой технологии разработан программно аппаратный технологический комплекс, показанный на рисунке 1.

Для синтеза формы управляющих импульсов использован принцип кусочно-линейной аппроксимации, когда исходная нелинейная форма заменяется ломаной линией с конечным числом прямолинейных отрезков. С этой целью в окне управляющей программы задается таблица, в которой указываются координаты

точек перегиба по осям «время – амплитуда напряжения», либо «время – амплитуда тока».

Сформированные управляющей программой данные передаются в память микропроцессора программно аппаратного комплекса по каналу USB и хранятся в дальнейшем в энергонезависимой памяти. Микропроцессор формирует цифровые коды, позволяющие реализовать линейное изменение управляющего напряжения между соседними временными точками при помощи двух быстродействующих цифроаналоговых преобразователей (ЦАП): один для управления каналом стабилизации тока, второй – каналом стабилизации напряжения.

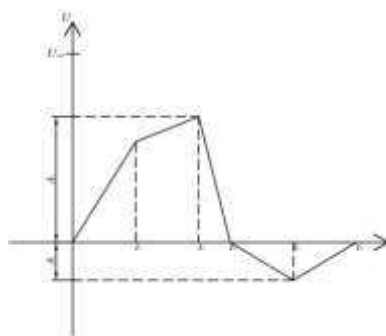


**Рисунок 1. – Программно аппаратный технологический комплекс синтезирующий импульсы стабильного тока произвольной формы для процессов нестационарного электролиза**

При необходимости синтезировать в одной последовательности импульсы, амплитуда которых сильно различается (например, в 50 - 100 раз) возникают проблемы обеспечения точности синтеза формы импульса, имеющего меньшую амплитуду. Поясним это примером синтеза формы последовательности импульсов, показанной на рисунке 2. На этом рисунке  $U_{MAX}$  – максимальная амплитуда импульса, которая определяется опорным напряжением, поданным на соответствующий вывод цифроаналогового преобразователя.  $A1$  – максимальное напряжение первого импульса,  $A2$  – амплитуда второго импульса. Пусть  $A1=U_{MAX}/2$ , а  $A2=A1/100$ . В этом случае

использование 12-разрядных ЦАП позволяет осуществить дискретизацию аналогового напряжения  $U_{\text{MAX}}$  при помощи 4096 уровней, напряжения A1 – при помощи 2048 уровней, а напряжения A2 – при помощи всего лишь 20 уровней.

Для решения этой проблемы введены дополнительные ЦАП, формирующие опорные напряжения для ЦАП, осуществляющих формирование линейного изменения управляющего напряжения. Опорное напряжение, генерируемое ими, выбирается равным амплитуде соответствующего импульса, что позволяет аппроксимировать форму последнего максимальным количеством уровней.



