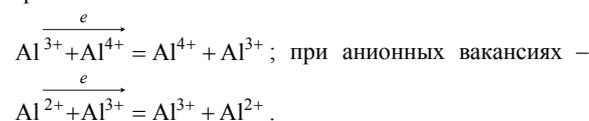


параметр кристаллической решетки алюминия (7,9 Å) практически не отличается от параметра (8,0 Å) решетки  $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ . При переходе  $\gamma$  в  $\alpha$ -модификацию (при нагреве в кислородосодержащей среде) сплошность пленки нарушается и ее защитные свойства утрачиваются. Однако, когда  $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$  полностью переходит в  $\alpha$ -модификацию оксида алюминия, защитные свойства пленки вновь восстанавливаются.

Алюминий, содержащий примеси, образует сложные оксиды чаще всего шпинельного типа  $\text{MeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ . Большинство таких примесей способствуют образованию рыхлых оксидных слоев из-за неблагоприятного параметра  $\beta$  Пилинга-Бердварса и хуже защищают алюминий. Пожалуй, единственным элементом, улучшающим защитные свойства оксидного слоя, является бериллий. Он образует окисел типа  $\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  с исключительно высокими защитными свойствами. Помимо этого окислы бериллия имеют очень высокое электросопротивление ( $> 10^9$  Ом·см), что в свою очередь затрудняет встречную диффузию кислорода и алюминия и тормозит рост окисной пленки.

Стоит остановиться на одном важном факторе, заметно влияющим на свойства эмиссионного слоя. Ранее отмечалось, что стехиометричный  $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$  является идеальным диэлектриком. Это действительно так, но только при отсутствии в кристаллической решетке точечных дефектов – катионных и анионных вакансий, хотя возникновение их при окислении алюминия термодинамически неизбежно. Появление точечных дефектов приводит к серьезным изменениям внутрикристаллических электрических полей и межатомных связей. Так, если точечными дефектами являются катионные вакансии  $\text{Vac}^{3+}$ , то они создают условия для нарушения электронейтральности. Для устранения этого нарушения три близлежащих к вакансии трехвалентных атома алюминия вынуждены отдать по одному электрону кислороду, перейдя в четырехвалентное состояние. Структурная формула оксида с таким дефектом запишется как  $\text{Al}_{2-X-3X}^{3+} \text{Vac}_X^{3-} \text{Al}_{3X}^{4+} \text{O}_4^{2-}$  или  $\text{Al}_{2-4X}^{3+} \text{Vac}_X^{3-} \text{Al}_{3X}^{4+} \text{O}_4^{2-}$ .

Возможен также и вариант с образованием анионных вакансий  $\text{Vac}^{2+}$  при недостатке кислородных атомов. В этом случае структурная формула уже представляется по-другому:  $\text{Al}_{2-2X}^{3+} \text{Al}_{2X}^{2+} \text{O}_{3-X}^{2-} \text{Vac}_X^{2+}$ . Здесь нарушенная электронейтральность восстанавливается за счет изменения валентности катионов алюминия, расположенных рядом с анионной вакансией ( $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Al}^{2+}$ ). Таким образом, даже из приведенных схем понятно, что в реальной кристаллической структуре  $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$  всегда присутствуют разновалентные катионы алюминия ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{2+}$ ) и  $\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$  уже не может считаться диэлектриком по определению. Наличие разновалентных катионов создает условия для легкой передачи заряда при наложении электрического поля: при катионных вакансиях по схеме



Так что эмиссионный слой на алюминии в процессе образования и роста определенно является несовершенным и дефектным, который по типу кристаллического строения и проводимости можно отнести к полупроводникам  $n$ - или  $p$ -типа. Формирование полупроводникового эмиссионного слоя с тем или другим типом проводимости зависит от многих причин и в первую очередь от исходной кристаллической структуры алюминия и значения параметров технологических факторов в принятой технологии окисления.

Поступила в редакцию 20 ноября 2009 г.

Brusentsov Yu.A., Minaev A.M., Pruchkin V.A. Physics and formation mechanism of the nano-sized emission layers on the cold cathode of the gas-discharge laser.

The mechanism of formation of nano-sized oxide layers on high-purity aluminium A5N and also its crystalline structure, cationic structure and emission properties are considered.

*Key words:* oxide spinel, electroneutrality, octahedral and tetrahedral pores, adhesion, pin-hole defects.

УДК 621.762

## ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ В СИСТЕМАХ С МАКРО- И НАНООБЪЕКТАМИ

© А.М. Минаев, Л.Н. Тялина

*Ключевые слова:* вероятность; электрон; интерференция; центр масс; импульс; траектория; волновая функция; стехиометрия.

В статье обсуждаются вероятностные состояния в макро- и микросистемах, указываются противоречия, возникающие при применении методов классической физики и квантовой теории для объяснения явлений, связанных с движением микрообъектов.

Фундаментальной основой мира техники и технологии является вероятностная природа закономерно-

стей тех явлений и физических эффектов, на которых они базируются. При математическом описании вы-

бранных моделей делаются определенные приближения и упрощения иногда такие, когда меняется физическая сущность самих явлений, что может привести к ошибочным выводам и заключениям. Остановимся на некоторых случаях такого рода.

