

КВАНТОВЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБРАЗОВ

В.М. Колешко, А.В. Гулай, В.А. Гулай

Белорусский национальный технический университет, кафедра «Интеллектуальные системы»
пр. Независимости, 65, г. Минск, Беларусь
телефон: + (375 17) 293-93-25; e-mail: altaj@tut.by

Проанализирована проблема создания интеллектуальных систем многомерного сенсорного контроля на основе процедур распознавания информационных образов. Показано, что одной из основных подсистем в устройствах интеллектуального контроля является массив сенсорных элементов с разной чувствительностью к измеряемым физико-химическим параметрам. Приведены результаты разработки и исследования квантовых наноструктур для интеллектуальных сенсорных систем распознавания информационных образов.

Ключевые слова – квантовые сенсорные наноструктуры, интеллектуальные сенсорные системы, распознавание информационных образов, генетический алгоритм оптимизации.

1 ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более широкое распространение получают технологии многомерного (многопараметрового) контроля, представляющие собой методы измерения некоторого множества параметров контролируемого объекта и формирования информационного образа данного объекта. Каждый из контролируемых параметров зависит от ряда свойств объекта, и на основе интеллектуальной обработки измеряемых сигналов определяется массив интересующих характеристик объекта. Измеренные составляющие общей последовательности тестовых сигналов воссоединяются в выбранных линейных или нелинейных комбинациях, обеспечивая получение определенных характеристик (информационных образов) на выходе.

Проблема создания систем многомерного сенсорного контроля обусловлена следующими обстоятельствами. Сенсоры, как правило, не реагируют только на отдельные признаки, а реагируют на совокупность разнообразных воздействующих факторов. Измеряемый сигнал вызывается несколькими воздействующими факторами, так как сенсоры обладают перекрестной чувствительностью относительно входных переменных величин. Путем измерения одного параметра нескольких чувствительных элементов сенсорной матрицы или нескольких параметров одной сенсорной системы можно разложить массив измеряемых сигналов в количества интересующих признаков.

При работе мультисенсорной системы, реализующей технологию многомерного контроля, возможны доста-

точно большие отклонения от линейной зависимости между входными и выходными величинами. Поэтому для получения корректной количественной информации требуются методы, позволяющие обрабатывать данные без априорного знания функциональных зависимостей между входными сигналами и выходными параметрами, то есть методы нелинейные и непараметрические. Особый интерес представляют системы, способные не только выполнять однажды запрограммированную последовательность действий с заранее определенными данными, но и самостоятельно анализировать вновь поступающую информацию, находить в ней определенные закономерности. В этой области приложений перспективны интеллектуальные сенсорные системы, состоящие из массива сенсоров и аппарата распознавания информационных образов, включающего набор искусственных нейронных сетей. В связи с изложенным важной представляется проблема создания массивов наносенсоров для многомерного контроля, в том числе на квантовых эффектах.

2 ТУННЕЛЬНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ОКСИДОВ

Для квантовых сенсорных наносистем получены структуры типа металл–диэлектрик–металл (МДМ) с туннельнотонким диэлектрическим слоем оксида РЗЭ (редкоземельного элемента), работа которых основана на туннелировании электронов через диэлектрик из одного металлического электрода и коллектировании их другим электродом [1]. Тонкие аморфные пленки оксидов РЗЭ получали методом реактивного магнетронного распыления металлических мишеней диаметром 95 мм и толщиной 10 мм на постоянном токе в среде аргона и кислорода [2]. Напряжение разряда магнетрона находится в пределах 400–440 В; давления рабочих газов выбирали равными: аргона – 1,25 Па, кислорода – 0,008 Па. Туннельные МДМ-контакты тестовых модулей образовывали пересекающиеся под прямым углом проводники с шириной 10; 100 мкм и 20; 40; 60; 80; 100 мкм, разделенные тонким слоем диэлектрика.

