

С. П. Бардаханов¹, А. П. Завьялов², К. В. Зобов², В. И. Лысенко¹,
А. В. Номоев³, В. В. Обанин^{1,2}, Д. Ю. Труфанов¹

¹ Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

³ Бурятский государственный университет
ул. Смолина, 24а, Улан-Удэ, 670000, Россия
E-mail: bard@itam.nsc.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И НИКЕЛЯ*

Работа посвящена экспериментальному изучению электропроводящих свойств наноразмерных порошков оксидов кремния и алюминия и магнитной проницаемости нанопорошка никеля, проводится сравнение с соответствующими показателями для воздуха. Для нанопорошка диоксида кремния сравниваются расстояния возникновения пробоя в различных порошках и в воздухе. Эксперименты показали, что наноразмерные порошки диоксида кремния могут препятствовать пробоем воздуха, но для разных порошков это свойство выражено в разной степени. Для порошков оксида алюминия определялись зависимости электрического сопротивления от расстояния между электродами. На их примере показано, что нанопорошки диэлектрических соединений могут обладать проводящими свойствами. Определена диэлектрическая проницаемость ϵ нанопорошков диоксида кремния различной дисперсности и нанопорошка оксида алюминия. Также определена магнитная проницаемость μ нанопорошка никеля.

Ключевые слова: нанопорошки, оксиды кремния и алюминия, электрические свойства, проводимость, магнитная проницаемость.

Введение

Частицы с размерами менее 100 нм (наночастицы) придают материалам новые свойства. Например, нанопорошки металлов, полученные на ускорителе электронов [1–2] путем испарения исходных материалов, обнаруживают высокие каталитические свойства [3], а нанопорошки кремния после воздействия ультрафиолетового излучения переизлучают в видимой сине-зеленой части спектра [4].

Но в целом свойства наноразмерных порошков изучены еще довольно мало. Одной из причин этого является сложность их производства. В данной работе использовались нанопорошки разных производителей, в том числе нанопорошки диоксида кремния «тар-

косил», которые производятся в ИТПМ СО РАН и ИЯФ СО РАН на ускорителе электронов [1–2]. Процесс основан на испарении исходного вещества под воздействием электронного пучка, созданного электронным ускорителем, причем производство таркосила идет без специальной атмосферы, на открытом воздухе. Продукты испарения захватываются потоком холодного воздуха, охлаждаются и коагулируются (образуют агломераты).

В нашей работе также использовались нанопорошки диоксида кремния «аэросил» и оксида алюминия (Al_2O_3), произведенные фирмой «Degussa» (Германия) [5] (химическим путем), нанопорошок оксида алюминия Сибирского химического комбината, г. Северск Томской области (получен плаз-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-Монголия 2007–2008 гг. (проект № 07-02-90103) и Рособразования (РНИ.2.1.2.3370).

мохимическим путем) и нанопорошки никеля производства томских институтов ИХН СО РАН и ИВН при ТПУ (приготовлены методом электрического взрыва проводников).

Так как нанопорошки представляют собой достаточно новое явление, многие их свойства и параметры еще не исследованы. Для создания физической и математической моделей нанодисперсных сред необходимо проведение разностороннего изучения особенностей их поведения в классических задачах физики.

Целью данной работы было исследование таких электромагнитных характеристик нанодисперсных сред, как диэлектрическая и магнитная проницаемости, электропроводимость и пробойное расстояние (в диэлектрическом нанопорошке при заданном напряжении).

Описание и результаты экспериментов

Было проведено четыре различных эксперимента – по измерению пробойного расстояния в нанопорошках диоксида кремния; измерению зависимости сопротивления от расстояния между электродами порошков оксида алюминия; измерению диэлектрической проницаемости порошков оксидов кремния и алюминия и измерению магнитной проницаемости нанопорошков никеля.

