

Министерство образования и науки Российской Федерации
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(государственный университет)
ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИЧЕСКОЙ И КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
КАФЕДРА ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИИ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

УДК

Кудрявцев Виталий Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЁНОК

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Направление подготовки 010900 «Прикладные математика и физика»

Заведующий кафедрой	_____	В.В. Аристов
Научный руководитель Марченко	_____	В.А.
Студент Кудрявцев	_____	В.В.

г. Долгопрудный

2011

Оглавление

1. Введение.....	3
1.1. Ионно-плазменное распыление, напыление сегнетоэлектрической плёнки.....	5
1.2. Постановка задачи.....	7
2. Обзор литературы	9
3. Экспериментальная часть.....	14
3.1. Экспериментальная установка по исследованию сегнетоэлектрических плёнок.....	14
3.2. Методика выполнения эксперимента.....	16
3.3. Эксперимент с искусственным сопротивлением.....	18
3.4. Математическое обоснование полученного эллипса.....	19
3.5. Анализ второй схемы.....	24
3.6. Применение полученных результатов.....	26
3.7. Исследование других дефектов в плёнке.....	27
4. Заключение.....	30
5. Список литературы.....	31

Введение

В последнее десятилетие в электронике к активно изучаемым и разрабатываемым функциональным слоям добавились сегнетоэлектрические. Сегнетоэлектрики - это вещества, кристаллическая структура которых допускает существование в некотором диапазоне температур и давлений спонтанной электрической поляризации (отличного от нуля результирующего дипольного момента единицы объема образца), модуль и пространственная ориентация которой могут быть изменены под действием внешнего электрического поля. Помимо электрически переключаемой спонтанной поляризации, сегнетоэлектрики обладают целым спектром полезных для приложений физических свойств, среди которых особенно выделяются высокая, резко анизотропная и зависящая от внешнего электрического поля диэлектрическая проницаемость, прямой и обратный пьезоэлектрический, а также пироэлектрический эффекты.

В приводимой таблице, почерпнутой из обзора, отражены некоторые возможные применения сегнетоэлектрических пленок, свойства, материалы и толщины пленок, необходимые для реализации указанных применений.

Таблица 1. Применения сегнетоэлектрических пленок

Вид использования	Необходимые свойства	Химический состав	Толщина, мкм
Энергонезависимая память	Высокая остаточная поляризация, низкое коэрцитивное поле, большое число циклов переключения	$Pb(Zr,Ti)O_3$ $(PbLa)TiO_3$ $Bi_4Ti_3O_{12}$ $BaMgF_4$ $SrBi_2Ta_2O_9$	0,1-0,3
Динамическая	Высокая	$(BaSr)TiO_3$	0,2-0,5,

память произвольной выборкой	с	диэлектрическая проницаемость, высокое пробивное напряжение	$\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ $(\text{PbLa})\text{TiO}_3$ $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$	
Конденсаторы		Высокая диэлектрическая проницаемость, низкие диэлектрические потери, термостабильность, высокое пробивное напряжение	$(\text{BaSr})\text{TiO}_3$ $(\text{PbLa})(\text{ZrTi})\text{O}_3$ $\text{Pb}(\text{MgNb})\text{O}_3$ $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$	0,1-0,5
Поверхностные акустические волны		Пьезоэлектричество	$(\text{PbLa})(\text{ZrTi})\text{O}_3$ LiNbO_3	2-10
Микроактюаторы		То же	$(\text{PbLa})(\text{ZrTi})\text{O}_3$ $\text{Pb}(\text{MgNb})\text{O}_3$	1-10
Приемники излучений ИК-		Пироэлектричество, низкая диэлектрическая проницаемость	$(\text{PbLa})(\text{ZrTi})\text{O}_3$ $\text{K}(\text{TaNb})\text{O}_3$	1-5
Оптический процессор		Пироэлектричество, высокая диэлектрическая проницаемость	$(\text{PbLa})(\text{ZrTi})\text{O}_3$ $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$	
Световоды, линии задержки	линии	Электрооптические явления	$(\text{LiK})\text{NbO}_3$ $(\text{PbLa})(\text{ZrTi})\text{O}_3$ $(\text{SrBa})\text{Nb}_2\text{O}_6$	0,2-5,0
Дефлекторы		Фоторефракция	то же	0,2-5,0
Умножение частоты		Высокая эффективность генерации гармоник высших порядков	то же	0,2-5,0

Данные таблицы показывают, что материалы на основе $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) годятся для практически всех приложений. В массивном виде его характеристики детально исследованы, развиты способы получения различных изделий, вполне годящиеся для изготовления мишеней.

Ионно-плазменное распыление, напыление сегнетоэлектрической плёнки

При ионном распылении удары энергичных ионов в мишень приводят к каскаду соударений в приповерхностном слое. Атомы мишени, получившие импульс в направлении внешней нормали и энергию, превышающую энергию связи в твердом теле, вылетают и могут осадиться на подложку. Можно не использовать независимый источник ионов, ионную пушку, а вытягивать ионы из прилегающего к мишени ионизированного газа. Для этого к мишени подводится отрицательный потенциал, притягивающий и ускоряющий положительные ионы. Мишень является катодом, поэтому распыление называется катодным, эти способы – ионно-плазменные.

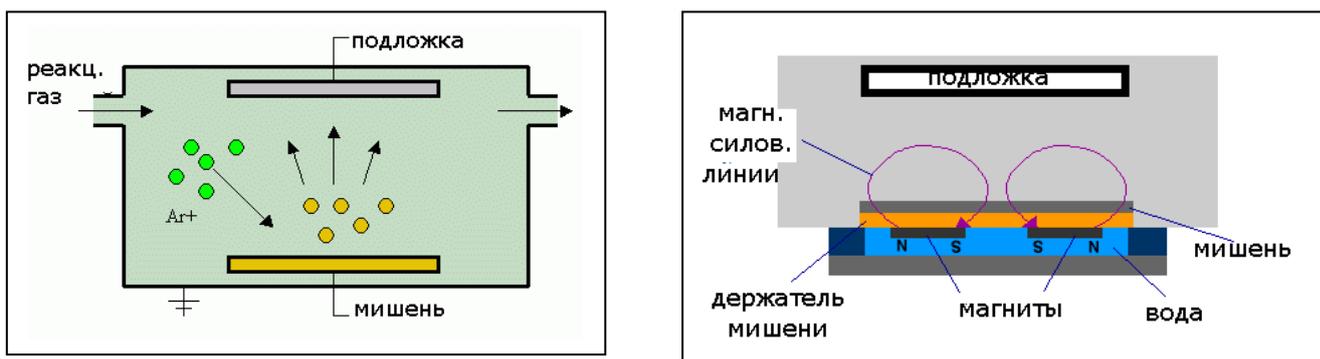


Рис.1 Схематическое представление катодного и магнетронного способов распыления

Поддержание плазмы происходит за счет ионизации реакционного газа электронами, эмитированными мишенью. В катодном распылении электроны довольно быстро уходят на стенки камеры, родив мало ионов. Для их удержания около мишени используются магнитные ловушки. Электроны спирально вращаются вокруг силовых линий магнитов, расположенных под мишенью. Такая конструкция называется магнетрон и может обеспечивать большие плотности ионного тока на мишень и высокие скорости осаждения пленок. При подаче на катод высокочастотного напряжения возможно распыление не только электропроводящих мишеней, но и диэлектриков. В магнетроне ионный ток на мишень сконцентрирован в кольцевой канавке вблизи максимума радиальной составляющей магнитного поля. Отсюда вылетают распыленные атомы, в этой канавке выделяется почти вся мощность разряда. Если керамическая мишень недостаточно теплопроводна, в области зоны эрозии она перегревается, становится неоднородной. При распылении ВТСИ мишеней это приводит к развитию дуговых разрядов и трещин. Использование мишеней с плотностью около 95% от теоретической в случае ВТСИ позволяет устойчиво эксплуатировать мишени. При катодном распылении ионный ток существенно более однороден по поверхности мишени и тепловые нагрузки также более однородны.

При распылении многих оксидных материалов мишень испускает не только атомы, но и отрицательные кислородные ионы. Эти отрицательные ионы разгоняются в катодном падении потенциала, бьют в подложку и распыляют осаждающуюся пленку. Это очень неприятная особенность ионно-плазменного распыления оксидов, так как состав пленки в итоге отличается от состава мишени.

Исследуемую сегнетоэлектрическую плёнку напыляли с помощью метода ионно-плазменного распыления. Материалом, на который её напыляли, являлась платина, расположенная на кремниевой подложке.

