

Синтез молекулярным наплавлением и исследование наноструктурированных оксидных слоев в высокоаспектных подложках

А. П. Барабан¹, В. А. Дмитриев¹, А. В. Дрозд^{2✉}, В. А. Мошников²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉adrozd93@mail.ru

Аннотация

Введение. Твердотельные электронные умножители (ТЭУ) в матричном исполнении, известные как микроканальные пластины (МКП), являются неотъемлемой частью современной электроники. В связи с развитием технологии молекулярного наплавления (МН) появилась возможность ее применения для управления и улучшения характеристик ТЭУ нанесением тонких слоев внутри каналов этих структур.

Цель работы. Изучение возможности нанесения тонких слоев внутри поверхности каналов ТЭУ МН с целью повышения коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) для улучшения эксплуатационных характеристик структур.

Материалы и методы. В работе был применен метод МН для нанесения нанометровых пленок оксидов магния и алюминия внутри каналов ТЭУ. Состав и структура слоев исследовались с помощью растровой электронной микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, анализа вторичной электронной эмиссии, атомной силовой микроскопии.

Результаты. Были синтезированы тонкие пленки оксида алюминия и оксида магния внутри микронных каналов ТЭУ, показана высокая равномерность слоев по всей длине каналов. Толщина слоев варьировалась в диапазоне от 2 до 30 нм. Получены слои с улучшенными эмиссионными и защитными характеристиками. Проведены сравнительные испытания контрольных образцов МКП, содержащих синтезированные пленки.

Заключение. Показана перспективность нанесения эмиссионных слоев внутри каналов ТЭУ. Структуры с высоким аспектным отношением являются перспективным объектом для применения технологии МН. Создание нанокпозиционных структур на основе МКП открывает возможность принципиального совершенствования технологии производства материалов и приборов оптико-электронной техники. Проведены экспериментальные исследования структур МКП, содержащих слои оксида алюминия, полученные технологией МН, для регистрации столкновения пучков (ФВВС) для работы в детекторах на ускорительном комплексе НИСА. Показано, что после нанесения в каналах тестируемых образцов МКП пленки Al_2O_3 толщиной 3.0 нм амплитуда сигнала возросла в 1.5 раза, а для образцов с толщиной пленки 10 нм амплитуда увеличилась почти в 2.5 раза.

Ключевые слова: вторичная электронная эмиссия, молекулярное наплавление, твердотельные электронные умножители, микроканальные пластины, оксид алюминия, оксид магния

Для цитирования: Синтез молекулярным наплавлением и исследование наноструктурированных оксидных слоев в высокоаспектных подложках / А. П. Барабан, В. А. Дмитриев, А. В. Дрозд, В. А. Мошников // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 4. С. 61–71. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-61-71

Благодарности. Работа выполнена с использованием оборудования ресурсных центров СПбГУ "Междисциплинарный центр по направлению нанотехнологии", "Инновационные технологии композитных наноматериалов".

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.06.2024; принята к публикации после рецензирования 12.08.2024; опубликована онлайн 27.09.2024



Molecular Layering Synthesis and Investigation of Nanostructured Oxide Layers in High Aspect Ratio Substrates

Aleksandr P. Baraban¹, Valentin A. Dmitriev¹, Arsenii V. Drozd^{2✉}, Vyacheslav A. Moshnikov²

¹Saint Petersburg State University, St Petersburg, Russia

²Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ adrozd93@mail.ru

Abstract

Introduction. Solid-state electron multipliers (EMs) in matrix design, referred to as microchannel plates (MCPs), are an integral part of modern electronics. Recent progress in the field of molecular layering (ML) technology has offered an opportunity to tailor and improve the characteristics of solid-state EMs by depositing thin layers inside the channels of these structures.

Aim. To study the possibility of depositing thin layers inside the surface of solid-state EM channels by ML in order to increase the secondary electron emission coefficient (SEEC) of such structures, thereby improving their performance characteristics.

Materials and methods. The ML method was used to deposit nanometer films of magnesium and aluminum oxides inside solid-state EM channels. The composition and structure of the layers were studied using scanning electron microscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, secondary electron emission analysis, and atomic force microscopy.

Results. Thin aluminum oxide and magnesium oxide films were synthesized inside the micron channels of solid-state EMs. The layers exhibited high uniformity along the entire length of the channels. The layer thickness varied in the range from 2 to 30 nm. Layers with improved emission and protective characteristics were obtained. Comparative tests of MCP samples containing the synthesized films were carried out.

Conclusion. Good prospects for the application of emissive layers inside solid-state EM channels were shown. Structures with a high aspect ratio are promising objects for ML application. The creation of nanocomposite structures based on MCPs opens up the fundamental possibility of improving the current technology of producing electrooptic materials and devices. The MCP structures containing aluminum oxide layers obtained by ML technology were experimentally tested to detect beam collisions (FBBC) for work in detectors at the NICA accelerator complex. Following deposition of a 3.0 nm-thick Al₂O₃ film in the channels of the tested MCP samples, the signal amplitude increased by 1.5 times. The deposition of layers with a film thickness of 10 nm resulted in a 2.5-fold increase in the amplitude.

