

УДК 539.216.2 Специальность ГРНТИ 81.09.03

БАРЬЕРНЫЕ ПЛЕНКИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, КАК ДИЭЛЕКТРИКИ

Атигаев А. С.

КГУ «Гимназия №93» ГУ «Отдел образования г. Караганды» (100008 Республика Казахстан, г. Караганда, ул. Алиханова, 24), e-mail: at_amir@bk.ru.

Пленки оксида алюминия находят широкое применение в промышленности: в качестве грунтовок алюминиевых изделий перед покраской или дальнейшей обработкой, реже в качестве диэлектриков или полупроводников. На данный момент широко исследованы свойства пористых пленок, состоящих из упакованных гексагонально цилиндрических пор. Широко используются их наноструктурированность, поскольку возможно получение одинаковых пор с диаметрами от десятков нанометров на больших площадях, порядка сотен квадратных сантиметров. Барьерные же пленки находят применение в качестве диэлектриков, наравне с пористыми, в том числе в электролитических конденсаторах, натрий-ионных аккумуляторах, супер-ионисторах.

Однако свойства пленок барьерного типа изучены мало. Известно, что ширина запрещенной зоны оксида алюминия позволяет использовать его и как диэлектрик, и как полупроводник. В статье приводится обширный анализ литературы на тему получения таких пленок путем анодирования подложек из алюминия, рассматриваются свойства подобных пленок, как диэлектриков, раскрываются особенности их пробоя и переноса через них заряда. Выделяются основные формулы и константы, необходимые для получения барьерного оксида алюминия, как например: зависимость толщины пленки от времени анодирования, константа анодирования и прочее.

Ключевые слова: Оксид алюминия, пленки, анодирование, пробой, проводимость, туннелирование.

BARRIER FILM OF ALUMINUM OXIDE AS AN ELECTRIC INSULATOR

Atigayev A.

#93 Gymnasium under the egis of Karaganda city education department (ul. Alikhanova, d. 24, g. Karaganda, 100008, Kazakhstan), e-mail: at_amir@bk.ru

Aluminum oxide films are widely used in industry: as primers of aluminum products before painting or further processing, less often as dielectrics or semiconductors. At the moment, the properties of porous films consisting of packed hexagonally cylindrical pores have been extensively studied.

However, the properties of barrier-type films have been studied little. It is known that the width of the forbidden zone of aluminum oxide makes it possible to use it both as a dielectric and as a semiconductor. The article gives an extensive analysis of the literature on the production of such films by anodizing aluminum substrates, examines the properties of such films as dielectrics, reveals the features of their breakdown and the transfer of charge through them. The basic formulas and constants necessary for the production of barrier alumina are distinguished, such as the dependence of the film thickness on the anodizing time, the anodization constant, and the like.

Keywords: Aluminum oxide, films, anodizing, breakdown, conductivity, tunneling.

Свойства барьерных пленок оксида алюминия.

Рассматривая задачу о движении электрона из среды кристаллической решетки металлического алюминия через слой его оксида в такую же среду под действием

электрического поля, нельзя не задаться вопросом о форме потенциального барьера Al_2O_3 . [13] говорит о способности последнего «изменять свои электрические параметры» при приложении к нему электрического поля. Авторы работы [10] приводят сравнение теории многофононной ионизации ловушек с моделью Френкеля, учитывающую эффект термически облегченного туннелирования. Доказывается непригодность последней концепции для теоретических расчетов процесса переноса заряда через барьер. Делается важное уточнение: слой оксида алюминия, толщиной больше $\sim 10^{-9}$ м не может быть представлен в виде прямоугольного потенциального барьера, так как имеет на границах Al- Al_2O_3 потенциальные ямы, т. н. кулоновские ловушки. С учетом этого, барьер может быть представлен, как показано на рис. 1.

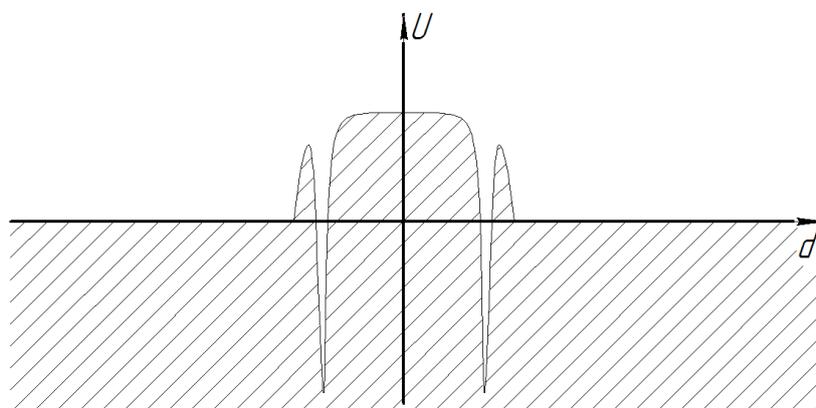


Рис. 1.

