

УДК 621.317.791:537.226.33

И. М. БУЗИН, И. В. ИВАНОВ, В. Ф. ЧУПРАКОВ

УНИВЕРСАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ НА СВЧ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР 4,2—300 К

Методика измерения линейных параметров сегнетоэлектриков (диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь) изложена в литературе достаточно подробно [1—3]. В работах [4, 5] предложена методика исследования нелинейных характеристик сегнетоэлектрических кристаллов, основанная на эффекте преобразования и умножения частоты. Нелинейные свойства материала характеризуются коэффициентами разложения диэлектрической проницаемости в ряды по степеням малых приращений статического поля ΔE_0 или по степеням малого по амплитуде мгновенного значения высокочастотного поля $E_{\sim}$:

$$\varepsilon(E_0 + \Delta E_0) = \varepsilon(E_0)(1 + \alpha_1^{\text{ст}} \Delta E_0 + \alpha_2^{\text{ст}} \Delta E_0^2 + \dots), \quad (1)$$

$$\varepsilon(E_0, E_{\sim}) = \varepsilon(E_0)(1 + \alpha_1^{\text{дин}} E_{\sim} + \alpha_2^{\text{дин}} E_{\sim}^2 + \dots). \quad (2)$$

Здесь $\varepsilon(E_0)$ — диэлектрическая проницаемость при данном поле смещения E_0 , измеренная в условиях бесконечно малой амплитуды высокочастотного поля. Коэффициенты

$$\alpha_n^{\text{ст}} = \frac{1}{n!} \frac{1}{\varepsilon(E_0)} \frac{\partial^n \varepsilon}{\partial E_0^n}, \quad \alpha_n^{\text{дин}} = \frac{1}{n!} \frac{1}{\varepsilon(E_0)} \frac{\partial^n \varepsilon}{\partial E_{\sim}^n} \quad (3)$$

называются соответственно коэффициентами статической и динамической нелинейности. Коэффициенты статической нелинейности определяются путем измерения зависимости диэлектрической проницаемости $\varepsilon(E_0)$ от поля смещения. При воздействии на образец нелинейного материала высокочастотного электрического поля частоты ω спектр тока через образец будет содержать гармоники тех порядков, которые соответствуют отличным от нуля коэффициентам разложения (2). Величина мощности, соответствующей частоте гармоник, будет зависеть от емкости образца и его диэлектрических потерь, поскольку эти параметры определяют импеданс образца как источника гармоник. Поэтому для определения нелинейных характеристик используется установка, позволяющая получать комплексные сведения об исследуемом материале: о его линейных параметрах — диэлектрической проницаемости и тангенсе угла диэлектрических потерь, а также о нелинейных параметрах — коэффициентах статической и динамической нелинейности. При разработке экспериментальной установки был выбран дециметровый диапазон длин волн: частота основного сигнала, т. е. рабочая частота, составляла 500 МГц, частота второй гармоники — 1000 МГц.

Для определения линейных диэлектрических параметров материалов в установке используется метод коаксиальной измерительной ли-

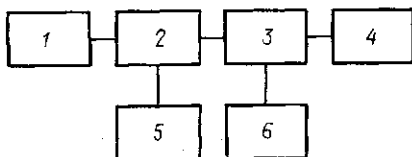
нии с сосредоточенным образцом на конце [6, 7]. При этом существенно, чтобы размеры образца исследуемого материала удовлетворяли условиям квазистационарности, а именно:

$$h \ll \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon}}, \quad r \ll \frac{0,45\lambda}{2\pi\sqrt{\epsilon}},$$

где h — высота образца, r — радиус образца.

Образцы, имеющие цилиндрическую форму с характерными размерами h и r порядка 0,4—0,5 мм, вырезались на ультразвуковом станке из пластин исходного материала, которые были предварительно ориентированы вдоль того или иного кристаллографического направления и отполированы. На торцы образцов наносились серебряные электроды методом вжигания серебряной пасты [8]. Образец помещался на конце коаксиальной измерительной линии между плоскими торцами внутреннего и внешнего проводников линии передачи. Таким образом, постоянное электрическое поле смещения E_0 и высоко-

Рис. 1. Упрощенная блок-схема установки: 1 — генератор основной частоты, 2 — фильтр-ответвитель, 3 — измерительная линия, 4 — образец исследуемого нелинейного материала, 5 и 6 — измерительные приемники на частоте гармоники 2ω и сигнала ω соответственно



частотное измерительное поле E_z были однородны внутри образца (при выполнении условий квазистационарности) и параллельны его оси.

