

УДК 681.2.082

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-23-31

Измерение эффективной площади металлизации в гальваническом процессе

Ю. В. Данилов, кандидат технических наук, Сарапульский политехнический институт (филиал)

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Сарапул, Россия

Ю. Г. Подкин, доктор технических наук, профессор, Сарапульский политехнический институт (филиал)

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Сарапул, Россия

Рассмотрены особенности измерения площади проводящих покрытий сложных топологий в процессе гальванической металлизации. Показано, что при разработке и исследовании гибридных слоистых структур наиболее сложно оценивать эффективную площадь проводящих металлических и неорганических поверхностей и электродов. Проведен анализ применимости разнообразных способов расчета и моделирования при проектировании проводящих поверхностей в условиях сложной топологии электрического поля и множества влияющих факторов. Установлено, что доминирующие в настоящее время оптические методы не обеспечивают требуемой достоверности контроля эффективной площади проводящих поверхностей. Доказано, что только применение ионного потока позволяет измерять площадь покрытия с учетом топологии электрического поля металлируемой поверхности. Выбран принцип измерения среднегеометрической площади гальванопары на основе ее зависимости от отношения эквивалентной проводимости гальванической цепи к удельной проводимости электролита. Разработан алгоритм, позволяющий экспериментально определять площадь металлизации изделия S_k , в котором коррекция результата измерения площади катода на топологию линий тока и краевые поля металлируемой поверхности выполняется автоматически.

Выбраны измерительные преобразователи: ток I – напряжение U_I , напряжение U – напряжение U_U и корректирующие преобразования контактной разности потенциалов, средней длины линий тока и обратной площади анода в нормированные напряжения. Определены условия и критерии нормировки и согласования с аналого-цифровыми преобразователями. На выходе аналого-цифрового преобразователя формируются коды тока N_I , напряжения N_U и соответствующих параметров процесса измерительного преобразования.

Синтезирована структурная схема измерительного преобразователя площади металлизации. Она состоит из измерительно-установочного блока и процессора. Изделие – катод, анод и набор электродов-датчиков – помещается в ванну с электролитом. Источник питания создает в ванне постоянный ток, который измерительными преобразователями преобразуется в коды напряжения, тока, удельной проводимости, контактной разности потенциалов, средней длины линий тока и обратной площади анода. Процессор реализует алгоритм измерительного преобразования и формирует измерительный сигнал US_k , пропорциональный эффективной площади изделия S_k и (или) код NS_k . Показано, что возможна автоматизация измерительного преобразования в режимах питания гальванических установок импульсным и импульсно-реверсивным токами. В режиме импульсного питания предложено в блоки, работающие в импульсном режиме, вводить интеграторы. В импульсно-реверсивном режиме в эти блоки должны вводиться корреляционные фильтры.

Разработана схема измерительной установки для измерения площади электропроводных деталей в процессе металлизации в импульсном и импульсно-реверсивном режимах. Включение синтезированных измерителей в состав систем автоматического управления током гальванических ванн обеспечивает уменьшение расхода материалов, экономию электрической энергии, повышение уровня автоматизации нанесения покрытий.

Ключевые слова: металлизация, проводящее покрытие, оптимизация, эффективная площадь, измеритель, фотоэлектронный преобразователь, импульсный режим.

Введение

Одно из направлений развития современных электронных технологий – расширение областей применения гетерогенных структур, образованных комбинацией проводящих, полупроводящих и диэлектрических слоев. Если в прошлом столетии к таким объектам относились, в основном, электронные и радиоэлектронные модули нулевого – второго уровней и первичные измерительные преобразователи с внешними областями чувствительно-

сти, то теперь их арсенал значительно расширился за счет технологии фотоэлектронного преобразования, включая бурно развивающуюся солнечную энергетику. Основная проблема, с которой сталкиваются разработчики и исследователи гибридных слоистых структур, – неопределенность, возникающая при оценке эффективной, фактически работающей площади проводящих металлических и неорганических поверхностей и электродов. Именно она, как правило, определяет энергетические показатели