Keywords: secondary electron emission, molecular layering, solid state electron multipliers, microchannel plates, aluminum oxide, magnesium oxide

For citation: Baraban A. P., Dmitriev V. A., Drozd A. V., Moshnikov V. A. Molecular Layering Synthesis and Investigation of Nanostructured Oxide Layers in High Aspect Ratio Substrates. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 4, pp. 61–71. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-4-61-71

Acknowledgments. The work was carried out using the equipment of the resource centers of St Petersburg State University "Interdisciplinary Center for Nanotechnology" and "Innovative Technologies of Composite Nanomaterials".

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 26.06.2024; accepted 12.08.2024; published online 27.09.2024

Введение. Высокоаспектные подложки являются основой для создания твердотельных электронных умножителей (ТЭУ), работа которых основана на вторичной электронной эмиссии [1]. Рабочие характеристики ТЭУ могут быть существенно улучшены путем дополнительного нанесения композитных слоев нанометровой толщины, обладающих эмиссионными, резистивными и

защитными свойствами, формируемыми в процессе синтеза слоев [2–4]. В качестве эмиссионных покрытий рассматриваются различные материалы, но наиболее перспективными являются оксиды магния и алюминия.

Различные способы нанесения таких слоев используются в исследовательских и практических целях, но наиболее привлекательным явля-

ется метод молекулярного наплавления (МН), известный как Atomic Layer Deposition (ALD). Притягательность этой технологии состоит в возможности однородного нанесения сверхтонких слоев различных материалов заданного химического состава и структуры, а также многослойных, наноламинированных покрытий на поверхность подложек различной конфигурации, в том числе имеющих трехмерную форму [5–8].

Технология МН обеспечивает равномерные по толщине покрытия на поверхности образцов, содержащих тонкие каналы, поры и отверстия в субмикронном диапазоне. Это достигается путем проведения реакции функциональных групп на поверхности подложки с молекулами выбранного прекурсора в определенных, заданных условиях. В этих реакциях производится "достройка" остова-подложки слоем новых структурных единиц. Важнейшим отличительным признаком этого метода является саморегуляция процесса, состоящая в остановке роста слоя после завершения синтеза одного монослоя вещества и его возобновлении только при поступлении внешнего сигнала о продолжении процесса. Такой синтез является ступенчатым (digital), и толщина получаемых пленок зависит не от длительности проведения процесса роста, как в других методах, а от числа повторяющихся циклов. Это достигается посредством предложенного и экспериментально доказанного, принципиально нового процесса необратимой, попеременной хемосорбции, т. е. необратимой многократной химической реакции поверхности твердого тела с газообразными реагентами. Поверхность в этом процессе вступает в химическое взаимодействие с молекулами реагента, одни атомы которого достраивают остов данного твердого тела, а другие играют на ней роль функциональных групп, способных присоединять к себе новые молекулы, достраивающие остов.

В настоящее время технология МН-ALD нашла широкое применение в электронике для изготовления элементов СБИС, таких как high-K подзатворные диэлектрики и элементы структуры памяти. Одним из перспективных примеров будущего применения технологии МН в высокоаспектных объектах являются ТЭУ матричного типа, представляющие собой тонкие стеклянные диски с несколькими миллионами сквозных отверстий, каналов микронного

диаметра, внутри которых под действием поля происходит лавинное умножение электронного потока. История многолетнего развития микроканальных пластин на основе свинцово-силикатных стекол подошла к своему пределу совершенствования технологии. В связи с этим возникла потребность перехода к новым материалам и методам изготовления ТЭУ для совершенствования их рабочих характеристик.

Цель работы – экспериментально показать возможность получения однородных покрытий, обладающих повышенным коэффициентом вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) и играющих роль защитного покрытия внутри каналов, и возможность улучшения таким образом характеристик ТЭУ. Для достижения поставленной цели было необходимо определить круг материалов и установить параметры технологического процесса для получения однородных покрытий внутри каналов ТЭУ.

Методика эксперимента. При формировании высококачественных слоев методом МН для каждого оксидного соединения необходима разработка технологического режима, который включает в себя выбор прекурсоров, установление температурного "окна процессов", оптимальных интервалов времени напуска прекурсоров и продувки инертным газом. При этом выбранные режимы должны обеспечивать полноту протекания реакций МН при синтезе слоев в высокоаспектных структурах типа ТЭУ, которые представляют собой сотовые структуры, образованные большим числом стеклянных каналов диаметром от единиц до десятков микрон с внутренней полупроводящей поверхностью, имеющей сопротивление от 20 до 1000 МОм (рис. 1).

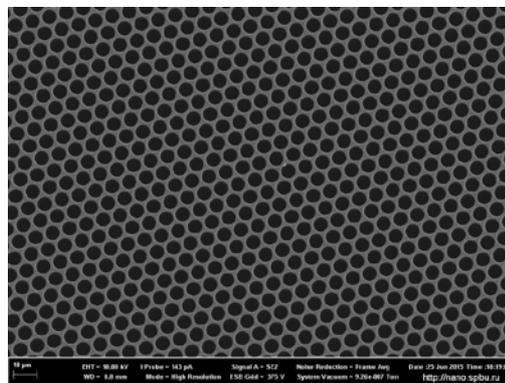


Рис. 1. Микрофотография фрагмента рабочей части МКП
Fig. 1. Microphotograph of a fragment of the MCP working part