В теории сплавов широко используются диаграммы равновесия, которые строятся экспериментально в координатах «температура – концентрация», где отмечаются температуры начала и окончания затвердевания, начала и окончания того или иного фазового перехода, указывается концентрация химического соединения. Положение устойчивого химического соединения на оси концентраций соответствует стехиометрическому соотношению, например  $A_mB_n$ . Его температурная координата изображается вертикальной линией, которая не имеет толщины. При внимательном анализе диаграммы равновесия возникает противоречие с законами термодинамики: на температурной оси химического соединения отмечаются две критические точки, которые не обнаруживаются при рентгеноструктурном фазовом анализе.

Это противоречие связано с тем, что эвтектическая линия на диаграмме пересекает температурную линию химического соединения, создавая видимость критической точки. Но в этом случае уже нарушится стехиометрия и должна возникнуть область (концентрационная) твердых растворов на базе кристаллической решетки химического соединения. Поэтому с необходимостью вынуждены констатировать, что стехиометрических бездефектных химических соединений существовать не может в принципе. Это согласуется с термодинамическими представлениями – с действием энтропийного фактора: любая система, предоставленная самой себе, стремится к возрастанию энтропии. Энтропия в рассматриваемой системе с химическим соединением может быть увеличена за счет двух факторов: за счет увеличения количества точечных дефектов и других разупорядочивающих кристаллическую структуру явлений. Особенно заметный рост энтропии наблюдается при растворении различных примесей. Кстати, стремление кристалла к образованию твердых растворов имеет важное практическое значение: например, очистка полупроводниковых кристаллов связана с большими технологическими проблемами. В связи с этим полупроводники с собственной проводимостью практически не применяют, а чтобы удовлетворить требование энтропийного фактора, используют легирование примесями, которые создают так называемую примесную  $n$ - и  $p$ -проводимость. Проводимость за счет точечных дефектов приводит к нестабильности полупроводниковых свойств, т. к. концентрация точечных дефектов (и число носителей) зависит от температуры. Например, хорошо очищенный кристалл NiO имеет электросопротивление  $\sim 10^{13}$  Ом·см. Этот же кристалл, нагретый до температуры  $\sim 950$  °C и закаленный с этой температуры, показывает электросопротивление всего  $10^3$  Ом·см. Это связано с тем, что при нагреве увеличивается концентрация точечных дефектов, а при закалке эта концентрация остается зафиксированной, и проводимость поэтому заметно возрастает.

Проявление вероятностных законов в макросистемах заметно отличается от вероятности в микромире, т. е. в квантовых системах. Сначала полезно рассмотреть некоторые постулаты квантовой механики.

Важной характеристикой движения любого объекта является не столько скорость, сколько импульс (количество движения). Импульс также не уничтожим, как и сама материя. Согласно классическим представлениям, когда говорят о положении тела, то имеют в виду центр его массы, т. е. строго математически – это есть геометрическая точка, не имеющая толщины. На самом деле это есть нечто другое, нечто такое, что можно назвать размытостью, хотя и невероятно малых размеров. Разница между классической физикой и квантовой механикой состоит в отличии математической точки (центр масс) от размытости.

Положение «размытой точки» (центра масс) можно описать непрерывной функцией типа  $f(x)$ , которая отлична от нуля не в единственной точке, а в некоторой ее окрестности. Как отмечалось ранее, в центре масс должен быть закодирован импульс. Много усилий изучению этого вопроса посвятил выдающийся физик Луи де Бройль. В результате детального рассмотрения функции  $f(x)$  и ее тщательного анализа де Бройль пришел к выводу, что  $f(x)$  имеет вид, напоминающий зубья расчески, а импульс характеризуется числом повторений. Чем больше частота «зубьев» (чем кривая более «беспокойна»), тем значение импульса больше. Де Бройль сделал попытку связать импульс  $P$  с длиной

волны ( $\lambda$ ) повторений в виде  $P = \frac{h}{\lambda}$ , где  $h$  – постоянная

Планка. Долгое время эту зависимость физики не понимали и не принимали. Было не ясно, какие волны имел в виду де Бройль. Несмотря на эти сомнения, формула де Бройля нашла подтверждение: была обнаружена дифракция электронов (Девиссон, 1927 г.). Измерение расстояний между дифракционными кольцами для электронов заданной энергии позволили определить длину «электронной» волны, вычисленной по формуле де Бройля. Но здесь вновь возникли новые трудности: ведь электрон – типичная корпускула (имеет массу покоя), а возникновение интерференционной картины согласно представлениям классической физики есть результат взаимодействия волн, как и в случае возникновения интерференции при прохождении световых волн через интерферометр.