*Потенциальный барьер Al_2O_3 с потенциальными ямами
на границах Al- Al_2O_3*

Однако Никифоров Д. К. и его коллеги говорят о приемлемости использования теории Френкеля-Пула для моделирования прохождения заряда через слой оксида алюминия [9]. Мы считаем, что такая разрозненность во мнениях авторских коллективов работ [9] и [10] может быть объяснена тем, что первая описывает механизм ионизации ловушек в запрещенной зоне полупроводника или диэлектрика, вторая исходит из того, что при приложении электрического поля к системе Al- Al_2O_3 -Al все кулоновские ловушки заполняются электронами, и взаимодействия потока электронов с ловушками не происходит.

Таким образом, при моделировании прохождения частицы через барьер требуется учесть только взаимодействие с донорами в его запрещенной зоне [19]. Авторами был проведен эксперимент, в ходе которого было выяснено, что в структурах Al- Al_2O_3 -Al доминирующую позицию в формировании тока занимает механизм активизации Френкеля-Пула. Таким образом, представление плотной однородной барьерной пленки оксида алюминия Al_2O_3 в виде прямоугольного потенциального барьера все же приемлемо.

Работа сотрудников ЦАГИ Курячего, Русьянова, Скворцова [7] посвящена моделированию диэлектрического барьерного разряда (ДБР) в среду газа или воздуха и имеет прямое отношение к теме нашего исследования о туннелировании в системе слоев алюминия и его оксида. Исследователи приводят теоретическое решение задачи ДБР, отдельно формулируют граничные условия диэлектрика и электрода, представляют численное параметрическое описание ДБР. Напоминается также очевидное, от того не менее важное следствие из закона сохранения энергии и второго начала термодинамики, применяя которое к системе Al-Al₂O₃-Al, можно сказать что вся электрическая мощность при коэффициенте пропускания барьера D=0 должна превратиться во внутреннюю энергию системы в результате неупругих столкновений электронов с пленкой барьера при энергии прикладываемого напряжения больше произведения работы выхода электронов из алюминия на их количество. При этом электрическое поле должно периодически изменяться с периодом T что, однако не мешает периоду быть бесконечно большим.

$$\langle W \rangle = \langle Q \rangle,$$

$$\langle W \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} V_e I_r dt,$$

$$\langle Q \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} dt \iint_S jE dS,$$

Здесь T – период изменения электрического поля, V_e – напряжение, приложенное к системе, I_e – ток, протекающий в цепи измерения.

В рамках работы [14] поток электронов в системе Al-Al₂O₃-Al представляется пакетом волновых функций. Приводится сравнение результатов аналитических расчетов и численного эксперимента эволюции Ψ-функции электрона при прохождении барьера. По мнению автора, в большинстве случаев, численный эксперимент с математической моделью дает более точные значения коэффициентов отражения и поглощения потенциального барьера, чем аналитические расчеты. Фурье преобразование волнового пакета в рамках эксперимента позволяет получить распределение амплитуды:

$$P(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x) \exp(-ikx) dx,$$

$$k \in (0; +\infty)$$

При этом должно соблюдаться условие нормировки:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi|^2 dx = 1$$

Кафедра физики факультета приборостроения, информационных технологий и электроники Пензенского государственного университета в 2016 году занималась исследованием диссипативного туннелирования [5]. Целью работы было сравнение влияния двух локальных фононных мод на вероятность одно- и двумерного туннелирования с приложенным внешним электрическим полем. Используя метод инстантонов, в рамках квазиклассического представления был проведен расчет зависимости вероятности одно- и двумерного туннелирования модели осцилляторного потенциала от его взаимодействия с одной или двумя фононными модами. Часть предсказанных расчетами эффектов авторам удалось экспериментально наблюдать.

