

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

РАДИОФИЗИКА

УДК 537.222

ИЗМЕРЕНИЕ ВАРИАЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Л. Г. Прохоров, В. П. Митрофанов

(кафедра физики колебаний)

E-mail: prokhorovlg@phys.msu.ru

Представлены результаты экспериментального исследования факторов, влияющих на распределение электростатических зарядов на образцах плавленого кварца и сапфира.

Чувствительными элементами интерферометрических детекторов гравитационного излучения являются пробные массы, изготавливаемые из высокочистых диэлектрических материалов, таких, как плавленый кварц или сапфир [1]. Они способны накапливать и сохранять электрические заряды. Находящиеся на пробных массах заряды взаимодействуют с окружающими телами посредством электростатических сил. Изменение распределения электрических зарядов может создавать дополнительный шум и ограничивать чувствительность детектора. Для исследования электрических зарядов, находящихся на поверхности диэлектриков, используются бесконтактные зондовые методы, основанные на измерении электростатической силы или индуцированного на зонде заряда [2–4]. В настоящей работе использовался специально разработанный электрометр с вращающимся образцом, обеспечивающий высокую чувствительность и минимальное влияние измерителя на распределение зарядов на образце. Измерения можно было проводить как на воздухе, так и в вакууме.

Схема электрометра представлена на рис. 1. Диэлектрический образец в форме диска на ножке мог вращаться вокруг своей оси с помощью электродвигателя. Под образцом помещался зонд, который сканировал его поверхность вдоль установленной полосы при вращении образца. Специальный датчик позволял привязать положение точек на диске к положению зонда и контролировать скорость вращения ω . Электрический заряд q , индуцированный на зонде, пропорционален локальной плотности электрического заряда над зондом σ и эффективной площади S , индуцирующей заряд на зонде. Она сравнима с площадью зонда при условии малости зазора h между зондом и образцом по сравнению с диаметром зонда d . Эквивалентная схема входной цепи зонда (рис. 1) позволяет рассчитать величину электрического напряжения, формирующегося на входе усилителя с большим входным сопротивлением R . Здесь C_p — емкость между областью диэлектрика, индуцирующей заряд, и зондом, C_g — между той же областью и заземленным окружением, C_m — между зондом и землей. Напряжение V_m на входе

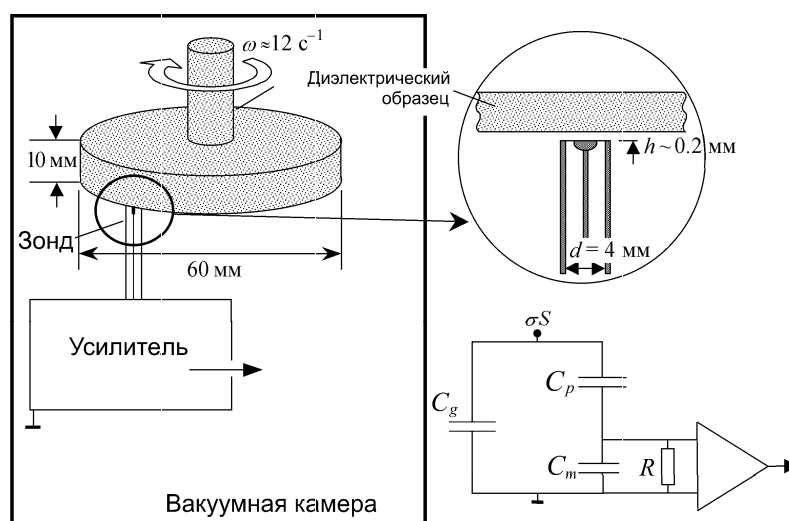


Рис. 1. Схема установки для измерения вариаций распределения электрических зарядов на диэлектрических образцах

усилителя следующим образом связано с вариациями плотности заряда $\delta\sigma$ на диэлектрическом образце над зондом (при условии $RC_m\omega \gg 1$, $R = 320$ ГОм, $C_m \approx 5$ пФ, $\omega = 12$ рад/с):

$$V_m \approx \delta\sigma S \left[C_m \left(1 + \frac{C_g}{C_p} \right) + C_g \right]^{-1}.$$

Для оценки можно пользоваться формулой: $\delta\sigma \approx 2V_m C_m / S$. Шумовые параметры усилителя позволяли регистрировать в полосе частот 1 Гц вариации плотности электрического заряда $\delta\sigma \approx 4 \cdot 10^{-16}$ Кл/см².