При толщине слоя оксида иттрия 5; 16 нм и площади МДМ-контакта $(0,2-10) \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$ напряженность поля пробоя структур составляет $(1-3) \cdot 10^6 \text{ В/см}$. Увеличение напряжения между электродами в пределах от 0,1 до 1,2–

1,5 В приводит к непрерывному возрастанию крутизны вольт-амперной характеристики с $(1,5-2,5) \cdot 10^{-8}$ до $(19-22) \cdot 10^{-8}$ А/В. При напряжении меньше критического значения проводимость сверхтонкого диэлектрика определяется эмиссией Шоттки, и вольт-амперная характеристика имеет вид $\ln(I) \sim U^{1/2}$, а при более высоких значениях напряжения наблюдается линейная зависимость между током I и напряжением U (рис.1). Сопротивление R МДМ-наноструктуры с увеличением напряжения на электродах сначала повышается до $(2,4-6,5) \cdot 10^7$ Ом, а затем плавно уменьшается до $(1,2-1,6) \cdot 10^7$ Ом.

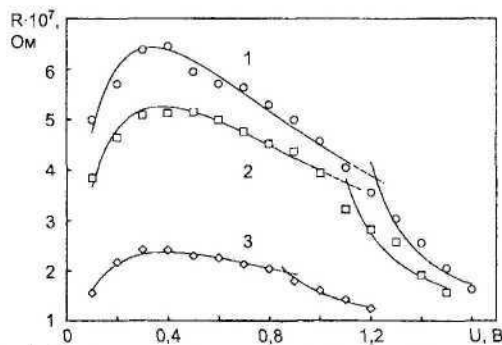


Рис.1. Зависимость сопротивления от приложенного напряжения туннельных сенсорных МДМ-наноструктур: 1 — толщина пленки $d=5$ нм, площадь МДМ-контакта $S=10^{-5}$ см²; 2 — $d=16$ нм, $S=10^{-5}$ см²; 3 — $d=16$ нм, $S=2 \cdot 10^{-5}$ см²

3 СЕНСОРНЫЕ МДП-НАНОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ФТОРИДОВ

На основе использования тонких пленок фторидов РЗЭ иттриевой подгруппы и арсенида галлия разработаны и изучены многослойные наноструктуры типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) и n -канальные нормально открытые МДП-транзисторы для сенсорных наносистем [4]. Для получения тонких пленок фторидов РЗЭ использовали эпитаксиальные структуры арсенида галлия n/n^{++} -типа проводимости с ориентацией (100), легированные теллуром. Пленки фтористого диспрозия, гольмия, иттербия и лютеция получали путем испарения порошков данных материалов на предварительно нагретые подложки до 293–623 К. Значения тангенса угла диэлектрических потерь для данных пленок лежат в диапазоне 0,002–0,09, диэлектрическая проницаемость имеет величину 6,7–10,6. Максимальные значения удельного сопротивления и электрической прочности равны соответственно $9,7 \cdot 10^{13}$ Ом·см (для фтористого диспрозия) и $1,8 \cdot 10^6$ В·см⁻¹ (для фтористого лютеция).

Зависимость плотности тока через МДП-наноструктуру от напряженности поля в диэлектрической пленке близка к линейной (рис.2). Для указанных МДП-наноструктур характерной особенностью является на порядок меньшее значение величины энергетической плотности поверхностных состояний у края зоны проводимости ($(10^{12}-10^{13})$ 1/эВ·см²) и в 2–3 раза меньшее значение в точке минимума U-образного их распределения

по ширине запрещенной зоны ($2,2 \cdot 10^{11}$ 1/эВ·см²) по сравнению с другими МДП-наноструктурами на арсениде галлия. МДП-нанотранзисторы с утопленным затвором на основе тонких пленок фторидов РЗЭ имеют максимальное значение удельной крутизны 54–210 мОм/мм, коэффициент усиления 7,2–8,4 дБ при минимальном коэффициенте шума 2,5–3,0 дБ на частоте 12 ГГц.