Большинство фермионных взаимодействий, доступных экспериментальному наблюдению и воспроизведению довольно точно описываются в рамках стандартной модели. Однако моделирование процессов с участием сравнительно большого количества частиц или туннельных переходов, учитывающих влияние интантонов и солитонов лежит вне области ее применения. Автор диссертационного исследования [2] впервые применяет квазиклассический метод нахождения вероятности туннельного перехода при многочастичных столкновениях в рамках калибровочной теории. Было обнаружено принципиально новое явление – туннелирование на сфалерон. В начале работы автором перечисляются все основные физические концепции, способные конкурировать со стандартной моделью, дается их общая характеристика. В основных главах формулируется новый подход к математическому моделированию, в т. ч. с использованием ЭВМ туннелирования высокоэнергетических (порядка энергии сфалерона) фермионов. Дополнение содержит выкладки аналитических расчетов.

Однако, к теме нашего исследования ближе работа [6]. В ней рассматривается процесс «сверхмалых туннельных переходов» (Под этим определением автором [6] понимается явление прохождения частицей потенциального барьера, физические размеры слоя которого меньше порядка сотой доли микрона, в том числе и при низких температурах в системах Al-AlO_x-Al (Подразумевается система Алюминий - Аморфный оксид алюминия - Алюминий. Подробнее в работе [24]). Достигнутой целью работы явилось пространственное и временное коррелирование электронов в системе одного и двух туннельных переходов (т. н.

транзисторный эффект). Впервые описан метод контролируемой манипуляции одиночными электронами, таким образом, дано начало новой области науки – одноэлектронике.

Использованы системы Al-AlO_x-Al, в качестве подложки выступал элемент из ПММА (полиметилметакрилат).

Работа [8] посвящена проблеме туннелирования электрона в сканирующей туннельной микроскопии. Несмотря на огромный массив работ на различных языках, в том числе и изученных в рамках настоящего исследования, некоторые вопросы все еще остаются открытыми. Один из них – вопрос о влиянии материала барьера и его структуры на туннельный ток. «Туннелирование электронов сквозь барьеры, в которых находятся электрон-содержащие системы — атомы или молекулы — часто встречается в различных задачах, связанных с подбарьерным переносом электронов. В сканирующей туннельной микроскопии — это туннельные токи через адсорбированные частицы. Влияние адсорбатов на туннельные токи и есть основная физическая причина возможности их наблюдения в СТМ».

Статья [21], опубликованная в “Journal of applied physics” в 2004 году посвящена исследованию пригодности сверхтонких пленок Al₂O₃·Al к использованию в качестве материала для потенциального барьера в системе Nb-(Al₂O₃·Al)-Nb. Исследователями была получена путем холодного (низкотемпературного) термического оксидирования сверхтонкая пленка оксида алюминия на его поверхности. Проведенные исследования спектрограмм пленок и их ВАХ позволило заявить о пригодности пленок аморфного Al₂O₃ к использованию в качестве материала потенциального барьера. Ссылаясь на более ранние свои исследования [23], авторы говорят, что те же свойства характерны и для γ-Al₂O₃. E. Cîmproiaşu и его коллеги также замечают, что для барьеров оксидов алюминия, полученных разными свойствами характерны разные высоты. Так, например для Al₂O₃ и AlO_x полученного методом термического оксидирования поверхности алюминиевой детали она составляет 1,7-2,5 эВ, для полученного путем электрохимической обработки – 1,2 – 2,0 эВ, плазменной (электродуговой) – 1,7-2,3 эВ.

Исследование [22] посвящено туннелированию электронов через «уltra-тонкий» (на языке оригинала “ultrathin”) слой оксида алюминия, полученного при термической обработке алюминиевой подложки кислородом при комнатной температуре и давлении ~30·10⁻³ бар. Авторы замечают, что в этом случае структура оксида алюминия не может отвечать брутто-формуле Al₂O₃, а представляется в виде AlO_x, где x – некоторое натуральное число. Прикладную сторону изучаемой проблемы они ограничили возможностью применения результатов в областях сканирующей туннельной и электрон-эмиссионной микроскопии.

В статье [4] рассмотрены особенности электрических и диэлектрических характеристик пленочных диэлектриков высоковольтных конденсаторов, даны рекомендации по их эксплуатации в схемах и устройствах, рассчитанных на высокие импульсные напряжения. Целью работы явилось исследование факторов, приводящих к электрическому пробое изолятора. Результаты экспериментов представлены в табличном виде, по ним можно судить о том, что большее количество пробоев локализовано на сгибах и неровностях (дефектах поверхности) диэлектрика. Авторы рекомендуют изготавливать пленки с наименьшим дефектообразованием.