электронных модулей. Для проводников, ширина которых на порядок и более превышает их толщину, отличие эффективной площади от геометрической в большинстве приложений не принципиально. Однако согласно закону Мура количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца. В результате обостряется проблема создания проводящих линий и промежутков между ними шириной менее 10 мкм. С другой стороны, по прогнозу Д. Хауса из Intel производительность процессоров должна удваиваться каждые 18 месяцев, что требует увеличения толщины проводников до уровня от 0,1 до 10 мкм [1]. В солнечных элементах ситуация еще сложнее. Зачастую в поисках компромисса применяются вертикальные проводящие ребра или матрицы из таких ребер [2, 3]. В результате при проектировании реальных слоистых элементов и устройств из-за сложности топологии электрического поля и множества влияющих факторов ни расчеты, ни разнообразные способы моделирования не позволяют достоверно оценивать эффективную площадь проводящих поверхностей и электродов электрическими методами. Поэтому при изготовлении электродов, например, методами порошковой металлургии, ограничиваются измерением напряжения на контактах в процессе спекания или легирования [4], которое приблизительно равно разности потенциалов между подложкой и контактом. В биосенсорике используются бипотенциостаты, включающие встроенные рабочие, опорные и вспомогательные электроды для амперометрического обнаружения электрохимических величин [5]. Однако связь этих величин с эффективной площадью сенсоров неоднозначна, поэтому до сих пор широко применяются как альтернатива оптические измерения: сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия, дифракция обратного рассеяния электронов [6], хроматическая конфокальная микроскопия, фокусно-вариационная микроскопия (FVM) [7] и другие методы, не связанные со структурой электромагнитного поля. Еще одно направление планиметрии появилось и развивается в связи с широким распространением простых коммерчески доступных планшетных сканеров. Например, разработан алгоритм обработки изображения лицевой стороны солнечной батареи (MetDetect) путем сравнения отсканированных изображений с тестовыми образцами, полученными с помощью микроскопа, что позволяет подтвердить хотя и очевидную, но потенциаль-

но перспективную для планиметрии корреляцию площади металлизированной поверхности с измеренной плотностью тока короткого замыкания образцов [8]. Однако при неразрушающем контроле площадь металлизации в полупроводниковых приборах и КМОП-матрицах площадь контактной поверхности настолько мала, что приходится ее искусственно увеличивать [9] и решать вопросы согласования импедансов, что нарушает геометрию системы электродов и топологию электромагнитного поля. При нанесении проводящего покрытия на полупроводниковую поверхность нужно учитывать компоненты контактного сопротивления, эффекты «скучивания тока» и промежуточные слои, которые возникают между металлом и полупроводником [10].

При формировании электродов фотоэлектрических преобразователей основные трудности связаны с разнообразием применяемых материалов. Так, при создании солнечных элементов используется кристаллический кремний [11], поликремний [12], устройства на основе перовскита и кристаллического кремния (PK / c-Si) [13], кремний с гетеропереходом (SHJ) [14], органически модифицированные керамические полимеры [15] и многие другие. В результате учет компонентов контактного сопротивления и эффектов «скучивания тока» становится практически невозможным из-за разнообразия структуры и состава промежуточных слоев между проводящей поверхностью и полупроводником. Таким образом, проводящая поверхность в изделиях сложной, разветвленной структуры с минимизированными по ширине проводниками определяется не только фронтальной геометрической площадью, но и площадью боковых и торцевых участков печатных дорожек. В изделиях на тканевой или волокнистой основе проводящий слой проникает вглубь подложки, а в многослойных печатных платах и слоистых структурах в покрытие включаются и площади межплатных соединителей. Фактически во всех этих случаях покрытие становится трехмерным, и контролировать необходимо все его участки. Следовательно, для оптимизации процессов нанесения проводящих покрытий диэлектрических и полупроводниковых материалов необходим инструментарий, позволяющий измерять их эффективную площадь непосредственно в процессе электроосаждения.

Цель исследования – разработка способа и устройств, обеспечивающих измерение эффективной площади металлизации непосредственно в процессе электроосаждения.

Принцип измерительного преобразования

В процессах нанесения покрытий с различной конфигурацией проводящих поверхностей удобнее и надежнее их площадь определять экспериментально, поэтому в качестве зонда, формирующего измерительную информацию, используется поток ионов. В качестве теоретической основы измерения эффективной площади проводящего покрытия принимается способ гальванической металлизации, применявшийся ранее в технологиях производства печатных плат [16]. Он основан на зависимости средне-геометрической эффективной площади электродной системы от отношения эквивалентной проводимости гальванической цепи к удельной проводимости электролита. Поскольку площадь анода обычно известна, для определения эффективной площади металлируемой поверхности (катода) S_k и установки номинальной плотности тока гальванической ванны достаточно измерить ток и напряжение гальванопары. В режиме измерения площади металлизированная поверхность подключается к отрицательному выводу источника. Эффективная площадь катода S_k связана с постоянным током I и напряжением U на электродах гальванопары соотношением

$$S_k = \frac{1}{S_a} \left[\frac{IL(1+\alpha)(1+\beta)}{\sigma[U - (1+\beta)\Delta\phi]} \right]^2, \quad (1)$$

где S_a – эффективная площадь анода; L – геометрическое расстояние между анодом и катодом; α и β – эмпирические коэффициенты, учитывающие потери энергии в электролите за счет газонаполнения и в контактах электрической цепи соответственно; $\Delta\phi$ – электродная разность потенциалов; σ – удельная проводимость электролита.

