

Министерство образования и науки РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**Исследование диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика на
СВЧ при фазовом переходе из твердой фазы в жидкую фазу**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 411 группы
направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»
факультета нано- и биомедицинских технологий

Антонова Владимира Александровича

Научные руководители

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч.
звание

подпись, дата

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч.
звание

подпись, дата

Д.В. Пономарев

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

Заслуженный деятель науки РФ,
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч.
звание

подпись, дата

Д.А. Усанов

инициалы, фамилия

Саратов 2018

Введение

На данный момент одной из наиболее развивающихся областей науки является разработка высокоэффективных, технологичных в производстве - поглощающих структур. Особый интерес проявляют к себе такие структуры как полярные диэлектрики. Одним из представителей данного вида диэлектриков является вода.

Главная электрическая характеристикой любой среды – диэлектрическая проницаемость и в случае воды демонстрирует необычные для жидкости особенности. Она очень велика (для статических электрических полей она равна 81), в то время как для другого агрегатного состояния вещества (твёрдой фазы) – льда, она достаточно мала (3,2).

Оба вещества представляют собой диэлектрики с широкой электронной запрещенной зоной равной примерно 5 эВ. Для простых диэлектриков они обладают высокой протонной проводимостью (проводимость льда в три раза меньше воды). Диэлектрические постоянные также аномально высоки. Идентичность диэлектрических постоянных является загадочной, поскольку, как считается, микроскопические механизмы $\epsilon(0)$ в воде и льду микроскопически различны.

При фазовом переходе льда в воду – данная структура может рассматриваться как композитный материал. Так как в определенный момент времени различные доли воды и льда, следовательно, также различны и свойства структуры.

Целью данной работы является выявление особенностей взаимодействия СВЧ излучения с композитным материалом, одним из компонентов которого является вода в точке фазового перехода.

Бакалаврская работа содержит 4 главы:

1. Критический анализ современного состояния исследований полярных диэлектриков

1.1 Диэлектрические материалы

1.2 Виды диэлектриков

1.3 Поляризация диэлектриков

1.4 Диэлектрическая проницаемость

1.4.1 Общие свойства

1.5 Диэлектрические особенности свойств воды

1.6 Диэлектрические особенности свойств льда

1.7 Композитные материалы

2. Компьютерное моделирование структуры

3. Результаты компьютерного моделирования взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ диапазона с полярным диэлектриком при фазовом переходе из твёрдой фазы в жидкую фазу

4. Результаты экспериментального исследования взаимодействия СВЧ излучения с полярным диэлектриком при фазовом переходе из твёрдой фазы в жидкую фазу

1. Критический анализ современного состояния исследований полярных диэлектриков

1.1 Диэлектрические материалы

В электродинамике материальных сред разделяют вещества на диэлектрики, в них существуют только связанные заряды, и на проводники, в них все заряды являются свободны. То есть, в диэлектриках заряды имеют возможность перемещаться только на микроскопические расстояния, а в проводниках возможно перемещение зарядов на макроскопические расстояния. Линейный отклик на электрическое поле в первых – описывают диэлектрической проницаемостью, а во вторых – электрической проводимостью.

Диэлектрические материалы – это класс электротехнических материалов, оказывающих достаточно большое сопротивление электрическому току, и они могут поляризоваться в электрическом поле.

1.2 Виды диэлектриков

На данный момент различают два основных типа диэлектриков: полярный и неполярный.

В молекулах полярных (дипольных) диэлектриков центры тяжести зарядов разных знаков «смещены» относительно друг друга и имеют чёткую границу раздела. В данном случае молекулы обладают собственным дипольным моментом. Но без воздействия внешнего электрического поля эти дипольные моменты ориентированы хаотически, из-за теплового движения молекул, и поэтому суммарный дипольный момент такого диэлектрика равен нулю.

В молекулах неполярных (нейтральный) диэлектриков в отсутствие внешнего электрического поля центры тяжести отрицательных и положительных зарядов совпадают. Для данных материалов дипольный момент равен нулю. Суммарный дипольный момент неполярного диэлектрика также равен нулю.

1.3 Поляризация диэлектриков

Одним из важнейших свойств диэлектриков является их способность поляризоваться под воздействием внешнего электрического поля.

Явление поляризации – изменение положения в пространстве частиц диэлектрика, которые имеют определенный электрический заряд того или иного знака, в связи с этим каждый макроскопический объем диэлектрика приобретает некоторый наведенный (индуцированный) электрический момент, которым этот объем диэлектрика до воздействия внешнего электрического поля не обладал.

1.4 Диэлектрическая проницаемость

Диэлектрическая проницаемость – это одна из важнейших электродинамических характеристик среды (газа, жидкости, твёрдого тела), частицы которой обладают зарядом или магнитным моментом. Данное понятие распространяется также на непротяжённые системы (атом, ядро, нуклоны).

С помощью диэлектрической проницаемости описываются внутренние свойства среды (спектр возбуждений, взаимодействие частиц) и результат воздействия на неё внешних зарядов или токов (неупругое рассеяние заряженных частиц, прохождение электромагнитных волн). Данная величина содержится в материальных уравнениях, а они являются дополнением системы уравнений Максвелла, делая её замкнутой.