Зондовый метод имеет погрешность измерения, особенно для толстых образцов [3], которая в основном связана с неопределенностью величины C_g , наличием зарядов в объеме и на противоположной поверхности образца. Кроме того, как всякий зондовый метод, он дает искаженное изображение распределения заряда за счет конечного диаметра зонда. Целью настоящей работы являлось исследование факторов, влияющих на общую картину распределения электрического заряда на диэлектрических образцах. Для измерений использовался относительно широкий зонд диаметром 2 мм и внутренним диаметром экрана 4 мм.

Для изучения факторов, влияющих на эволюцию распределения электрического заряда, исследовалось изменение со временем распределения заряда, локально нанесенного на образец методом контактной электризации. Наносимый заряд $\sim 10^{-11}$ Кл. Измерялись высота и ширина соответствующего этому заряду пика на кривой пространственного распределения (рис. 2). Для образцов сапфира и плавленного кварца зависимость высоты пика от времени, как правило, была близка к экспоненциальной на интервале одного-двух времен релаксации, хотя иногда наблюдались отклонения от экспоненциальной зависимости.

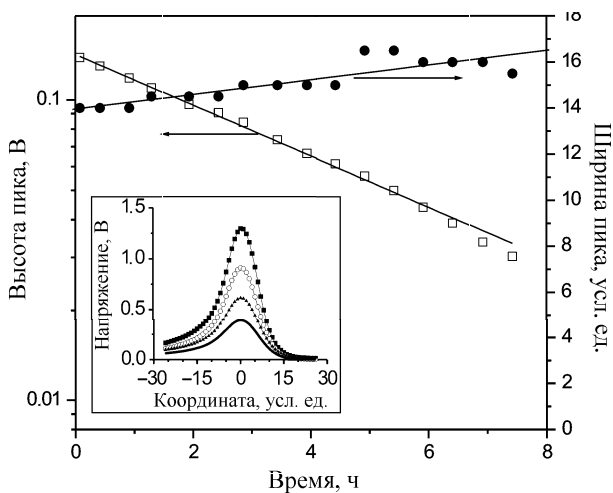


Рис. 2. Зависимость от времени высоты и ширины пика распределения заряда, нанесенного на образец из сапфира методом контактной электризации. На вставке представлена форма пика и его эволюция

Способ приготовления образца оказывал значительное влияние на последующие вариации распределения заряда. Миграция электрических зарядов могла быть обусловлена несколькими процессами: поверхностной и объемной проводимостью, нейтрализацией зарядов ионами воздуха [5]. Поверхностная проводимость зависит, например, от количества адсорбированной воды. При измерениях на воздухе (влажность менее 25%) сразу после прогрева кварцевого образца в пламени кислородной горелки время релаксации распределения заряда, нанесенного на образец, составляло ~ 1 мин, в обычных условиях ~ 40 мин, а после прогрева в печи при температуре 300°C — 5.5 ч. Время релаксации в вакууме составило более 1000 ч.

На рис. 2 приведены результаты экспериментальных исследований на сапфировом образце. Из малого уширения пика при значительном уменьшении его высоты (что наблюдалось во всех экспериментах как с сапфиром, так и с кварцем) можно сделать вывод, что эволюция распределения заряда не может быть обусловлена одной лишь диффузией заряда по поверхности образца.