В качестве подложек в работе использовались изолирующие (не прошедшие высокотемпературное восстановление) заготовки микроканальных пластин диаметром 25 мм. Толщина пластин составляла 300 мкм при общем числе каналов $5 \cdot 10^6$ и диаметре каждого канала 6 мкм. Аспектное отношение в таких структурах составляет 50 единиц. На рис. 1 приведена микрофотография фрагмента такой структуры, полученная с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Исследование синтеза сверхтонких слоев методом МН на поверхности высокоаспектных образцов предполагает предварительную оценку и ориентировочное задание параметров технологических режимов синтеза. Для решения этой задачи была использована модель расчета процесса синтеза для получения сплошного стехиометрического слоя синтезируемого вещества из [9], как наиболее близкая к нашим условиям. В модели рассматривался отдельный канал использованной в работе подложки в виде круглой трубки. Длина канала в расчетах составляла 300 мкм, диаметр 6 мкм, аспектное соотношение, соответственно, равно 50. В рассмотренной модели допускалась возможность использования в расчетах каналов разной формы.

Для определения условий, необходимых для покрытия канала внутри одним монослоем целевого продукта, была разработана программа определения времени синтеза в канале. Из проведенных расчетов была получена минимальная длительность импульса подачи паров воды для реакции полной гидратации поверхности канала по всей его длине, которая составила 3.1 с. Аналогично было рассчитано время подачи и для других прекурсоров, необходимое для полного покрытия поверхности канала по всей его длине монослоем синтезируемого вещества. Было установлено ориентировочно время подачи паров прекурсоров и рекомендованы температуры источников для создания необходимого давления паров прекурсоров.

Синтез слоев проводился на установке отечественного производства "Наносерф". Оксид алюминия, получаемый из паров воды и триметилалюминия (ТМА), наиболее удовлетворяет условиям процесса МН. Важным свойством является то, что ТМА очень активно взаимодействует с гидратированной поверхностью

подложки и обладает достаточным парциальным давлением паров при комнатной температуре. Для обеспечения ламинарного потока реагентов внутри каналов ТЭУ была разработана конструкция ячейки ограниченного объема для синтеза слоев на одном образце ТЭУ. Ячейка была оснащена двумя герметичными каналами для подачи паров прекурсоров и рассеивателем газового потока для создания равномерной концентрации паров прекурсоров. Синтез слоев оксида алюминия осуществлялся последовательной обработкой каналов ТЭУ парами воды и ТМА в заданной последовательности. Цикл состоял из 100 мс подачи к поверхности подложки паров воды, удаления продуктов реакции потоком сухого азота в течение 10 с, обработки парами ТМА в течение 100 мс и последующего удаления продуктов реакции в течение 10 с. Процесс синтеза проводился при постоянной температуре 200 °С. Многократным повторением приведенных циклов внутри каналов наносились слои различной толщины, определяемой числом проведенных циклов МН. Равномерность слоев определялась с помощью эллипсометрии на кремниевых полированных образцах-свидетелях, а также прямым исследованием скола канала микроканальной пластины (МКП) с помощью РЭМ. Результаты измерений показали, что за один цикл МН на поверхности подложки синтезировался слой оксида алюминия толщиной 0.13 нм, что соответствует литературным данным [10]. Оптимизация режимов синтеза слоев оксида алюминия позволила провести аналогичные исследования и при синтезе покрытий на основе оксида магния. В качестве прекурсоров для получения слоев MgO были выбраны бисэтилциклопентаденилмагний $Mg(CpEt)_2$ и вода. Учитывая низкое давление паров $Mg(CpEt)_2$ при комнатной температуре, пришлось нагревать данный прекурсор до температуры 90 °С и увеличивать время взаимодействия паров с поверхностью подложки до 400 мс. В результате были синтезированы слои оксида магния внутри каналов ТЭУ. Эллипсометрические данные на кремниевых образцах-свидетелях показали прирост за один цикл толщины слоя MgO МН на 0.12 нм.

Анализ и оптимизация свойств наносимых слоев были проведены на модельных образцах,

в которых в качестве подложки использовался монокристаллический кремний. Выбор подложки был обоснован тем фактом, что поверхность кремния обычно содержит реальный, гидратированный оксид толщиной 1...2 нм, который с химической точки зрения довольно близок по составу поверхности каналов ТЭУ, содержащих в своей основе оксид кремния с гидроксильным покровом. Обе поверхности содержат гидроксильный покров, играющий роль функциональных групп, участвующих в процессе синтеза слоев в качестве макрореагента. Синтез слоев оксидов на кремнии проводился в широком диапазоне толщин.

Выбранные в результате предварительных экспериментов, основанных на моделировании процессов синтеза в высокоаспектных структурах, параметры синтеза оксидных слоев позволили в едином цикле получить набор модельных структур на кремниевой подложке и набор контрольных пластин на высокоаспектной подложке для дальнейших исследований.

Для измерения шероховатости поверхности синтезируемых слоев использовалась атомно-силовая микроскопия (АСМ). АСМ-измерения проводились в полуконтактном режиме на атомно-силовом микроскопе Veeco Dimension V. Максимальный размер области сканирования составлял 1×1 мкм.

Для определения толщин нанесенных пленок методом МН использовалась спектральная эллипсометрия. Измерения синтезированных на поверхности кремния оксидных слоев проводились на установке "Эллипс 1891 САГ". Спектральный диапазон измерений 350...1000 нм.