Из (1) вытекает, что функция измерительного преобразования тока и напряжения гальванопары в эффективную площадь катода параметрически инвариантна относительно площади анода S_a :

$$S_k = \frac{1}{S_a} \left[\frac{Il}{\sigma(U - \phi_k)} \right]^2, \quad (2)$$

где l – средняя длина линий тока, скорректированная на потери энергии в гальванической цепи,

$$l = L(1+\alpha)(1+\beta),$$

и контактная разность потенциалов

$$\phi_k = (1+\beta)\Delta\phi$$

являются параметрами измерительного преобразования. В режиме холостого хода $I = 0$ и $U_{im} = \phi_k$. Это позволяет измерить контактную разность потенциалов, вводя дополнительный канал измерительного преобразования.

Таким образом, алгоритм, реализующий формулу (2), позволяет экспериментально определять площадь металлизации изделия S_k , причем коррекция результата измерения площади катода на топологию линий тока и краевые поля металлируемой поверхности выполняется автоматически.

Выбор измерительных преобразователей

Для выполнения алгоритма, реализующего формулу (2), необходимо сформировать сигналы: тока I , напряжения U , удельной проводимости σ . Измерить или ввести вручную параметры: контактной разности потенциалов ϕ_k , обратной площади анода $1/S_a$ и средней длины линий тока l .

В аналоговых измерительных преобразователях площади металлизации все сигналы и параметры, моделирующие процесс измерения, преобразуются в нормированные напряжения. Это позволяет использовать для реализации алгоритма по формуле (2) известные аналоговые решающие устройства. Однако развитие микропроцессорной техники и соответствующего программного обеспечения позволило решать задачи обработки цифровой информации любой математической сложности. Поэтому логичнее сформированные измерительными преобразователями сигналы оцифровать и затем выполнить их математическую обработку по алгоритму, определенному выражением (2).

Для формирования измерительных сигналов гальванопары используются нормирующие измерительные преобразователи: ток I – напряжение U_I (нормирование сопротивлением из условия $R_0 = U_{\text{acp max}}/I_{\text{min}}$, где $U_{\text{acp max}}$ – максимальное входное напряжение аналого-цифрового преобразователя) и напряжение U – напряжение U_U (коэффициент нормирования $k_0 = U_{\text{acp max}}/U_{\text{max}}$), одновременно осуществляющие гальваническую развязку силовой и измерительной цепей. На выходе аналого-цифрового преобразователя формируются коды тока N_I и напряжения N_U . Код сигнала удельной проводимости U_σ формируется кондуктометром с цифровым выходом, например, кондуктометром-солемером МАРК-602Т (<http://vzornn.ru/catalog/konduktometry-mark-602t.html> (дата обращения 19.02.20)).

Параметры процесса – средняя длина линий тока l , обратная площадь анода N_{S_a} – задаются

генераторами кодов установки. Контактная разность потенциалов φ_k измеряется с помощью тестового электрода 4.2, выполненного из материала покрытия, нормируется коэффициентом k_0 и преобразуется в код N_{φ_k} . Процессор реализует алгоритм по выражению (2) с учетом параметров нормировки. Выходной сигнал формируется в виде кода N_{S_k} и (или) нормированного напряжения U_{S_k} и используется, при необходимости, в системе автоматического задания плотности тока.

Структурная схема измерительной установки

Структурная схема измерителя площади металлизации приведена на рис. 1. Она состоит из измерительно-установочного блока и процессора. Изделие 4.1, закрепленное на первой штанге 3, опускается в ванну 1 с раствором электролита 2. В ванну на штангах погружены также анод 5, кондуктометрический первичный изме-

рительный преобразователь (ПИП) 9 и тестовый электрод 4.2. Источник питания 6 создает в ванне ток, который измерительным преобразователем ток – напряжение 7 преобразуется в напряжение токового сигнала U_I , а напряжение на электродах гальванопары 4 – 5 измерительным преобразователем 8 преобразуется в сигнал напряжения U_U . Кондуктометрический ПИП 9 формирует код удельной проводимости N_{σ} . АЦП 11 преобразует φ_k в код N_{φ_k} . Если контактная разность потенциалов φ_k задается вручную, тестовый электрод 4.2 не вводится в электролит. Нормированные напряжения средней длины линий тока U_I и обратной площади анода U_{Sa} задаются вручную или регистрами кодов установки 10 и 12, где преобразуются в коды N_I и N_{Sa} . Процессор реализует алгоритм по выражению (2) и формирует измерительный сигнал U_{S_k} , пропорциональный эффективной площади изделия S_k , и (или) код N_{S_k} .