В квантовой теории часто применяется термин «электронные волны». В это понятие, к сожалению, нередко вкладывается смысл классической волны. Однако по современным представлениям эти волны не являются силовыми в отличие от гравитационных, электромагнитных, звуковых и др. Но если электроны не могут сформировать классическую волну, то тогда возникает вопрос, как же понимать содержание волнового уравнения Шредингера, описывающее поведение электрона в кристалле, решением которого является плоская волна  $\psi(x) \sim e^{ikx}$ , где  $k$  – волновой вектор,  $x$  – координата. Волновая функция  $\psi(x)$ , как утверждают основоположники квантовой теории (например Борн), есть вероятность обнаружить электрон в данной точке объема в заданный момент времени (временное уравнение Шредингера). Эта вероятность хорошо описывается в терминах, используемых для характеристики классических волновых процессов. Корректнее называть функцию  $\psi(x)$  не волновой функцией (устаревший термин), а амплитудой вероятности.

Привычная классическая картина вращающегося вокруг ядра электрона по представлениям квантовой

физики неверна. Одной из причин таких свойств электрона является то, что его центр масс размыт настолько, что эта размытость (и сам электрон с его зарядом) может достигнуть макроскопических размеров ( $> 0,1$  см).

Таким образом, из краткого обзора вероятностных состояний микро- и макросистем видно, что вероятности в разных системах имеют различный физический смысл и оперировать ими необходимо очень внимательно и аккуратно, т. к. в зависимости от условий в одних случаях могут складываться сами вероятности, а в других – амплитуды вероятностей. Результирующим этих сложений становится или суммарное распределе-

ние вероятностей или интерференционная (волновая) картина.

Поступила в редакцию 20 ноября 2009 г.

Minaev A.M., Tyalina L.N. About features of likelihood conditions in systems with macro- and nanoobjects.

In the article likelihood conditions are discussed in macro- and microsystems, contradictions arising while application of methods of the classical physics and the quantum theory for an explanation of the phenomena related with microobjects movement are specified.

*Key words:* probability; electron; interference; centre of weights; impulse; trajectory; wave function; stoichiometry.

УДК 621.762.214

## ПОЛУЧЕНИЕ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

© Ю.А. Брусенцов, И.С. Филатов, И.Г. Проценко

*Ключевые слова:* взрывное испарение; пленки проводящих и магнитных материалов; оптоэлектронные устройства. Предложен способ получения пленок микро- и наноразмерной толщины методом взрывного испарения металлов пропусканием через них тока при разряде конденсатора. Оценено влияние электрических параметров конденсатора на структуру и толщину получаемой пленки.

В современной технологии получения микросхем и оптоэлектронных устройств существует множество методов получения пленок из проводящих и магнитных материалов [1], материалов с особыми оптическими и физическими свойствами [2].

Существуют различные методы получения пленок проводящих и магнитных материалов на поверхностях – вакуумное испарение, гальваническое осаждение, нанесение проводящих и резистивных паст и др. Эти процессы продолжительные по времени и зачастую не дают качественное покрытие. Так, метод вакуумного испарения требует дорогостоящего и громоздкого оборудования, и пленка может быть нанесена только на плоскую поверхность [3]. Гальваническое осаждение металла на непроводящие поверхности тоже сопряжено со значительными трудностями. Этот процесс сопровождается выделением опасных для здоровья газов и продолжителен во времени [4]. Кроме того, во всех этих методах существующие технологические ограничения не позволяют нанести качественное покрытие на внутренние поверхности изделий. Некоторые сплавы, например, твердые растворы при вакуумном испарении, разделяются на отдельные компоненты и дают неконтролируемое по химическому составу покрытие. В [5] авторы используют взрыв проводника для получения микро- и наноразмерных частиц тугоплавких материалов.

В работе предложена методика получения микро- и наноразмерных пленок металлов и сплавов методом взрывного испарения. Они имеют проводящие свойства и могут быть нанесены не только на внешние, но и

на внутренние поверхности изделий при помещении испаряемого проводника внутрь их.

Целью работы является изучение структуры и толщины пленок, полученных в результате взрывного испарения различных материалов.

Известно, что основными проводящими материалами в радиоэлектронике для изготовления микросхем методом вакуумного напыления являются золото и медь. Для получения слоя с высоким электросопротивлением чаще всего используются хром, керметы. Изменением толщины напыленного слоя можно в широких пределах изменять значение удельного электросопротивления.

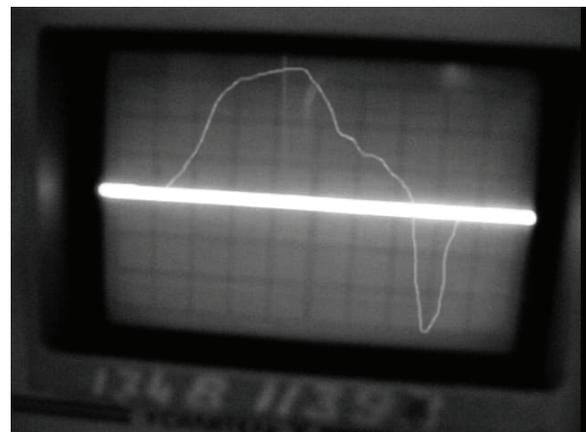


Рис. 1. Импульс тока при прохождении через материал