1.4.1 Общие свойства

Самое простое определение диэлектрической проницаемости заключается в том, что она (статическая диэлектрическая проницаемость) показывает, во сколько раз уменьшится Кулоновское взаимодействие зарядов, которые не испытывают обратного влияния среды, при переносе их из вакуума в данную среду. Также диэлектрическая проницаемость ϵ связывается уравнением

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1)$$

электрическую индукцию \mathbf{D} с напряжённостью \mathbf{E} электрического поля в среде.

1.5 Диэлектрические особенности свойств воды

Диэлектрическая проницаемость для воды демонстрирует очень необычные свойства. Она очень велика, для статических электрических полей $\epsilon = 81$, а для других веществ обычно не превышает значения 10 (для льда – 3,25).

При воздействии на вещество переменным током его диэлектрическая проницаемость становится не постоянной величиной, а появляется

зависимость от частоты приложенного поля, сильно уменьшаясь для полей высоких частот.

Также у воды есть особенность в том, что её диэлектрическая проницаемость уменьшается не только в переменных во времени полях, но также и в пространственно-переменных полях, таким образом, вода - не локально поляризующаяся среда.

Из-за особенностей химического строения молекулы H_2O объясняется значение её диэлектрической проницаемости.

Молекула воды H_2O построена в виде треугольника (рис.1): между связью кислорода – водорода угол $104,7$ градуса. Относительно кислорода, два атома водорода расположены по одну сторону. Электрические заряды в молекуле рассредоточиваются.

Причина особого взаимодействия между разными молекулами H_2O объясняется тем, что вода – полярный диэлектрик.

Атомы водорода в молекулах H_2O имеют частичный положительный заряд при взаимодействии с электронами атомов кислорода соседних молекул. Такой вид химической связи носит название - водородной. Такая связь объединяет молекулы воды в своеобразные полимеры пространственного строения; плоскость расположения водородных связей перпендикулярна плоскости атомов той же молекулы H_2O .

Таким образом, большое значение статической диэлектрической проницаемости воды $\epsilon = 81$ связано с тем, что вода - сильно полярная жидкость, и, вследствие этого, обладает мягкой ориентационной степенью свободы (т.е. вращением молекулярных диполей).

Чтобы описать реакцию воды на внешнее электрическое поле в 1929 г. П. Дебай предложил сделать это с помощью комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}) / (1 + i \omega \tau) \quad (2)$$

где ω - частота внешнего электрического поля, i - мнимая единица, τ - характерное время релаксации, $\varepsilon_{\infty} \approx 4 \div 5$ - диэлектрическая проницаемость воды при максимально высокой частоте внешнего поля, ε_0 - электрическая постоянная $\approx 8,85$.

Для вывода формулы Дебая была использована довольно искусственная модель структуры воды. Данное выражение довольно четко соответствует экспериментальным данным, и тому, что из-за роста частоты внешнего поля диэлектрическая проницаемость резко падает.

1.5 Диэлектрические особенности свойств льда

Лёд является твёрдой фазой полярного диэлектрика – воды. Свойства воды и льда имеют достаточное сильное различие.

Во время низовых метелей крупные кристаллы льда заряжаются отрицательно, а более мелкая снежная пыль - положительно. Свежевыпавший снег во всех случаях обнаруживает более значительную электризацию, чем уже слежавшийся. При взвихривании снежной пыли в воздухе может возникать объемный заряд до 1^{-8} кулон м^3 . Особенно сильные электрические поля (до 100 в/см) наблюдаются во время снежных метелей в полярных и высокогорных областях, где за счет электризации антенн сухим снегом весьма усиливаются помехи радиосвязи. Сталкиваясь с проводами линий телефонной или телеграфной связи, снежинки из метельных потоков передают им свой заряд. При хорошей изоляции от земли, заряд может накопиться такой большой, что в прилегающем воздухе возникнет коронный разряд.

Движение лавин в горах в безлунные ночи иногда сопровождается зеленовато-желтым свечением, благодаря чему лавины становятся видимыми. Обычно световые явления наблюдаются у лавин, которые движутся по снежной поверхности, и не наблюдаются у лавин, проносящихся

по скалам. По-видимому, причиной свечения лавин является коронный электрический разряд наэлектризованных масс снега. На озерах Антарктики во время полярной ночи иногда возникает свечение при разламывании крупных масс озерного льда. Свечение это - результат электрического разряда, возникающего при разрушении льда.

Электропроводность льда и снега весьма мала. Она во много раз меньше электропроводности воды. Различные примеси оказывают существенное влияние на электропроводность воды и почти не изменяют электропроводности льда. Электропроводность химически чистой воды обусловлена частичной диссоциацией молекулы воды на ионы H^+ и OH^- . Основное значение для электропроводности и воды и льда имеют перемещения ионов H^+ (протонные перескоки).

1.7 Композитные материалы

Композиционные материалы – это материалы, состоящие из двух или несколько компонентов, которые отличаются по своей природе или химическому составу, где компоненты объединены в единую монолитную структуру с границей раздела между компонентами, оптимальное сочетание которых позволяет получить комплекс физико-химических и механических свойств, отличающихся от комплекса свойств компонентов.