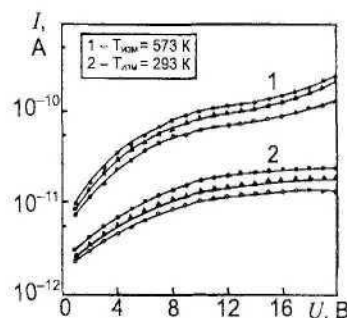


Рис.2. Вольт-амперные характеристики МДП-наноструктур на основе фторидов РЗЭ и арсенида галлия: черный кружок — температура подложки $T_{пл}=373$ К, толщина пленки $d=170$ нм; белый кружок — $T_{пл}=473$ К, $d=160$ нм; треугольник — $T_{пл}=573$ К, $d=160$ нм

4 ФОРМИРОВАНИЕ СЕНСОРНЫХ НАНОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ СИЛИЦИДОВ

Исследован процесс формирования многослойных наноструктур на основе тонких пленок силицидов РЗЭ, используемых в качестве активных элементов наносенсоров. Получение многослойной силицидной наноструктуры проводилось путем термообработки исходной системы тонких пленок аморфного кремния и РЗЭ (в частности, иттрия, диспрозия, тулия) с суммарной толщиной ~180 нм на кремниевой подложке $\alpha\text{Si-PZO-Si}$ [5]. В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния, легированного фосфором; их температура во время осаждения пленок не превышала 373 К. Выполнялась оптическая обработка наноструктуры в среде азота путем многократного воздействия импульсами излучения ксеноновых ламп длительностью 14 мс с плотностью энергии в импульсе ~44 Дж/см², а затем проводился дополнительный вакуумный отжиг в течение 30 мин при температуре 623 К.

Сопротивление получаемых многослойных наноструктур определяется выбором редкоземельного элемента и плавно снижается с увеличением числа оптических импульсов, что дает возможность регулировать электрические характеристики формируемых наноструктур (рис.3). Путем измерения вольт-амперных характеристик наноструктур изучен характер токопереноса в них: исходный образец демонстрирует выпрямляющие свойства при значительном последовательном сопротивлении; с увеличением количества импульсов от 10 до 70 контакт становится все более омическим, причем наблюдается некоторое различие прямого и обратного токов; последующий

вакуумный отжиг приводит к практически омическому характеру вольт-амперной характеристики.

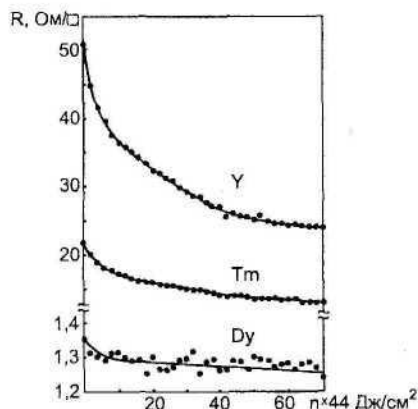


Рис.3. Зависимость сопротивления R наноструктуры α Si-P3Э-Si от числа импульсов n и оптического излучения

5 ПОЛУЧЕНИЕ СЕНСОРНЫХ НАНОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОНКИХ ВТСП-ПЛЕНОК

Для получения многослойных наноструктур с тонкими пленками высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) разработан процесс формирования распыляемых мишеней из кислородонесодержащих материалов – фторидов элементов, входящих в состав сверхпроводящих слоев [6, 7]. В случае получения пленок (РЗЭ)BaCuO используются мишени, содержащие, например, фторид РЗЭ, фторид бария и медь при соотношении между ингредиентами (0,766–1,218):1,837:1 (по массе). Смеси порошков предварительно измельчаются и гомогенизируются с помощью планетарной шаровой мельницы с халцедоновыми размольными шарами в течение 6–8 часов в гексане при скорости вращения 340 об/мин. Прессование распыляемых мишеней из фторидных соединений осуществляется методом импульсного нагружения при давлении 2–4 ГПа и скорости детонации $(2\text{--}5) \cdot 10^3$ м/с.

Тонкие ВТСП-пленки получали путем ВЧ-магнетронного распыления мишеней в среде аргона при давлении 0,13–2,66 Па и мощности колебаний 50–150 Вт. В качестве подложек использовались пластины титаната стронция при температуре 293 К. Длительность процесса осаждения пленок составляла 30 мин, толщина их достигала ~200 нм. Формирование сверхпроводящей фазы 1 2 3 проводилось путем отжига образцов в смеси азота с насыщенным водяным паром в течение 15–30 мин при температуре 973–1073 К и охлаждения в среде кислорода.

