

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОК ДЛЯ КОНДЕНСАТОРОВ ПОВЫШЕННОЙ ЕМКОСТИ

И.Е. Пименов, С.В. Сидорова

АННОТАЦИЯ

В работе предложен способ формирования островкового покрытия методом магнетронного распыления из комбинированной мишени для нанесения на обкладки конденсатора. Приведены варианты исполнения комбинированной мишени из диэлектрического материала с вставками из проводника. Представлены результаты моделирования и расчета емкости конденсатора с островковыми слоями на обкладках.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ИОННОЕ ТРАВЛЕНИЕ, ОСТРОВКОВЫЕ ПЛЕНКИ, КОНДЕНСАТОРЫ

ISLAND FILMS FORMING METHOD FOR HIGH-CAPACITY CAPACITORS

I.E. Pimenov, S.V. Sidorova

ABSTRACT

The paper proposes a method of island coating formation by magnetron sputtering from a combined target for capacitor formation. Design variants of the combined target made of dielectric material with conductor inserts are presented. The results of calculations of capacitance of a capacitor with an island layer are presented.

KEYWORDS

VACUUM TECHNOLOGIES, ISLAND FILMS, ION PLASMA TECHNOLOGIES, ION ETCHING, CAPACITORS

ВВЕДЕНИЕ

Повсеместная электрификация становится тенденцией современного технологического развития. Продиктованы такие решения заботой об экологии посредством снижения выбросов вредных веществ в атмосферу. Наиболее распространенным накопителем энергии является электрохимический аккумулятор. Однако сами аккумуляторы изготавливаются из редкоземельных металлов, добыча которых также наносит вред окружающей среде. Такие аккумуляторы имеют короткий срок службы, после чего требуется их замена. Однако, процесса полноценной переработки аккумуляторов и электролита, ядовитого для окружающей среды, на данный момент нет.

Альтернативой аккумуляторам могут быть конденсаторы. Конденсаторы запасают энергию за счёт электрофизических явлений, то есть не используют электролит. Ранее считалось, что конденсаторы обладают меньшей удельной емкостью, однако современные разработки не уступают электрохимическим аккумуляторам, а некоторые даже превосходят. Из-за отсутствия химических реакций в конденсаторах они имеют больший

срок службы и менее чувствительны к температуре окружающей среды. Также конденсаторы способны быстро отдавать и накапливать заряд, что позволяет сократить время их зарядки, а также использовать в системах с высокими токами.

Одним из перспективных вариантов конденсатора с высокой ёмкостью рассматривается конденсатор с островковыми структурами. Увеличение ёмкости реализуется посредством увлечения площади обкладок и уменьшения толщины диэлектрического слоя. Островковые структуры служат потенциальными ямами для зарядов, что позволяет увеличить КПД, уменьшив собственное потребление энергии. Формирование островковой структуры является ключевой задачей в реализации конденсаторов [1, 2].

Целью данной работы является анализ и выбор геометрии островкового слоя для обкладок конденсатора.

КОНДЕНСАТОР НА ОСТРОВКОВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

Конденсаторы на островковых наноструктурах призваны увеличить удельную емкость за счет уменьшения размеров и увеличения развитости поверхностей обкладок. Как и классические конденсаторы, они имеют две откладки и диэлектрический слой между ними. Однако на поверхности одной (рисунок 1а) или обеих (рисунок 1б) обкладок формируется островковый слой с островками диаметром от 5 до 100 нм.