Если установку для исследования линейных диэлектрических параметров материалов дополнить фильтром-ответвителем, позволяющим из цепи отраженных от образца волн ответвлять сигнал на частоте гармоники, а также приборами для измерения мощности падающего сигнала основной частоты и мощности отраженной от образца второй гармоники, то получим установку для изучения нелинейных характеристик кристаллов. Упрощенная блок-схема такой установки показана на рис. 1.

Так как установка собрана на коаксиальных линиях одного волнового сопротивления, т. е. тракт однороден и не содержит трансформирующих элементов, можно получить соотношения, позволяющие выразить коэффициенты нелинейности исследуемых материалов через экспериментально измеряемые мощности сигналов на основной частоте и на частоте гармоник [4, 5]. В частности, для первого коэффициента динамической нелинейности получается

$$\alpha_1^{\text{дин}} = \frac{\sqrt{P_{2\omega}}}{P_\omega} h \Psi(Z_0, \text{tg } \delta, X), \quad (4)$$

где P_ω и $P_{2\omega}$ — мощности падающей на образец и отраженной от него волн основной частоты и второй гармоники соответственно, $\Psi(Z_0, \text{tg } \delta, X)$ — медленно меняющаяся функция, зависящая от волнового сопротивления тракта Z_0 , тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ и реактивного импеданса образца $X = 1/\omega C_0 Z_0$. Экспериментальная установка представляет собой существенно нерезонансную систему, а именно нерезонансный умножитель частоты. Основным преимуществом такого рода систем является то, что они не нуждаются

в подстройке в процессе работы при изменении емкости образца вследствие изменения электрического поля смещения или температуры.

Полная блок-схема установки приведена на рис. 2. В ее состав входят два высокочастотных коаксиальных тракта: тракт основной частоты ω (элементы 6, 1, 2, 3, 7, 10, 15, 16, 20 и 25) и тракт измерения второй гармоники 2ω (элементы 16, 19, 24, 30, 35 и 36). Элементы, входящие в состав СВЧ-трактов, соединены двойными линиями. Сигнал $\omega = 500$ МГц от генератора основной частоты ГЧ-37А (6) через диссипативные аттенюаторы (1, 3), фильтр нижних частот (2), фильтр-ответвитель (16) и измерительную линию (25) попадает на

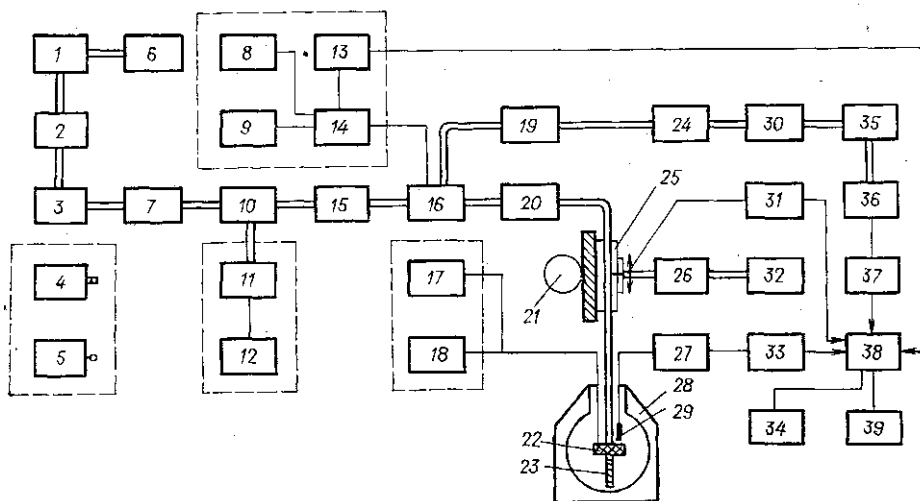


Рис. 2. Блок-схема измерительной установки

нелинейный образец исследуемого материала (22), находящийся на конце съемной части коаксиального тракта, подключаемой к измерительной линии (25).

Сигнал основной частоты, отраженный от образца, поглощается в диссипативных аттенюаторах (1, 3), выполненных в виде двух бухт высокочастотного кабеля с общим затуханием около 20 дБ. Фильтр нижних частот (2) с частотой среза ~ 700 МГц и ослаблением не менее 50 дБ не пропускает в систему высшие гармоники от генератора основной частоты (6). Проходной конденсатор (7) обеспечивает разделение по постоянному току цепей подачи постоянного поля смещения на образец и входа генератора ГЧ-37А (6). Ответвитель (10), детекторная головка (11) и стрелочный индикатор (12) позволяют контролировать постоянство СВЧ-мощности основной частоты, поступающей в процессе эксперимента на исследуемый образец. Исследование зависимостей диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь материала от температуры и поля смещения сводится к измерению смещения минимума стоячей волны и определению ширины этого минимума в измерительной линии (25).