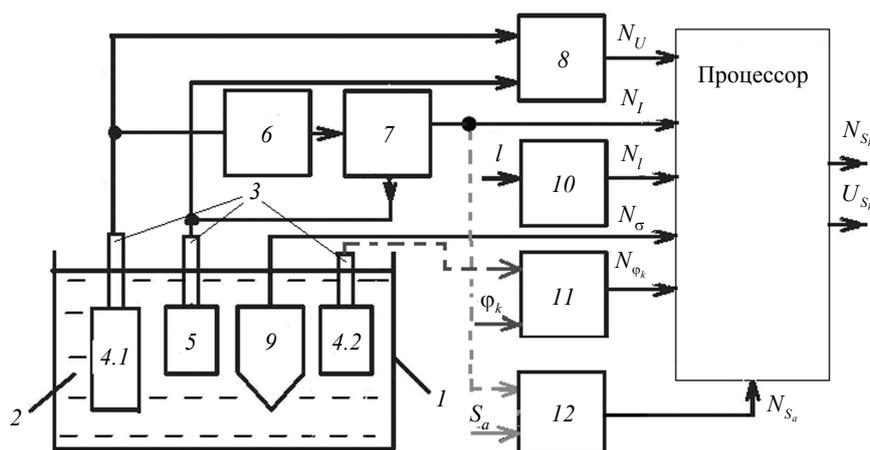


Рис. 1. Структурная схема измерительного преобразователя площади металлизации

Fig. 1. Block diagram of a metallization measuring transducer

Рассмотренная структура измерительного преобразования обеспечивает удовлетворительную точность измерений в большинстве технологически важных случаях. Однако при металлизации сложных топологий печатных плат, особенно пространственно распределенных и многослойных изделий, а также изделий на эластичной, тканой и волокнистой основе возрастает погрешность установки величины тока, связанная с неопределенностью, вызванной краевыми полями и межсоединениями [17]. Для снижения этой погрешности, а также погрешностей, обусловленных скученностью, обычно для уточнения результатов измерений используется метод длины переноса (TLM). Длина переноса характеризует среднее расстояние, которое

электрон (или дырка) проходит в полупроводнике под контактом, прежде чем попадет в контакт. В современной высокоскоростной электронике длина переноса становится важнейшим показателем, определяющим контактное сопротивление, и должна учитываться при задании тока формирования покрытия. Прямой метод его нормирования – сравнение с током образцового элемента сравнения по упомянутой методике. Элемент сравнения – это образец, идентичный покрываемому по составу компонентов и текстуры, с известной площадью металлизации, допускающей измерение существующими образцовыми методами. Он имеет упрощенную топологию покрытия, изоморфную наносимой, что позволяет рассчитать краевые поля, и вво-

дится в ванну вместо изделия 4.1 для оценки статических составляющих погрешностей, вносимых в процессе нанесения покрытия. Динамическая составляющая погрешности связана с тем, что блоки измерителя имеют повышенную чувствительность к импульсным помехам и шумам токораспределения. Определяется как составляющая общей погрешности при тестировании. Минимизируется применением стандартного комплекса средств защиты от импульсных помех.

Еще одна составляющая погрешности в режиме нанесения гальванического покрытия связана с искажением результатов измерений из-за растворения анода и соответствующего уменьшения его площади. Вместе с тем устойчивость конфигурации и начальных размеров анода позволяет этот недостаток автоматически нейтрализовать в процессе гальваноосаждения. Дело в том, что интегральная информация о степени растворения анода содержится в прошедшем через гальванопару заряде, поэтому для коррекции кода сигнала U_{Sa} можно использовать информацию, содержащуюся в сигнале тока на выходе блока 7 (см. рис. 1). С этой целью N_I вводится на дополнительный вход блока 12 (пунктир на рис. 1) и по мере растворения анода корректирует выходное напряжение этого блока.

Цифровые измерители, выполненные по структуре (см. рис. 1) с коррекцией результатов, связанных с изменением площади анода и переносом, имеют сравнительно невысокую погрешность измерений (10...15 %); причем такая

погрешность обеспечивается без сложной системы фильтрации сигналов и экранирования в условиях производства, где импульсные воздействия возникают как неперенный атрибут технологии.

Измерения в импульсном режиме

В последние годы для улучшения качества гальванических покрытий стали применяться различные методы активации процесса осаждения и импульсный режим питания – униполярный и реверсивный, что позволило добиться некоторого ускорения обновления электролита у поверхности катода, повышения катодного выхода металла по току, измельчения структуры покрытия [18]. При использовании в процессе металлизации импульсных униполярных токов традиционные структуры измерительного преобразования работают некорректно, и погрешность измерений резко возрастает. Поэтому перед оцифровыванием сигналы в блоках 7 и 8 (см. рис. 1) интегрируют. В реверсивном режиме возникает дополнительная составляющая погрешности измерений, связанная с изменением полярности тока и переходными процессами в электролите и на электродах системы. Наиболее эффективно точность измерений в таком режиме позволяет обеспечить только корреляционная обработка информационных сигналов.

Учет этих инноваций приводит к функциональной схеме цифрового автоматизированного измерителя площади металлизации, приведенной на рис. 2.