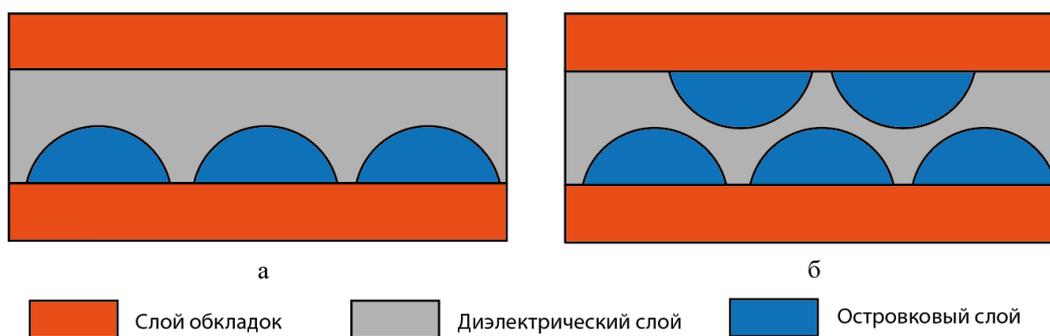


Рис. 1. Модели конденсатора с одним (а) и двумя (б) островковыми слоями

Материал обкладок должен обладать высокими проводящими свойствами, например, золото, серебро, алюминий или медь. Серебро и золото имеют особенность прорасти под действием потенциала сквозь диэлектрик, образуя мостики, что недопустимо. Диэлектрический слой должен обладать высокой диэлектрической проницаемостью для обеспечения максимальной емкости конденсатора. Одними из наиболее подходящих материалов являются оксид кремния ($\epsilon \approx 4$) [3], оксид алюминия ($\epsilon \approx 10$) [4] и оксид вольфрама ($\epsilon \approx 24,9$) [5]. Оксид кремния имеет невысокую диэлектрическую проницаемость, поэтому емкость конденсатора будет низкой. У оксида вольфрама при температуре от -27 до 20 °С происходит перестроение кристаллической решетки, что может привести к изменению свойств и разрушению структуры диэлектрического слоя. Оксид алюминия обладает достаточно высокой диэлектрической проницаемостью и имеет стабильную кристаллическую решетку, поэтому целесообразнее его применение для формирования диэлектрической прослойки разрабатываемого конденсатора.

Конденсаторы с двумя островковыми слоями имеют большую емкость за счет наибольшей площади обкладок, конденсаторы с одной обкладкой имеют меньшую ёмкость в 2–6 раз, но превосходят по емкости конденсаторы без островковых слоев в 4–6 раз. На рисунке 2 приведена схема измерения емкости конденсаторов.

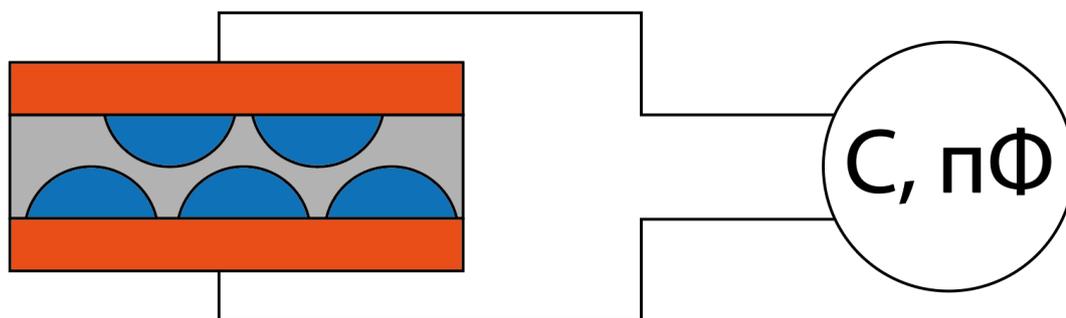


Рис. 2. Схема измерения емкости конденсатора

Измерение емкости проводится на измерителе иммитанса, что позволяет определить емкость при постоянном токе, а также влияние частоты переменного тока на емкость и характеристики конденсатора.

На рисунке 3 представлена вольтамперная характеристика в зависимости от температуры для конденсатора без островкового слоя (сплошная), с одним (штриховая) и двумя (точечная) островковыми слоями.

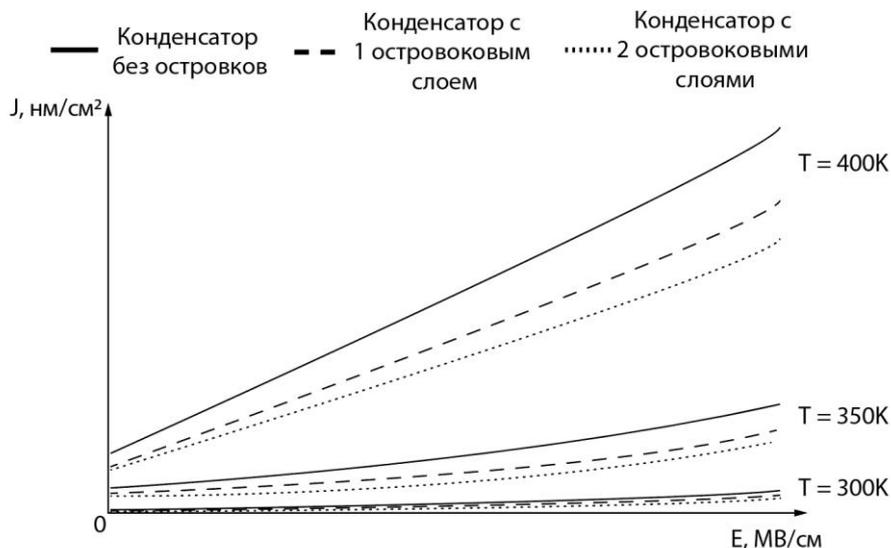


Рис. 3. ВАХ конденсаторов при различной температуре

Из анализа графиков на рисунке 3 видно, что характеристики конденсаторов с островковыми структурами имеют меньшую зависимость от температуры, чем конденсатор без островкового слоя [6]. Однако, влияние роста температуры остается очевидным.