Измерения расстояния пробоя производились на установке, схема которой представлена на рис. 1. Установка состоит из пластикового стакана 1, дно которого заменено латунным электродом 2, а над ним

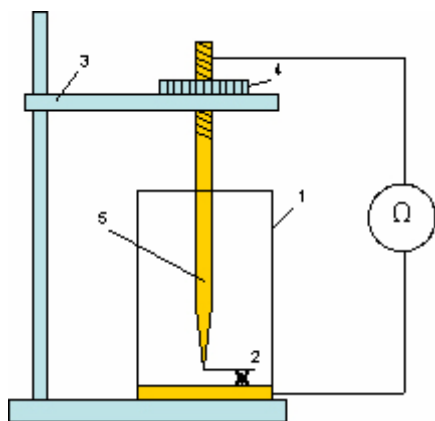


Рис. 1. Экспериментальная установка для измерения расстояния пробоя в воздухе и порошке

с помощью штатива 3 и координатного устройства 4 закреплен второй электрод 5. Пробой определялся при помощи мегомметра, который позволял создавать достаточно высокое и стабильное напряжение (2,5 кВ) и при пробое показывал резкое падение сопротивления. Координатное устройство позволяло менять расстояние с достаточно высокой точностью (цена деления 0,01 мм). В начале каждого измерения выставлялся координатный ноль по соприкосновению электродов. Затем расстояние между электродами увеличивалось до 1 мм, подавалось высокое напряжение, и начинался медленный спуск электрода. Как только в воздухе происходил пробой, расстояние фиксировалось, засыпался нанопорошок, и спуск продолжался, пока не начинался пробой в порошке. Расстояние фиксировалось, и электрод опускался для проверки координатного ноля.

В результате эксперимента были получены расстояния, на которых происходит пробой в исследуемых нанопорошках, и проведено сравнение с аналогичной величиной для воздуха при тех же условиях эксперимента. Результаты приведены на рис. 2. Порошки расположены в порядке увеличения среднего размера частиц слева направо: аэросил А-380 (средний диаметр частиц 7 нм), таркосил Т-20 (25 нм), аэросил А-90 (40 нм) и таркосил Т-05 (50 нм).

Эксперимент показал, что в нанопорошках диоксида кремния (SiO_2) пробой происходит на меньших расстояниях, чем в воздухе.

Оценочные измерения электрического сопротивления нанопорошков производились на той же установке, на которой измерялись расстояния пробоя. Использовался тот же мегомметр. Хотя регистрируемые сопротивления не являются достаточно точными, но данный эксперимент показал особенности изменения сопротивления в данных средах. При достаточном уменьшении величины исследуемого сопротивления, мегомметр заменялся мультиметром для увеличения точности. Измерения производились по той же схеме. Определялся ноль, электрод поднимался, мегомметр включался, после чего электрод медленно опускался с фиксацией величины сопротивления для разных расстояний.

Эксперимент показал, в частности, что нанопорошок оксида алюминия (Al_2O_3)

производства фирмы «Degussa» обладает следующими свойствами. Порошок пробивается на ббльших расстояниях, чем воздух при тех же условиях. Кроме того, постоянно происходит небольшое стекание заряда с электродов, что может быть объяснено наличием небольшой проводимости (высокого, но конечного сопротивления).

В порошке Сибирского химкомбината пробой не наблюдался. Для него была получена зависимость полного сопротивления порошка от расстояния между электродами, представленная на рис. 3. Хотя оксид алюминия не является проводящим материалом, его нанодисперсный порошок обладает проводящими свойствами. Впрочем, этот порошок показал себя не совсем типичным проводником. Его сопротивление с уменьшением расстояния уменьшалось, но не линейно. Кроме того, наблюдался интересный эффект. При любом расстоянии между электродами сопротивление со временем (при включенной установке) постепенно начинало расти (от указанного на графике) в бесконечность (что возможно, когда порошку присуща собственная емкость).

