

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»

«Институт естественных и точных наук»

Физический факультет

Кафедра физики наноразмерных систем

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, к.х.н., с.н.с.

_____/Жеребцов Д.А./

« ____ » _____ 2019 г

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой д.ф.-м.н. проф.

_____/Бескачко В.П./

« ____ » _____ 2019г.

Емкостной метод измерения электрической проводимости жидких кристаллов в
ячейке с блокирующими электродами

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ – 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР

Руководитель, к.ф.-м.н., доцент

_____/Подгорнов Ф.В./

" ____ " _____ 2019г.

Автор, студент группы ЕТ – 263

_____/Колмакова Н.С./

" ____ " _____ 2019г.

Нормоконтролер, к.х.н., ст. преп.

_____/Кувшинов А.М./

" ____ " _____ 2019г.

АННОТАЦИЯ

Колмакова Н.С. Емкостной метод измерения электрической проводимости жидких кристаллов в ячейке с блокирующими электродами. – Челябинск: ЮУрГУ, ИЕТН, ЕТ-263; 2019, 55 с. 12 ил., библиогр. список – 31 наим.

Цель выпускной квалификационной работы – измерение электрической проводимости сегнетоэлектрического жидкого кристалла (СЖК) в ячейке с блокирующими электродами.

В данной работе был проведен сравнительный анализ методов измерения электрической проводимости жидкокристаллических материалов. Рассчитан комплексный спектр диэлектрической проницаемости гетерогенных систем, спектр комплексной электрической проводимости СЖК, и значение электрической проводимости СЖК по постоянному току.

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	9
1.1 Жидкие кристаллы и их классификация.....	9
1.2 Сегнетоэлектрические жидкие кристаллы.....	12
1.2.1 Хиральные смектики С. Группа симметрии.....	13
1.2.2 Применение сегнетоэлектрических жидких кристаллов.....	18
1.3 Релаксационные диэлектрические моды в СЖК.....	20
1.3.1 Голдстоуновская мода.....	21
1.3.2 Мягкая мода.....	22
1.3.3 Ионы в жидких кристаллах.....	22
2 ГЛАВА. ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ	25
2.1 Физические принципы измерения импеданса.....	25
2.2 Анализатор частотного отклика.....	27
2.3 Поляризация Максвелла-Вагнера.....	29
2.4 Поляризация электродов.....	31
3 ГЛАВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	33
3.1 Изготовление СЖК ячейки.....	33
3.1.1 Структура СЖК ячейки.....	33
3.1.2 Изготовление ориентирующих слоев.....	35
3.1.3 Обработка подложек.....	35
3.1.4 Нанесение ориентирующих слоев.....	37
3.1.5 Распределение спейсеров по подложке.....	39
3.1.6 Сборка СЖК ячеек.....	39
3.2 Расчет электрической проводимости слоя СЖК в ячейке с неблокирующими и блокирующими электродами из мнимой части спектра комплексной проводимости.....	41
3.3 Измерение диэлектрических спектров.....	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	52
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	53
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	54

					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	Лист 6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ВВЕДЕНИЕ

В настоящие дни одно из самых перспективных материалов в современной науке и технике являются жидкие кристаллы. Главным преимуществом данного материала является наличие уникальных свойств, таких как диэлектрическая и оптическая анизотропия [1], свойствами упругости [2], пространственной ориентацией молекул [3], а также высокой чувствительностью к внешним полям, таким как электрическое [4], магнитное [5], к изменению температуры [6] и механическим напряжениям. Исходя из этих уникальных свойств, данный материал обладает широкой областью применения в жк дисплеях [7,8], тактильных датчиках давления [9], пространственных модуляторах света [10], томографии [11], адаптивной оптике и устройствах управления светом [12].

Точное определение электрических параметров жидких кристаллов обладает огромным значением в каждой из этих областей применения. Такими параметрами являются диэлектрическая проницаемость и электрическая проводимость по постоянному току. Изучение различных свойств жидких кристаллов удобно при помощи специальной жидкокристаллической ячейки. Электрические параметры существенно зависят от характеристик и технологии изготовления ячейки [13], наличия выравнивающих слоёв [14], материала электрода [15] и внешних полей.