ФОРМИРОВАНИЕ ОСТРОВКОВОГО СЛОЯ НА ОБКЛАДКАХ КОНДЕНСАТОРА

Рост тонкопленочного покрытия проходит в несколько этапов: образование зародышей, рост зародышей, коалесценция, образование каналов, образование дыр, сплошная пленка. Для островкового конденсатора необходимо, чтобы островки имели максимальную высоту, но при этом не соприкасались друг с другом, образуя единую цепочку. Поэтому при формировании покрытия необходимо остановиться на этапах роста зародышей и коалесценции.

Островковые покрытия можно получать различными методами: термическим испарением [7], электронно-лучевым испарением [8], магнетронным распылением [9] и др. [10]. Термическое и электронно-лучевое испарения обладают высокой скоростью осаждения и низкой равномерностью, что не позволяет точно контролировать рост покрытия для получения структуры с необходимыми размерами и формировать его на больших площадях. Атомно-слоевое осаждение применяется для получения пленок химических соединений, в нашем случае требуется получение островков из мономолекулярного материала. Магнетронное распыление, на первый взгляд, кажется наименее подходящим методом, так как скорость осаждения низкая, а равномерность осаждения высокая. Однако низкая скорость роста позволяет вовремя остановить формирование покрытия. Для лучшего перемещения адсорбированных атомов подложка должна нагреваться. Также повысить подвижность атомов и обеспечить удаление вторичных зародышей можно посредством ионной обработки во время осаждения покрытия.

Для получения островковых покрытий может использоваться не только распыление одного материала, но и одновременное распыление двух материалов. Таким образом, при осаждении частицы одного материала образуют островки, а второго заполняют пространство между ними. Такое решение может быть использовано и при осаждении покрытий методом магнетронного распыления, так как данный метод позволяет распылять металлы, диэлектрики, полупроводники и другие материалы [11].

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ МИШЕНИ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО МАГНЕТРОННОГО ОСАЖДЕНИЯ

Для одновременного осаждения двух материалов предполагается использование комбинированной (составной) мишени. Комбинированная мишень представляет собой каркас из основного материала и вставки различной формы и размера из второго материала. В зависимости от скорости осаждения материала островков, в нашем случае проводника, и материала заполняющего, в нашем случае диэлектрика, необходимо подбирать размеры вставок так, чтобы количество распыленного материала соответствовало требуемой структуре.

Например, осаждение меди происходит со скоростью на два порядка выше, чем оксида алюминия, поэтому вставки из меди должны иметь площадь практически на 2 порядка меньше, чем площадь распыляемого диэлектрика. Сами вставки наиболее выгодно располагать в зоне эрозии мишени, так как оттуда распыляется основная часть материала. Предложено рассмотреть два варианта конструкции мишени.

Первый вариант представлен на рисунке 4а. Цилиндрические вставки из проводящего материала размещаются в отверстиях диэлектрического материала мишени.

Данная конструкция усложняется тем, что в диэлектрических мишенях достаточно сложно получить отверстия малого размера и не вызвать разрушение диэлектрика.

На рисунке 4б представлена конструкция второго типа мишени с кольцом между двумя отдельными частями диэлектрика. В этом случае необходимо впрессовывать медное кольцо, а затем и внешнее кольцо из диэлектрика, не вызвав растрескивание материала диэлектрика.

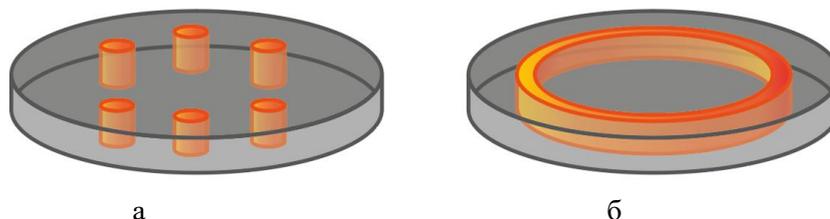


Рис. 4. Варианты исполнения комбинированной мишени с цилиндрическими (а) и кольцевой (б) вставками

Для обеих конфигураций был проведен расчет требуемой островковой структуры с примерно равным объемным соотношением обоих материалов. В результате при использовании шести цилиндрических вставок их диаметр должен составлять 2 мм. Кольцевая вставка должна иметь толщину 0,12 мм, что значительно затрудняет ее изготовление, так как медь очень мягкий материал и обработка настолько тонкой структуры экономически и технологически нецелесообразна.

