

УДК 621.315.55 / .58 : 538.945

## МАТЕРИАЛЫ И КОМПОНЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ И СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ ТЕХНИКИ. ТЕХНОЛОГИЯ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

Л.М. ЛЫНЬКОВ, В.А. БОГУШ, Т.В. БОРБОТЬКО, Н.В. НАСОНОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220027, Беларусь**Поступила в редакцию 24 января 2014*

Изложены основные результаты разработки и исследования новых материалов, компонентов и элементов наноэлектроники, микроэлектроники и радиоэлектроники. Приведены оригинальные достижения в области сверхпроводниковой электроники, наноструктурированных материалов для сверхбольших интегральных схем (СБИС), золь-гель методов формирования изоляционных слоев на основе оксидов тугоплавких металлов, осаждения пленок из СВЧ-плазмы металлов, технологии создания широкодиапазонных экранов электромагнитного излучения и технических средств подавления акустических сигналов.

*Ключевые слова:* сверхпроводниковая электроника, СБИС, наноструктурированные материалы, золь-гель метод, экраны электромагнитного излучения, защита информации от утечки по техническим каналам.

### Введение

Разработка и исследования технологии создания элементов сверхпроводниковой электроники, элементов микросхем различного назначения начаты в МРТИ–БГУИР в начале 1972 г. Работы проводились в рамках отдельных хозяйственных работ, международных проектов, госбюджетных договоров. Проводились исследования по использованию новых технологий обратной (взрывной) фотолитографии для формирования рельефа тонких пленок, процессов наноразмерного формирования элементов микросхем, специального оборудования для формирования различных слоев тонких пленок. Результаты разработанных технологических процессов использовались в том числе и для создания средств электромагнитного и акустического экранирования. В результате защищены докторские диссертации Лыньковым Л.М. (1994 г.), Прищепой С.Л. (1996 г.), Богушем В.А. (2007 г.), Борботько Т.В. (2010 г.). Исследования проводятся в рамках проектов МАГАТЭ, НАТО, «Интас», фонда фундаментальных исследований РБ, программ Союзного государства, Государственных программ РБ, международных хозяйственных договоров. Кандидатские диссертации по указанной выше тематике защитили Столер В.А., Соловьев В.В., Машара Г.Г., Жданович В.М., Захаров В.А., Прудник А.М., Молодечкина Т.А., Колбун (Насонова) Н.В., Таболич Т.Г., Пулко Т.А., Казека А.А., Петров С.Н., Зельманский О.Б., Терех И.С., Маликов В.В., Криштопова Е.А., Фан Ньят Занг, Нгуен Ван Хай, Каван Джамаль Масуд, Кред Хуссейн Мохамед, Абдулькабер Хамза Абдулькадер, Фархат Али Саадали, Аль-Хатми Мохаммед Омар, Альлябад Хуссейн Мохаммед, Мохаммед Шакер Махмуд, Омер Джамал Саад.

### Элементы и структуры сверхпроводниковой электроники [1–3]

Использование различных плазменных процессов в технологии криоэлектронных интегральных микросхем (КИМС) позволяет значительно снизить температуру формирования тонких пленок высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), получать

высококачественные изолирующие слои, в том числе и сверхтонкие, на поверхности сверхпроводников. Такое разнообразие возможностей использования плазменных процессов в технологии криомикроэлектроники потребовало проведения дополнительных исследований для детального изучения взаимодействия потока осаждаемого материала с различными микрорельефами, содержащими как диэлектрические, так и металлические фрагменты. Плотные оксидные пленки могут использоваться в качестве межслойной и межуровневой изоляции КИМС, а также для формирования областей собственных слабых связей с субмикронными размерами. Анодные оксидные пленки диоксида циркония представляются весьма перспективным материалом для использования в качестве буферных (барьерных) покрытий ВТСП-КИМС, поскольку позволяют использовать высокие адгезионные свойства тонких пленок циркония к различным подложкам в сочетании с такими преимуществами электрохимического анодирования, как его селективность и воспроизводимость режимов.

Предложен и разработан весьма перспективный для криомикроэлектроники метод формирования в сверхпроводнике микронеоднородностей субмикронных размеров для создания искусственных центров пиннинга за счет использования процессов управляемого локального растворения тонких пленок и подложек в процессе их электролитического анодирования.

Разработаны методы анодной обработки подложек и тонких пленок в сочетании с процессами травления для формирования микронеоднородностей в виде множественных микроострийных структур. Показано, что разработанные процессы позволяют получать до 4000 микроострий на  $1 \text{ мкм}^2$ . С использованием процесса пористого окисления двухслойной системы Nb/Al разработана методика формирования микроострий с высотой до 0,3 мкм за счет получения в порах  $\text{Al}_2\text{O}_3$  окислов ниобия по форме пор.

Предложены методики и проведено определение степени регулярности (упорядоченности разложения) микронеоднородностей субмикронных размеров для оценки возможностей технологии. На первом этапе для оценки регулярности расположения структур на плоскости использовалась одна скалярная величина – расстояние между соседними элементами (их геометрическими центрами). Второй этап заключался в противоположной операции – расширении (дилатации) их геометрических центров, что реализуется на анализаторах изображений. Для экспериментального решения данной задачи использовали текстурно-анализирующую систему Leitz-TAS (ФРГ) с программируемым блоком анализа изображений. Система имеет гексагональный растр памяти изображения и структурирующий элемент в виде минимального шестиугольника. С использованием разработанной методики исследовано распределение между микрочастицами (до 500 микрочастиц).