В настоящее время существует несколько методов экспериментального определения проводимости по постоянному току, например, импедансная спектроскопия. Но этот метод основан на измерении омического отклика за счет движения ионов в ячейке, что не даёт корректных результатов. Для получения более точных значений электрической проводимости по постоянному току был предложен новый альтернативный метод, основанный на измерении ёмкостного отклика ячейки [16].

						Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	

Таким образом, цель настоящей работы – измерение электрической проводимости сегнетоэлектрического жидкого кристалла (СЖК) в ячейке с блокирующими электродами.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести сравнительный анализ методов измерения электрической проводимости жидкокристаллических материалов.
2. Рассчитать комплексный спектр диэлектрической проницаемости гетерогенных систем.
3. Рассчитать спектр комплексной электрической проводимости СЖК.
4. Рассчитать значение электрической проводимости СЖК по постоянному току.

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Жидкие кристаллы и их классификация.

Жидкие кристаллы представляют собой промежуточное мезофазное состояние между кристаллическими твердыми телами и изотропными жидкостями. Их структурными элементами являются удлиненные стержневидные (каламитики) или дисковидные (дискотики) органические молекулы. Размер молекулы обычно составляет несколько нанометров. Соотношение между длиной и диаметром стержнеобразных молекул составляет ≥ 5 . Так как молекулы не являются сферическими, они могут также иметь ориентационный порядок помимо позиционного [17].

Для жидкокристаллической молекулы необходимо, чтобы она имела жесткое ядро и гибкий хвост. В случае, если молекула полностью гибкая, она не будет иметь ориентационный порядок. Если молекула полностью жесткая, она будет переходить из изотропной жидкой фазы в кристаллическое твердое вещество с понижением температуры и достижением температуры фазового перехода.

Жесткая часть отвечает за ориентационный и позиционный порядок. При балансе жесткой и гибкой частей, вещество может стать жидкокристаллическим.

Жидкокристаллическое состояние имеет разные фазы. При высоких температурах молекулы находятся в изотропном жидком состоянии, где они не имеют ни позиционного, ни ориентационного порядка. Молекулы без проблем движутся, и материал может течь как вода. Поступательная вязкость жидких кристаллов сопоставима с вязкостью воды. Длинные и короткие молекулярные оси могут быть направлены в любом направлении.

Когда температура снижается, материал переходит в нематическую фазу (рисунок 1.1.), которая является наиболее общей и простой жидкокристаллической фазой. В этом случае молекулы имеют ориентационный порядок, но все еще не имеют позиционный порядок. Молекулы все еще могут

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

диффундировать по объему, и поступательная вязкость не сильно отличается от поступательной вязкости изотропной жидкости. Длинная ось молекулы имеет предпочтительное направление. Хотя молекулы все еще вращаются из-за теплового движения, среднее по времени направление длинной молекулярной оси хорошо определено и одинаково для всех молекул в макроскопическом масштабе. Среднее направление длинной молекулярной оси записывается, как \vec{n} и представляет собой единичный вектор, который называется директором жидкого кристалла. Короткие молекулярные оси не имеют ориентационного порядка в одноосном нематическом жидком кристалле.

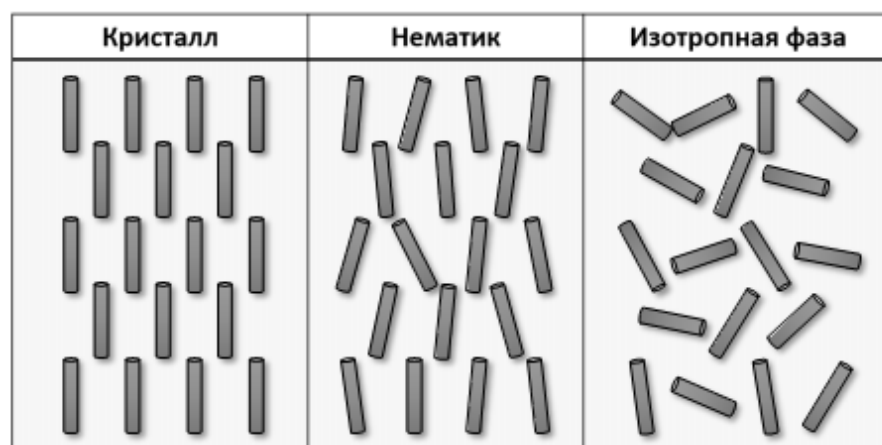


Рисунок 1.1. Молекулярный порядок кристаллической, нематической и изотропной фазы ЖК.