Толщина напыляемого слоя составляла 0,3 мкм. Подложка при напылении PZT подвергалась намеренному охлаждению до комнатной температуры. При напылении атомы одного сорта располагаются в плёнке не однородно. Чтобы получить равномерное распределение атомов одного сорта в плёнке, мы её обжигали в печи. Там плёнка в течение 2-3 часов она разогревалась до температуры 650-700 °С, выдерживалась при этой температуре 30 минут, после чего она охлаждалась до комнатной температуры в течение 5 часов. В результате мы получаем сегнетоэлектрическую плёнку, однородную по составу.

Постановка задачи

При напылении плёнки в ней могут образовываться различные дефекты. При помещении этой плёнки в печку она, платиновый электрод и кремниевая подложка будут нагреваться и расширяться. Но так как коэффициенты теплового расширения у этих веществ разные, в частности коэффициент теплового расширения у кремния очень низок по сравнению с другими веществами, то и их удлинения будут отличаться друг от друга. При этом плёнка будет сморщиваться, а при охлаждении растягиваться. Из-за этих процессов возможно изменение в некоторых местах толщины плёнки, проникновение платиновых электродов внутрь плёнки, что приводит к возникновению проводящих каналов и короток.

Другой проблемой может быть большая упругость паров PbO и Pb . Из-за этого при нагревании в печке происходит значительное испарение этих веществ, и на поверхности плёнки будет существовать недостаток свинца. Таким образом, на поверхности плёнки мы будем получать не сегнетоэлектрик, а различные оксиды титана и циркония. А, как известно, эти соединения являются диэлектриками. То есть на поверхности плёнки появляется диэлектрический слой, который будет вести себя как линейный конденсатор.

Возможны ещё различные эффекты, но мы остановимся на этих, так как мы считаем, что эти эффекты вносят основной вклад в изменение электрических характеристик плёнки по сравнению с идеальным случаем. Следовательно, петля гистерезиса сегнетоэлектрической плёнки при наличии этих эффектов будет отличной от петли для идеального случая. Наша задача заключается в определении по петле гистерезиса физические параметры сегнетоэлектрической плёнки, в частности её сопротивления и ёмкости, и на основе этого оценить какой вклад вносят вышеописанные эффекты.

Обзор литературы

Анализ состояний и тенденций развития науки о сегнетоэлектричестве и его практических приложениях позволяет утверждать, что как в фундаментальном, так и в прикладном плане исследование этой группы материалов в ближайшие десятилетия будет оставаться на переднем крае науки и техники. Сегнетоэлектрики все время пополняются новыми группами веществ: сегнетоэластиками, сегнетомагнетиками, сегнетоэлектрическими жидкими кристаллами, сегнетоэлектрическими полимерами, композитами.

В конце 20-х годов в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе И.В. Курчатовым с сотрудниками были начаты исследования сегнетовой соли. Уже тогда им и его сотрудниками были получены обширные результаты, положившие начало многим последующим работам. В процессе исследования было выяснено, что электрические особенности кристаллов сегнетовой соли не связаны, как тогда предполагалось, с явлениями высоковольтной поляризации и представляют собой особый класс явлений. В этих исследованиях были изучены свойства сегнетовой соли и твердых растворов на ее основе, установлена сильная зависимость физических свойств от внешних воздействий, обнаружен эффект униполярности и релаксационные явления, развита молекулярная теория сегнетоэлектричества. Эти результаты были обобщены И. В. Курчатовым в его монографии о сегнетоэлектричестве.

В дальнейшем, в 30-е годы, эти исследования были направлены на практические применения сегнетовой соли. В. Вологдин предложил использовать сегнетову соль для умножения частоты, положив начало применения нелинейных диэлектрических свойств сегнетоэлектриков. Изучение Г. М. Михайловым пьезоэлектрических и упругих свойств сегнетовой соли привело в 40-е годы к использованию сегнетовой соли, а затем и кристаллов дигидрофосфата калия — KDP в электро- и

гидроакустике. Этому способствовала разработка методов выращивания крупных кристаллов сегнетовой соли и KDP.

Занимаясь в Физическом институте АН СССР поиском диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью, Б. М. Вул обнаружил (1943—1944 гг.) сегнетоэлектрические свойства у титаната бария, открыв тем самым новый этап в истории сегнетоэлектричества. Этот кристалл обладает интересными свойствами.

Прежде всего он кристаллизуется в простой структуре перовскита. Кроме того, титанат бария отличается высокой диэлектрической проницаемостью, большим пьезомодулем, удобной для технических применений температурой Кюри (120°C), большой механической прочностью, термической устойчивостью, тогда как сегнетова соль имеет низкую температуру Кюри (24°C), гигроскопична и механически не прочна. Еще одна интересная особенность титаната бария — этот кристалл является многоосным сегнетоэлектриком, т. е. в нем существует несколько возможных направлений спонтанной поляризации,— в противоположность сегнетовой соли, которая является одноосной. Поэтому его можно использовать для технических применений в виде поликристаллов (керамики), а не в виде дорогостоящих монокристаллов. При воздействии электрического поля на такой кристалл в нем происходит ориентация доменов, которая сохраняется и после снятия поля. Таким образом, создается как бы квазикристалл. Кроме того, используя обычную керамическую технологию, из поликристаллического титаната бария можно изготовить изделия практически любой формы и размеров из достаточно дешевых окислов или солей соответствующих металлов. Все эти свойства титаната бария сыграли большую роль в развитии работ по физике сегнетоэлектриков и их техническим применениям.

В 1948 г. в Институте кристаллографии АН СССР впервые были оптически обнаружены домены в сегнетовой соли (М. В. Классен-Неклюдова, М. А. Чернышева) и началось все более интенсивное

кристаллофизическое исследование сегнетовой соли, а затем и других водородсодержащих сегнетоэлектриков. В 50-е годы были установлены общие кристаллографические закономерности доменной структуры сегнетоэлектриков.

Вскоре после открытия титаната бария В. Л. Гинзбург (1946—1949 гг.), эффективно применив теорию фазовых переходов Л. Д. Ландау, создал феноменологическую теорию сегнетоэлектричества, которая до сих пор лежит в основе всех термодинамических описаний сегнетоэлектриков. Затем в развитие идей И. В. Курчатова были созданы так называемые модельные теории.

Современной теорией этого класса веществ является так называемая динамическая теория. Она была создана В. Л. Гинзбургом и исходит из того, что рассматриваются не ионы, а колебания решетки — фононы. Отсюда возникла очень интересная идея о мягкой фононной моде. При приближении к фазовому переходу частота одной из фононных мод резко уменьшается.

Продолжавшиеся в 60-е годы поиск и исследование кислороднооктаэдрических сегнетоэлектриков с поливалентными ионами, находящимися в одинаковых кристаллографических положениях в решетке, привели к открытию сегнетоэлектриков с размытыми фазовыми переходами и нового класса веществ с одновременно электрическим и магнитным упорядочением, названных сегнетомагнетиками (Г. А. Смоленский, В. А. Боков, В. А. Исупов, Н. Н. Крайник). Сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом представляют большую группу веществ, относящихся к неупорядоченным и неравновесным системам и получивших широкое применение в конденсаторостроении. В сегнетомагнетиках обнаружен ряд новых эффектов, и в частности, зависимость поляризации от магнитного поля и намагниченности — от электрического поля.

В конце 60-х годов и в 70-е годы были сильно продвинуты микроскопические модельные и статистические теории сегнетоэлектричества (В. Г. Вакс, Н. М. Плакида и др.). Стала бурно развиваться феноменологическая теория, к достижениям которой относится разработка сначала теории несобственных, а затем соразмерных переходов вообще и в конкретных кристаллах, в частности (В. Л. Инденбом, А. П. Леванюк, Д. Г. Санников, Ю. М. Гуфан). Оказалось, что в ряде сегнетоэлектриков, получивших название несобственных, спонтанная поляризация возникает как вторичный эффект.

Разработана методика визуализации динамики доменов с помощью жидких кристаллов, установлен ряд закономерностей динамики доменной структуры и, что особенно важно, способов управления ею (Л. А. Шувалов, Н. А. Тихомирова). Последние годы большое внимание уделяется выращиванию различными методами, исследованию и использованию в интегральной оптике тонких пленок сегнетоэлектриков и родственных материалов и слоистых систем (В. А. Дудкевич, Б. Я. Томашпольский).