С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на приборе ESCALab 250 Xi был исследован химический

состав поверхностного слоя в исходных синтезированных слоях. Сначала были записаны обзорные спектры исследуемого образца в нескольких точках и была выбрана наилучшая точка по интенсивности пиков элементов. После чего были записаны обзорные и детальные спектры. Для исключения зарядки образца в процессе измерений использовалась система электронно-ионной компенсации заряда.

Для обеспечения контроля равномерности нанесения слоев методом МН внутри каналов ТЭУ была разработана специальная конструкция, помещаемая в вакуумный реактор для синтеза (рис. 2).

Внутри реакционной камеры для синтеза пленок методом МН 1, находится конструкция, которая содержит микроканальную пластину 3, установленную на держатель 2, диаметр которого меньше диаметра ТЭУ на 2 мм. Держатель установлен на подложку-индикатор 4, выполненную из пластины полированного кремния, и создает зазор от 2 до 5 мм между ТЭУ, расположенной на дне держателя, и подложкой-индикатором. Подложка-контролер 5, также выполненная из пластины полированного кремния, установлена снаружи на расстоянии 5 мм от держателя ТЭУ.

Внутрь реактора попеременно подаются пары химических прекурсоров, что приводит к послойному росту пленки внутри каналов ТЭУ. Конструкция устройства позволяет убедиться в том, что реакция прошла по всей длине канала, путем измерения на спектральном эллипсометрическом комплексе толщины пленки на поверхности образца-индикатора. Если доза подаваемых в реактор прекурсоров достаточна, то на образце-индикаторе, находящемся под ТЭУ, толщина полученной пленки будет такая же, как и толщина пленки на образце-контролере.

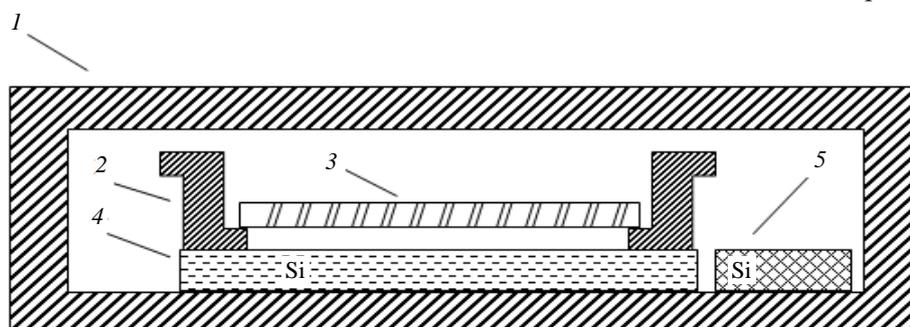


Рис. 2. Конструкция ячейки для контроля равномерности покрытия каналов ТЭУ с высоким аспектным отношением

Fig. 2. Cell design for monitoring the uniformity of covering high aspect ratio EM channels

Это свидетельствует о правильном выборе дозы подачи молекул на вход канала и обеспечение их перемещения по каналу вплоть до выхода из канала. Если толщины пленок на образцах отличаются, то это означает, что доза прекурсоров недостаточна для получения равномерного, сплошного покрытия внутри каналов МКП.

Методом контроля толщины пленки и ее состава, полученной методом МН внутри каналов ТЭУ, являлась сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) на установке Zeiss Supra. Недостатком данного метода является то, что для проведения измерения необходимо разрушить ТЭУ. Точность измерения с помощью СЭМ составляет порядка 10 %.

Исследования кристалличности структуры оксидов, синтезированных на кремнии, проводились с использованием электронограмм "на отражение" и рентгеновской дифрактометрии.

Экспериментальные результаты. Электронограммы "на отражение" синтезированных в диапазоне температур от 200 до 250 °С слоев оксидов алюминия и магния на кремнии указывают на отсутствие каких-либо признаков текстуры, и в первом приближении их можно считать некристаллическими.

Анализ пленок оксидов алюминия и магния ($d_{\text{ок}} = 20 \dots 100$ нм) методом АСМ показал, что разброс толщины слоя по площади образца не превышает ± 5.2 %.

Состав и стехиометрия оксидных пленок, синтезированных на кремнии при различных температурах, определялись методом РФЭС. На рис. 3 приведены спектры РФЭС сформированных при температуре 200 °С слоев оксида магния в диапазоне от 0 до 1400 эВ, которые соответствуют энергетическому уровню углерода 1s, основным уровням и оже-линиям магния и кислорода. Аналогичные спектры были получены для слоев оксида алюминия на кремнии (рис. 4).

Необходимо отметить, что сигнал C 1s в обоих случаях исчезает после удаления загрязнений с поверхности пленки, и его можно связать с неконтролируемой адсорбцией углеводородов или углекислого газа на поверхности синтезируемой пленки при переносе из реакторной камеры в камеру фотоэлектронного спектрометра. Дополнительные исследования методом оптической эмиссионной спектроско-