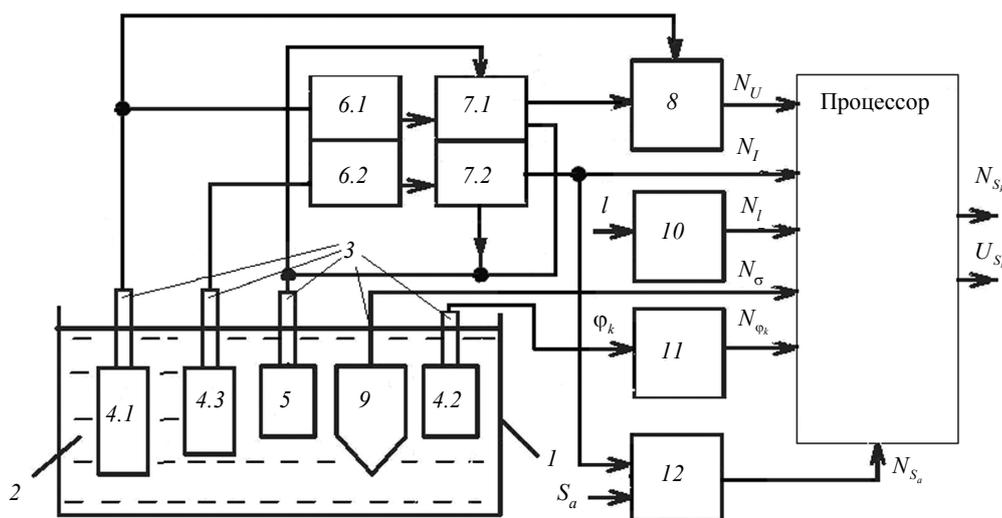


Рис. 2. Функциональная схема цифрового автоматизированного измерителя площади металлизации (нумерация блоков соответствует рис. 1)

Fig. 2. Functional diagram of a digital automated meter of metallization (block numbering corresponds to fig. 1)

Она по-прежнему состоит из измерительно-установочного блока и процессора. Изделие 4.1 и электрод сравнения 4.3, закрепленные на штангах, опускаются в ванну 1 с электролитом 2. В ванну на штангах погружены также анод 5, кондуктометрический первичный измерительный преобразователь (ПИП) 9 и тестовый электрод 4.2. Источник питания 6.1 создает в ванне импульсный или импульсно-реверсивный ток, который измерительным преобразователем ток – напряжение 7.2 преобразуется в напряжение токового сигнала U_I с последующей оцифровкой, а напряжение на электродах гальванопары 4.1 – 5 измерительным преобразователем 8 преобразуется в сигнал напряжения U_U . Источник питания 6.2 создает в ванне ток сравнения, который измерительным преобразователем ток – ток 7.2 преобразуется в код опорного тока N_{I0} , а напряжение на электродах гальванопары 4.1 – 5 измерительным преобразователем с гальванической развязкой 8 преобразуется в код напряжения N_U . Кондуктометрический ПИП 9 формирует код сигнал N_{σ} . Контактная разность потенциалов φ_k задается на основе тестирования потенциала электрода 4.2, а коды нормированного напряжения обратной площади анода U_{Sa} и средней длины линий тока U_I – регистрами 10 и 11. Процессор, выполненный на базе микроконтроллера, реализует алгоритм по выражению (2), корректирует статическую и динамическую составляющие погрешности и формирует код измерительного сигнала N_k , соответствующий площади изделия S_k .

Выводы

Цифровые измерители, выполненные по структурам (см. рис. 1 и 2), обеспечивают возможность контроля площади проводящих покрытий как в процессе проектирования, так и непосредственно в технологии металлизации. Разработанные способы коррекции результатов, связанных с изменением площади анода и переносом, обеспечивают сравнительно невысокую погрешность измерений (ориентировочно 10...15 %), точная оценка которой представляет собой отдельную задачу. Причем такая погрешность достигается без сложной системы фильтрация сигналов и экранирования в условиях производства, где импульсные воздействия возникают как неперенный атрибут технологии. Использование интеграторов в режиме импульсного и корреляционных фильтров в режиме импульсного реверсного питания, а также учет дискретной структуры металлируемой поверхности позволяют увеличить точность измерения площади катода в этих сложных с точ-

ки зрения электромагнитной совместимости условиях. При включении синтезированных измерителей в состав систем автоматического управления током гальванических ванн обеспечивается уменьшение расхода материалов, экономится электрическая энергия, повышается уровень автоматизации нанесения покрытий. Точность установки тока повышается на 8...10 % по сравнению с вариантом построения измерителя без системы автоматического управления. Используемый алгоритм измерения обеспечивает линейный выходной сигнал по измеряемому параметру, позволяет хранить и пересылать данные по информационным сетям, автоматически задавать требуемую плотность тока.