Данный эксперимент не столько дал численные значения каких-либо параметров, сколько показал принципиальную возможность исследуемых сред (в общем, не континуальных, а являющихся смесью диэлектриков) проводить ток.

Измерение диэлектрической проницаемости производилось при помощи плоского конденсатора, который представлял собой короб, дно и крышку которого образовывали плоские диэлектрические пластины с медным покрытием. Измерения емкости производились при помощи универсального моста E7-11, что давало достаточно высокую точность. Сначала проводилось измерение емкости «пустого» конденсатора, затем он заполнялся порошком, и измерение повторялось. «Пустой» конденсатор имел емкость 79 пФ. По полученным данным определялась диэлектрическая проницаемость разных нанопорошков, значения которой представлены на рис. 4. Погрешность определения диэлектрической проницаемости для порошков диоксида кремния составила 0,06, а для порошка оксида алюминия 0,07. На рис. 4 порошки приведены не в порядке среднего размера частиц, а в порядке роста значения ε. Объемная доля твердых частиц

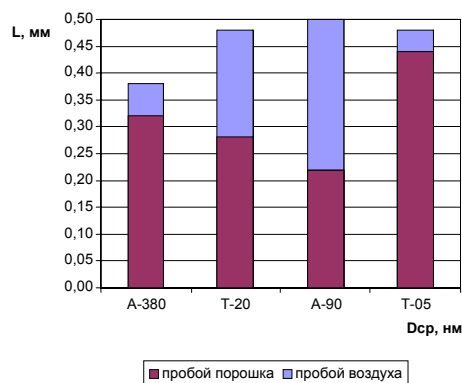


Рис. 2. Расстояние, на котором происходит пробой в воздухе и в нанопорошках диоксида кремния разных марок (порошки расположены в порядке увеличения среднего размера частиц)

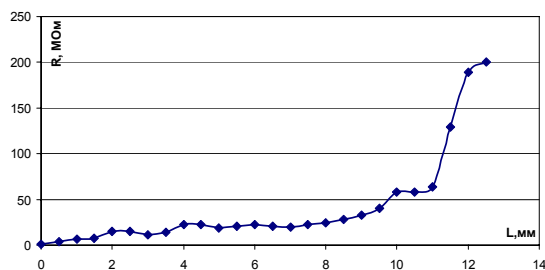


Рис. 3. Зависимость сопротивления нанопорошка оксида алюминия производства СХК от расстояния между электродами

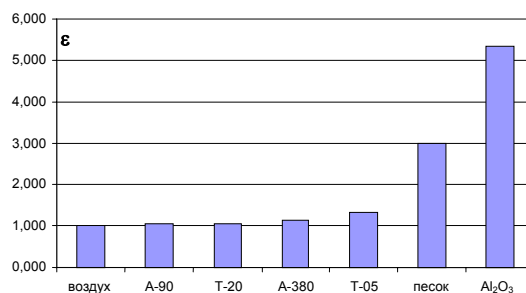


Рис. 4. Значение диэлектрической проницаемости для различных нанопорошков

диоксида кремния относительно воздуха составляла около 2 %.

Измерение диэлектрической проницаемости нанопорошка оксида алюминия производства Сибирского химического комбината было осложнено наличием проводящих свойств. Установка была изменена добавлением прослоек из тонких листов бумаги между обкладками конденсатора и нанопо-

рошком. При этом емкость «пустого» конденсатора уменьшилась до значения 35 пФ. При заполнении его порошком оксида алюминия значение емкости возросло до 185 пФ. По отношению этих величин и было рассчитано значение диэлектрической проницаемости Al_2O_3 .

Измерение магнитной проницаемости производилось аналогично определению диэлектрической проницаемости. При помощи универсального моста измерялась индуктивность катушки, у которой в качестве сердечника использовалась пробирка с нанопорошком. Сначала производилось измерение индуктивности пустой катушки, а затем с различными порошками. По полученным данным определялась магнитная проницаемость порошка.