РАСЧЕТ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА НА ОСТРОВКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Для определения емкости конденсатора с островковым слоем было проведено моделирование структуры в программном пакете физического моделирования. Были построены модели конденсаторов с островками диаметром 100 нм, модели конденсаторов приведены на рисунке 1. Такой размер выбран, так как при увлечении диаметра выше 100 нм структура перестает проявлять наноразмерные свойства, а при уменьшении будет происходить уменьшение площади, а значит и уменьшение емкости. Расположение островков было задано при условии наиболее благоприятной – плотной компоновки (треугольной, рис. 5). Расстояние между островками заданно 3 и 10 нм, выбор таких значений обусловлен туннельным эффектом, который не проявляется при большем расстоянии. Толщина диэлектрического слоя из оксида алюминия составляет 100 нм для полного покрытия электродов и исключения замыкания обкладок.

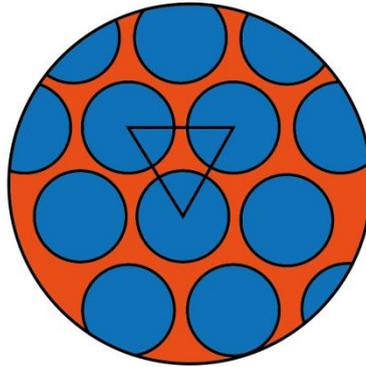


Рис. 5. Расположение островков на поверхности обкладки

В результате расчета было определено, что конденсатор с расстоянием между островками 3 нм превосходит по емкости конденсатор без островковых структур в 3,7 раза. Конденсатор с расстоянием между островками 10 нм превосходит безостровковый аналог в 3,4 раза. Наибольшей емкостью обладает конденсатор с островковой структурой на обеих обкладках – в 20,6 раза выше, чем конденсатор без островковых структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ методов формирования островкового покрытия. Предложен метод формирования островкового покрытия методом магнетронного распыления из комбинированной мишени. Благодаря высокой равномерности формирования покрытия, возможно формирование равномерного островкового покрытия с минимальными отклонениями формы и размера.

Предложен метод формирования с использованием комбинированных мишеней с цилиндрическими и кольцевыми вставками, позволяющими одновременно осаждать покрытие из двух материалов.

Предложена конструкция конденсатора островковыми слоями на одной или обеих обкладках для повышения ёмкости конденсатора.

Проведено моделирование конденсатора с предполагаемой структурой. Установлено повышение емкости при внедрении островкового слоя в структуру конденсатора.

В дальнейшем планируется апробация предложенной методики формирования островкового покрытия с применением составных мишеней и ионным ассистированием для получения спрогнозированной по результатам моделирования геометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ №2020123399, 15.07.2020. Островковый тонкоплёночный конденсатор // Патент России №200183. 2020. Бюл. №28 / Сидорова С.В., Андреасян О.Г.
2. Сидорова С. В. Расчет технологических режимов и выбор параметров оборудования для формирования островковых тонких пленок в вакууме: автореф. дисс. ... к.т.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
3. Командин Г. А. и др. Диэлектрические потери тонкопленочных образцов SiO₂ на Al в THz-IR-диапазоне // Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62. – №. 2. – С. 223-228.

4. Абызов А. М. ОКСИД АЛЮМИНИЯ И АЛЮМООКСИДНАЯ КЕРАМИКА (Обзор). Часть 1. Свойства Al_2O_3 и промышленное производство дисперсного Al_2O_3 // Новые огнеупоры. – 2019. – №. 1. – С. 16-23.
5. Козюхин С. А. и др. Диэлектрические свойства нанокристаллического оксида вольфрама в области температур 223–293 К // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52. – №. 7. – С. 745-750.
6. Белявский Павел Юрьевич, Плотников Виктор Валерьевич Исследование температурных зависимостей вольт-амперных характеристик тонкопленочных конденсаторов на основе твердых растворов титаната бария стронция // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2016. №1.
7. Исаева А. А. Медные тонкие пленки и островковые наноструктуры // Будущее машиностроения России. – 2018. – С. 268-270.
8. Бабурин А.С., Габидуллин А.Р., Зверев А.В., Родионов И.А., Рыжиков И.А., Панфилов Ю.В. Получение пленок серебра методом электронно-лучевого испарения для применения в наноплазмонике // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2016. №6 (111).
9. Монахов И. С., Тюрганов М. Г. Начальные стадии роста пленок вольфрама и меди при магнетронном распылении // Московский государственный институт электроники и математики (ТУ). – С. – С. 1-5.
10. Сидорова С.В. Обзор методов формирования и модулирование роста островковых наноструктур в вакууме // Сборник трудов 3 Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», Москва, 2010.
11. Streletskiy O. A. et al. Size control of silver nanoclusters during ion-assisted pulse-plasma deposition of carbon-silver composite thin films // Vacuum. – 2020. – Т. 175. – С. 109286.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пименов Илья Евгеньевич – Аспирант 1-го года ФГУП НАМИ, г. Москва, e-mail: ilyapimenov2004@gmail.com

Сидорова Светлана Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры (ORCID: 0000-0002-3002-1246). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: sidorova_bmstu@mail.ru