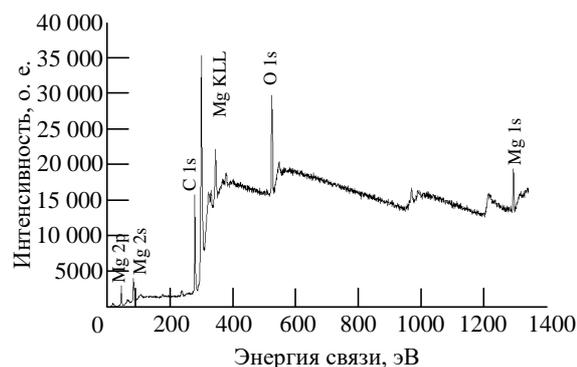


Рис. 3. Спектры РФЭС оксида магния, полученного методом МН на кремнии

Fig. 3. XPS spectra of magnesium oxide obtained by the ML method on silicon

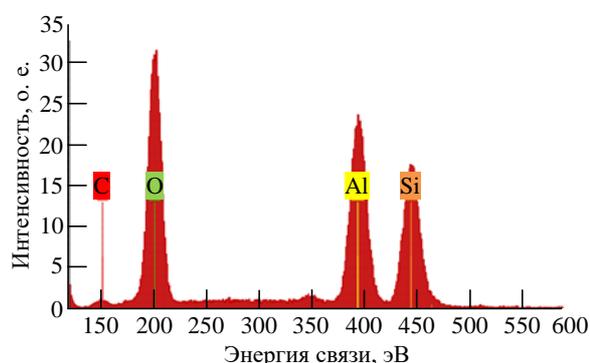


Рис. 4. Элементный состав покрытий из оксида алюминия, полученных методом МН на кремнии

Fig. 4. Elemental composition of aluminum oxide layers obtained by the ML method on silicon

рии тлеющего разряда покрытия Al_2O_3 на поверхности кремниевой пластины показали отсутствие углерода в объеме оксида. При этом кислород и алюминий в первом приближении характеризуются однородным распределением по всей толщине пленки, за исключением приповерхностного слоя (~ 3 нм), в котором отмечается уменьшение количества алюминия и увеличение кислорода, что представляется вполне приемлемым.

Наличие в обоих спектрах (рис. 3 и 4) только основных уровней металлов (магния, алюминия) и кислорода позволяет утверждать, что синтезированные слои являются оксидами магния и алюминия без заметных примесей.

Для контроля однородности толщины оксидных слоев, полученных методом МН внутри каналов ТЭУ, были нанесены пленки толщиной 30...40 нм и на сколе образца выполнены измерения толщины пленки и ее равномерности методом СЭМ. На рис. 5 приведены изображения

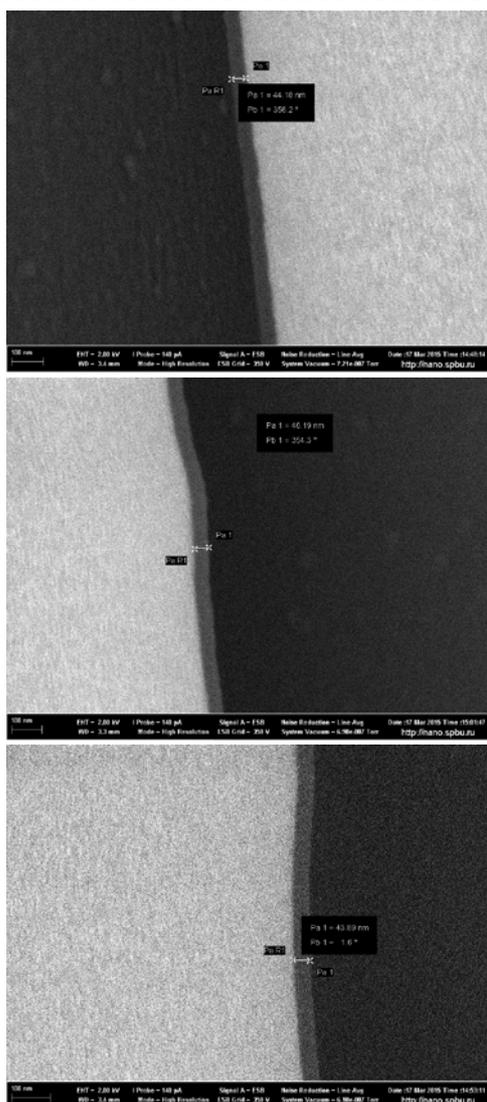


Рис. 5. Изображение скола канала ТЭУ с нанесенным слоем Al_2O_3 , полученное с помощью РЭМ в трех равноудаленных точках по длине канала

Fig. 5. Image of a cleavage of a EM channel with a deposited Al_2O_3 layer obtained by scanning electron microscopy at three equidistant points along the length of the channel

скола канала по его длине в трех точках для слоев оксида алюминия на высокоаспектной подложке, показывающие хорошую равномерность покрытия на структуре с аспектным отношением 50. Исследования с помощью СЭМ слоев оксида магния на высокоаспектной подложке показали аналогичные результаты. Результаты проведенных исследований показали высокую равномерность толщин слоев, синтезированных методом МН, по всей длине каналов в диапазоне толщин от 2 до 50 нм.

Таким образом, в соответствии с целью данной работы были выбраны параметры синтеза и экспериментально показана возможность

формирования тонких пленок оксидов алюминия и магния внутри микронных каналов ТЭУ с аспектным отношением до 50.

Достигнутый результат может быть использован как для улучшения характеристик существующих стандартных ТЭУ, так и для создания ТЭУ нового поколения [11], в которых на инертную высокоаспектную подложку последовательно будут наноситься резистивный и эмиссионный слои.