Большое внимание проявляется сейчас к дипольным стеклам, в которых диполи зафиксированы в различных направлениях. В этом плане интересны исследования виртуального сегнетоэлектрика — танталата калия с нецентральной примесью лития. До сих пор не удается установить, при какой концентрации лития происходит в этом кристалле фазовый переход в сегнетоэлектрическое состояние при низкой температуре, а при какой образуется дипольное стекло (Г. А. Смоленский, Н. К. Юшин).

Акустика твердого тела, в том числе нецентросимметричных кристаллов, каковыми являются сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики, представляет собой один из бурно развивающихся в последние годы разделов физики твердого тела. Очень важный в теоретическом и практическом отношении раздел акустики твердого тела составляет акустооптика. Возможность взаимодействия оптических и акустических волн в твердых телах была, как известно, предсказана Л. И.

Мандельштамом и Л. Бриллюэном еще в 20-х годах. Вскоре это предсказание было экспериментально подтверждено в работах П. Дебая, Е.Ф. Гросса и др. Особенно бурное развитие акустооптика получила после изобретения лазеров. Широкие возможности открывает применение сегнетоэлектрических материалов для световодов в интегральной оптике. В световодах удастся реализовать высокие плотности излучения, что позволяет исследовать нелинейные оптические и акустооптические взаимодействия. Обнаружена генерация гармоник в условиях синхронизма, вызванного пересечением различного типа мод; наблюдалось вынужденное мандельштам-бриллюэновское рассеяние света, приводящее к обращению волнового фронта; обнаружена оптическая бистабильность в интегрально-оптическом коммутаторе из ниобата лития. Показана возможность применения пироэлектрического фотогальванического эффектов для регистрации оптического излучения в волноводе, что позволяет создать соответствующую интегральнооптическую схему.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили устройства на основе диффузионных градиентных световодов, получаемых с помощью термодиффузии титана в ниобат лития. Использование электрооптических и акустооптических взаимодействий привело к созданию многих функциональных элементов интегральной оптики, которые зачастую намного превосходят объемные аналоги. Заканчивая настоящий обзор, подчеркнем, что за сравнительно небольшой период времени, отделяющий современную физику сегнетоэлектричества от ранних исследований И. В. Курчатова, эта область науки быстро развивалась и вглубь и вширь, обогащаясь новыми физическими идеями. Это привело к открытию ряда новых материалов и разработке принципов их применений.

Экспериментальная часть

Экспериментальная установка по исследованию сегнетоэлектрических плёнок

Для измерений петель гистерезиса использовалась схема Сойера-Тауэра. Плёнка располагалась между платиновыми электродами. Верхние Pt-контакты - квадраты площадью 0.01 мм^2 напылены через маску после термообработки структуры. Всё это располагалось на кремниевой подложке. Образец и прижимной контакт к нижнему электроду располагались на подвижном в двух горизонтальных направлениях столе инструментального микроскопа ИМЦ 100x50. Второй контакт схемы прикреплен к подвижному в вертикальном направлении держателю тубуса. Нанесенные на внешнюю поверхность пленки контактные площадки подводились под верхний контакт схемы, он опускался, и производилось измерение.

Для контактирования к нижнему электроду участок пленки PZT сцарапывался и на обнажившийся слой платины наносился серебряный клей. После высыхания к нему прижимался контакт измерительной схемы. Этот простой способ оказался надежным.

Помимо сегнетоэлектрической плёнки с платиновыми электродами схема Сойера-Тауэра содержит конденсатор с ёмкостью 141 нФ. Ёмкость конденсатора была выбрана так, чтобы она всегда была на много больше ёмкости сегнетоэлектрика. Эта схема подключалась к осциллографу так, что по оси X откладывается внешнее напряжение, а по оси Y напряжение на конденсаторе.

Напряжение на конденсаторе определяется по формуле: $U_c = \frac{Q_c}{C}$.

Соответственно на сегнетоэлектрической плёнке: $U_f = \frac{Q_f}{C_f}$.

Так как плёнка и конденсатор соединены последовательно, то $Q_c = Q_f$.

Следовательно: $U_f \frac{Q}{U_c} = C \frac{Q}{C_f} \gg 1$.

То есть падение напряжения на сегнетоэлектрике практически равно внешнему напряжению. С другой стороны напряжение на конденсаторе пропорционально заряду на нём. Таким образом, на экране осциллографа мы получаем зависимость заряда на сегнетоэлектрике от напряжения на нём.

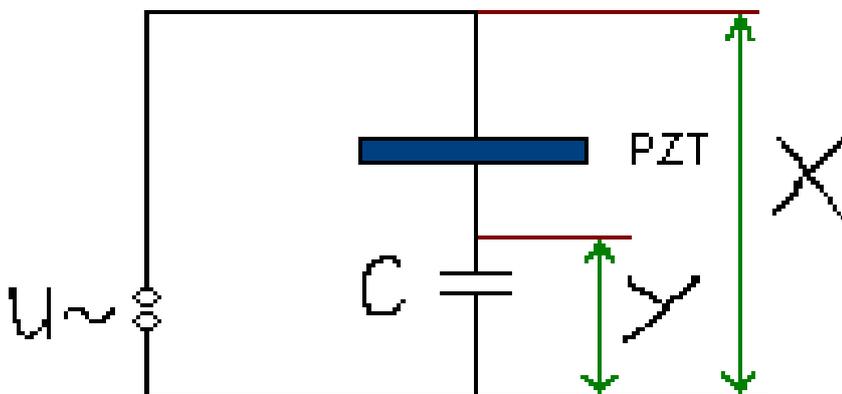


Рис.2 Схема Соьера-Тауэра

Эта зависимость есть петля гистерезиса.

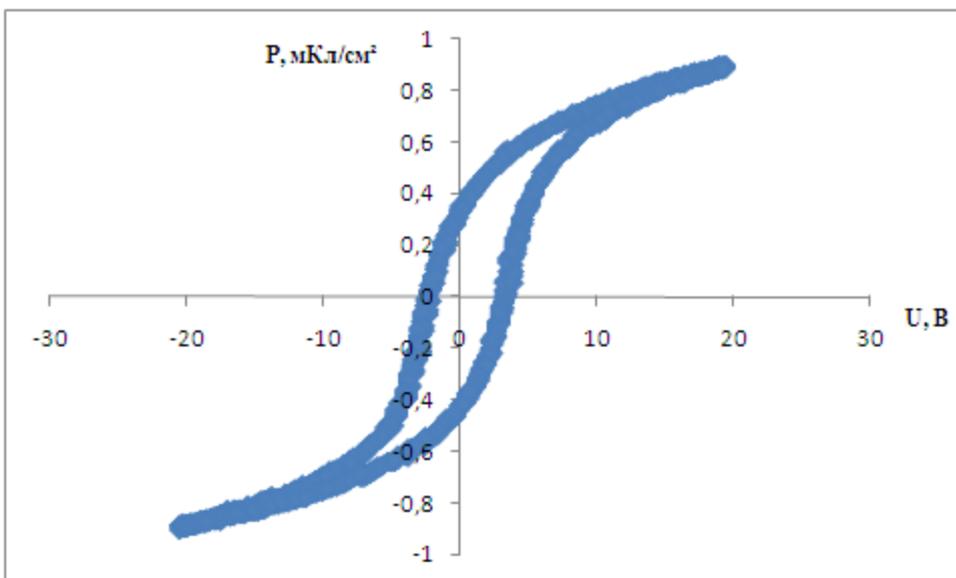


Рис.3 Петля гистерезиса

Методика выполнения эксперимента

В опыте рассматривались несколько сегнетоэлектрических плёнок. Петля гистерезиса первой плёнки при неслишком высоких частотах ($\nu = 100 \text{ Гц}$) имела более округлённый вид, напоминающий эллипс, чем при высоких частотах ($\nu = 1000000 \text{ Гц}$). Соответствующие петли гистерезиса показаны на рисунках:

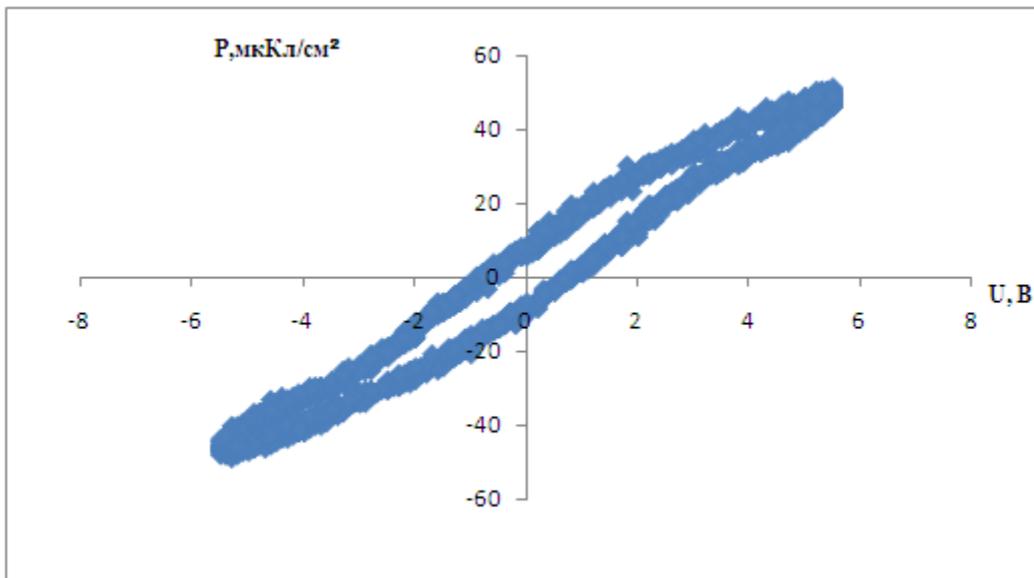


Рис.4 Петля гистерезиса плёнки при частоте $\nu = 1000000 \text{ Гц}$

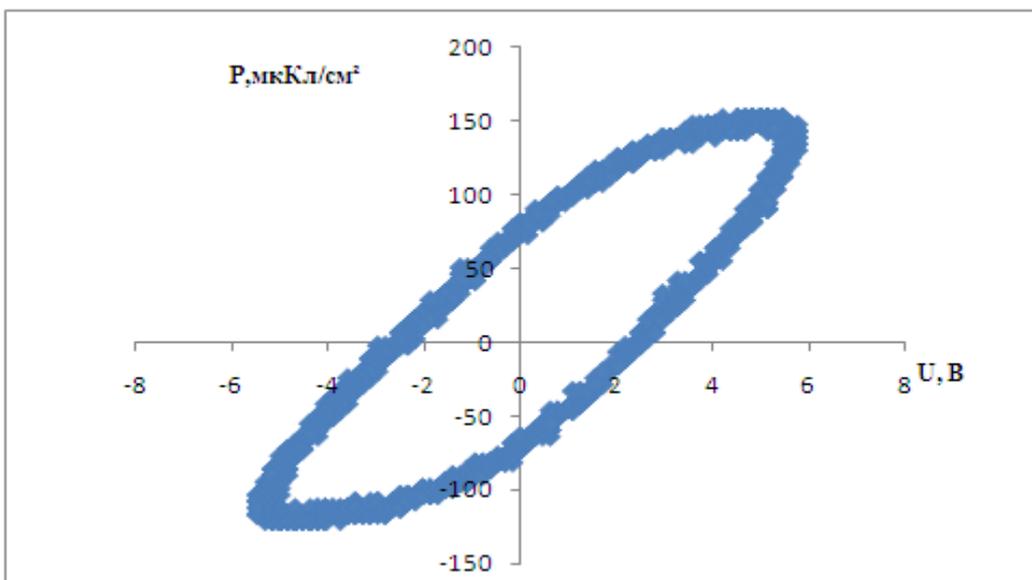


Рис.5 Петля гистерезиса плёнки при частоте $\nu = 100$ гц

При промежуточных частотах происходит плавный переход от одной петли гистерезиса к другой. Например при частоте $\nu = 10000$ гц мы получаем петлю гистерезиса, показанную на рисунке 6.

Как видно из рисунков петли гистерезиса зависят от частоты. Если бы сегнетоэлектрическая плёнка была бы идеальной или аппроксимировалась только суперпозицией конденсаторов, то данная зависимость не имела бы место, так как ёмкостное сопротивление определяется по формуле:

$Z = -\frac{i}{\omega * C}$. Следовательно отношение падений напряжения на плёнке и конденсаторе не будет зависеть от частоты.

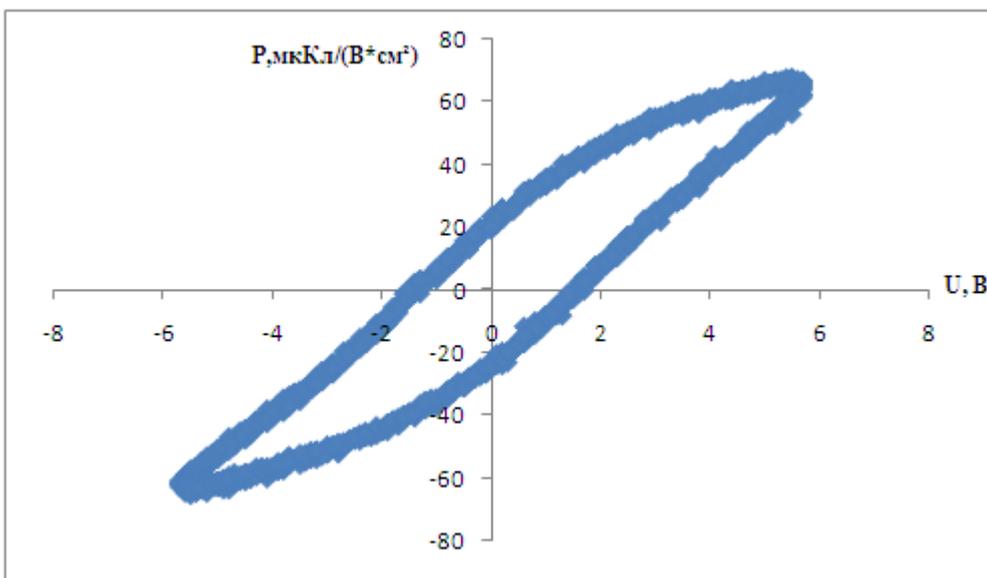


Рис.6 Петля гистерезиса плёнки при частоте $\nu = 10000$ гц

Данный эффект можно связать с появлением активного сопротивления R , включённого параллельно плёнке. В таком случае соотношение между R и Z , будет определяться частотой: при больших частотах ёмкостное сопротивление будет намного меньше активного, следовательно током через резистор можно пренебречь и мы получим “хорошую” петлю гистерезиса. При малых частотах токи через резистор сравниваются с токами через плёнку и петля меняет свою форму. С физической точки зрения появление активного сопротивления можно связать с наличием проводящих каналов в плёнке.

Эксперимент с искусственным сопротивлением

Чтобы убедиться, что мы имеем дело именно с активным сопротивлением проведём следующий эксперимент. Получим при определённой частоте “хорошую” петлю гистерезиса, а затем подключим параллельно сегнетоэлектрической плёнке сопротивление R . Получим следующие картины:

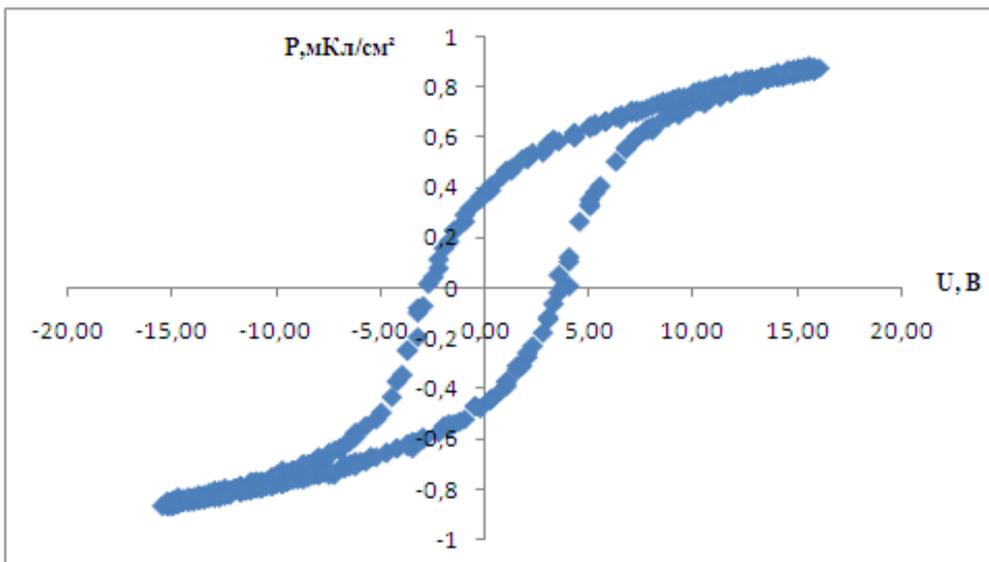


Рис.7 Петля гистерезиса без сопротивления

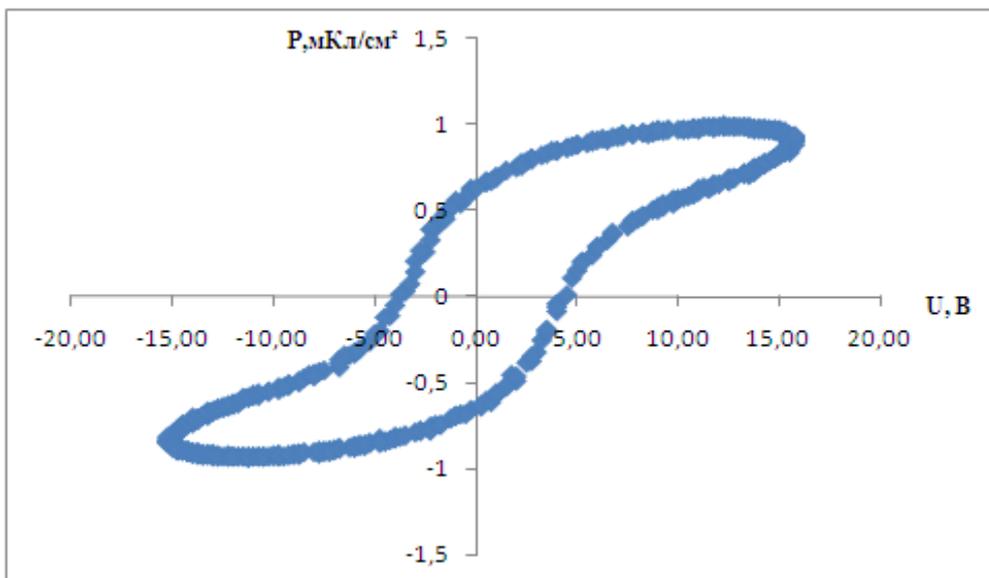


Рис.8 Петля гистерезиса при наличии активного сопротивления

В данном случае частота переменного напряжения равна $\nu=10000$ гц, а сопротивление $R=10,9$ КОм. Как видно из рисунков петля гистерезиса при включении сопротивления как бы уширилась. Теперь проведём следующую процедуру: будем вычитать значения по оси Y из кривой на рисунке 8 значения по Y кривой на рисунке 7 при одинаковых значениях X. Мы получим новую кривую, которая изображена на рисунке 9:

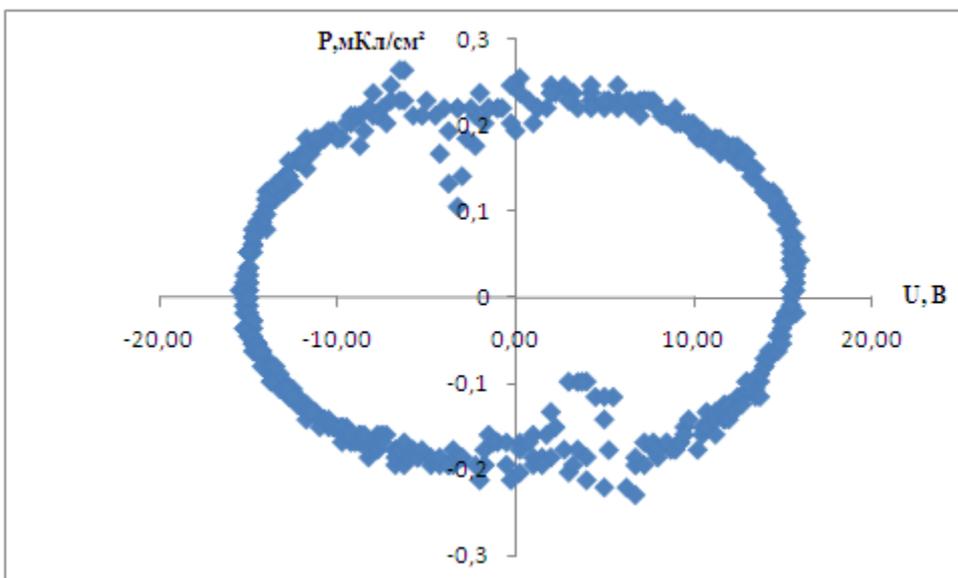


Рис.9 Результат вычитания значений по оси Y двух кривых

Как видно из рисунка эта кривая очень похожа на эллипс. Далее будет показано, что это не случайно, при некоторых соотношениях между сопротивлением резистора, частотой и ёмкостью конденсатора эта фигура действительно может получиться.

Математическое обоснование полученного эллипса

Рассмотрим 3 электрические схемы.

Первая схема состоит из плёнки и конденсатора, включённого последовательно. Будем предполагать, что проводящих каналов нет, то есть плёнка проявляет только свойства конденсатора.

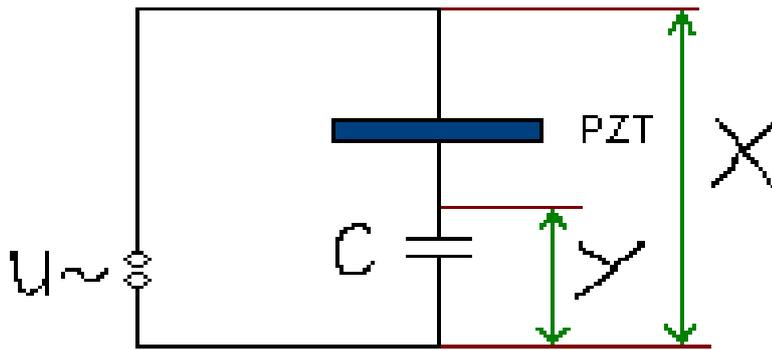


Рис.10 Схема 1.

Напряжение на конденсаторе C равно: $U_{C1} = \frac{UC_f}{C + C_f}$, где C_f - ёмкость плёнки, U - внешнее напряжение. Учитывая, что $C \gg C_f$, получаем окончательную формулу для падения напряжения на конденсаторе:

$$U_{C1} = \frac{UC_f}{C + C_f}.$$

Вторая схема состоит из конденсатора, к которому последовательно подключён резистор.

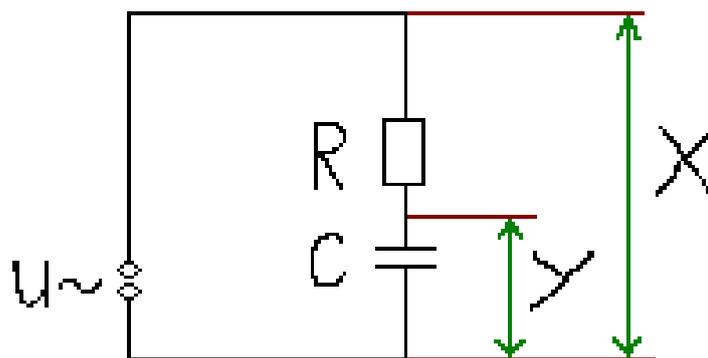


Рис.11 Схема 2

Ток через резистор равен: $I_R = \frac{U - U_{C2}}{R}$

Ток через конденсатор равен: $I_C = \frac{d}{dt}(CU_{C2}) = C \frac{d}{dt}U_{C2}$

Учитывая, что $I_R = I_C$, получаем: $\frac{U - U_{C2}}{R} = C \frac{d}{dt}U_{C2}$

$$C \frac{d}{dt}U_{C2} + \frac{U_{C2}}{R} = \frac{U}{R}$$

$$d/dt U_{C2} + U_{C2}/(RC) = U/(RC)$$

Решаем это дифференциальное уравнение методом неопределённых

коэффициентов, получаем: $U_{C2} = A(t) \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$

Коэффициент $A(t)$ определяется из формулы:

$$d/dt A(t) \exp(-t/RC) = U/(RC)$$

$$A(t) = \frac{1}{RC} \int \exp\left(\frac{t}{RC}\right) U dt$$

Таким образом, напряжение на конденсаторе:

$$U_{C2} = \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \frac{1}{RC} \int \exp\left(\frac{t}{RC}\right) U dt$$

Третья схема состоит из такой же плёнки как и в схеме 1, к ней параллельно подключён резистор, последовательно к ним подключён резистор.

