

РАЗДЕЛ IV. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

нений типа $AuGa$, $AuAs$ и других, обладающих высоким сопротивлением. Модель омического контакта в этом случае представляется в виде структуры $M-n+-v-GaAs$, где v -высокоомный слой.

Проведенный анализ формирования омических контактов, их морфологии, характера изменения величины электрического сопротивления показывает сложную кинетику их поведения, в которой участвуют процессы диффузии, растворения, рекристаллизации и образования различных интерметаллических соединений.

Вывод

Метод измерения приведенного поверхностного удельного или полного электрического сопротивления одновременно с контролем температуры термообработки и скорости нагрева и охлаждения непосредственно в процессе технологического цикла формирования омических контактов позволяет обеспечить высокую воспроизводимость электрических параметров омических контактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заводчиков В.М. Исследование возможности использования импульсного фотонного отжига в технологии [Текст] / Заводчиков В.М., Дохтуров В.В., Карпович Н.В., Солдатенко К.В. // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ.-1993г. №.3 (170).- С. 26-27.
2. Стриха В.И. Физические основы надежности контактов металл-полупроводник в интегральной электронике [Текст] / Стриха В.И., Бузанева Е.В. // Радио и связь.- М.: 1987.- С. 178-181.
3. Брянцева Т.А. Термические изменения в области контакта пленки золота с поверхностью монокристаллического арсенида галлия [Текст] / Брянцева Т.А., Волков А.И., Ормонт А.Б. //Электронная Техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы.-1976.- №. 2 (100).- С.65-67.
4. Филимонов В.М. Морфологические изменения в омических контактах к арсениду галлия на основе сплава золото – германий в процессе их отжига [Текст] / Филимонов В.М., Юрченко В.И. // Сборник трудов VI Всесоюзного совещания по исследованию арсенида галлия. – Томск- 1987. - Т.2 - С.48.
5. Дохтуров В.В. Кристаллизация сплава золото-германий на поверхности арсенида галлия при импульсной термообработке [Текст] / Дохтуров В.В., Смирнов С.В. // Электронная техника. - Серия 7. Ферритовая техника.-1992.- №.2 (171). - С. 50-51.
6. Отчет по ОКР "Терка" Исследование и разработка технологического процесса и автоматизированной установки импульсного отжига N Госрегистрации Ф28456.-1988.

Руководитель производства В.В. Дохтуров – niipr24@mail.ru, (3822) 555-572; Начальник отдела оптических систем В.И.Юрченко – yur_med@mail.r, (3822) 488-521 – ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов», д.т.н., проф. С.В. Смирнов – Томский университет систем управления и радиоэлектроник, кафедра физической электроники, center@ms.tusur.ru, (3822) 485-638, д.т.н., проф А.В. Юрченко – каф. Информационно-измерительной техники Национального исследовательского Томского политехнического университета, тел.(3822)-41-89-11, niipr@inbox.ru

УДК 621.385.833

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НАНОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ

Е.Ю. Шелковников, А.В. Тюриков, П.В. Гуляев, С.Р. Кизнерцев, С.И. Липанов

В статье рассмотрены особенности помехозащищенного сканирующего туннельного микроскопа для автоматической идентификации наноструктуры поверхности. Представлена структурная схема разработанного микроскопа, приведены основные принципы его работы. Показано использование метода анализа иерархий для окончательной идентификации СТМ-изображений наночастицы с применением аппарата нейронных сетей и нечеткой логики.

Ключевые слова: сканирующий туннельный микроскоп, идентификация СТМ-изображений, система активной виброзащиты, нейронные сети, нечеткая логика.

Введение

Исследования наночастиц кластерных материалов с применением сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) являются важным этапом при создании новых перспек-

тивных материалов. Поскольку СТМ позволяет получать топографические изображения поверхности постоянного туннельного тока (СТМ-топографии), величина которой в каждой точке над поверхностью определяется

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3/2, 2012

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НАНОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ

суперпозицией определенных электронных состояний, а, следовательно, и квантово-электронным строением исследуемой наночастицы, подложки и измерительной иглы, то идентификация подобных СТМ-изображений достаточно затруднена. Наличие искажений и помех на изображении значительно затрудняет правильную интерпретацию нанобъектов. Поэтому создание новых методов и средств идентификации экспериментальных СТМ-изображений, обладающих высокой степенью автоматизации и, в то же время, гибкостью принятия решений, свойственной человеку, является важной и актуальной задачей.