Эксперимент показал, что нанопорошки диоксида кремния и оксида алюминия, использованные в вышеприведенных экспериментах, имеют магнитную проницаемость, равную значению магнитной проницаемости воздуха в пределах погрешности эксперимента. Поэтому были использованы нанопорошки ферромагнетика (никель). Результаты представлены на рис. 5 (образцы 1 и 2 получены в разных томских институтах – соответственно в ИХН СО РАН и ИВН при ТПУ). Погрешность измерения составила 0,003.

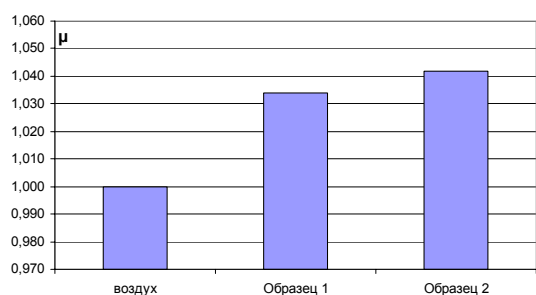


Рис. 5. Значения магнитной проницаемости для нанопорошков никеля

Неожиданно оказалось, что нанопорошки никеля проявляют ферромагнитные свойства лишь в слабой степени.

Обсуждение и выводы

Нанопорошки диоксида кремния имеют меньшее расстояние пробоя, чем воздух. Расстояния пробоя в различных порошках

различно. Предположительными причинами этого являются различия среднего размера частиц, структуры агломератов, фазового состава, химического состава примесей, наличие полых частиц и другое. Порошок имеет насыпную структуру, которая образует систему пор и канальцев, стенки которых состоят из непроводящего материала. Эта структура может препятствовать образованию пробойного канала в порошке.

Данные по электрическому сопротивлению нанопорошка оксида алюминия показали, что, хотя оксид алюминия не является проводящим материалом, его нанодисперсный порошок обладает проводящими свойствами.

Таким образом, некоторые нанопорошки являются хорошими изоляторами, а некоторые (даже непроводящих веществ) могут проводить ток.

Оказалось, что нанопорошки никеля проявляют ферромагнитные свойства лишь в слабой степени.

Список литературы

1. Лукашов В. П., Бардаханов С. П., Салимов Р. А. и др. Способ получения ультрадисперсной двуокиси кремния, устройство для его осуществления и ультрадисперсная двуокись кремния. Патент РФ №2067077 // Бюл. изобретений. 1996. № 27.
2. Бардаханов С. П., Корчагин А. И., Куksанов Н. К. и др. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении // ДАН. 2006. Т. 409, № 3. С. 320–323.
3. Korchagin A. I., Kuksanov N. K., Lavrukhin A. V. et al. Production of silver nanopowders by electron beam evaporation // Vacuum. 2005. Vol. 77. Is. 4. P. 485–491.
4. Ефремов М. Д., Володин В. А., Марин Д. В. и др. Видимая люминесценция нанопорошков кремния, созданных испарением кремния мощным электронным пучком // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 80, вып. 8. С. 619–622.
5. Bode R., Ferch H., Fratzscher H. Basic characteristics of Aerosil Fumed Silica, Fine particles// Degussa Tech. Bull. 2006. № 11.

**S. P. Bardakhanov, A. P. Zavjalov, K. V. Zobov, V. I. Lysenko,
A. V. Nomoev, V. V. Obanin, D. Yu. Trufanov**

**RESEARCH OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF SILICA, ALUMINA
AND NICKEL NANOPOWDERS**

The paper is devoted to experimental study of electroconductive properties of silica and alumina nanopowders and magnetic conductivity of nickel nanopowder, comparison with air data is carried out. The experiments showed that silica nanopowders can prevent from air disruption. It was shown also that dielectric compounds (for example, alumina) nanopowders can possess electroconductive properties.

Keywords: nanopowders, silica, alumina, electrical properties, conductivity, magnetic conductivity.