Структуру, которая образуется в процессе фазового перехода льда в воду, можно рассматривать как композитный материал. Такой вывод делается из того, что у нас нет чёткого раздела фаз, данный процесс постепенный, и свойства такого «материала» меняются.

Был проведен анализ работы по исследованию влагосодержащих пористых матриц. Авторами установлена зависимость диэлектрических свойств влагосодержащих композитов от влагосодержания и вида матрицы. Получены формулы, позволяющие описывать диэлектрические характеристики влагосодержащего материала в зависимости от его удельной поверхности.

2. Компьютерное моделирование структуры

Измерять диэлектрическую проницаемость среды можно по изменению коэффициента отражения или прохождения электромагнитного излучения.

В связи с этим были созданы различные модели структуры в ANSYS HFSS для трехмерного моделирования СВЧ-устройств произвольной геометрии.

Программное обеспечение HFSS даёт возможность расчета электрических и магнитных полей, токов, S параметров и излучений. Для решения нашей задачи используется метод конечных элементов.

3. Результаты компьютерного моделирования взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ диапазона с полярным диэлектриком при фазовом переходе из твёрдой фазы в жидкую фазу

В данном разделе исследовалась структура, состоящая из диэлектрика (капролон) с включения в виде 5 цилиндров диаметром 1 мм и 2 мм, в которые был залит полярный диэлектрик (вода). Проводили измерения коэффициентов отражения при фазовом переходе полярного диэлектрика из твёрдой фазы в жидкую в диапазоне частот 8 – 12 ГГц.

4. Результаты экспериментального исследования взаимодействия СВЧ излучения с полярным диэлектриком при фазовом переходе из твёрдой фазы в жидкую фазу

Экспериментально исследовалась структура, которая была описана ранее в пункте 3. Измерение амплитудно-частотных характеристик коэффициентов отражения исследуемого образца в трехсантиметровом диапазоне длин волн проводилось с помощью векторного анализатора цепей Agilent PNA-L Network Analyzer N5242A. Получены АЧХ коэффициентов отражения для данной структуры. Произведено сравнение полученных экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования. Показаны соответствия между теоретическим расчётом и полученными данными.

Список использованных источников

- 1 D. Eisenberg and W. Kauzmann, *The Structure and Properties of Water*. Oxford: Oxford University Press; 1969.
- 2 A. von Hippel, The Dielectric Relaxation Spectra of Water, Ice, and Aqueous Solutions, and their Interpretation. *IEEE Trans Electr Insul.* **23**, 801–816 (1988).
- 3 I. A. Ryzhkin, Ice in Proton conductors. In: Colomban P, ed. *Solids, membranes and gels materials and devices*. Cambridge: Cambridge University Press; 1992:158–164.
- 4 А.В.Клюев, И.А. Рыжкин Обобщённая диэлектрическая проницаемость льда - Письма в ЖЭТФ, том 100, вып. 9, С.683-687
- 5 Физические величины. Справочник/А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина и др.; Под ред. И.С. Григорьева и Б.З. Мейлихова. М.; Энергоатомиздат, 1991, С. 12-32.
- 6 Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. –М.: Энергоиздат, 1982. С. 320-332.
- 7 Диэлектрическая проницаемость [Электронный ресурс] / Энциклопедия физики и техники [Электронный ресурс] – URL: http://femto.com.ua/articles/part_1/1099.html (дата обращения: 11.04.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 8 Зацепина, Г.Н. Свойства и структура воды / Зацепина, Г.Н. – М.:Изд-во МГУ,1974.С.168-175.
- 9 Строение молекулы воды [Электронный ресурс] / Энциклопедия физики и техники [Электронный ресурс] – URL: <https://studfiles.net/preview/2074032/page:12/> (дата обращения: 13.04.2018). Загл. с экрана. Яз. рус
- 10 Эйзенберг, Д. Структура и свойства воды./ Эйзенберг, Д. Кауyman В.-Л.:Гидрометеиздат,1975,С. 280-291.
- 11 Ахадов Я.Ю., Диэлектрические параметры чистых жидкостей / Ахадов Я.Ю. - Москва,- МАИ, 1999. С. 854.
- 12 Карапетьянц, М.Х. Строение вещества / Карапетьянц М.Х., Дракин С.И.-М: "Высшая школа", 1978, С. 55.
- 13 Бородулин В. Н. Диэлектрики. –Изд-во МЭИ. М.: 1993. С. 60-73.
- 14 Паундер, Э. Физика льда/Пауэндер, Э.-М.:Изд-во Мир, 1967,С. 190-195.
- 15 Маэно,Н.Наука о льде/Маэно,Н.-М.:Мир,1988. С. 231-240.
- 16 Композитные материалы [Электронный ресурс] / Композитные материалы [Электронный ресурс] – URL: <http://poznayka.org/s83374t1.html> (дата обращения: 05.06.2018). Загл. с экрана. Яз. Рус
- 17 Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS. М. (2004). С. 14.