Для повышения точности фиксации положения минимума стоячей волны в качестве индикатора измерительной линии использован супергетеродинный приемник П5-3 (32). Каретка измерительной линии сопряжена с датчиком стандартной системы измерения линейных перемещений [9], имеющей выход на цифровой блок индикации Ф 5095

(31). Раздвижная коаксиальная линия (26) позволяет оптимально согласовывать вход приемника П5-3 (32) с зондом измерительной линии. Погрешность определения положения минимума стоячей волны составляет ± 10 мкм. Применение супергетеродинного приемника позволяет определять емкость образца с точностью $\sim 1\%$, а диэлектрическую проницаемость — с погрешностью $\sim 5\%$, которая связана в основном с точностью определения геометрических размеров образца.

Одним из основных элементов экспериментальной установки является фильтр-ответвитель (16), собранный из отрезков коаксиальных линий, который пропускает сигнал основной частоты без ослабления в обоих направлениях, а в тракте измерения второй гармоники ответвляет только сигнал удвоенной частоты 2ω .

Для создания режима бегущих волн в тракте основного сигнала и в тракте второй гармоники имеются два согласующих трансформатора (15, 24), обеспечивающих малую величину коэффициента отражения (при этом $K_{CB} \leq 1,05$). Особенно важно согласование тракта основной частоты со стороны СВЧ-генератора (6). Коаксиальная раздвижная линия (20), установленная между фильтром-ответвелем (16) и измерительной линией (25), позволяет контролировать в процессе эксперимента степень согласования тракта. Окончательная настройка согласующего трансформатора (15) в тракте основной частоты производится по минимальному изменению уровня сигнала $P_{2\omega}$ при перестройке длины раздвижной линии (20).

В качестве индикатора второй гармоники в тракте 2ω используется супергетеродинный приемник П5-20 (36), высокая чувствительность которого ($\sim 10^{-13}$ Вт) обеспечивает возможность измерения значений первого коэффициента нелинейности материала вплоть до величин порядка 10^{-3} см/кВ. В тракте второй гармоники установлены также режекторный фильтр (35), настроенный на частоту ω , и ферритовый вентиль Э8-8 (30) для обеспечения оптимальной работы тракта частоты второй гармоники. Разделительный конденсатор (19) развязывает по постоянному току вход приемника П5-20 от цепи подачи смещения на образец. Приемник П5-20 имеет выход на цифровой измерительный вольтметр В2-23 (37). В процессе работы приемник П5-20 калибруется с помощью генератора Г4-37А (4) на частоте 1000 МГц и прецизионного измерителя мощности М3-22 (5). Мощность сигнала P_{ω} на частоте 500 МГц измеряется тем же прибором М3-22 (5).

В установке предусмотрена система подачи, коммутации и измерения смещения, подаваемого на образец исследуемого материала. В качестве источников электрического напряжения смещения используются стабилизированный источник Б1-4 (8) и стабилизатор напряжения П-136 (9). Блок коммутации смещения (14) обеспечивает плавное изменение величины напряжения смещения на образце и коммутацию знака смещения. Величина напряжения смещения регистрируется цифровым измерительным вольтметром В2-23 (13).

Кроме того, в установке имеются блоки измерения (27, 33) и стабилизации (18) температуры исследуемого образца, а также блок измерения уровня жидкого гелия (17) в сосуде Дьюара СТГ-40 (или СТГ-25) (28). Для измерения температур в интервале 50—300 К используется термометр, изготовленный из чистого медного провода, изменение относительного сопротивления которого было с высокой степенью точности определено в работе [10]. Для измерения более низких температур используются угольные сопротивления Allen-Bradley (R_{A-B}) (29) с номиналами 68, 100, 200, 270 Ом [11]. Падение напря-

жения на R_{A-B} измеряется с помощью цифрового вольтметра В2-22 (33). Использование этого прибора позволяет считать значение сопротивления R_{A-B} при данной температуре непосредственно по численному значению падения напряжения на R_{A-B} (при токе 10 мкА). Относительная ошибка определения температуры с помощью угольных резисторов R_{A-B} составляет $\pm 0,05$ К, а с помощью медного датчика температур $\pm 0,1$ К.