В зависимости от концентрации компонентов получали беспористые слои  $\text{ZrO}_2$  толщиной 0,04...0,5 мкм. Методами рентгеновской дифрактографии изучено влияние модификаторов Ca, Mg или Y на механические образования  $\text{ZrO}_2$  кубической или моноклинной модификации. Показано, что присутствие стабилизаторов в количестве 10 мол. % приводит к преимущественному формированию кубического диоксида циркония в интервале температур отжига 500...900 °С.

Изучена структура слоев  $\text{ZrO}_2$ , синтезируемых на монокристаллическом кремнии с применением фотонного отжига. Сформированы беспористые слои кубического  $\text{ZrO}_2$  при температурах 500...700 °С и импульсном нагреве за 2 и более секунд, при 800...1000 °С за время 1 с. Установлено, что при импульсном фотонном отжиге наблюдаются более низкие значения микродеформации поверхностных слоев монокристаллической подложки. При этом величина микродеформации решетки кремния не зависит от температуры отжига. Разработана методика получения кубического  $\text{ZrO}_2$  со степенью текстурированности до 99,8 %. В случае разбавления базовых (0,1 М) растворов алкоголятов циркония, на поверхности подложек формируется сверхтонкая (1...5 нм) пленка, получение на которой последующих слоев  $\text{ZrO}_2$  позволяет изменять их кристаллографические характеристики.

Углубленное изучение термодеструкции тонких пленок олова в процессе его низкотемпературной термообработки (<13 °С) позволило решить вопрос о селективном удалении пленки олова без применения химических травителей. В основу исследований положен общеизвестный фазовый переход  $\beta\text{-Sn} \rightarrow \alpha\text{-Sn}$ , сопровождающийся изменением плотности олова и, как следствие, увеличением его объема, превращением в порошкообразное

состояние. Анализ литературных источников позволил установить основные экспериментальные условия проведения процесса, одним из которых является использование катализаторов – порошка  $\alpha$ -Sn или гексахлорстанната олова.

Анализируя процессы взаимодействия металла с водородом, сформированы основные условия его разрушения (охлаждения). Многие металлы в обычных условиях инертны к молекулярному водороду, однако с повышением температуры ряд металлов (Pb, Ti, Zr, Nb, Ta) начинает поглощать водород, в результате чего происходит непрерывное расширение их кристаллической решетки с последующим разрушением при образовании гидрида.

Экспериментальное изучение процессов влияния режимов гидрирования при различных температурах на структурные свойства пленок циркония и титана проводили методами рентгенографического анализа и сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что с повышением температуры происходит увеличение локально расположенных участков гидридной фазы и при температуре 500 °С в течение 15 мин пленки Ti и Zr полностью переходят в их гидриды TiH<sub>x</sub> и ZrH<sub>x</sub> и отделяются от подложки. Установлено, что температура деструкции и перехода пленок циркония в гидрид снижается до 300 °С при легировании пленок Zr никелем до 1 %, что является весьма перспективным для использования процесса в технологии обратной литографии.

С точки зрения снижения температуры процессов обратной литографии исследованы и установлены режимы удаления тонких пленок Nb, Ti, Zr при отжиге в водороде маскирующих рельефов на их основе при температуре от 200 до 600 °С в течение 15...150 мин.

При разработке технологии формирования мостиков переменной толщины использовали метод скрайбирования в сочетании с разработками в области изучения свойств термически окисленных металлов. Основная предложенная конструктивно-технологическая схема состоит в следующем. На подложке селективного травления тонкой пленки Ta или Nb формируется необходимый ее рельеф и проводится термическое окисление. Поверх сформированного рельефа осаждается слой сверхпроводника (Nb). Пленка ниобия перерезалась резцом перпендикулярно канавке. Таким образом изготавливали мостики шириной 1,5...5 мкм и длиной 0,5...1 мкм. Разработанная методика позволяет с увеличением толщины окисляемой пленки получать субмикронные размеры ширины мостика (канавок) за счет объемного роста металла при его окислении.

В основу разработки базовых процессов обратной литографии положено углубленное изучение процессов термического окисления рельефа тонких пленок тугоплавких металлов, что позволило при определенных условиях разрушать окисел с превращением его в порошкообразное состояние. Использование такого материала в качестве маски позволяет проводить операцию обратной литографии отжигом в среде кислорода на воздухе при температурах 500 °С в течение 1...2 ч при толщине маски 0,2...0,4 мкм. Термическое окисление таких масок при повышенном давлении окислительной атмосферы (2...10 атм.) позволяет снизить нижний предел толщины тугоплавкого металла до 0,05 мкм, что также способствует улучшению качества края за счет более тонкого измельчения оксида.

Исследован процесс обратной литографии по тонким пленкам алюминия для создания рельефа тонких пленок оксидов тугоплавких металлов. Взрывное удаление Al производили с использованием ультразвука, применение которого позволило эффективно удалить остатки маски с обрабатываемой поверхности подложки.