При дальнейшем понижении температуры, материал переходит в фазу смектик-А. Эта фаза характеризуется тем, что в дополнение к ориентационному порядку молекулы также имеют частичный позиционный порядок, то есть молекулы выстраиваются в слоистую структуру. Жидкокристаллический директор перпендикулярен слоям. Смектик-А - это одномерный кристалл, молекулы которого имеют ориентационный порядок в направлении, перпендикулярном слою. В действительности границы между соседними слоями не так очевидны, как показано на рисунке 1.2. Молекулярная плотность имеет волнистость с

длиной волны около одной длины молекулы. Внутри слоя, это двухразмерная жидкость в которой не существует позиционного порядка и молекулы могут двигаться. Для материалов в фазе смектик-А, поступательная вязкость намного выше, вследствие этого он начинает вести себя как жир. Когда температура падает еще ниже, материал переходит в фазу смектик-С, в которой жидкокристаллический директор больше не перпендикулярен слою, а направлен под углом к нормали.

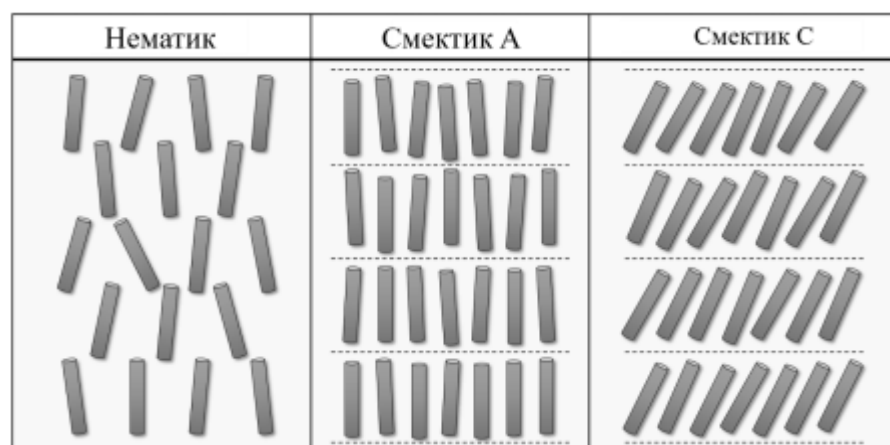


Рисунок 1.2. Молекулярный порядок нематической фазы, смектика-А и смектика-С.

При более низких температурах материал переходит в твердую фазу, в которой существует как позиционный, так и ориентационный порядок. Поступательная вязкость становится бесконечной, и большинство молекул больше не диффундирует в объем материала.

Жидкие кристаллы в твердотельном состоянии имеют оптическое двулучепреломление аналогично кристаллическим твердым телам. И в тоже время они обладают текучестью, как жидкости. Молекулы жидких кристаллов вытянуты и имеют различную молекулярную поляризуемость вдоль своих длинных и коротких осей. Как только длинные оси молекул ориентируются вдоль общего направления, показатели преломления вдоль и перпендикулярно к

директору становятся другими. Следует отметить, что не все молекулы в форме стержней могут стать жидкокристаллическими.

Жидкие кристаллы, обсуждаемые выше, называются термотропными жидкими кристаллами и переходят из одной фазы в другую с изменением температуры. Существует другой тип жидких кристаллов, а именно лиотропные жидкие кристаллы, которые существуют благодаря взаимодействию структурных молекул с молекулами растворителя. Фазовые переходы из одной фазы в другую обусловлены концентрацией растворителя. Лиотропные жидкие кристаллы обычно состоят из амфифильных молекул, которые имеют гидрофобную группу на одном конце и гидрофильную группу на другом, смешанные с водой в качестве растворителя. Как правило, лиотропная жидкокристаллическая фаза является мицеллярной и ламинарной. Лиотропные жидкие кристаллы важны в биологии.