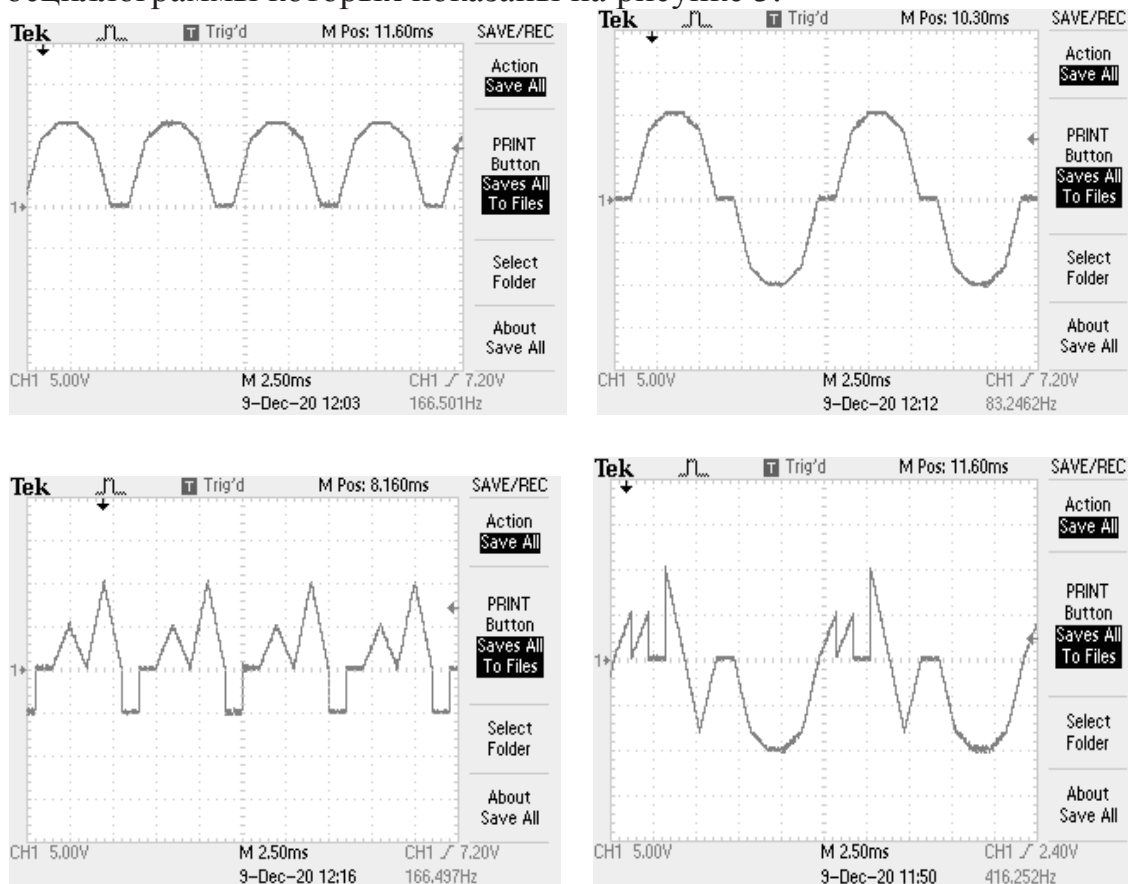
**Рисунок 2. – Последовательность импульсов**

Программно аппаратный комплекс обеспечивает следующие характеристики:

- питание - сеть переменного тока 230 В, 50 Гц;
- режимы работы – гальваностатический, потенциостатический;
- программирование и управление режимами источника питания производится от компьютера IBM PC через порт USB;
- в автономном режиме программно аппаратный комплекс работает под управлением одной из десяти программ, хранящихся в энергонезависимой памяти;
- выходной ток (напряжение) – последовательности импульсов стабилизированного тока (напряжения) произвольной формы с длительностью импульсов и промежутков между ними от одной миллисекунды и более;
- амплитуда выходного тока -  $\pm 5$  А;
- амплитуда выходного напряжения -  $\pm 10$  В; нестабильность мгновенного значения тока (напряжения) – не более  $\pm 1\%$ ;
- входные и выходные цепи источника импульсного тока гальванически изолированы от сети и от корпуса;

- обеспечена защита от короткого замыкания и перегрева.

Для демонстрации возможностей программно аппаратного комплекса были синтезированы различные формы импульсов тока, осциллограммы которых показаны на рисунке 3.



**Рисунок 3. - Осциллограммы синтезированных управляющих импульсов различной формы, демонстрирующие возможности программно аппаратного комплекса**

#### ЛИТЕРАТУРА

1 Makoto Motoyoshi Through-Silicon Via (TSV) / Proceedings of the IEEE. – 2009. - Vol. 97. - No. 1. – pp. 43 – 48.

2 Кушнер, Л.К. Электрохимическое заполнение TSV-отверстий на реверсированном токе / Л.К. Кушнер, Л.И. Степанова, И.И. Кузьмар, А.А. Хмыль, С.К. Лазарук, А.В. Долбик // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018, Т. 18, № 1, – С. 179–182.