#### **Наноструктурированные материалы элементов СБИС [4]**

На основании проведенных электрохимических исследований процесса химического осаждения серебра с вольфрамом установлено, что формирование покрытия происходит одновременно по химическому и электрохимическому механизмам при взаимном влиянии анодной и катодной стадий процесса, выражающемся в замедлении скорости осаждения. Показано, что скорость осаждения лимитируется диффузией анодного и катодного реагентов и скоростью анодного процесса. Установлен каталитический эффект вольфрамата натрия в бензоатном электролите и уточнен его ингибирующий эффект в аммиачно-ацетатном растворе, обусловленный участием вольфрамсодержащих соединений в реакциях комплексообразования и сорбционных процессах на покрываемой поверхности, приводящих к изменению ее

потенциала, что позволяет варьировать скорость осаждения покрытий «серебро-вольфрам» в диапазоне 0,1...2,0 нм/с.

Установлено, что в результате осаждения пленок «серебро-вольфрам» формируются поликристаллические покрытия, состоящие из кристаллических зерен серебра с параметрами решетки  $4,086 \pm 0,002 \text{ \AA}$ , на границах которых локализованы соединения вольфрама с кислородом и серебром. Максимальная концентрация вольфрама в покрытиях не превышает 3 ат.%, при этом концентрация вольфрама на границах зерен составляет около 15 ат.%. Показано, что концентрация вольфрама в покрытии выше на границе раздела «пленка–подложка», что связано с каталитической активностью центров кристаллизации и наличием индукционного периода реакции, в течение которого происходит адсорбция вольфрамсодержащих комплексов на подложке. Удельное электрическое сопротивление  $\text{Ag(W)}$  покрытий толщиной 50...100 нм на подложках диоксида кремния находится в диапазоне 10...50 мкОм·см и снижается более чем в 2 раза после вакуумного отжига при температуре 100...350 °С.

Предложена и разработана феноменологическая модель формирования сверхтонких слоев серебра с вольфрамом, описывающая изменение их электрического сопротивления с учетом термохимических процессов и массопереноса на поверхности и границах зерен покрытий. Модель учитывает наличие проводящих кластеров серебра и узких глубоких каналов между ними, что позволяет описывать покрытия с высоким (несколько десятков мкОм·см) удельным электрическим сопротивлением и его изменение при низкотемпературном (100...300 °С) отжиге. Экспериментально определено значение энергии активации процесса снижения удельного электрического сопротивления покрытий, равное 0,19 эВ, и предложен механизм уменьшения количества поверхностных дефектов (снижения открытой пористости) под действием сил поверхностного натяжения за счет перемещения атомов серебра, что позволяет достоверно описывать электрические свойства тонких  $\text{Ag(W)}$  пленок.

Разработаны составы водных растворов, установлены и оптимизированы параметры формирования на поверхности оксида кремния покрытий из серебра с вольфрамом с удельным электрическим сопротивлением  $10 \pm 1,5$  мкОм·см при толщине 50...100 нм и повышенной до 350 °С температурной стабильностью по сравнению с серебряными покрытиями. Впервые предложено использовать бензойную кислоту в качестве комплексообразователя и установлен диапазон концентраций вольфрамата натрия (5...10 г/л), что необходимо для получения высокостабильных растворов осаждения покрытий «серебро-вольфрам». Установленные закономерности формирования на диэлектрических подложках с развитой поверхностью тонкопленочных слоев  $\text{Ag(W)}$ , удельное электрическое сопротивление которых составляет  $2,2 \pm 0,2$  мкОм·см, позволяют рекомендовать использование разработанных процессов для изготовления межэлементных соединений интегральных микросхем с проектными нормами 70...250 нм и проводящих покрытий для устройств биоэлектроники (рис. 1).

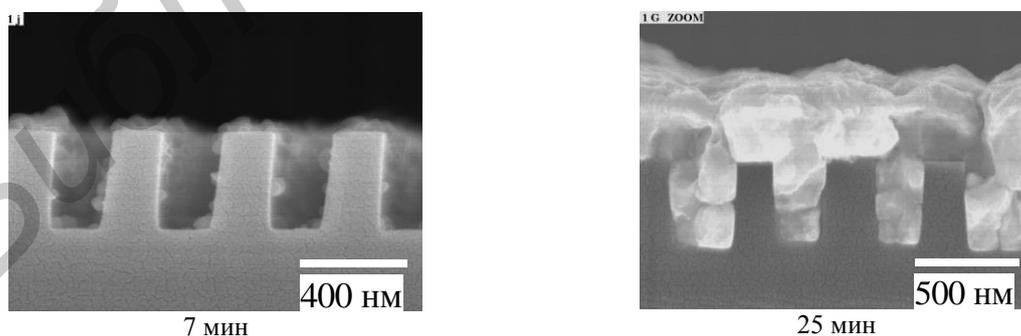


Рис. 1. Стадии формирования межэлементных соединений микросхем в оксиде кремния при осаждении  $\text{Ag(W)}$  из аммиачно-ацетатного электролита