1.2 Сегнетоэлектрические жидкие кристаллы

Мы знаем, что нематические жидкие кристаллы не имеют спонтанную поляризацию, потому что они имеют зеркальную симметрию. Сейчас мы приступим к рассмотрению возможности спонтанной поляризации в других жидкокристаллических фазах. Для стержневидных молекул в любой жидкокристаллической фазе невозможно иметь спонтанную поляризацию, потому

что направления \vec{n} и $-\vec{n}$ равнозначны. Холестерики хиральные молекулы и поэтому не имеют зеркальной симметрии. В нематической фазе холестерики инвариантны при двукратном повороте вокруг директора, что исключает возможность спонтанной поляризации перпендикулярной директору. Они также инвариантны при двукратном повороте вокруг оси, которая перпендикулярна плоскости спиральной оси, что исключает возможность спонтанной поляризации параллельной директору. Ввиду вышеизложенного можно сделать вывод, что у

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

холестериков отсутствует спонтанная поляризация. Жидкий кристалл смектик-А, кроме того, что имеет ориентационный порядок как нематики, имеет частичный позиционный порядок. Они имеют слоистую структуру. Директор жидкого кристалла в этой фазе перпендикулярен слоям смектика. И в случае хиральных, и в случае не хиральных молекул, поворот вокруг директора инвариантен. Они также инварианты при двукратном повороте вокруг любой оси перпендикулярной директору. Поэтому не существует спонтанной поляризации в направлении перпендикулярном директору смектикаА. Следовательно, в смектиках-А не существует сегнетоэлектричества, даже когда структурные молекулы являются хиральными [18]. Жидкие кристаллы смектики-С подобны смектикам-А, но у них директор не перпендикулярен слоям, а направлен под углом к нормали. Двукратный поворот вокруг любой оси также инвариантен. Это исключает возможность спонтанной поляризации в жидких кристаллах смектик-С.

Согласно Мейеру [19], зеркальная симметрия жидких кристаллов смектика С может быть разрушена, если структурные молекулы являются хиральными, и таким образом становится возможным появление спонтанной поляризации. Эта фаза называется хиральным смектиком С или фаза смектик-С*. Внутри слоя, его структура такая же, как и в смектике-С. Однако директор жидкого кристалла больше не ориентирован одинаково в пространстве, а закручивается от слоя к слою. Таким образом смектики-С* являются сегнетоэлектрическими жидкими кристаллами, так как у них присутствует спонтанная поляризация вдоль оси вращения.

1.2.1 Хиральные смектики С. Группа симметрии.

В смектической-С фазе длинные молекулярные оси отклонены от нормали к смектическим слоям на угол θ , что показано на рисунке 1.3. В смектической-С

					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

фазе директор \vec{n} совпадает с преимущественным направлением длинных молекулярных осей, и, как прежде, $\vec{n} = -\vec{n}$.

Если направление нормали к слоям совпадает с осью z в декартовых координатах, то проекции директора:

$$(\vec{n}_x, \vec{n}_y, \vec{n}_z) = (\sin(\theta) \cos(\varphi), \sin(\theta) \sin(\varphi), \cos(\theta)) \quad (1.1)$$

где $\vec{n}_x, \vec{n}_y, \vec{n}_z$ – проекции на соответствующие оси,

θ – угол наклона молекулы к нормали,

φ – азимутальный угол молекулы.

Проекция директора \vec{n} на плоскость смектического слоя называется \vec{c} -директором. В качестве двухкомпонентного параметра порядка смектика-С выбирается комплексная функция $\Psi = \sin(\theta) e^{\pm i\varphi}$, которую можно представить \vec{c} -директором. $\sin(\theta)$ и угол φ могут рассматриваться как амплитуда и фаза угла наклона, причем знак $\pm\varphi$ определяет направление поворота \vec{c} -директора. В экспериментах угол θ варьирует от 0 до 45° .