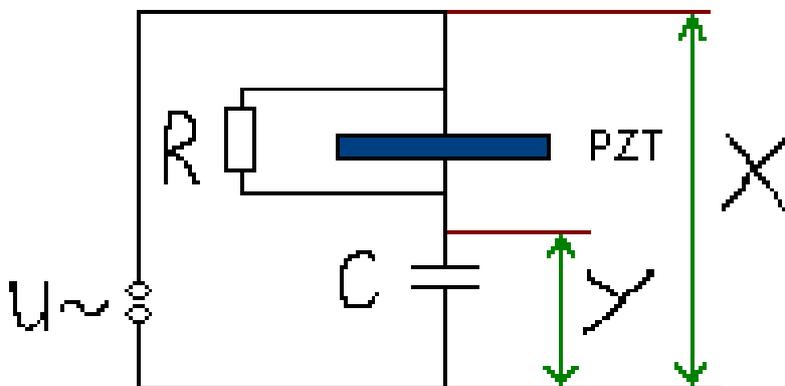


Рис.12 схема 3

Ток через резистор: $I_R = \frac{U - U_{C_3}}{R}$

Ток через конденсатор: $I_C = C \frac{d}{dt} U_{C_3}$

Ток через плёнку: $I_f = \frac{d}{dt} ((U - U_{C_3})C_f)$

По первому закону Кирхгофа: $I_C = I_f + I_R$

$$C \frac{d}{dt} U_{C_3} = \frac{U}{R} - \frac{U_{C_3}}{R} + \frac{d}{dt} (UC) - U_{C_3} \frac{d}{dt} C_f - C_f \frac{d}{dt} U_{C_3}$$

$$(C + C_f) \frac{d}{dt} U_{C_3} + U_{C_3} \left(\frac{1}{R} + \frac{d}{dt} C_f \right) = \frac{U}{R} + \frac{d}{dt} (UC_f)$$

По условию $C_f \gg C$, также будем предполагать, что

Получаем:

$$C \frac{d}{dt} U_{C_3} + \frac{U_{C_3}}{R} = \frac{U}{R} + \frac{d}{dt} (UC_f)$$

$$\frac{d}{dt} U_{C_3} + \frac{U_{C_3}}{RC} = \frac{U}{RC} + \frac{1}{C} \frac{d}{dt} (UC_f)$$

Решаем это дифференциальное уравнение методом неопределённых

коэффициентов, получаем:
$$U_{C_3} = B(t) \exp\left(-\frac{t}{R * C}\right)$$

$$\frac{d}{dt} B(t) \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) = \frac{U}{RC} + \frac{1}{C} \frac{d}{dt} (UC_f)$$

$$B(t) = \frac{1}{CR} \int \exp\left(\frac{t}{RC}\right) U dt + \frac{1}{C} \int \frac{d}{dt} (UC_f) \exp\left(\frac{t}{RC}\right) dt$$

Упростим второе слагаемое, для этого прежде всего заметим, что:

$$\frac{d}{dt} (UC_f \exp\left(\frac{t}{RC}\right)) = \frac{d}{dt} (UC_f) \exp\left(\frac{t}{RC}\right) + \exp\left(\frac{t}{RC}\right) \frac{UC_f}{RC}$$

Поэтому если мы сделаем предположение, что: $\left| \frac{d}{dt} (UC_f) \right| \gg \left| \frac{UC_f}{RC} \right|$, то

$$B(t) = \frac{1}{CR} \int \exp\left(\frac{t}{RC}\right) U dt + \frac{1}{C} \int \frac{d}{dt} (UC_f \exp\left(\frac{t}{RC}\right)) dt$$

$$B(t) = \frac{1}{CR} \int \exp\left(\frac{t}{RC}\right) U dt + \frac{UC_f}{C} \exp\left(\frac{t}{RC}\right) + D$$

,где $D = \text{const}$. Можно задать начальные условия так, что $D=0$.

Таким образом, напряжение на конденсаторе:

$$U_{C3} = \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \left(\frac{1}{CR} \int \exp\left(\frac{t}{RC}\right) U dt + \frac{UC_f}{C} \exp\left(\frac{t}{RC}\right) \right)$$

$$U_{C3} = \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \frac{1}{CR} \int \exp\left(\frac{t}{RC}\right) U dt + \frac{UC_f}{C}$$

Если теперь мы сравним напряжения на конденсаторе у каждой схемы, то получим равенство: $U_{C3} = U_{C2} + U_{C1}$

При выводе этого равенства вы воспользовались тремя предположениями:

- 1) $C \gg C_f$, что выполняется, так как мы выбирали конденсатор, для которого выполняется данное условие.
- 2) , данное условие означает, что сопротивление должно быть не очень большим. Так как C_f определяется первой производной петли гистерезиса, то фактически эта величина есть наклон петли в данной точке. Этот наклон меняется медленно у “усов” петли, следовательно, там фигура должна быть более “правильной”.
- 3) $|d/dt (UC_f)| \gg |(UC_f)/RC|$

$$-C_f \left| \frac{d}{dt} U \right| + \left| U \frac{d}{dt} C_f \right| \gg \left| \frac{UC_f}{RC} \right|$$

Так как, то

$$-C_f \left| \frac{d}{dt} U \right| + \left| \frac{U}{R} \right| + \left| U \frac{d}{dt} C_f \right| \gg \left| \frac{UC_f}{RC} \right| + \left| U \frac{d}{dt} C_f \right|$$

$$-C_f \left| \frac{d}{dt} U \right| + \left| \frac{U}{R} - \frac{UC_f}{RC} \right| \gg 0$$

Учтём, что $C \gg C_f$, получаем

$$\left| \frac{U}{R} \right| \gg C_f \left| \frac{d}{dt} U \right|$$

$$|U| \gg RC_f \left| \frac{d}{dt} U \right|$$

Это условие, как и второе лучше выполняется ближе к “усам” петли. Таким образом, сделав вычитания значений по оси Y двух кривых, мы получаем кривую, которую даёт вторая схема.

Анализ второй схемы

Получим аналитически фигуру, которая должна быть на осциллографе, если он подключен к схеме 2.

По закону Ома: $U = \left(R - \frac{i}{C\omega} \right) * I$, $U_C = -\frac{i}{C\omega} * I$

$$U_C = U * \left(-\frac{\frac{i}{C\omega}}{\left(R - \frac{i}{C\omega} \right)} \right) = U * \left(-\frac{i}{R\omega C - i} \right) = U * \frac{1 - iR\omega C}{1 + (R\omega C)^2} = \frac{U}{\sqrt{(1) + (R\omega C)^2}} *$$

$e^{i\varphi}$,

где $\cos(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{(1) + (R\omega C)^2}}$.

Таким образом, напряжение на конденсаторе будет сдвинуто по фазе относительно внешнего напряжения на угол $-\frac{\pi}{2} < \varphi < 0$.

Пусть $U = A * \cos(\omega t)$, $U_C = B * \cos(\omega t + \varphi)$, где A и B амплитуды напряжений.

$$U_C = B * (\cos(\omega t) * \cos(\varphi) - \sin(\omega t) * \sin(\varphi))$$

$$B * \cos(\omega t) * \cos(\varphi) - U_C = B * \sin(\omega t) * \sin(\varphi)$$

$$B^2 * \cos^2(\omega t) * \cos^2(\varphi) + U^2 C - 2BU_1C * \cos(\omega t) * \cos(\varphi) =$$

$$B^2 * \sin^2(\omega t) * \sin^2(\varphi)$$

$$B^2 * (U/A)^2 * \cos^2(\varphi) + U^2 C - 2BU_1C * (U/A) * \cos(\varphi) = B^2 * (1 - (U/A)^2) * \sin^2(\varphi) - B^2 U^2 + 2AB\cos(\varphi)U_1C - A^2 U^2 C = -A^2 B^2 \sin^2(\varphi)$$

Мы получили уравнение кривой линии второго порядка. Чтобы привести это уравнение к каноническому виду, необходимо повернуть оси

координат на угол
$$\operatorname{tg}(2\alpha) = -\frac{2AB\cos(\varphi)}{B^2 - A^2}$$

Новое уравнение будет выглядеть так:

$$\hat{A} * U^2 + \hat{B} * U_1C = -A^2 * B^2 * \sin^2(\varphi),$$

где
$$\hat{A} = \frac{-A^2 - B^2}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{4A^2 B^2 \cos^2(\varphi) + (A^2 - B^2)^2}$$

$$\hat{B} = \frac{-A^2 - B^2}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{4A^2 B^2 \cos^2(\varphi) + (A^2 - B^2)^2}$$