В 2004 году Институтом физики НАН Азербайджана было проведено исследование [11]. Автор озаботился проблемой влияния примесей в материалах диэлектриков на их электрическую прочность. Несмотря на очевидную актуальность проблемы, нельзя сказать что она достаточно хорошо изучена. В работе рассматривается влияние размеров и зарядовых состояний включений на пробой диэлектриков. Подобная задача рассматривается с использованием модели заряженного шара конечных размеров, помещенного в однородное электрическое поле. Объектами исследования стали скопления точечных зарядов (СТД), форма которых максимально приближена к шарообразной. Такие скопления были локализованы в слоях объемного заряда (СОЗ) p-n переходов кремниевых полупроводниковых приборов. На приведенной автором микрофотографии видно расположение СТД вблизи p-области, что свидетельствует об их положительном заряде. В рамках описанной задачи принято представлять СТД заряженным металлическим шаром. При взаимодействии его собственного поля E_0 с внешним приложенным E образуется ловушка, потенциальная яма вблизи СТД. Пробой же с большей вероятностью наступит если $E_0 = E$. В этом случае п. барьер, отделяющий седловую точку п. ямы от границ СТД исчезает, поле захватывает заряды ловушки и разгоняет их в сторону СТД, что приводит в рекомбинации «горячих носителей» и образованию локализованных микроплазм, то есть к пробое диэлектрика.

Изучая пробой диэлектриков нельзя не задаться вопросом о роли в этих процессах эффекта убегания электронов. Он связан с влиянием сильных электрических полей на функцию распределения электронов по энергетическим уровням и, как следствие, появления части электронов, осуществляющей ударную ионизацию [3]. В промышленных газовых диэлектриках этот процесс описывается Таунсендовской моделью. Если же межэлектродное расстояние d удовлетворяет условию $d < 1/\alpha$, где α – коэффициент ударной ионизации, то максимальная кинетическая энергия электронов $eU = eEd$, при U – разгоняющее напряжение. Рассматривая кривую Пашена для подобного случая, можно заметить, что ее нижняя точка

будет соответствовать α_{\max} . Ее саму можно здесь разделить на области убегания, размножения и дрейфа электронов.

В диэлектриках же дело обстоит иначе. Ранее действительно считалось, что эффект убегания электронов играет ключевую роль в пробое кристаллических изоляторов. Однако с появлением монографии Г. И. Сканава (См. Физика диэлектриков: (Область слабых полей) / Г. И. Сканава. – М. ; Л. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1949) возник некий диссонанс: с одной стороны ударная ионизация и убегание электронов были единственными теориями, описывающими пробой твердых диэлектриков, с другой – основные их положения оказались невозможными в рамках изучения пробоя твердых диэлектриков. Устранению этого противоречия поспособствовало рассмотрение этого процесса с учетом перегретой неустойчивости электронов проводимости.

Таким образом, авторы приходят к выводу о невозможности эффекта убегания электронов в твердых диэлектриках. «Электронные процессы в них описываются в рамках ионизации перегретой неустойчивости системы электронов проводимости» – [3].

Авторы работы [12] рассматривают процесс электрического пробоя органических полимерных диэлектриков под действием сильных электрических полей при толщине первых от 0,5 до 10,0 мкм. Выяснено, что морфология полимерного диэлектрика не влияет на форму (на осциллограмме) и параметры пробойных импульсов. Существенную роль играет здесь толщина барьерного слоя. В качестве материалов последнего были выбраны ПММА (полиметилметакрилат), поликарбонат, полистирол. Electroдами были лоскуты алюминиевой фольги, полимеры на них наносились методом центрифугирования из растворов в дихлорэтаноле. Вторым электродом был представлен вольфрамовым шаром, диаметром ~2 мм. Авторами было замечено, что длительность пробойного импульса при любых толщинах диэлектрика (в указанных пределах) одинакова и составляет ~400 нс. В большинстве случаев возникают также кратковременные (до ~100 нс) импульсы напряжения, в разы превышающего номинальное, что может привести к выходу из строя некоторых элементов измерительной цепи.

Получение оксидных пленок на поверхности алюминия.