Электрохимические исследования химического осаждения покрытий  $\text{Co(W,B)}$ , проведенные методом анализа парциальных реакций восстановления металла и окисления восстановителя, позволили установить электрохимический механизм процесса, характеризующийся значениями смешанного потенциала ( $-890 \dots -1005$ ) мВ относительно

хлорсеребряного электрода и тока реакции 1,85...11,8 мА/см<sup>2</sup> при температуре 75...80 °С и рН = 9,5...9,6. Показано, что увеличение концентрации восстановителя (диметиламиноборана) от 0,02 до 0,14 М, рН (8...10) или температуры (60...85 °С) раствора приводит к смещению смешанного потенциала в область отрицательных значений и увеличению скорости реакции по линейному закону, что обусловлено влиянием процесса окисления восстановителя. Скорость процесса осаждения также определяется формируемым комплексом кобальта и концентрацией вольфрама и варьируется в диапазоне 0,44...4,0 нм/с.

Установлены особенности структуры покрытий Co(W,B) и Co(W,P,B), характеризующейся наличием нанокристаллитов кобальта, которые трансформируются в ГЦК решетку вакуумным отжигом при температуре 550...650 °С. Увеличение концентрации бора в покрытии приводит к формированию пленок с рентгеноаморфной структурой, содержащих бориды кобальта. Электрические свойства покрытий из сплавов кобальта с примесями вольфрама, бора, фосфора характеризуются величиной удельного электрического сопротивления около 10<sup>-4</sup> Ом·см, свойственной нанокристаллическим материалам, которая снижается до 2·10<sup>-5</sup> Ом·см после вакуумного отжига при 550 °С.

Показано, что при увеличении толщины покрытий «серебро-вольфрам» от 50 нм до 120 нм происходит увеличение коэффициента отражения от 0,74±0,05 до 0,85±0,05, а вакуумная термообработка покрытий при 350 °С улучшает их оптические характеристики за счет улучшения структуры и состояния поверхности, увеличивая коэффициент отражения до величины 0,92±0,05, что обуславливает перспективность применения покрытий Ag(W) в качестве оптически отражающих элементов волноведущих систем, интегральных и микроэлектромеханических устройств и декоративных слоев.

Предложена методика, разработаны составы водных растворов и определены параметры (рН = 9...10, T = 70...85 °С) процесса селективного химического осаждения тонкопленочных покрытий из сплавов кобальта с вольфрамом, бором и фосфором на поверхность меди, использующего для ее активации предварительную обработку в растворе борсодержащего восстановителя, что позволяет формировать без дополнительных литографических операций сверхтонкие (10...20 нм) защитные слои для встроенных в диэлектрик медных межэлементных соединений, отличающихся повышенной более чем в 10 раз стабильностью электрических характеристик при отжиге при 250 °С. Показано, что стойкость к окислению защитных покрытий прямо пропорциональна их толщине и ухудшается при увеличении содержания в них вольфрама более 10 ат. %. Методом ВИМС профилометрии показано, что наилучшими барьерными свойствами по отношению к диффузии меди обладают покрытия Co(W,B), суммарная концентрация примесей вольфрама и бора в которых составляет 10...13 ат. %, а их высокая эффективность обеспечивается снижением скорости диффузии по границам зерен за счет формирования рентгеноаморфной или нанокристаллической структуры (рис. 2).

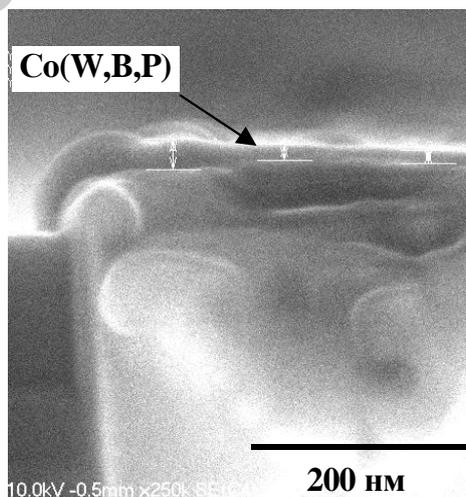


Рис. 2. Стадии формирования межэлементных соединений микросхем в оксиде кремния при осаждении Ag(W) из аммиачно-ацетатного электролита

### Материалы для экранов ЭМИ и их применение [5–13]

Разработанные методы модифицирования волокнистых и порошкообразных диэлектриков с развитой поверхностью и установленные режимы процессов сорбции и восстановления ионов металлов из водных растворов позволяют формировать наноструктурированные металлсодержащие композиционные материалы с удельным сопротивлением  $(0,1...50) \cdot 10^{-3}$  Ом·м, перспективные для использования в конструкциях электромагнитных экранов. Исследования взаимодействия никельсодержащих материалов, синтезированных с использованием палладиевой активации поверхности диэлектрика, с электромагнитным излучением (ЭМИ) в диапазоне частот 0,1 МГц...118 ГГц показали, что их эффективность экранирования электромагнитного излучения повышается с увеличением частоты и достигает значения 50 дБ, а его подавление обеспечивается в основном за счет отражения электромагнитной волны. Установлено, что в частотном диапазоне 0,1 МГц...118 ГГц эффективность экранирования никельсодержащих материалов, синтезированных методом сорбции ионов никеля с последующим их восстановлением, изменяется от 10 до 40 дБ, из которых не более 10 дБ обеспечивается за счет поглощения электромагнитного излучения. Эффективность экранирования кобальтсодержащих материалов не превышает уровня 5 дБ на частотах до 25 ГГц и увеличивается с повышением частоты. Экспериментально показано, что такие материалы обладают коэффициентом отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2...118 ГГц, не превышающем –15 дБ. При этом частотная характеристика эффективности экрана из металлсодержащих волокон не зависит от поляризации электромагнитной волны и позволяет реализовать гибкие конструкции высокоэффективных широкополосных электромагнитных экранов, интегральных защитных панелей и защитных элементов для пользователей радиотехнических устройств и средств вычислительной техники, радиопоглощающих укрывных материалов, снижающих радиолокационную заметность наземных объектов не менее чем в 2,5 раза (см. рис. 3).