Структура СТМ для идентификации изображений наноструктуры поверхности

Для автоматического распознавания наночастиц создан интеллектуальный цифровой СТМ, структурная схема которого приведена на рисунке 1. Он содержит съемный точный пьезопривод ТП для перемещения измерительного острия О по осям X, Y, Z относительно поверхности образца Об, шаговый пьезопривод ШП сближения образца с острием, блок БИТТ измерения туннельного тока, блок БРТ регистрации топографии исследуемой поверхности с управляющим вычислителем, блок компенсации БКПН пульсаций напряжения, коммутатор К, высоковольтный усилитель ВВУЗ напряжения по оси Z, блок БАУ адаптивного управления, систему активной виброзащиты САВ, блок автоматического обнаружения и распознавания наночастиц БАОР, цифро-аналоговые преобразователи ЦАП1 – ЦАП6, высоковольтные усилители ВВУХ, ВВУУ напряжения по осям X, Y, три последовательно расположенных изолированных друг от друга электрода Э1, Э2, Э3, сумматор С, фильтр низких частот ФНЧ. Блок БИТТ включает преобразователь ПТН ток-напряжение, аналого-цифровой преобразователь АЦП2, цифро-аналоговый преобразователь ЦАП4 и высоковольтный усилитель ВВУ туннельного напряжения. Блок БАУ включает цифро-аналоговый преобразователь ЦАП5, блок БАС адаптивного сближения образца Об с острием О и сигнальный процессор СП. Коммутатор К представляет собой многоканальный электронный коммутатор, управляемый сигнальным процессором и реализующий работу сканирующего туннельного микроскопа в трех режимах: грубого и точного цифрового регулирования, а также заострения острия О. Система активной виброзащиты САВ включает магнит М, основание Ос, магнитопровод МП, подвижную катушку ПК, установленную на датчике ускоре-

ния ДУ, упругую мембрану МБ, усилитель сигналов виброзащиты УСВ, аналого-цифровой преобразователь АЦП3, цифро-аналоговый преобразователь ЦАП6 и усилитель У. Блок автоматического обнаружения и распознавания БАОР наночастиц подключен к шине данных, соединяющей сигнальный процессор СП с блоком БРТ. СТМ работает следующим образом. Для сближения образца Об с острием О до возникновения туннельного тока используется шаговый пьезопривод 4.

После их сближения и установления заданного туннельного тока сканирующий туннельный микроскоп может работать в трех режимах. В первом режиме основной контур автоматического регулирования (цифровой отрицательной обратной связи) образуют: образец Об, туннельный промежуток, острие О, блок БИТТ измерения туннельного тока, сигнальный процессор СП и цифро-аналоговый преобразователь ЦАП5 блока БАУ адаптивного управления, сумматор С, высоковольтный усилитель ВВУЗ напряжения по оси Z и электрод Э3 точного пьезопривода ТП. При работе цифровой отрицательной обратной связи напряжение с выхода преобразователя ПТН ток-напряжение (пропорциональное величине туннельного тока) поступает через аналого-цифровой преобразователь АЦП2 в сигнальный процессор СП, где происходит его сравнение с заданным уровнем стабилизации, и, с учетом предшествующих отсчетов аналого-цифрового преобразователя АЦП2, изменяется напряжение на выходе цифро-аналогового преобразователя ЦАП5, задающее напряжение на электроде Э3 пьезопреобразователя ТП.

Задание весовых множителей позволяет легко модифицировать тип моделируемого программой сигнального процессора СП закона управления и подбирать оптимальную передаточную функцию цифровой отрицательной обратной связи. Данный режим позволяет «осматривать» большие площади со значительными перепадами высот рельефа исследуемой поверхности образца Об, но при этом разрешение вдоль координаты Z составляет несколько нанометров. Этот режим предназначен для начального исследования поверхности. Получив начальное топографическое изображение поверхности, можно выбрать нужный для исследования её участок и перейти на второй режим точного регулирования. В этом режиме работают два электрода Э1 и Э3, причем управляющее напряжение на электроде Э3 изменяет положение острия О, если управляющее напряжение, подаваемое на электрод Э1, выходит за за-

РАЗДЕЛ IV. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

данные пределы точного регулирования, которые оцениваются вычислителем БРТ с выхода сигнального процессора СП.