Наиболее эффективным из методов получения оксидных пленок $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ на поверхности алюминиевых изделий и подложек, позволяющим получить оксид высокой чистоты при наименьшей трудоемкости процесса оксидирования и высокой доступности расходных материалов, оборудования и реактивов является метод анодирования алюминия

Работа [15] посвящена определению режимов анодирования, зависимости морфологии пленки от них. При электрохимическом анодировании на поверхности

алюминия могут образовываться пленки двух типов: вначале барьерные, затем пористые. Морфологические параметры, в т. ч. размер ячейки, диаметр поры и пр. зависят от природы электролитической среды. Поскольку работа содержит развернутый методологический отчет о процессе анодирования, она представляет для нас большую ценность, как единица методологической базы. Авторами сообщается о несоответствии данных имеющихся исследований. Так, Вихарев сообщает о возможности получения в щелочных электролитах барьерных оксидных пленок и только их, Агаюинбо и его коллеги, Филяк и ее коллеги и др. опровергают это утверждение своими исследованиями, показывающими возможность получения в щелочных электролитах, как пористых, так и барьерных оксидных пленок.

Для изучения и контроля процесса анодирования важен вид хроноамперограммы плотности тока от времени. Вначале график резко направлен вниз из-за образования барьерного слоя. Затем ток возрастает вследствие появления в нем трещин и образования ячеек пор. После этого останавливается на некотором постоянном значении, в этот период времени идет процесс образования, структурирования и роста пористого оксида алюминия. Авторы проводят анодирование алюминия чистотой 99,6 % по массе в растворах 0,08 и 0,10 М при напряжении анодирования 20 В, 25 В, 30 В. Из приведенных хроноамперограмм видно, что для образования барьерного слоя при напряжениях 20 В – 25 В в растворах гидроксида натрия 0,10 М необходимо падение плотности тока с 60 мА/см² до 30 мА/см² за промежуток времени ~2 мин.

Тот же авторский коллектив в работе [16] исследовал кинетику процессов анодирования алюминия в щелочных электролитах. Определена зависимость таких характеристик, как удельное сопротивление и электрическая прочность оксидных пленок от режимов электро-химической обработки.

Толщина полученных пленок определена авторами методом светового сечения по ГОСТ 9.031-74. Была аппроксимирована зависимость толщины и скорости роста пленки от времени. Для случая анодирования в 0,10 М р-ре NaOH при напряжении 30 В, аппроксимирующая функция имеет вид:

$$d(t) = 1.133\sqrt{t} + 0.015t + 1.603$$

d – толщина в мкм, t – время в мин.

Электрическую прочность измеряли по авторской методике. Один из электродов был представлен полусферой, т. к. при увеличении площади образца реальное значение пробивного напряжения может быть искажено неоднородностями в морфологии оксида.

Было обнаружено, что электрическая прочность уменьшается с ростом толщины пленки, как следствие влияния эффекта электрического упрочнения. Электрическая прочность с ростом напряжения оксидирования с 20 В до 30 В уменьшилась на 20%. Для пленок, оксидируемых в 0,10 М р-ре NaOH при 30 В она составила ~ 20 кВ/мм.

Удельное электрическое сопротивление измеряли тераомметром, в качестве электродов, для обеспечения более надежного контакта использовали алюминиевую фольгу. Для пленок, полученных в 0,10 М р-ре NaOH при 20 В она составила $\sim 2,10 \cdot 10^8$ Ом·мм.

Работа же [17] посвящена измерению основных диэлектрических характеристик анодного покрытия, среди которых нас интересовало пробивное напряжение. С помощью установки АМИ-60, авторами было выяснено, что для барьерных пленок толщиной до ~ 9 мкм, зависимость $U_{пр}(d)$ аппроксимируется в функцию вида:

$$U_{пр}(d) = 12d + 86$$

Уточняется также, что для пористого оксида, поры которого заполнены водой, характерны свойства полярного диэлектрика, диэлектрическая проницаемость таких пленок зависит от частоты изменения прилагаемого электрического поля.

Более позднее исследование того же авторского коллектива [18] направлено на вычисление константы анодирования для процесса оксидирования алюминия, нахождению зависимости толщины оксида от времени его получения.

Действительная толщина пленок определялась гравиметрическим способом, теоретическая же вычислялась по формуле:

$$d_{th} = A \int_0^t j(t) dt$$

где A – константа анодирования, равная:

$$A = \frac{M_{ок}}{zF\rho_{ок}} \eta$$

$M_{ок}$ – молекулярная масса оксида, z – число электронов, участвующих в реакции, F – постоянная Фарадея, $\rho_{ок}$ – плотность оксидной пленки, η – выход реакции по току.