Угольные резисторы и медный датчик температуры помещаются внутри медного блока, охватывающего снизу съемную часть коаксиала, укрепляемую на конце измерительной линии. Термометры находятся в непосредственной близости от образца исследуемого материала. Во время проведения эксперимента в интервале температур 4,2—78 К конец съемной части коаксиала, внутри которой находится исследуемый образец, опускается в транспортный сосуд Дьюара СТГ-40 (или СТГ-25) с жидким гелием (28). Измерительная линия (25) укреплена на подвижной каретке механизма вертикального перемещения (21), с помощью которого осуществляется перемещение измерительной линии и жестко связанной с ней съемной части коаксиального тракта, тем самым производится изменение положения исследуемого образца относительно уровня жидкого гелия в сосуде Дьюара и, следовательно, изменение температуры образца в интервале 4,2—15 К.

Хорошая термоизоляция сосуда Дьюара обеспечивает быстрое установление температуры и ее высокую стабильность. Однако при удалении от поверхности жидкого гелия стабильность температуры ухудшается. Дальнейшее увеличение температуры осуществляется путем нагрева медного блока, внутри которого находится исследуемый образец, с помощью проволочного нагревателя, намотанного на внешнюю поверхность блока. Для уравнивания потоков тепла и холода и получения заданной рабочей температуры образца используется система стабилизации температуры (18), в основном аналогичная [12]. Резистор R_{A-B} , по которому стабилизируется заданная рабочая температура, включается в одно из плеч моста постоянного тока Р-304. Подбором переменного сопротивления моста осуществляется компенсация токов в мостовой схеме. Сигнал разбаланса поступает на нуль-индикатор баланса сопротивлений датчика и моста. В качестве нуль-индикатора используется фотоэлектрический самопишущий потенциометр Н-373, который также является предуслителем напряжения разбаланса. Сигнал разбаланса поступает в цепь гальванометра фотоэлектрического стабилизатора напряжения постоянного тока П-136, нагруженного на проволочный нагреватель, который намотан на внешнюю поверхность медного блока. В зависимости от интервала температур, в котором проводятся измерения, в системе стабилизации используются либо угольные сопротивления, либо медный датчик.

Датчик уровня жидкого гелия (23) представляет собой вертикально расположенную цепочку последовательно соединенных угольных сопротивлений *Allen-Bradley*. Нами используется цепочка, составленная из 37 сопротивлений R_{A-B} с номинальным значением $R_{ном} = 100$ Ом каждый. Калибровочная кривая зависимости общего сопротивления от глубины погружения в жидкий гелий снималась в стеклянном гелиевом сосуде Дьюара. Точность определения положения уровня жидкого гелия составляет ± 1 мм.

Автоматизация измерений, и в частности вывод данных с цифровых измерительных приборов на цифropечатающее устройство (ЦПУ), позволяет повысить точность измерений и существенно уменьшить трудоемкость работы на установке. При автоматизации установки за

основу было взято цифропечатающее устройство Ф 5033К, состоящее из транскриптора Ф 5033 (38) и электроуправляемой пишущей машины ЭУМ-23Д (39). Цифропечатающее устройство регистрирует в десятичной системе счисления результаты измерения, поступающие от цифровых измерительных приборов, имеющих выход информации в параллельном (вольтметры В2-22 и В2-23) или параллельно-последовательном (блок индикации Ф 5095) двоичнодесятичном коде 1-2-4-8 [12]. При этом транскриптор автоматически по очереди опрашивает цифровые измерительные приборы (13, 31, 33, 37) и после получения от каждого из них импульса «конец измерения» (или «разрешение печати») выдает команду на печать информации пишущей машинкой (39).

Запуск цифропечатающего устройства осуществляется вручную при нажатии кнопки «выход на цифропечать» на блоке индикации Ф 5095 (31). Один и тот же импульс «конец измерения» подается на входы «разрешение печати» транскриптора Ф 5033 по всем четырем цифровым приборам. Таким образом, вольтметры В2-22 и В2-23 работают в автоматическом режиме, что позволяет следить по цифровому табло этих приборов за изменением текущего значения измеряемых величин.

Для совместной работы ЦПУ и цифровых измерительных приборов необходимо, чтобы уровни сигналов, соответствующих логическому нулю («0») и логической единице («1») [12], находились в пределах соответственно $-(0-1)\text{В}$ и $-(6-70)\text{В}$. Так как в цифровых вольтметрах В2-22 и В2-23 (13, 33, 37) уровни сигналов для «0» и «1» не соответствовали вышеуказанным, то в конструкцию этих приборов были внесены изменения, позволившие согласовать их с транскриптором Ф 5033. В частности, в цифровом вольтметре В2-22 выход на ЦПУ осуществляется с триггеров памяти через диоды Д 220А в унифицированных платах пересчетных декад. В цифровых вольтметрах В2-23 выход на ЦПУ берется с других (по отношению к тем, которые указаны в схеме) плеч выходных триггеров в платах пересчетных декад [12].