На основе сверхпроводящих пленок методом фотолиграфии изготавливались ВТСП-фотоприемники в виде зигзага с шириной полосы 200 мкм и размерами активной зоны 3×3 мм². Установлено, что тонкопленочные ВТСП-элементы стабильно переходят в сверхпроводящее состояние, температура перехода составляет ~82 К, ширина перехода не превышает 3 град. (рис.4). Критический

ток при 77 К – более 10^5 А/см², обнаружительная способность ВТСП-фотоприемника равна порядка 10^7 см·Гц^{1/2}/Вт.

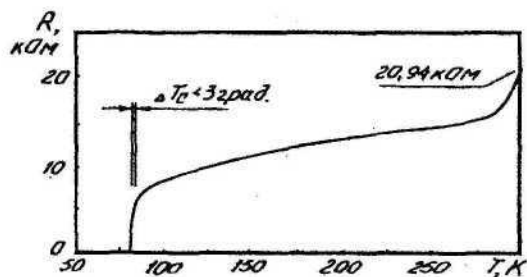


Рис.4. Зависимость сопротивления R фотоэлектрического ВТСП-преобразователя от температуры T

6 ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ КВАНТОВЫХ СЕНСОРНЫХ НАНОСТРУКТУР

В качестве объекта оптимизации выбран квантовый наносенсор космических микрочастиц, выполненный в виде МДМ-наноструктуры, на которую нанесен полимерный улавливающий слой [8]. Функция оптимизации разрабатывается с учетом требований формата выбранной среды разработки (MATLAB, GEATbx), а также ограничений, накладываемых на параметры модели квантового наносенсора. В данном случае стоит задача оптимизации конструктивно-технологических параметров наносенсора, сочетание которых наилучшим образом влияет на его отклик в виде изменения проводимости. Оптимизации подлежат: толщина диэлектрической пленки; удельная проводимость диэлектрика; его относительная диэлектрическая проницаемость; толщина полимерного слоя (мишени); плотность материала слоя-мишени; проводимость измерительной цепи; напряжение питания. При этом параметры МДМ-наносенсора, не подлежащие оптимизации, рассматриваются фиксированными. Причем возможна как оптимизация всех вышеперечисленных параметров одновременно, так и отдельных переменных из приведенного перечня, в этом случае незадействованные параметры также фиксируются.

В качестве критерия оптимизации принята максимизация величины ΔG_{max} с одновременной максимизацией длительности импульса роста проводимости $t_{0,7}$ на уровне $0,7\Delta G_{max}$. Это позволяет в процессе оптимизации учесть, что системе обработки информации на выходе моделируемого квантового наносенсора необходимо определенное время для анализа выходного сигнала. Задача при этом становится многокритериальной, а для многокритериальной оптимизации можно установить дополнительные «мягкие» целевые значения критериев оптимизации. Решения, лежащие ближе к таким значениям, являются более предпочтительными при их отборе.

Функция оптимизации квантового наносенсора написана на языке MATLAB и предназначена для выполнения

в тулбоксе GEATbx, являющемся универсальной реализацией генетического алгоритма. Сделан выбор следующих параметров работы генетического алгоритма: количество субпопуляций – 5; количество индивидуумов (для каждой субпопуляции) – 50, 30, 20, 20, 10; точность мутации (для вещественных чисел) – 24; визуализация проведения оптимизации многокритериальной задачи – каждые 10 популяций; визуализация промежуточных решений – каждые 10 популяций; вывод текстовой информации – каждые 5 популяций; тип завершения алгоритма – максимальное количество популяций + время оптимизации.

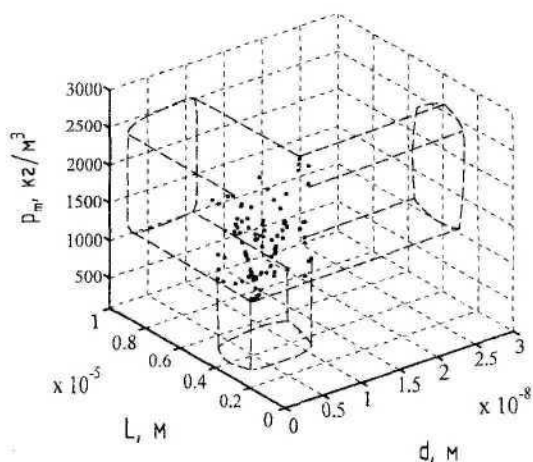


Рис.5. Объем решений в пространстве оптимизируемых параметров модели квантового наносенсора