Однако авторы величину A «считали известной по толщине анодного оксида алюминия» [18]:

$$A = \frac{d_{pr}}{\int_0^t j(t) dt}$$

Вычисленная авторами средняя величина A по разному времени анодирования равна $A = (3,67 \pm 0,2) \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{mA} \cdot \text{мин}$ (время измеряется в минутах, размерность интеграла $\text{mA} \cdot \text{мин}/\text{см}^2$)

Работа Агаюинова и его коллег, уже упомянутая выше, описывает способ получения пористого оксида алюминия и измерения его адсорбционной способности.

Для анодирования был использован электролит с высоким водородным показателем, являющимся смесью 20% фосфорной кислоты и 2,5 М раствора NaOH, общий pH которой равен ~ 13 . Образцом служил брусок алюминия «высокой чистоты» 99,3 % (на языке оригинала «high purity»), предварительно обезжиренный ацетоном.

Полученный оксид изучили на рентген-спектрометре. По виду спектров авторы делают вывод о пренебрежимо малой адсорбционной способности пористого оксида алюминия. Можно заметить, что адсорбционная способность барьерного оксида в разы меньше.

Диссертационное исследование [1] посвящено получению пористых пленок оксида алюминия и создания с их помощью нановолокон. Был впервые изучен механизм формирования нановолокон оксида алюминия, методологической базой работы были различные методики оксидирования алюминия, в том числе и анодирование. Одно из положений, вынесенное на защиту: «Параметрами структуры и скоростью роста пористого оксида алюминия можно эффективно управлять температурой применяемого электролита». Было выяснено, что для наиболее стабильного роста барьерной пленки требуется температура электролите не выше $\sim 280 \text{ К}$.

Библиографический список.

Источники на русском языке.

1. Алпысбаева Б. Е. Получение и исследование наноструктурированных материалов на основе пористого оксида алюминия : дис. ... доктора философии (PhD) в области материаловедения и технологии новых материалов: 6D071000 – Материаловедение и технология новых материалов. - Алматы, 2014.
2. Безруков Ф. Л. Туннельные и многочастичные процессы в электрослабой теории и моделях теории поля: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.02. - М., 2003.

3. Вершинин Ю. Н., Гашимов А. М., Гурбанов Э. Д. Роль эффекта убегания электронов при импульсном пробое диэлектриков // Электронная обработка материалов. - 2005. - №6. - С. 72-75.
4. Гунько В. И., Дмитришин А. Я., Онищенко Л. И., Топоров С. О., Фещук Т. А. Исследование конструкций пленочного диэлектрика для высоковольтных импульсных конденсаторов // Электронная обработка материалов. - 2012. - №2. - С. 93-96.
5. Кревчик П. В., Кревчик В. Д., Семенов М. Б. Эффекты диссипативного туннелирования: теория и сравнение с экспериментом // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. - 2016. - №2. - С. 147-180.
6. Кузьмин Л. С. Коррелированное туннелирование электронов и куперовских пар в сверхмалых туннельных переходах: автореф. дис. ... д-р физ.-мат. наук: 01.04.01. - М., 1996.
7. Курячий А. П., Русьянов Д. А., Скворцов В. В. Особенности численного моделирования диэлектрического барьерного разряда // Ученые записки ЦАГИ. - 2011. - №1. - С. 37-52.
8. Мурясов Р. Р. Вопросы теории туннелирования электронов в СТМ: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17. - М., 2000.
9. Никифоров Д. К., Коржавый А. П., Никифоров К. Г. Влияние диэлектрического нанослоя на эмиссионные свойства структур Al-Al₂O₃ и Be-BeO // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. - 2009. - №79. - С. 153-159.
10. Новиков Ю. Н., Вишняков А. В., Гриценко В. А., Насыров К. А. Перенос заряда в оксиде алюминия: многофононный механизм ионизации ловушек // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. - 2010. - №122. - С. 46-52.
11. Рзаев С. Г. Влияние включений на пробой диэлектриков // Электронная обработка материалов. - 2004. - №5. - С. 41-44.
12. Сударь Н.Т., Егорычев Н.Л., Закревский В.А., Пахотин В.А. О надежности компонентов электронных приборов при электрическом пробое структур металл-полимер-металл // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2004. - №5. - С. 39-44.
13. Тавреев Б. М., Лернер М. М. Оксидная изоляция: научное издание. - 2-е изд., перераб. изд. - М.: Энергия, 1975, 150 с.
14. Темников А. Н. Моделирование квантовых эффектов в одномерных структурах. Прохождение частицы через потенциальный барьер // Вестник Казанского технологического университета. - 2013. - №21. - С. 10-12.