Далее на поверхность образца были нанесены два локальных заряда на расстоянии 5 мм (пространственное разрешение используемого зонда). Выяснилось, что времена релаксации двух расположенных рядом пиков распределения заряда могут отличаться в 1.5 раза. По-видимому, существуют факторы, локально определяющие время релаксации в разных точках образца. Изменения координат максимумов или других проявлений взаимодействия двух зарядов между собой не наблюдалось.

На электрические заряды, находящиеся на образце, действуют силы изображения со стороны металлических деталей рабочей камеры. Если зонд оставался под неподвижным образцом, то через некоторое время на кривой пространственного распределения заряда формировался пик, соответствующий положению зонда. Если зонд постоянно находился под областью с дополнительно нанесенным зарядом, то процесс перераспределения этого заряда значительно замедлялся по сравнению со случаем, когда образец постоянно вращался или зонд отводился от образца. Так, соответствующие времена релаксации распределения зарядов в экспериментах с кварцевым образцом составили 100 и 5 ч.

Электрические поля внутри рабочей камеры, возникающие из-за контактной разности потенциалов (КРП) между элементами окружения, могут влиять на распределение зарядов. Подвижные заряды в диэлектрическом образце перераспределяются таким образом, чтобы скомпенсировать электрическое поле внутри него. Для демонстрации этого эффекта под образцом сапфира, на расстоянии 11 мм от него была установлена медная пластина с нанесенными на нее пятью алюминиевыми полосками. Эта заземленная система проводников создавала из-за КРП

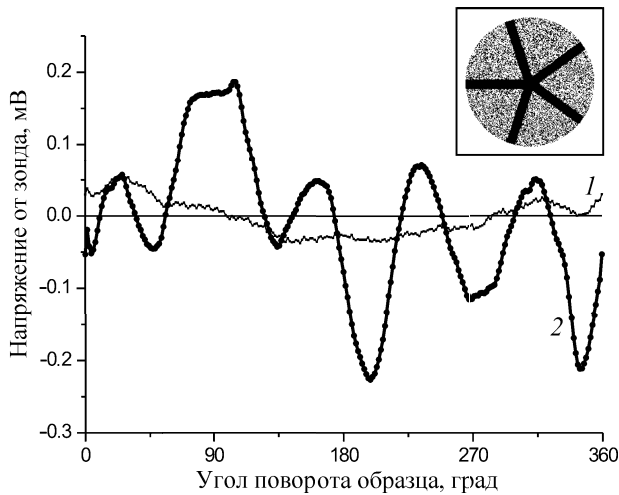


Рис. 3. Распределение электрического заряда по поверхности сапфирового образца: 1 — перед измерениями образец непрерывно вращался в течение 7 ч; 2 — в течение 18 ч под неподвижным образцом на расстоянии 11 мм находилась медная пластина с пятью алюминиевыми полосками (показана на вставке)

электрическое поле с симметрией пятого порядка. После того как образец в течение 18 ч неподвижно находился в этом поле, распределение зарядов на нем изменилось так, что влияние КРП было хорошо различимо (рис. 3).

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что на поверхности диэлектрического образца, находящегося внутри экранированного объема, формируется распределение электрического заряда, обусловленное наличием остаточных электрических полей. Подвижность зарядов определяется водой, адсорбированной на поверхности. Измерены времена релаксации распределения заряда.

Авторы благодарны В. Б. Брагинскому за ценные обсуждения. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 03-02-16975а) и Госконтракта (02.445.11.7070).

Литература

1. Abbott B., Abbott R., Adhikari R. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2004. **517**. P. 154.
2. Stern J.E., Terris B.D., Mamin H.J. et al. // Appl. Phys. Lett. 1988. **53**. P. 2717.
3. Takuma T., Yashima M., Kawamoto T. // IEEE Trans. DEI. 1998. **10**. P. 497.
4. Davies D.K. // J. Sci. Instrum. 1967. **44**. P. 521.
5. Wintle H.J. // IEEE Trans. DEI. 1999. **6**, N 1. P. 1.

Поступила в редакцию
02.11.05