Библиографические ссылки

1. Schnabel M., Klein T., Lee B., Nemeth W., LaSalvia V., van Hest M. and Stradins P. [Novel Rear Side Metallization Route for Si Solar Cells Using a Transparent Conducting Adhesive]. Presented at the 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) Washington, DC June 25-30, 2017. <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/68679.pdf> (дата обращения 07.02.2020).
2. Wilt D.M., Bradshaw G., Gap Lt.N., Abudayyeh O.K., Nelson C., Han S., Cox N., RapeA., Landi B. and Whipple S. [Metal matrix composite solar cell metallization]. DOI: 10.1051/e3sconf, 20171603001 E3S Web of Conferences /16, 03001, 2017. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/04/e3sconf_espc2017_03001.pdf (дата обращения 07.02.2020).
3. Balaji N., Raval M.C. and Saravanan S. [Review on Metallization in Crystalline Silicon Solar Cells. Submitted]. October 5th 2018 Reviewed: January 30th 2019 Published: July 1st 2019. Open access peer-reviewed chapter - ONLINE FIRST <https://www.intechopen.com/online-first/review-on-metallization-in-crystalline-silicon-solar-cells>. DOI: 10.5772/intechopen.84820 (дата обращения 06.02.2020).
4. Xiong S., Li Y., Liu C., Yuan X., Tong H., Yang Yu., Ye X., Wang X. and Luo L. [Rapid and accurate characterization of silver-paste metallization on crystalline silicon solar cells by contact-end voltage measurement]. AIP Advances 8, 095225, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5038127> View Affiliations, PDF (дата обращения 08.02.2020).
5. Grell M., Dincer C., Le T., Lauri A., Bajo E.N., Kasimatis M., Barandun G., Maier S.A., Cass A.E.G., and Güde F. [Autocatalytic Metallization of Fabrics Using Si Ink, for Biosensors, Batteries and Energy Harvesting]. Adv. Funct. Mater. 2019, 29, 1804798. 11 p. DOI: 10.1002/adfm.201804798.
6. Ruffli R. [Fatigue mechanisms in Al-based metallizations in power MOSFETs]. Material chemistry. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. English. NNT Submitted on 23 Nov 2018: 2017TOU30256, 251 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01933501> (дата обращения 07.02.2020).

7. Jumelle C., Hamri A., Egaud G., Mauclair C., Reynaud S., Dumas V., Garcin T., Gain Ph. and Thibaud G. [Comparison of four methods of surface roughness assessment of corneal stromal bed after lamellar cutting]. *Biomedical optics express* 4974, vol. 8, no. 11 | 1 Nov 2017.
8. Heinrich M., Kraft A., Lieder M., Hoex B/, Aberle A.G., Glatthaar M. [Quantification of front side metallization area on silicon wafer solar cells for background plating detection]. 5th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV, 2015, pp. 717-724. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.102> Get rights and content <https://pdf.sciencedirectassets.com/277910/1-s2.0-S1876610215X00166/1-s2.0-S1876> (дата обращения 07.02.2020).
9. Lin Li L., Yin H. and Mason A.J. [Epoxy Chip-in-Carrier Integration and Screen Printed Metallization for Multichannel Microfluidic Lab-on-CMOS Microsystems]. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst.*, 2018, Apr; 12(2): 416-425. doi: 10.1109/TBCAS.2018.2797063. www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/PMC5886702 (дата обращения 06.02.2020).
10. TLM measurement PEducation.org. A collection of resources for the photovoltaic educator <https://www.pveducation.org/pvcdrom/tlm-measurement> (дата обращения 19.02.2020).
11. Xiong1 S., Li1 Yo., Liu C., Yuan X., Tong1 H., Yang1 Yu., Ye1 X., Wang X. and Luo L. Rapid and accurate characterization of silver-paste metallization on crystalline silicon solar cells by contact-end voltage measurement. *AIP Advances* 8, 095225, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5038127> View Affiliations, PDF (дата обращения 08.02.2020).
12. Hande E., Çiftçinar H., Stodolny K.M., Wu Yu., Janssen G.J.M., Löffler Jo., Schmitz Ju., Lenes M., Luchies J.-M., Geerligs L.J. [Study of screen printed metallization for polysilicon based passivating contacts]. 7th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2017. *Energy Procedia* 124 (2017) 851-861. <https://www.sciencedirect.com> (дата обращения 07.02.20).
13. [Low-Temperature Screen-Printed Metallization for the Scale-Up of Two-Terminal Perovskite - Silicon Tandems]. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2019, 2, 5, 3815. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsaem.9b00502> (дата обращения 07.02.20).
14. Hatt T., Bartsch J., Kluska S., and Glatthaar M. [Establishing the “native oxide barrier layer for selective electroplated” metallization for bifacial silicon heterojunction solar cells]. *AIP Conference Proceedings* 2147, 040005 (2019); Published Online: 27 August 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5123832> (дата обращения 07.02.20).
15. Bonabi A., Tähkä S., Ollikainen E., Jokinen V. and Sikanen T. Metallization of Organically Modified Ceramics for Microfluidic Electrochemical. *Micro-machines*, 2019, 10, 605, 12 p. <https://researchportal.helsinki.fi/en/publications/metallization-of-organically-modified-ceramics-for-microfluidic-e-2> (дата обращения 07.02.20).
16. Подкин Ю. Г., Данилов Ю. В. Измерение площади металлизации при импульсном реверсном питании гальванических ванн // *Технологии в электронной промышленности*. 2018. № 5. С. 48–50.
17. Integrated multilayer stretchable printed circuit boards paving the way for deformable active matrix. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-12870-7> (дата обращения 06.02.20).
18. Кондрашов Д. Системы тестирования на ЭМС микросхем и печатных плат // *Технологии в электронной промышленности = Technologies in electronic industry*. 2019. № 5 (113). С. 62–66. ISSN 2079-9454.