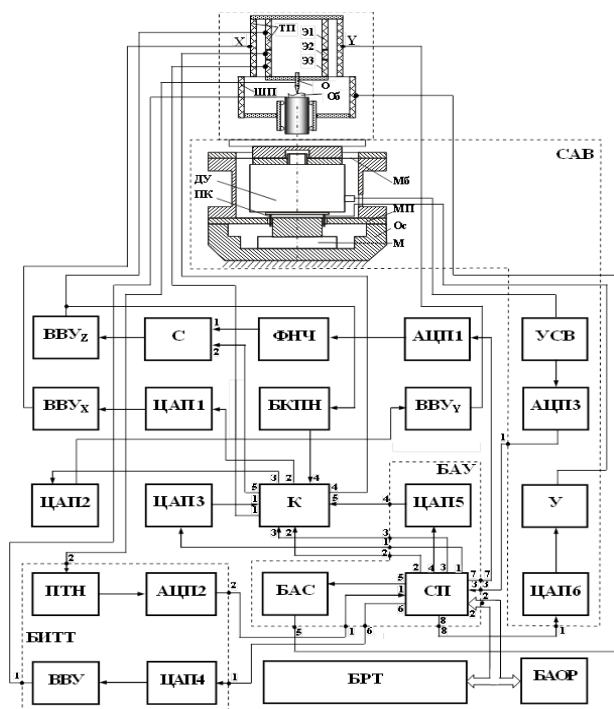


Рисунок 1 – Структурная схема СТМ для идентификации изображений наноструктуры поверхности

Контур цифрового точного автоматического регулирования образуют: образец Об, туннельный промежуток, острие О, блок БИТТ измерения туннельного тока, сигнальный процессор СП, цифро-аналоговый преобразователь ЦАП3 точного управления туннельным промежуток, электрод Э1 точного пьезопривода ТП. Использование блока БКПН компенсации пульсаций напряжения и второго электрода Э2 на пьезоэлементе координаты Z компенсирует перемещения острия О, вызванные пульсациями и возмущениями выходного напряжения высоковольтного усилителя ВВУZ по оси Z (подаваемого на электрод Э3) под действием нестабильности источников питания и внешних возмущающих воздействий.

При работе в первых двух режимах имеется возможность компенсировать температурные дрейфы микроскопа. Компенсация термодрейфа в плоскости X, Y образца обеспечивается осесимметричной конструкцией точного и шагового пьезоприводов. Роль точного компенсатора термодрейфа острия по оси Z выполняет дополнительная цепь регу-

лирования туннельного промежутка, образованная сигнальным процессором СП, цифро-аналоговым преобразователем термокомпенсации АЦП1, фильтром низких частот ФНЧ, сумматором С и усилителем ВВУZ.

Для сокращения времени получения изображения поверхности образца Об и повышения производительности туннельного микроскопа в данном устройстве использована нелинейная адаптивная развертка с прогнозированием Z-координаты в точке измерений. Для расширения интеллектуальных возможностей микроскопа используются алгоритмы прогнозирования с высокими адаптивными свойствами [1]. Данные алгоритмы обеспечивают высокую точность прогноза при изменении характера рельефа поверхности за счет формирования упреждающих сигналов управления на базе полученных прогнозных оценок. Прогнозирование позволяет реализовать прямой канал управления и повысить скорость отработки сигналов за счет исключения времени прохождения сигнала через объект регулирования и цепь обратной связи.

Идентификация СТМ-изображений

Автоматическое обнаружение и распознавание СТМ-изображений наночастиц осуществляется следующим образом. Полученное в режиме грубого сканирования с невысоким пространственным разрешением СТМ-изображение с выхода сигнального процессора СП передается в блок автоматического обнаружения и распознавания БАОР, в котором осуществляется обнаружение наночастиц путем выделения ее структурных элементов на основе сегментации по кривизне профилограмм СТМ-изображения, при этом вычисляются геометрические параметры частицы – ее центр и радиус [1]. Полученные данные передаются в сигнальный процессор СП и СТМ автоматически переходит в режим точного сканирования с высоким пространственным разрешением и с распознаванием обнаруженных наночастиц. Полученные в этом режиме СТМ-изображения наночастиц передаются в блок автоматического обнаружения и распознавания БАОР, где производится распознавание наночастиц с использованием аппарата нейронных сетей и нечеткой логики. В случае несоответствия полученных результатов распознавания заданным критериям осуществляется повторное сканирование выбранной наночастицы и ее распознавание. При этом СТМ используется в многокадровом режиме с перекрытием, в котором производится автоматическая координатная

ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НАНОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ

привязка зондирующего острия к системе координат, в которой снимались предыдущие кадры [2].