Установлено, что использование никель- и кобальтсодержащих порошкообразных материалов (силикагель, шунгит) для создания однослойных конструкций экранов ЭМИ приводит к увеличению их коэффициента отражения с –12,2...–14,2 дБ до –8,9...–10,3 дБ для силикагеля и с –5...–5,8 дБ до –1,8 дБ для шунгита в диапазоне частот 8...12 ГГц вследствие повышения их электрического сопротивления. Воздействие пламени на композиционные материалы с порошкообразным наполнителем (силикагель) приводит к снижению на 0,5...0,7 дБ значений их ослабления и коэффициента отражения в радиочастотном диапазоне длин волн вследствие деструкции покрытия.

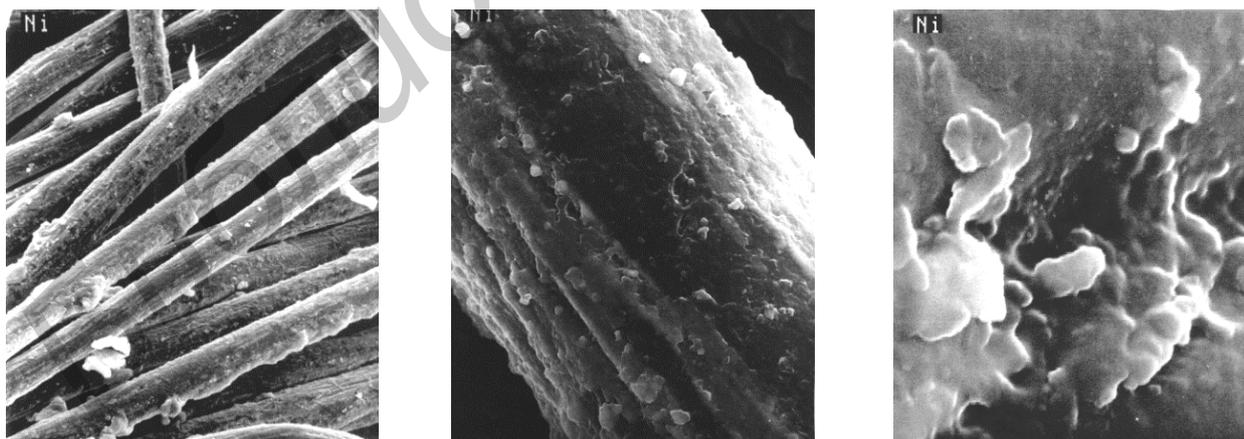


Рис. 3. Внешний вид модифицированных волокон ПАН с кластерами никеля, полученными по сорбционной технологии

Получены порошкообразные материалы с необходимым значением коэффициента отражения ЭМИ за счет их модифицирования методами термической обработки и селективного химического травления. Показано, что значения коэффициента отражения в радиочастотном диапазоне модифицированных материалов зависят от режимов термообработки и уменьшаются при увеличении температуры с 200 °С до 500 °С. Так, например, термообработка при

температурах до 500 °С и времени до 60 мин обеспечивает снижение коэффициента отражения порошкообразного шунгита с  $-5,2$  до  $-7,5$  дБ при одновременном увеличении значения ослабления с  $9,2...9,5$  до  $16,2$  дБ, а селективное химическое травление его поверхности в течение 1 ч приводит к увеличению коэффициента отражения с  $-5...-5,8$  дБ до  $-2,1...-2,3$  дБ при одновременном росте ослабления с  $9,5$  до  $22$  дБ в диапазоне частот  $8...12$  ГГц. Предложенный процесс термообработки можно использовать и для модифицирования других порошкообразных материалов, таких, например, как диоксид титана или диоксид циркония.