15. Филяк М. М., Каныгина О. Н. Особенности формирования анодного оксида алюминия в щелочных электролитах // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2013. - №1. - С. 154-159.
16. Филяк М. М., Каныгина О. Н. Электрофизические свойства анодного оксида алюминия // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2013. - №9. - С. 240-244.
17. Филяк М. М., Каныгина О. Н. Диэлектрические свойства анодного оксида алюминия из растворов гидроксида натрия // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2015. - №1. - С. 245-249.
18. Филяк М. М., Каныгина О. Н. Кинетика роста пленок анодного оксида алюминия в электролите на основе гидроксида натрия // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2015. - №9. - С. 207-211.
19. Юсупов А. Р. Кинетические явления в аморфных полупроводниках: учеб.-метод. пособие. - Уфа: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики молекул и кристаллов уфимского научного центра Российской Академии Наук, 2013, 50 с.
Источники на английском языке.
20. Araoynbo, A., Fauzi, M., Sreekantan, S. et al (2010). A Novel process to produce nanoporous aluminium oxide using alkaline sodium phosphate electrolyte. *Azian Journal of Materials Science*, № 2, 63-68.
21. Cimpoiasu, E., Tolpygo, S. K., Liu, X. et al (2004). Aluminum oxide layers as possible components for layered tunnel barriers. *Journal of Applied Physics*, № 2, 1088-1093.
22. Rippard, W. H., Perrella, A. C., Albert, F. J. et al (2002). Ultrathin aluminum oxide tunnel barriers. *Physical Review Letters*, № 4, 1-4.
23. S. K. Tolpygo, E. Cimpoiasu, X. Liu, Yu. A. Polyakov, J. E. Lukens, and K. K. Likharev, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13**,99 (2003).

Список использованной литературы.

Литература на русском языке.

1. Воробьев А. А., Воробьев Г. А. Импульсный пробой твердых диэлектриков // Известия томского Ордена Трудового Красного Знамени политехнического института имени С. М. Кирова. - 1958. - №(58). - С. 3-16.
2. Караваев Г. Ф., Гриняев С. Н., Чернышов В. Н. Исследование электронных процессов в наноструктурах // Известия томского государственного университета. - 2005. - №285. - С. 52-56.

3. Кревчик В. Д., Семенов М. Б., Разумов А. В., Гаврина З. А., Кревчик П. В. 2D-туннельные бифуркации в спектрах двухфотонного поглощения света в системе двух взаимодействующих квантовых молекул // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. - 2009. - №4. - С. 147-156.
4. Меркулов В. И., Почивалова А. В. Особенности разряда на границе раздела твердых слоистых диэлектриков // Известия томского политехнического университета . - 2008. - №2. - С. 91-94.
5. Меркулов В. И., Карпицкий О. В. Особенности развития разряда на границе раздела твердых слоистых диэлектриков при длительном воздействии приложенного напряжения // Известия томского политехнического университета . - 2011. - №2. - С. 140-144.
6. Меркулов В. И., Ким И. В. Оценка роли частичных разрядов в процессе развития разряда на границе раздела твердых слоистых диэлектриков при длительном воздействии приложенного напряжения // Известия томского политехнического университета . - 2013. - №4. - С. 94-99.

Литература на английском языке.

7. Frenkel, J. (1938). On pre-breakdown phenomena in insulators and electronic semiconductors. *Physical Review*, № 8, 647-648.
8. Majhi, B. R. (2002). Fermion tunneling beyond semiclassical approximation. *Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology*, № 4, 1-6.
9. Jeurgens, L. P. H., Sloof, W. G., Tichelaar, F. D. et al (2002). Growth kinetics and mechanisms of aluminum-oxide films formed by thermal oxidation of aluminum. *Journal of Applied Physics*, № 3, 1649-1656.
10. Moon, S., Pyun, S. (1999). The formation and dissolution of anodic oxide films on pure aluminium in alkaline solution. *Electrochimica Acta*, № 14, 2445-2454.