Характеристики стандартного ТЭУ могут быть улучшены двумя способами: формированием защитного слоя, уменьшающего десорбцию ионов с поверхности канала в рабочем режиме под действием электрического поля и формированием эмиссионного слоя, обладающего повышенным КВЭЭ. В качестве защитного слоя с успехом могут использоваться слои оксида алюминия толщиной порядка 2 нм. В качестве эмиссионного слоя с повышенным КВЭЭ могут использоваться оба оксида. На рис. 5 приведены результаты экспериментов по оценке КВЭЭ на модельных структурах с оксидами алюминия и магния. Полученные значения КВЭЭ составили 5.5 для оксида алюминия толщиной 99.7 нм и 7.5 для оксида магния толщиной 17 нм, что значительно превышает КВЭЭ для стандартных структур ТЭУ.

Проведенные исследования позволили продемонстрировать возможности метода МН для улучшения характеристик ТЭУ типа МКП. Удачный пример использования предложенного авторами подхода приведен в [12]. Проверка эффективности применения метода МН для улучшения параметров МКП была осуществлена авторами статьи на быстром мониторе столкновения пучков (FBVC) для работы в детекторах, строящихся на ускорительном комплексе NICA. Задачи FBVC состоят в оценке таких характеристик столкновений, как множественность, центральность, момент времени, в которое произошло событие. Важной характеристикой такого детектора является коэффициент усиления и, соответственно, большая амплитуда выходного сигнала. В работе было показано, что после нанесения в каналах тестируемых образцов МКП пленки Al_2O_3 толщиной 3.0 нм амплитуда сигнала возросла в 1.5 раза, а для образцов с толщиной пленки 10 нм амплитуда увеличилась почти в 2.5 раза.

Оксид магния обладает большим значением КВЭЭ, однако характеризуется отсутствием стабильности свойств в атмосфере, ввиду химической активности. С учетом того, что глубина выхода вторичных электронов из оксида магния составляет порядка 30 нм [13–15], авторами статьи был предложен и реализован вариант наноламинированного покрытия в виде последовательно нанесенных внутри каналов МКП слоев оксида магния толщиной 30 нм и оксида алюминия толщиной 2 нм. Слой оксида алюминия выступает в данном случае в качестве защитного слоя, и его наличие не приводит к заметному уменьшению КВЭЭ, характерному для оксида магния.

Закключение. На основе проведенных исследований были выбраны оптимальные режимы синтеза методом МН оксидных слоев алюминия и магния, экспериментально показана возможность формирования однородных слоев по всей длине канала в высокоаспектных структурах с аспектным отношением вплоть до 50. Учитывая высокий КВЭЭ, данные слои могут быть с успехом использованы для улучшения усилительных характеристик МКП, а также при разработке новых электронных умножителей на основе высокоаспектных структур на инертной (вплоть до полимерной) подложке.

Авторский вклад

Барабан Александр Петрович – постановка задачи; анализ экспериментальных данных; разработка оригинальной ячейки для синтеза.

Дмитриев Валентин Александрович – определение элементного состава образцов; получение изображений образцов с помощью растровой электронной микроскопии.

Дрозд Арсений Викторович – синтез образцов; измерение коэффициента вторичной электронной эмиссии; разработка оригинальной ячейки для синтеза.

Мошников Вячеслав Алексеевич – анализ экспериментальных данных; рекомендации по АСМ-измерениям.

Author's contribution

Alexander P. Baraban, problem statement; analysis of experimental results; design of the original synthesis cell.

Vladimir A. Dmitriev, determination of the elemental composition of samples; obtaining images of samples using scanning electron microscopy.

Arsenii V. Drozd, sample synthesis; measurement of the secondary electron emission coefficient; design of the original synthesis cell.

Vyacheslav A. Moshnikov, analysis of experimental results; recommendations for AFM measurements.

Список литературы

1. Бронштейн И. М., Фрайман Б. С. Вторичная электронная эмиссия. М.: Наука, 1969. 408 с.

2. Lifetime of MCP-PMT / N. Kishimoto, M. Nagamine, K. Inami, Y. Enari, T. Ohshima // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2006. Vol. 564, iss. 1. P. 204–211. doi: 10.1016/j.nima.2006.04.089

3. Mori T. Lifetime of HPK Square-shape MCP-PMT // Acta Physica Polonica B. 2011. Vol. 4, iss. 1. P. 101–106. doi: 10.5506/APhysPolBSupp.4.101

4. Lifetime-extended MCP-PMT / T. Jinno, T. Mori, T. Ohshima, Y. Arita, K. Inami, T. Ihara, H. Nishizawa, T. Sasaki // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2011. Vol. 629, iss. 1. P. 111–117. doi: 10.1016/j.nima.2010.10.145

5. Stabilization of ambient sensitive atomic layer deposited lanthanum aluminates by annealing and in situ capping / J. Swerts, S. Gielis, G. Vereecke, A. Hardy, D. Dewulf, C. Adelman, M. K. V. Bael, S. V. Elshocht // Applied Physics Letters. 2011. Vol. 98. P. 102904. doi: 10.1063/1.3557501

6. Application of titanium materials to vacuum chambers and components / H. Kurisu, K. Ishizawa, S. Yamamoto, M. Hesaka, Y. Saito // J. of Physics: Conf. Series. 2008. Vol. 100. P. 092002. doi: 10.1088/1742-6596/100/9/092002

7. Hydrogen outgassing from titanium-modified layers with various surface treatments / Y. Mizuno, A. Tanaka, K. Takahiro, T. Takano, Y. Yamauchi, T. Okada, S. Yamaguchi, T. Homma // J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2001. Vol. 19. P. 2571–2577. doi: 10.1116/1.1392396