Предложено использовать водные растворы в качестве сред, поглощающих ЭМИ. Показано, что их инкорпорирование в межволоконное пространство капиллярно-пористых материалов влияет на коэффициент отражения последних в зависимости от концентрации и состава жидкостного наполнителя и свойств капиллярно-пористой матрицы. Снижение коэффициента отражения таких материалов возможно за счет формирования на их поверхности или поверхности жидкостного наполнителя (за счет специальной конструкции экрана) упорядоченных геометрических неоднородностей. Установлено, что формирование на поверхности жидкостных наполнителей (водного раствора хлорида натрия, водного раствора этиленгликоля, воды) геометрических неоднородностей в форме усеченных пирамид, расположенных в шахматном порядке, высотой 3 мм, размером основания  $5 \times 5$  мм и расстоянием между их центрами 10 мм за счет введения в конструкцию формообразующих элементов, приводит к снижению коэффициента отражения до  $-17...-27$  дБ в диапазоне частот  $27...36$  ГГц. Создание на поверхности экранов ЭМИ, выполненных на основе волокнистых материалов (ПАН), геометрических неоднородностей в форме гофров высотой 3 мм и расстоянием между их центрами 5 мм приводит к снижению коэффициента отражения с  $-3,9...-7,5$  дБ до  $-22$  дБ в диапазоне частот  $80...117$  ГГц. Получение требуемого значения коэффициента отражения экранов ЭМИ, выполненных на основе порошкообразных материалов, возможно за счет использования различных типов таких материалов, а также за счет выбора состава растворного наполнителя, инкорпорированного в них.

Изучены оптические свойства материалов, полученных методом химического осаждения металлов на пористые волокнистые и порошкообразные диэлектрические матрицы в диапазоне длин волн  $440...800$  нм. Показано, что СКЯ и степень их поляризации зависят от типа используемой подложки, количества осаждаемого металла, размеров микрокристаллитов и неоднородностей поверхности. Спектрально-поляризационные имитаторы на основе волокнистого ПАН характеризуются значениями СКЯ не более 0,14 при степени поляризации не более 0,5 в диапазоне длин волн  $440...800$  нм. Металлосодержащие спектрально-поляризационные имитаторы на основе кобальтсодержащего силикагеля обладают СКЯ  $0,2...0,7$ , который возрастает с длиной волны при одновременном снижении степени поляризации с 0,14 до 0,01, а никельсодержащий силикагель характеризуется СКЯ  $0,3...0,64$ , при этом данный материал практически не поляризует свет в диапазоне длин волн  $440...800$  нм. Значение СКЯ для спектрально-поляризационных имитаторов на основе порошкообразного шунгита не превышает 0,09 при степени поляризации не более 0,45 в диапазоне длин волн  $440...800$  нм. Для них наблюдается увеличение СКЯ и степени поляризации с ростом угла наблюдения.

Пропитка жидкостными наполнителями пористых диэлектрических матриц позволила обеспечить снижение СКЯ и деполаризацию отраженного света влагосодержащим материалом. Пропитка водой синтетических волокон (ПАН) и формирование на их основе спектрально-поляризационных имитаторов приводят к снижению их СКЯ с 1,2 до 0,8 при одновременном уменьшении степени поляризации с 0,2 до 0,13 в диапазоне длин волн  $440...800$  нм. Установлено, что применение водных растворов для пропитки пористых диэлектрических матриц, например волокнистого ПАН, позволяет изменять показатель преломления ее поверхности, что приводит к снижению зависимости СКЯ матрицы от угла визирования (40 %-ый водный раствор этиленгликоля) и обеспечивает перераспределение ее яркости в углах наблюдения от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  (10 %-ый водный раствор хлорида натрия).

Предложено создавать конструкции спектрально-поляризационных имитаторов на основе компонентов природных сред (сухие листья, торф и песок), что позволяет воспроизводить СКЯ и степень поляризации природных сред такими конструкциями. Установлено, что введение в них порошкообразного силикагеля не ухудшает их оптические

свойства, а позволяет получать широкодиапазонные однослойные экраны ЭМИ, функционирующие в видимом и радиочастотном диапазонах. Получение необходимых значений СКЯ и степени поляризации данных материалов обеспечивается за счет варьирования показателя преломления связующего. Установлено, что использование прозрачных связующих веществ (силикон) при их концентрации до 50 масс. % в конструкциях спектрально-поляризационных имитаторов на основе молотого сухого лавра позволяет получить значения контрастов по яркости до 0,42 и степени поляризации до 0,25 в диапазоне длин волн 440...800 нм на фоне зеленых насаждений. Понижение температуры воздуха до  $-27^{\circ}\text{C}$  вызывает уменьшение интенсивности отраженного света не более чем на 0,006 для влагосодержащих материалов (волокнистый ПАН, пропитанный 10 %-ым водным раствором NaCl) и на 0,03 для композиционных материалов (на основе молотого сухого лавра) в диапазоне длин волн 400...1100 нм. Пропитка волокнистых материалов (ПАН) 10 %-ым водным раствором хлорида натрия способствует уменьшению яркости исходного материала до 0,01...0,18 при углах визирования  $0...60^{\circ}$  в диапазоне длин волн 250...400 нм. Показано, что композиционный материал на основе молотого лавра характеризуется значениями яркости, варьируемыми в пределах 0,02...0,07, которые уменьшаются при увеличении угла визирования с  $0^{\circ}$  до  $60^{\circ}$  в диапазоне длин волн 250...400 нм.