При использовании аппарата нейронных сетей реализуется нейронная сеть с многослойной структурой, в которой каждый нейрон произвольного слоя связан со всеми выходами нейронов предыдущего слоя или, в случае первого слоя, со всеми входами нейронной сети. Для обучения нейронной сети применяются такие методики, как методика обратного распространения ошибок и генетический алгоритм), после чего на выделенных участках СТМ-изображений, соответствующих наночастице, осуществляется ее начальная идентификация [3]. Результат распознавания представляется в виде вектора приоритетов, компонентами которого (после проведения нормировки) являются меры принадлежности распознаваемой частицы к одному из эталонных видов [4].

При применении аппарата нечеткой логики процесс идентификации распадается на четыре этапа. На первом этапе «фазсификации» вводится нечеткость на основе определения значений функций принадлежности для каждой из четких входных переменных, в качестве которых использованы значения высот дискретизированной СТМ-топографии локализованной наночастицы [5]. На втором этапе «логического вывода» находятся «уровни отсечения» функций принадлежности выходных переменных (выражающих интегральную степень «схожести» экспериментального и эталонного изображений наночастицы), после чего формируются нечеткие подмножества. На третьем уровне «композиции» все нечеткие подмножества объединяются в единое нечеткое множество с помощью операций максимума или сложения. На четвертом этапе «дефазсификации» набор нечетких выводов преобразуется в четкое число и осуществляется начальная идентификация наночастицы. Результаты распознавания (также, как и при применении нейронной сети) представляются в виде вектора приоритетов, подлежащего нормировке. [6].

Для окончательной идентификации СТМ-изображений наночастицы с применением аппарата нейронных сетей и нечеткой логики (синтеза обобщенного вектора принадлежности) использован метод анализа иерархий, широко применяемый в автоматизированных системах принятия решений. В соответствии с данным методом строится трехуровневая иерархия вида: уровень I – «результат распознавания»; уровень II – «применяемые методы» (нейронная сеть и аппарат нечеткой ло-

гики); уровень III – «возможные альтернативы» (эталонные образцы, имеющиеся в базе знаний). Для успешного применения метода анализа иерархий необходим вектор приоритетов используемых методов на уровне 2, который представляет собой численный результат сравнения применяемых методов распознавания. Компонентами данного вектора являются меры достоверности (точности) распознавания наночастиц при использовании каждого из методов, с последующим выполнением нормировки. Для синтеза обобщенного вектора принадлежности (компонентами которого являются меры принадлежности идентифицируемой частицы к одному из известных эталонных видов) выполняется усреднение соответствующих компонентов векторов приоритетов (полученных на этапах распознавания с применением нейронной сети и аппарата нечеткой логики) с весами-компонентами вектора приоритетов методов распознавания и с последующим выполнением нормировки. [7,8]

Активная система виброзащиты

С целью уменьшения помех на СТМ-изображении и, как следствие, для повышения эффективности автоматического распознавания наночастиц введена активная система виброзащиты САВ мембранного типа, содержащая мощный магнит М, вмонтированный в основание Ос, которое совместно с магнитопроводом МП концентрирует магнитный поток в его зазоре. Подвижная катушка ПК, расположенная в зазоре, связана с датчиком ускорения ДУ и с жестким центром закрепленной на опоре основания Ос упругой мембраны Мб, на которой установлена измерительная головка СТМ. Цифровая обратная связь системы активной виброзащиты САВ образована датчиком ускорения ДУ, усилителем УСВ, аналого-цифровым преобразователем АЦПЗ, сигнальным процессором СП, цифро-аналоговым преобразователем ЦАП6, усилителем У и подвижной катушкой ПК. Сигнал с датчика ускорения ДУ через усилитель УСВ, аналого-цифровой преобразователь АЦПЗ поступает в сигнальный процессор СП для фильтрации и формирования управляющего сигнала. Далее этот сигнал через цифро-аналоговый преобразователь ЦАП6 и усилитель У подается в подвижную катушку ПК, осуществляющую при протекании через нее электрического тока линейные перемещения и подавление виброакустических помех. Кроме того, применение сигнального процессора СП в системе активной виброзащиты позволяет для повышения надежности распознавания осуществлять интеллектуальное

РАЗДЕЛ IV. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

управление измерениями, оценивая уровень помех и приостанавливая СТМ-измерения на периоды времени с повышенным виброакустическим фоном.