8. From V. B. Aleskovskii's "Framework" Hypothesis to the Method of Molecular Layering/Atomic Layer Deposition / A. A. Malygin, V. E. Drozd, A. A. Mal'kov, V. M. Smirnov // Chem. Vap. Deposition. 2015. Vol. 21 iss. 10–12. P. 216–240. doi: 10.1002/cvde.201502013

9. A Kinetic Model for Step Coverage by Atomic Layer Deposition in Narrow Holes or Trenches / R. G. Gordon, D. Hausmann, E. Kim, J. Shepard //

Chemical Vapor Deposition. 2003. Vol. 9, iss. 2. P. 73–78. doi: 10.1002/cvde.200390005

10. Puurunen R. Surface chemistry of atomic layer deposition: A case study for the trimethylaluminum/water process // J. of Applied Physics. 2005. Vol. 97. P. 121301. doi: 10.1063/1.1940727

11. Shu Xia Tao, Hong Wah Chan, Harry van der Graaf. Secondary Electron Emission Materials for Transmission Dynodes in Novel Photomultipliers: a Review // Materials. 2016. Vol. 9, iss. 12. P. 1017. doi: 10.3390/ma9121017

12. Микроканальные пластины с тонкими слоями Al_2O_3 для FBVC-мониторинга / А. В. Дрозд, Н. И. Калинин, Ф. Ф. Валиев, Г. А. Феофилов, А. М. Яфясов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2023. Т. 54, вып. 4. С. 855–859.

13. Теория термоэмиссионных и вторично-эмиссионных свойств палладий-бариевых катодов электровакуумных сверхвысокочастотных приборов / В. И. Капустин, И. П. Ли, С. О. Москаленко, А. В. Шуманов // Журн. технической физики. 2020. Т. 90, вып. 2. С. 330–337. doi: 10.21883/JTF.2020.02.48829.195-19

14. Upgraded Cherenkov time-of-flight detector for the AFP project / L. Nozka, G. Avoni, E. Banas, E. Brandt // Optics Express. 2023. Vol. 31, № 3. P. 3998–4014. doi: 10.1364/OE.480624

15. Conneely T. M., Milnes J. S., Howorth J. Extended lifetime MCP-PMTs: Characterisation and lifetime measurements of ALD coated microchannel plates in a sealed photomultiplier tube // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2013. Vol. 732. P. 388–391. doi: 10.1016/j.nima.2013.07.023

Информация об авторах

Барабан Александр Петрович – доктор физико-математических наук (1991), профессор (2008), заведующий кафедрой электроники твердого тела Санкт-Петербургского государственного университета. Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – неравновесные электронные процессы и электрофизические свойства слоистых структур на основе структур полупроводник–диэлектрик; процессы взаимодействия электронной и атомной подсистем твердого тела при их возбуждении ионами, электронами, ионизирующим облучением; люминесцентные методы для исследования слоистых структур на основе полупроводников и исследования межфазовой границы диэлектрик–диэлектрик; физико-химические свойства слоистых структур на основе полупроводников, формируемых на принципах молекулярного наслаивания, с целью создания на их основе функциональных элементов двойного применения.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет, ул. Ульяновская, д. 1, корп. М, Петергоф, 198504, Россия

E-mail: a.baraban@spbu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8745-7019>

Дмитриев Валентин Александрович – кандидат физико-математических наук (2005), старший научный сотрудник кафедры электроники твердого тела Санкт-Петербургского государственного университета. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – неравновесные электронные процессы и электрофизические свойства слоистых структур на основе структур полупроводник–диэлектрик; процессы взаимодействия электронной и атомной подсистем твердого тела при их возбуждении ионами, электронами, ионизирующим облучением; люминесцентные методы для исследования слоистых структур на основе полупроводников и исследования межфазовой границы диэлектрик–диэлектрик.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет, ул. Ульяновская, д. 1, корп. М, Петергоф, 198504, Россия

E-mail: v.dmitriev@spbu.ru

Дрозд Арсений Викторович – аспирант, младший научный сотрудник инженерингового центра микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – наноструктуры; технология молекулярного наслаивания; физика конденсированного состояния; физика полупроводников.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: adrozdz@mail.ru

Мошников Вячеслав Алексеевич – доктор физико-математических наук (1997), профессор кафедры микро- и наноэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – коллоидные квантовые точки; золь-гель-технология; иерархические пористые материалы; биосенсоры; солнечные элементы, фотокатализаторы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: vamoshnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>