Получаем уравнение эллипса:

$$\frac{U^2}{\left(\sqrt{\left(\left|\frac{-A^2 B^2 \sin^2(\varphi)}{\hat{A}}\right|\right)^2}\right)} + \frac{U_1C^2}{\left(\sqrt{\left(\left|\frac{-A^2 B^2 \sin^2(\varphi)}{\hat{B}}\right|\right)^2}\right)} = 1$$

Главные полуоси определяются уравнениями:

$$a = \sqrt{\left|\frac{-A^2 B^2 \sin^2(\varphi)}{\hat{A}}\right|} \quad b = \sqrt{\left|\frac{-A^2 B^2 \sin^2(\varphi)}{\hat{B}}\right|}$$

Если мы имеем дело со случаем, когда наклон эллипса очень мал, как на рисунке 9, то формулы можно упростить.

$$\operatorname{tg}(2\alpha) = \frac{2AB\cos(\varphi)}{A^2 - B^2} = \frac{2}{1 - \frac{1}{1 + (RC\omega)^2}} = \frac{2\sqrt{1 + (RC\omega)^2}}{(RC\omega)^2}$$

Если $\alpha \ll 1$, то $RC\omega \gg 1$, $\cos(\varphi) \ll 1$

$$\dot{A} = -B^2,$$

$$\dot{B} = -A^2$$

$$a = A,$$

$$b = B$$

$$\frac{a}{b} = \frac{A}{B} = \sqrt{1 + (RC\omega)^2} \cong RC\omega.$$

Таким образом, имея на осциллографе эллипс можно оценить значение R по известным значениям C и ω .

Применим полученные результаты к эллипсу, который изображён на рисунке 9. Амплитуда по оси Y в переводе на вольты равна $b=0,2/1,41=0,14$ В, по оси X $a=15$ В.

$$R = \frac{1}{C\omega} \cdot \frac{a}{b} = \frac{1}{141 \cdot 10^{-9} \cdot 6,28 \cdot 10^4} \cdot \frac{15}{0,14} = 12,1 \text{ кОм}$$

Значение сопротивления, определённое из эллипса мало отличается от значения самого сопротивления $R=10,9$ кОм.

Применение полученных результатов

Полученные выше выражения можно теперь применить для кривых, которые изображены на рисунках 4 и 5. Будем считать, что при частоте $\nu = 1000000$ Гц наличие проводящих каналов не сказывается на петле гистерезиса плёнки, то есть будем считать её идеальной. “Вычтем” из петли гистерезиса на рисунке 5 петлю гистерезиса на рисунке 4, получим эллипс, изображённый на рисунке 13.

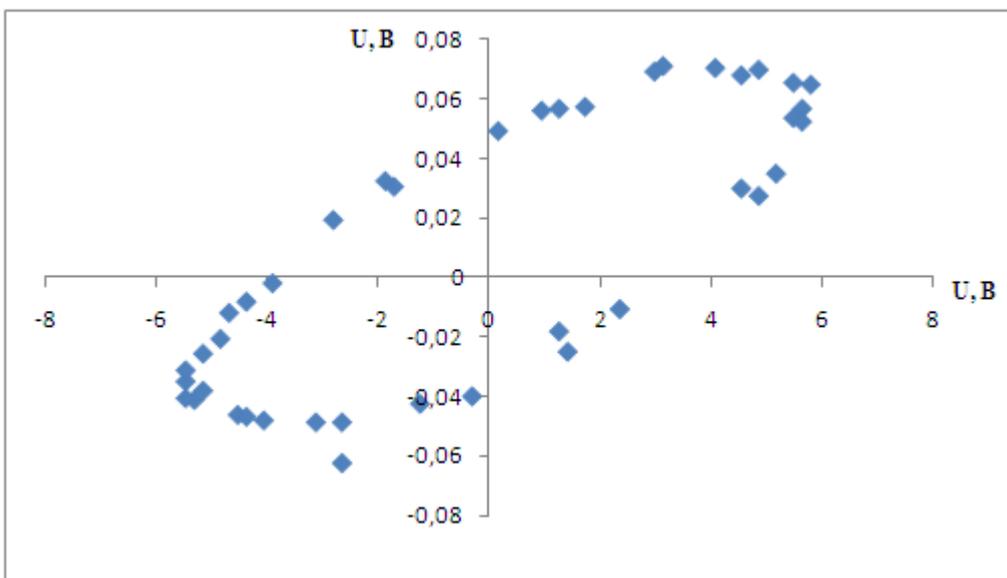


Рис.13 Результат “вычитания” петель гистерезисов

Как видно из рисунка эллипс имеет почти горизонтальное положение. Следовательно, можно применить результаты, полученные выше. Значение большой полуоси $a \cong 6 \text{ В}$, а малой $b \cong 0,045 \text{ В}$. Тогда значение сопротивления:

$$R = \frac{1}{C\omega} * \frac{a}{b} = \frac{1}{141 * 10^{-9} * 6,28 * 10^2} * \frac{6}{0,045} = 1,5 \text{ МОм}$$

Таким образом, зная только петли гистерезиса плёнки при двух частотах можно оценить сопротивление проводящих каналов этой плёнки.

Исследование других дефектов в плёнке

Теперь будем рассматривать плёнку, вид которой не имеет закруглений, характерных для плёнки с проводящими каналами. Соответствующие кривые гистерезиса для частоты $\nu=10000 \text{ Гц}$ и частоты $\nu=800 \text{ Гц}$ показаны на рисунках 14 и 15:

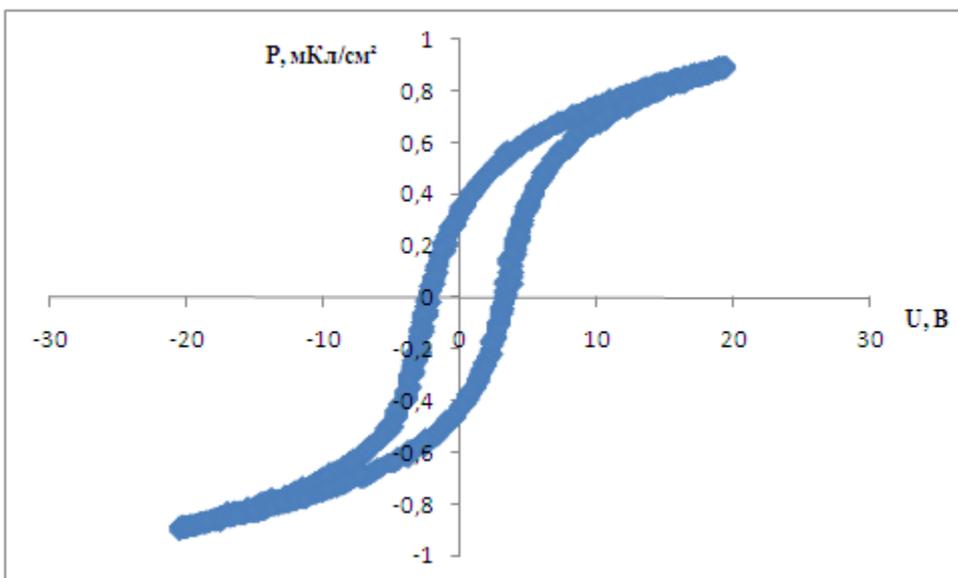


Рис.14 Петля гистерезиса для $\nu=10000$ Гц

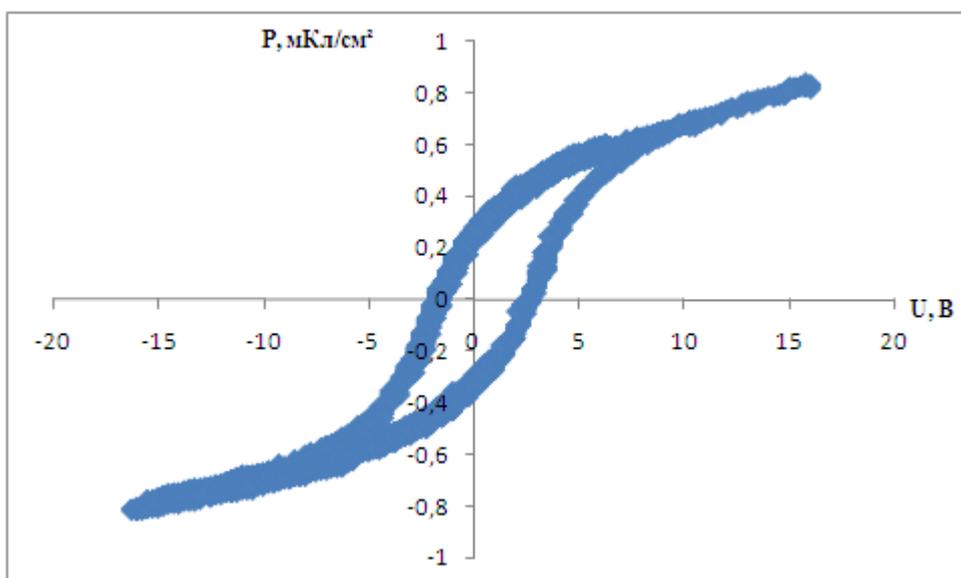


Рис.15 Петля гистерезиса для $\nu=800$ Гц

Как видно, рисунки не сильно отличаются друг от друга: при малых частотах петля имеет более длинные “усы”, что объясняется большим временем, которое имеют домены для переполяризации. Однако если найти наклон этих “усов” при различных частотах, то обнаружится, что он каким-то сложным образом зависит от частоты. Зависимость этого наклона от частоты приведён в таблице 2