Выводы

Предложенный интеллектуальный сканирующий туннельный микроскоп обеспечивает расширение функциональных возможностей за счет автоматического обнаружения (путем выделения структурных элементов нанообъектов на основе сегментации по кривизне СТМ-профилограмм) и распознавания СТМ-изображений нанообъектов с повышенной надежностью, обеспечиваемой использованием двух методов распознавания (аппарата нейронных сетей и нечеткой логики), а также посредством уменьшения шумов на СТМ-изображениях и приостановки измерений на периоды времени с повышенным виброакустическим фоном (путем введения системы активной виброзащиты).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гафаров М.Р. Контроль дисперсности наночастиц в СТМ-измерениях выделением структурных элементов их изображений [Текст] / М.Р. Гафаров, Е.Ю. Шелковников, П.В. Гуляев, А.В. Тюриков, С.Р. Кизнерцев // Ползуновский вестник. – 2011. – №3. – С. 118-124.
2. Шелковников Ю.К. Построение изображений поверхности при многокадровом режиме сканирующего туннельного микроскопа [Текст] / Ю.К. Шелковников, М.Р. Гафаров, П.В. Гуляев,

А.В. Тюриков, С.Р. Кизнерцев // Химическая физика и мезоскопия. – 2008. – Т. 10. – №4. – С.514-520.

3. Липанов А.М. Применение генетического алгоритма для обучения нейронной сети в задаче идентификации СТМ - изображений [Текст] / А.М. Липанов, А.В. Тюриков, А.С. Суворов, Е.Ю. Шелковников, П.В. Гуляев // Ползуновский вестник. – 2010. – №2. – С.217-221.
4. Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение [Текст] / В.А. Головкин. – М.: ИПР-ЖР, 2001. – с. 28-57.
5. Шелковников Ю.К. Методика автоматизированного построения функций принадлежности для оперативного распознавания СТМ-профилограмм [Текст] / Ю.К. Шелковников, А.В. Тюриков, М.В. Тарасов, П.В. Гуляев // Ползуновский вестник. – 2010. – №2. – С.84-88.
6. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети [Текст] / В.В.Круглов, М.И. Длин, Р.Ю. Голубов. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. – 224 с.
7. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети [Текст] / Т.Л. Саати. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 360 с.
8. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий [Текст] / Т.Л. Саати. – М.: Радио и связь, 1989. – 316 с.

Д.т.н., зав. лаб. Шелковников Е.Ю., к.ф.-м.н., с.н.с. Тюриков А.В., к.т.н., с.н.с. Гуляев П.В., к.т.н., с.н.с. Кизнерцев С.Р., студент Липанов С.И. – (3412) 21-89-55, iit@udman.ru - Институт прикладной механики УрО РАН.

УДК 620.171.33

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕРЕГУЛЯРНОГО МИКРОПОЛОСКОВОГО РЕЗОНАТОРА

Т.Д.Кочеткова, В.И. Суслиев, В.А. Журавлёв, Е.Ю. Корвин, Т.П.Соловьева

Представлены результаты измерения влажности почв мобильным прибором «Аквасенсор», построенном на основе нерегулярного микрополоскового резонатора. Приведены результаты измерений для нескольких видов почв Томской области. Прибор четко определяет переход воды в почве из связанного состояния в рыхлосвязанное и свободное. Отмечена зависимость показаний прибора от состава почвы.

Ключевые слова: влажность почв, связанная вода, нерегулярный микрополосковый резонатор, экспресс-метод.

Введение

Изучение влажности почв дает практически важную информацию для эффективного использования сельскохозяйственных угодий, проведения мелиоративных мероприятий; для выбора расположения радиорелейных станций. Традиционные почвенно - агрофизические методы отбора проб в длинномерных почвенных траншеях, а затем определе-

ния влажности сухо-весовым способом в лабораторных условиях, требуют значительных временных затрат и не позволяют получить результаты в режиме реального времени. Эту проблему можно решить применением радиоволновых методов.

Определение влажности в многофазных дисперсных средах, к которым относятся почвы, основывается на поглощении и рассе-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3/2, 2012