В качестве результата выполнения задачи получен Парето-оптимальный фронт в пространстве критериев оптимизации (изменение проводимости ΔG , время $t_{0.7}$), то есть множество недоминирующих альтернативных решений. Отмечены решения, распределенные по Парето-оптимальному фронту, которые являются доминирующими по отношению к остальным значениям, лежащим вне фронта Парето. На рис.5 показано поле решений в пространстве оптимизируемых параметров модели квантового МДМ-наносенсора (d – толщина диэлектрической пленки, L – толщина полимерной мишени, ρ_m – плотность материала мишени). Поскольку задача оптимизации является многокритериальной, не существует одно наилучшее ее решение, напротив, можно выделить набор доминирующих решений задачи. Поле решений задачи оптимизации сконцентрировано в области значений оптимизируемых конструктивно-технологических параметров, при которых модель сенсорной наносистемы на выходе дает сигнал, максимально удовлетворяющий установленным критериям оптимизации.

7 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализирована проблема создания интеллектуальных систем многомерного сенсорного контроля при введении процедур распознавания информационных образов. Исследованы процессы формирования квантовых

наноструктур на основе редкоземельных соединений (оксидов, фторидов, силицидов и ВТСП-материалов) для интеллектуальных сенсорных систем. Разработаны конструкции и технологии получения наносенсоров на основе редкоземельных соединений для контроля различных физико-химических параметров. Выполнено аналитическое моделирование чувствительных к микроудару туннельных сенсорных МДМ-наноструктур. Определены параметры баллистического квантового МДМ-наносенсора для орбитального контроля высокоскоростных техногенных и метеороидных микрочастиц. Разработан генетический алгоритм оптимизации и установлен объем решений в пространстве оптимизируемых параметров модели квантового наносенсора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Колешко В.М., Гулай А.В., Гулай В.А. Туннельные МДМ-наносенсоры: стратегии и технологии моделирования / В.М. Колешко [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 9. – С. 46–52.
- [2] Колешко В.М., Гулай А.В., Гулай В.А. Получение туннельных сенсорных МДМ-наноструктур на основе оксидов РЗЭ / В.М. Колешко [и др.] // Теоретическая и прикладная механика. – 2007. – Вып. 22. – С. 287–296.
- [3] Гулай В.А. Электрофизические свойства туннельных сенсорных МДМ-наноструктур на основе оксидов РЗЭ / Гулай В.А. // Электроника-инфо. – 2007. – № 9. – С. 52–56.
- [4] Koleshko V.M., Gulay A.V. et. al. The properties of rare-earth fluoride thin films on GaAs substrates for possible MIS use / Koleshko V.M. [et. al.] // Vacuum. – 1990. – Vol. 40. No. 6. – P. 517–520.
- [5] Колешко В.М., Гулай А.В., Гулай В.А. Формирование сенсорных наноструктур на основе силицидов РЗЭ с использованием импульсного оптического излучения / В.М. Колешко [и др.] // Матер. междунар. научной конф. «Физико-химические основы формирования и модификации микро- и наноструктур», 10–12 октября 2007 г., Харьков. – 2007. – С. 29–31.
- [6] Колешко В.М., Гулай А.В. и др. Способ получения мишеней для осаждения ВТСП-пленок / В.М. Колешко [и др.] // Патент РФ № 2064717. – Бюл. № 21. – 1996.
- [7] Koleshko V.M., Gulay A.V. et. al. Fluoride Compound Targets for the Sputter Deposition of Thin Films of High- T_c Superconductors / Koleshko V.M. [et. al.] // Technical Physics Letters. – 2006. – Vol. 32. No. 2. – P. 158–160.
- [8] Колешко В.М., Гулай А.В., Гулай В.А. Квантовый наносенсор для контроля космических микрочастиц / В.М. Колешко [и др.] // 19-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009). Севастополь, 14–18 сентября 2009 г.: материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2009. – С. 631–632.