References

1. Bronshtein I. M., Fraiman B. S. Secondary Electron Emission. Moscow, Science, 1969, 408 p.
2. Kishimoto N., Nagamine M., Inami K., Enari Y., Ohshima T. Lifetime of MCP-PMT. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2006, vol. 564, iss. 1, pp. 204–211. doi: 10.1016/j.nima.2006.04.089
3. Mori T. Lifetime of HPK Square-shape MCP-PMT. Acta Physica Polonica B. 2011, vol. 4, iss. 1, pp. 101–106. doi: 10.5506/APhysPolBSupp.4.101
4. Jinno T., Mori T., Ohshima T., Arita Y., Inami K., Ihara T., Nishizawa H., Sasaki T. Lifetime-extended MCP-PMT. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2011, vol. 629, iss. 1, pp. 111–117. doi: 10.1016/j.nima.2010.10.145
5. Swerts J., Gielis S., Vereecke G., Hardy A., Dewulf D., Adelmann C., Bael M. K. V., Elshocht S. V. Stabilization of Ambient Sensitive Atomic Layer Deposited Lanthanum Aluminates by Annealing and in Situ Capping. Applied Physics Letters. 2011, vol. 98, p. 102904. doi: 10.1063/1.3557501
6. Kurisu H., Ishizawa K., Yamamoto S., Hesaka M., Saito Y. Application of Titanium Materials to Vacuum Chambers and Components. J. of Physics: Conf. Series. 2008, vol. 100, p. 092002. doi: 10.1088/1742-6596/100/9/092002
7. Mizuno Y., Tanaka A., Takahiro K., Takano T., Yamauchi Y., Okada T., Yamaguchi S., Homma T. Hydrogen Outgasing from Titanium-Modified Layers with Various Surface Treatments. J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. 2001, vol. 19, pp. 2571–2577. doi: 10.1116/1.1392396
8. Malygin A. A., Drozd V. E., Malkov A. A., Smirnov V. M. From V. B. Aleskovskii's "Framework" Hypothesis to the Method of Molecular Layering/Atomic Layer Deposition. Chem. Vap. Deposition. 2015, vol. 21, iss. 10–12, pp. 216–240. doi: 10.1002/cvde.201502013
9. Gordon R. G., Hausmann D., Kim E., Shepard J. A Kinetic Model for Step Coverage by Atomic Layer Deposition in Narrow Holes or Trenches. Chemical Vapor Deposition. 2003, vol. 9, iss. 2, pp. 73–78. doi: 10.1002/cvde.200390005
10. Puurunen R. Surface Chemistry of Atomic Layer Deposition: a Case Study for the Trimethylaluminum/Water Process. J. of Applied Physics. 2005, vol. 97, p. 121301. doi: 10.1063/1.1940727
11. Shu Xia Tao, Hong Wah Chan, Harry van der Graaf. Secondary Electron Emission Materials for Transmission Dynodes in Novel Photomultipliers: a Review. Materials. 2016, vol. 9, iss. 12, p. 1017. doi: 10.3390/ma9121017
12. Drozd A. V., Kalinichenko N. I., Makarov N. A., Valiev F. F., Feofilov G. A., Yafyasov A. M. Microchannel Plates with Thin Al₂O₃ Layers for an FBBC Monitor. Physics of Particles and Nuclei. 2023, vol. 54, pp. 717–719. doi: 10.1134/S1063779623040147
13. Kapustin V. I., Lee I. P., Moskalenko S. O., Shumanov A. V. Theory of Thermionic and Secondary Emission Properties of Palladium-Barium Cathodes of Microwave Electrovacuum Devices. Technical Physics. 2020, vol. 65, pp. 317–323. doi: 10.1134/S1063784220020073
14. Nozka L., Avoni G., Banas E., Brandt E. Upgraded Cherenkov Time-of-Flight Detector for the AFP Project. Optics Express. 2023, vol. 31, no. 3, pp. 3998–4014. doi: 10.1364/OE.480624
15. Conneely T. M., Milnes J. S., Howorth J. Extended Lifetime MCP-PMTs: Characterisation and Lifetime Measurements of ALD Coated Microchannel Plates in a Sealed Photomultiplier Tube. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2013, vol. 732, pp. 388–391. doi: 10.1016/j.nima.2013.07.023

Information about the authors

Alexander P. Baraban, Dr Sci. (Phys.-Math.) (1991), Professor (2008), Head of the Department of Solid State Electronics of Saint Petersburg State University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: nonequilibrium electronic processes and electrical properties of layered structures based on semiconductor-insulator structures; processes of interaction between the electronic and atomic subsystems of a solid body when they are excited by ions, electrons, and ionizing radiation; luminescent methods for studying layered structures based on semiconductors and studying the dielectric-dielectric interface; physicochemical properties of layered structures based on semiconductors, formed on the principles of molecular layering, with the aim of creating dual-use functional elements on their basis.

Address: Saint Petersburg State University, 1, bldg. M, Ulyanovskaya St., Peterhof 198504, Russia

E-mail: a.baraban@spbu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8745-7019>

Vladimir A. Dmitriev, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2005), Senior Researcher of Department of Solid State Electronics of Saint Petersburg State University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: nonequilibrium electronic processes and electrical properties of layered structures based on semiconductor-insulator structures; processes of interaction between the electronic and atomic subsystems of a solid body when they are excited by ions, electrons, and ionizing radiation; luminescent methods for studying layered structures based on semiconductors and studying the dielectric-dielectric interface.

Address: Saint Petersburg State University, 1, bldg. М, Ulyanovskaya St., Peterhof 198504, Russia

E-mail: v.dmitriev@spbu.ru

Arsenii V. Drozd, Postgraduate Student, Junior Researcher at the Engineering Center for Microtechnology and Diagnostics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 20 scientific publications. Area of expertise: nanostructures; molecular layering technology; condensed matter physics; physics of semiconductors.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: adrozd93@mail.ru

Vyacheslav A. Moshnikov, Dr Sci. (Phys.-Math.) (1997), Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: colloidal quantum dots; sol-gel technology; hierarchical porous materials; biosensors; solar cells; photocatalysts.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: vamosnikov@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6500-5492>