References

1. Schnabel M., Klein T., Lee B., Nemeth W., LaSavia V., van Hest M. and Stradins P. [Novel Rear Side Metallization Route for Si Solar Cells Using a Transparent Conducting Adhesive]. Presented at the 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) Washington, DC June 25-30, 2017. <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/68679.pdf> (дата обращения 07.02.2020).
2. Wilt D.M., Bradshaw G., Gap Lt.N., Abudayyeh O.K., Nelson C., Han S., Cox N., RapeA., Landi B. and Whipple S. [Metal matrix composite solar cell metallization]. DOI: 10.1051/e3sconf, 20171603001 E3S Web of Conferences /16, 03001, 2017. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/04/e3sconf_escp2017_03001.pdf (дата обращения 07.02.2020).
3. Balaji N., Raval M.C. and Saravanan S. [Review on Metallization in Crystalline Silicon Solar Cells. Submitted]. October 5th 2018 Reviewed: January 30 th 2019 Published: July 1st 2019. Open access peer-reviewed chapter - ONLINE FIRST <https://www.intechopen.com/online-first/review-on-metallization-in-crystalline-silicon-solar-cells>. DOI: 10.5772/intechopen.84820 (дата обращения 06.02.2020).
4. Xiong1 S., Li1Yo., Liul C., Yuan X., Tong1 H., Yang1 Yu., Ye1 X., Wang X. and Luo L. [Rapid and accurate characterization of silver-paste metallization on crystalline silicon solar cells by contact-end voltage measurement]. *AIP Advances* 8, 095225, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5038127> View Affiliations, PDF (дата обращения 08.02.2020).
5. Grell M., Dincer C., Le T., Lauri A., Bajo E.N., Kasimatis M., Barandun G., Maier S.A., Cass A.E.G., and Güde F. [Autocatalytic Metallization of Fabrics Using Si Ink, for Biosensors, Batteries and Energy Harvesting]. *Adv. Funct. Mater.* 2019, 29, 1804798. 11 p. DOI: 10.1002/adfm.201804798.
6. Ruffli R. [Fatigue mechanisms in Al-based metallizations in power MOSFETs]. *Material chemistry*. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. English. NNT Submitted on 23 Nov 2018: 2017TOU30256, 251 p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01933501> (дата обращения 07.02.2020).
7. Jumelle C., Hamri A., Egaud G., Mauclair C., Reynaud S., Dumas V., Garcin T., Gain Ph. and Thibaud G. [Comparison of four methods of surface roughness

assessment of corneal stromal bed after lamellar cutting]. *Biomedical optics express* 4974, vol. 8, no. 11 | 1 Nov 2017.

8. Heinrich M., Kraft A., Lieder M., Hoex B/, Aberle A.G., Glatthaar M. [Quantification of front side metallization area on silicon wafer solar cells for background plating detection]. 5th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV, 2015, pp. 717-724. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.102> Get rights and content <https://pdf.sciencedirectassets.com/277910/1-s2.0-S1876610215X00166/1-s2.0-S1876> (дата обращения 07.02.2020).

9. Lin Li L., Yin H. and Mason A.J. [Epoxy Chip-in-Carrier Integration and Screen Printed Metallization for Multichannel Microfluidic Lab-on-CMOS Microsystems]. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst.*, 2018, Apr; 12(2): 416-425. doi: 10.1109/TBCAS.2018.2797063. www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/PMC5886702 (дата обращения 06.02.2020).

10. TLM measurement PVEducation.org. A collection of resources for the photovoltaic educator <https://www.pveducation.org/pvcdrom/tlm-measurement> (дата обращения 19.02.2020).

11. Xiong1 S., Lil Yo., Liu C., Yuan X., Tong1 H., Yang1 Yu., Ye1 X., Wang X. and Luo L. Rapid and accurate characterization of silver-paste metallization on crystalline silicon solar cells by contact-end voltage measurement. *AIP Advances* 8, 095225, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5038127> View Affiliations. PDF (дата обращения 08.02.2020).

12. Hande E., Çiftçinar H., Stodolny K.M., Wu Yu., Janssen G.J.M., Löffler Jo., Schmitz Ju., Lenes M., Luchies J.-M., Geerligs L.J. [Study of screen printed metallization for polysilicon based passivating contacts]. 7th

International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2017. *Energy Procedia* 124 (2017) 851-861. <https://www.sciencedirect.com> (дата обращения 07.02.20).