Вывод числовой информации с транскриптора может осуществляться на перфоратор ПЛ-80 (34) с тем, чтобы сразу в ходе эксперимента получать оптерфорированные числовые массивы, готовые для обработки на ЭВМ. Все это позволяет увеличить эффективность работы на установке, а также повысить надежность и точность получаемых результатов.

В заключение авторы приносят свою благодарность Н. А. Морозову, Е. И. Рукину и А. И. Коробову, принимавшим участие в работе на различных этапах создания, совершенствования и автоматизации установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М., 1963, 403 с.
2. Петров В. М. Диэлектрические измерения сегнетоэлектриков. М., 1972, 154 с.
3. Брок А. Метод резонанса короткозамкнутого отрезка линии передачи для СВЧ исследований сегнетоэлектриков. Рига, 1972, 147 с.
4. Иванов И. В., Морозов Н. А. Метод исследования динамической нелинейности сегнетоэлектриков в полях сверхвысоких частот.— Физ. тв. тела, 1966, 8, № 11, 3218—3225.
5. Ivanov I. V., Morozov N. A. Thin film microwave ferroelectric capacitors and nonlinear microwave properties of ferroelectric ceramics.— Proc. of the Intern. Meeting of Ferroelectricity. VII, Prague, 1966, 180—192.
6. Иванов И. В., Петров В. М. Метод измерений диэлектрической проницае-

мости и тангенса угла потерь сегнетоэлектриков в однородных полях СВЧ диапазона (диапазон 3000 МГц).—Изв. АН СССР, сер. физ., 1958, 22, № 12, 1524—1526.

7. Петров В. М. Об измерении ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ диэлектриков методами полukoаксиального резонатора и коаксиальной измерительной линии.—Приб. и техн. эксперимента, 1960, № 4, 118—122.
8. Слуцкая В. В. Тонкие пленки в технике СВЧ. М., 1967, 178—187.
9. Бузин И. М., Коробов А. И., Рукин Е. И., Стародуб А. Е. Использование серийных измерителей перемещений с цифровым отсчетом для автоматизации работы измерительных линий сверхвысокочастотного диапазона.—Приб. и техн. эксперимента, 1976, № 6, 193—194.
10. Davphinee T. M., Preston-Thomas H. A copper resistance temperature scale.—Rev. Sci. Instr., 1954, 25, N 9, 884—886.
11. Роуз-Инс А. Техника низкотемпературного эксперимента. М., 1966, 158—164.
12. Тычино К. К. Пересчетные декады. М., 1976, 93 с.

Поступила в редакцию
11.07.78

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1980, Т. 21, № 4

УДК 521.134

Г. И. ШИРМИН

ЧАСТНЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ, ПОЛУЧАЕМОЙ ИЗ МОДЕЛИ ХУАНГА ОСРЕДНЕНИЕМ ПО СХЕМЕ ФАТУ

Введение. Точные частные решения ограниченной задачи трех тел, называемые также точками либрации, со времени открытия Эйлером (1767 г.) и Лагранжем (1772 г.) нашли целый ряд приложений в астрономии и космогонии [1]. Интерес к ним значительно возрос с начала 60-х годов нашего столетия, когда в связи с бурным развитием космических исследований все чаще стали появляться проекты, которые предусматривают использование динамических свойств точек либрации для создания искусственных космических объектов, предназначенных обслуживать межпланетные полеты [2]. Однако модель ограниченной задачи трех тел дает лишь весьма грубое приближение к действительности, ибо, за исключением двух точечных масс, выбираемых в качестве основных, она не учитывает притяжения других тел. В то же время учет влияния на положения либрационных точек всевозможных возмущающих факторов, в том числе и гравитационной природы, приобретает все большее практическое значение ввиду той особой роли, которую точки либрации ограниченной задачи трех тел начинают играть в астродинамике.

В настоящей статье изложено исследование вековых возмущений в положениях точек либрации вследствие притяжения точечной массы, возмущающей силовое поле круговой ограниченной задачи трех тел. Сделано это следующим образом. В рамках варианта дважды ограниченной круговой задачи четырех тел, полученного осреднением по схеме Фату, доказано существование частных решений, аналогичных эйлеровым и лагранжевым. Отклонения соответствующих этим решениям стационарных точек от классических точек либрации интерпретируются как вековые возмущения, произведенные активно гравитирующей массой, притяжение которой игнорируется в ограниченной задаче трех тел. Показано, что указанные возмущения приводят к по-