Таблица 2. Наклон “усов” при различных частотах

ν , Гц	800	1500	2500	4000	8000	10000	20000
	20	10,5	7,6	18,7	11	11	17,5

Эту зависимость от частоты можно связать с наличием диэлектрического слоя на поверхности плёнки, а также появление различных воздушных прослоек между плёнкой и электродом. Наличие диэлектрического слоя можно аппроксимировать включением ещё одного конденсатора, параллельно плёнке, как показано на рисунке 16:

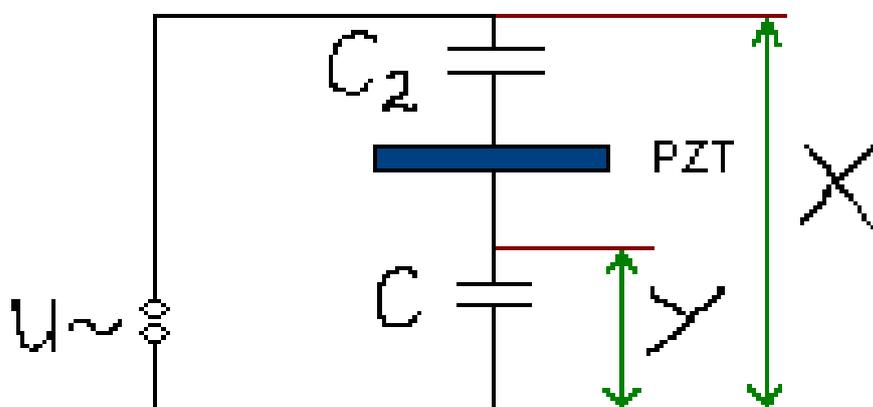


Рис.16 Аппроксимация диэлектрического слоя

Наличие такого конденсатора меняет наклон линейной части петли гистерезиса. Так как конденсатор линейный, то зависимость вектора поляризации от внешнего напряжения изобразится в виде прямой линии, как показано на рисунке 17. Так как конденсаторы включены последовательно, то заряд на их обкладках будет равным, следовательно, на экране осциллографа это изобразится в виде кривой, значения которой по оси X есть сумма значений кривых по оси X при одинаковом Y . Что и изображено на рисунке 18.

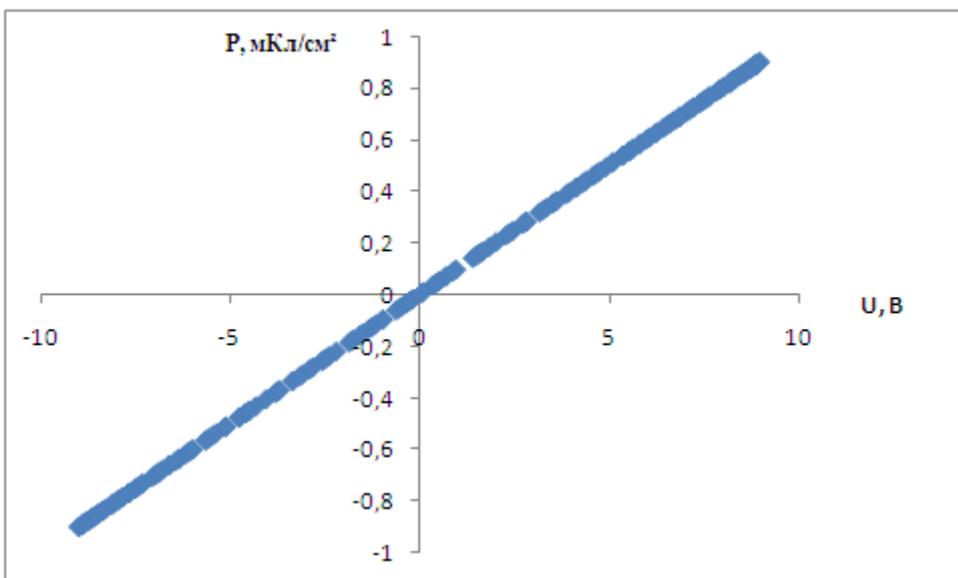


Рис.17 Зависимости для линейного диэлектрического конденсатора

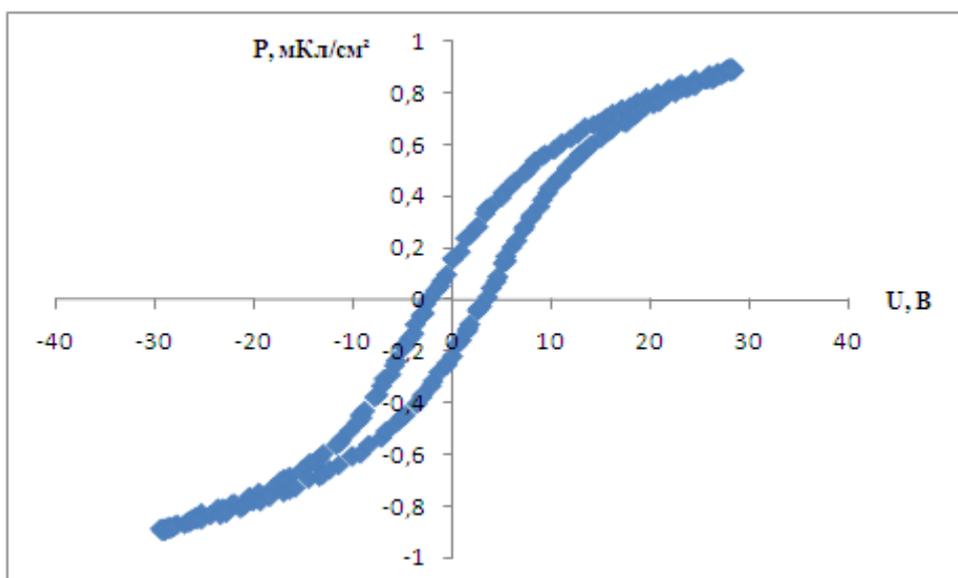


Рис.18 Сумма по X значений петель на рисунках 14 и 17

Как видно при таком предположении наклон “усов” изменился. Предполагая более сложные схемы из конденсаторов, можно будет объяснить зависимости, представленные в таблице 2.

Заключение

В дипломной работе были проведены исследования влияния различных побочных эффектов, при напылении сегнетоэлектрической плёнки $PbTi_{0,48}Zr_{0,52}O_3$, на петлю гистерезиса этой плёнки.

В результате проведенных исследований было обнаружено:

- 1) “Округление” петли гистерезиса связано с наличием проводящих каналов в плёнке
- 2) Зная петлю гистерезиса для большой и малой частоты, можно определить величину этого сопротивления
- 3) Зависимость наклона “усов” петли гистерезиса от частоты можно связать с наличием диэлектрического слоя на поверхности плёнки

Список литературы

1. Сивухин Д.В. “Общий курс физики. Электричество”
2. Ч. Киттель. “Введение в физику твёрдого тела”
3. Г.А. Смоленский, Л.А. Шувалов. “История развития сегнетоэлектричества в СССР”
4. А.Е. Умнов. “Аналитическая геометрия и линейная алгебра”
5. В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. “Физика полупроводников”
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. “Теоретическая физика. Электродинамика сплошных сред”
7. А.С. Сидоркин. “Доменная структура в сегнетоэлектриках и родственных материалах”