### **Построение систем защиты информации от утечки по техническим каналам [8, 11, 14-16]**

Разработаны научные основы построения пассивных систем защиты информации, включающие:

- принципы построения, содержащие набор обоснованных требований к основным техническим характеристикам компонентов системы, использованию композиционных материалов, обладающих определенным сочетанием физических и технологических характеристик, отличающихся широкодиапазонностью и многоуровневостью построения защитных барьеров, адаптируемостью под мощность воздействия электромагнитного излучения более 100 Вт и многофункциональностью, что позволяет обеспечить устойчивое функционирование пассивных систем защиты информации с заданными показателями эффективности в соответствующих диапазонах длин волн и использовать их для решения широкого круга проблем;

- подобие построения систем защиты информации и систем защиты от обнаружения вооружения, военной и специальной техники средствами дистанционного зондирования, учитывающих одинаковые выполняемые ими функции, что позволяет обеспечить их однотипное многоуровневое построение и унификацию для различных применений;

- методику построения многоуровневых систем защиты информации, основанную на одновременном учете взаимодействия электромагнитного излучения ультрафиолетового, видимого, ближнего ИК (180...1500 нм), среднего, дальнего ИК (3...5, 8...12 мкм) и радиочастотного (0,7...142,5 ГГц) диапазонов с широкодиапазонными экранами электромагнитного излучения, интегрированными в единую конструкцию, обеспечивающую построение защитных барьеров для блокирования электромагнитного, оптического и теплового каналов утечки информации по схеме «защищаемый объект/тепловой экран/радиопоглощающий материал/спектрально-поляризационный имитатор».

Для реализации предложенных принципов построения многоуровневых систем защиты информации разработаны конструкции экранов ЭМИ, обеспечивающие блокирование электромагнитного канала утечки информации.

Для формирования спектрально-поляризационных имитаторов, обеспечивающих блокирование оптического канала утечки информации предложена конструкция спектрально-поляризационного имитатора растительных сред, в которой используется молотый (размер фракций 9...104 мкм) сухой лист, равномерно распределенный в связующем веществе (например, силикон) в пропорции 1:1, которое наносится на полимерный материал (например, полиэтилен, полиэстер), что позволяет обеспечить контраст по яркости до 0,4 и по поляризации до 0,2 в диапазоне длин волн 400...700 нм данной конструкции и закрываемого ею объекта, размещаемого на фоне растительности.

Для блокирования тепловых каналов утечки информации предложены однослойные конструкции тепловых экранов на основе металлических и полимерных материалов со встроенным трубопроводом. Показано, что применение в них в качестве хладагента воды позволяет снизить температуру источника ИК излучения, закрываемого таким экраном, с  $+56^{\circ}\text{C}$  до  $+22^{\circ}\text{C}$  в течение 3 мин. Используются волокнистые материалы, в том числе влагосодержащие, для создания конструкций тепловых экранов. Показано, что применение комбинированного охлаждения водой и потоком воздуха теплового экрана, выполненного на основе влагосодержащих материалов, снижает его температуру с  $+47^{\circ}\text{C}$  до  $+26^{\circ}\text{C}$  в течение 6 мин.

Для снижения теплового контраста высокотемпературных объектов на фоне земной поверхности и блокирования теплового канала утечки информации разработана конструкция теплового экрана, выполненная на основе влагосодержащего (водный раствор соли щелочноземельного металла) капиллярно-пористого материала, покрытого слоем кристаллического гидрофильного полимера (полученного на основе поливинилацетата) и охлаждаемого воздушным потоком, что позволяет снизить температуру его поверхности с  $+27^{\circ}$  до  $+19^{\circ}\text{C}$  и обеспечить время функционирования при данных тепловых режимах не менее 40 мин.

Создана конструкция интегрированной защитной панели для блокирования электромагнитного и акустического каналов утечки информации, выполненная на основе двухкамерного стеклопакета, одна из камер которого заполняется оптически прозрачным раствором на основе воды, а на одну из поверхностей наклеивается проводящая полимерная оптически прозрачная пленка, что обеспечивает ослабление ЭМИ в диапазоне частот  $0,1 \dots 120$  ГГц не менее 15 дБ и звукопоглощение до 80 дБ в диапазоне частот  $125 \dots 8000$  Гц.

Разработаны устройства на основе влагосодержащих материалов для защиты пользователей от электромагнитного излучения сотовых телефонов, которые выполняются в виде барьеров с размером, кратным длине волны ЭМИ сотового телефона, размещаемых между сотовым телефоном и телом человека. Повышение эффективности таких устройств обеспечивается использованием трехслойных экранов ЭМИ, где в качестве внутреннего слоя применяется металлическая фольга (например, алюминий) или порошкообразный углеродсодержащий материал (например, шунгит). Разработанные устройства защиты предназначены для использования телефона совместно с проводной гарнитурой hands-free. Элементы данной гарнитуры можно разместить непосредственно в устройстве защиты или обеспечить прохождения акустических волн через защитный барьер за счет выполнения в нем отверстия, располагаемого напротив динамика. В последнем случае подавление ЭМИ, распространяющегося через данное отверстие, обеспечивается за счет его перекрытия по площади экраном ЭМИ, выполненным на основе металлической сетки с размером ячейки  $0,1 \dots 0,125$  мм (рис. 4).