13. [Low-Temperature Screen-Printed Metallization for the Scale-Up of Two-Terminal Perovskite - Silicon Tandems]. *ACS Appl. Energy Mater.*, 2019, 2, 5, 3815. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsaem.9b00502> (дата обращения 07.02.20).

14. Hatt T., Bartsch J., Kluska S., and Glatthaar M. [Establishing the “native oxide barrier layer for selective electroplated” metallization for bifacial silicon heterojunction solar cells]. *AIP Conference Proceedings* 2147, 040005 (2019); Published Online: 27 August 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5123832> (дата обращения 07.02.20).

15. Bonabi A., Tähkä S., Ollikainen E., Jokinen V. and Sikanen T. Metallization of Organically Modified Ceramics for Microfluidic Electrochemical. *Micromachines*, 2019, 10, 605, 12 p. <https://researchportal.helsinki.fi/en/publications/metallization-of-organically-modified-ceramics-for-microfluidic-e-2> (дата обращения 07.02.20).

16. Podkin Yu.G., Danilov Yu.V. [Measurement of the metallization area during pulsed reverse feeding of galvanic baths]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti*, 2018, no. 5, pp. 48-50 (in Rus.).

17. Integrated multilayer stretchable printed circuit boards paving the way for deformable active matrix. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-12870-7> (дата обращения 06.02.20).

18. Kondrashov D. [EMC Testing Systems for Circuits and PCBs]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti*, 2019, no. 5, pp. 62-66 (in Russ.). ISSN: 2079-9454.

Measurement of Effective Area of Metallization at Galvanic Processes

Yu.V. Danilov, PhD in Engineering, Sarapul Polytechnic Institute (branch) of Kalashnikov ISTU, Sarapul, Russia

Yu.G. Podkin, DSc in Engineering, Professor, Sarapul Polytechnic Institute (branch) of Kalashnikov ISTU, Sarapul, Russia

The features of measuring the area of conductive coatings of complex topologies in the process of galvanic metallization are considered. It is shown that when developing and studying hybrid layered structures, it is most difficult to evaluate the effective area of conductive metal and inorganic surfaces and electrodes. The analysis of the applicability of various methods of calculation and modeling for the design of conductive surfaces in a complex topology of the electric field and many influencing factors. It is established that the currently dominant optical methods do not provide the required reliability of the control of the effective area of conducting surfaces. It is proved that only the use of ion flux allows measuring the coating area taking into account the topology of the electric field of the metallized surface. The principle of measuring the geometric mean area of the galvanic couple was selected based on its dependence on the ratio of the equivalent conductivity of the galvanic circuit to the electrical conductivity of the electrolyte. An algorithm has been developed that allows for experimentally determining the metallization area of the product S_k , in which the correction of the result of measuring the cathode area on the topology of streamlines and the marginal fields of the metallized surface are performed automatically.

Measuring transducers “current I - voltage UI”, “voltage U - voltage UU” and correcting transformations of the contact potential difference, the average length of the current lines, and the reciprocal area of the anode into normalized voltages were selected. The conditions and criteria for normalization and coordination with analog-to-digital converters are determined. At the ADC output, current codes NI and voltage NU and the corresponding parameters of the measurement conversion process are generated.

The block diagram of the measuring transducer of the metallization area is synthesized. It consists of a measuring and installation unit and a processor. The product - a cathode, an anode and a set of sensor electrodes are placed into a bath with electrolyte. The power source creates a direct current in the bath, which is converted by measuring trans-

ducers into codes of voltage, current, specific conductivity of the contact potential difference, the average length of the current lines and the inverse area of the anode. The processor implements the measurement conversion algorithm and generates a measurement signal USk proportional to the effective product area Sk and / or NSk code. It is shown that automation of the measurement conversion is possible in the power supply modes of galvanic installations by pulsed and pulsed-reverse currents. In the pulse power mode, it is proposed to introduce integrators into the blocks operating in the pulse mode. In the pulse-reversible mode, correlation filters should be introduced into these blocks.

A measuring setup for measuring the area of electrically conductive parts during metallization in pulsed and pulse-reversed modes has been developed. The inclusion of synthesized meters in the system of automatic control of the current of galvanic baths ensures a reduction in the consumption of materials, energy saving, and an increase in the level of automation of coating.

Keywords: metallization, conductive coating, optimization, effective area, meter, photoelectronic converter, pulse mode.

Получено 28.01.2020

Образец цитирования

Данилов Ю. В., Подкин Ю. Г. Измерение эффективной площади металлизации в гальваническом процессе // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 1. С. 23–31. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-23-31.

For Citation

Danilov Yu.V., Podkin Yu.G. [Measurement of Effective Area of Metallization at Galvanic Processes]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 23-31 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-23-31.