а



б

Рис. 4. Внешний вид (а) и применение (б) устройств защиты от ЭМИ сотового телефона

# MATERIALS AND COMPONENTS FOR ELECTRONICS AND SUPERCONDUCTOR TECHNIQUE. TECHNOLOGY, PROPERTIES AND APPLICATION

L.M. LYNKOU, V.A. BOGUSH, T.V. BORBOTKO, N.V. NASONOVA

## Abstract

The main results of development and investigation of materials, components and elements for nanoelectronics, microelectronics and radioelectronics are reported. The original advances are summarized in the areas of superconductive electronics, nanostructured materials for VLSI, sol-gel techniques of isolating layers forming on the basis of hard-melting metallic oxides, metal SHF-plasma deposition of films, technologies of wideband electromagnetic shields forming and technical facilities of acoustic signals suppression.

## Список литературы

1. *Лыньков Л.М., Прищепка С.Л.* Субмикронная литография. Минск, 1999.
2. *Лыньков Л.М., Глыбин В.П., Богущ В.А. и др.* Технология формирования покрытий на основе окислов титана и циркония. Минск, 2001.
3. *Лыньков Л.М., Мухуров Н.И.* Микроструктуры на основе анодной алюмооксидной технологии. Минск, 2002.
4. *Богущ В.А.* Технология и свойства химически осажденных тонких пленок серебра с вольфрамом для наноразмерных структур. Минск, 2004.
5. *Лыньков Л.М., Глыбин В.П., Богущ В.А. и др.* Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения. Минск, 2000.
6. *Лыньков Л.М., Богущ В.А., Борботько Т.В. и др.* Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты. Минск, 2003.
7. *Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Колбун Н.В.* Электромагнитные излучения средств телекоммуникаций. Методы защиты, безопасность организма человека. Минск, 2004.
8. *Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Колбун Н.В. и др.* Поглотители электромагнитного излучения. Применение в вооруженных силах. Минск, 2006.
9. *Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Колбун Н.В.* Антропогенные источники электромагнитного излучения. Безопасность жизнедеятельности человека. Минск, 2008.
10. *Борботько Т.В., Лыньков Л.М., Калинин Ю.К. и др.* Углеродсодержащие минералы и области их применения. Минск, 2009.
11. *Абдулькабер Хамза Абдулькадер, Борботько Т.В., Лыньков Л.М.* Тепловые и оптические каналы утечки информации. Методы и средства защиты. Минск, 2012.
12. *Лыньков Л.М., Махмуд М.Ш.М., Насонова Н.В. и др.* Шунгитсодержащие композиционные экраны электромагнитного излучения. Минск, 2013.
13. *Неамах М.Р., Бойправ О.В., Борботько Т.В., Лыньков Л.М. и др.* Радиоэкранирующие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов. Минск, 2013.
14. *Лыньков Л.М., Маликов В.В., Борботько Т.В.* Защита объектов различных форм собственности от несанкционированного доступа. Минск, 2008.
15. *Алялябад Х.М., Пулко Т.А., Насонова Н.В., Лыньков Л.М.* Пассивные технические средства обеспечения информационной безопасности от утечки по электромагнитному, оптическому и акустическому каналам. Минск, 2010.
16. *Зельманский О.Б., Аль-Хатми М.О., Петров С.Н., Лыньков Л.М.* Активные и пассивные методы и средства защиты информации от утечки по техническим каналам. Минск, 2011.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Лыньков Леонид Михайлович (1949 г.р.), д.т.н., профессор. В 1971 г. окончил МРТИ. В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 1994 г. – докторскую. В 1982–1983 гг. стажировался в Хельсинском технологическом университете. С 2004 г. – заведующий кафедрой защиты информации БГУИР. Заместитель главного редактора научно-технического журнала «Доклады БГУИР». Под его руководством защищено 2 докторских и 20 кандидатских диссертаций. Им опубликовано 15 монографий и более 200 статей. Является автором и соавтором 150 патентов.



Богуш Вадим Анатольевич (1975 г.р.), д.ф.-м.н., доцент. Окончил БГУИР в 1997 г. В 2000 г. защитил кандидатскую, в 2007 г. – докторскую диссертацию. Стажировался в Тель-Авивском университете. С 2010 г. – заместитель Председателя Национального статистического комитета, профессор кафедры защиты информации БГУИР (по совместительству). Им опубликовано 3 монографии и более 100 статей. Является автором и соавтором более 15 патентов.



Борботко Тимофей Валентинович (1977 г.р.), д.т.н., профессор. В 2000 г. окончил ВГКС. В 2003 г. защитил кандидатскую, в 2010 г. – докторскую диссертацию. Лауреат стипендии Президента Республики Беларусь для талантливых молодых ученых (2007 г.). Лауреат Первой премии для молодых ученых стран-участников СНГ (2010 г.). С 2004 г. – доцент, а с 2010 г. – профессор кафедры защиты информации БГУИР. Под его руководством защищено 4 кандидатских диссертации. Им опубликовано 9 монографий и более 50 статей. Является автором и соавтором более 30 патентов.



Насонова (Колбун) Наталья Викторовна (1980 г.р.), к.т.н., доцент. В 2002 г. окончила ВГКС. В 2005 г. защитила кандидатскую диссертацию. Лауреат стипендии Президента Республики Беларусь для талантливых молодых ученых (2008 г.). С 2006 г. – доцент кафедры защиты информации БГУИР. Под ее руководством защищена одна кандидатская диссертация. Является автором и соавтором 6 монографий, более 30 статей и 15 патентов.