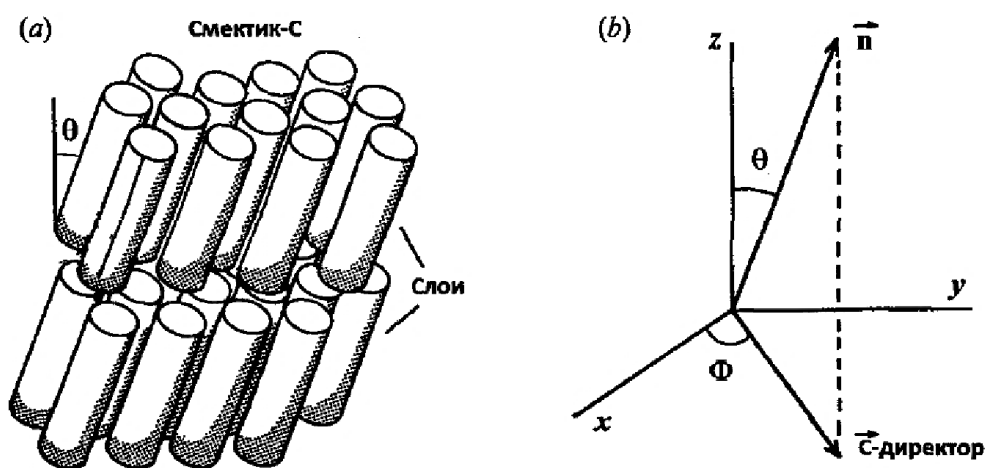


Рис. 1.3. Смектик С. Молекулярная структура (а) и определение \vec{n} -директра.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Точечная группа симметрии фазы C_{2h} или $\frac{2}{m}$ включает операцию поворота

вокруг оси x и плоскость симметрии σ_h , перпендикулярную поворотной оси (отсюда и h -индекс у символа σ_h). Полная группа симметрии фазы - $C_{2h} \times T(2)$. Пространственные положения молекул в соседних слоях не коррелированы, а их наклон коррелирован.

Фаза С оптически двуосна, что видно на рисунке 1.4 (а), и все проекции директорана координатные оси различны: $n_1 \neq n_2 \neq n_3$ (при направлении нормали слоям вдоль z) [20].

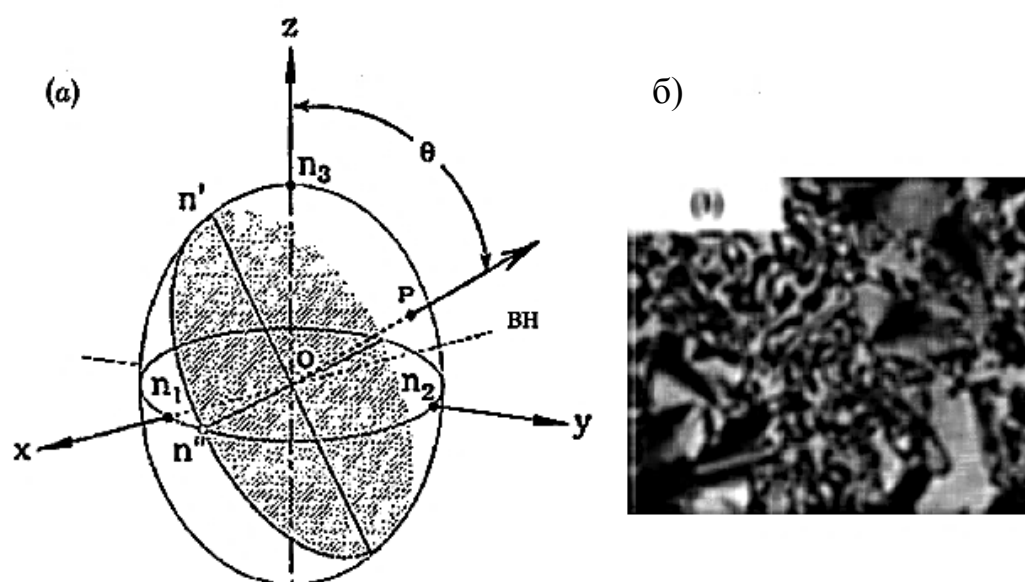


Рис. 1.4. Оптическая индикатриса (а) и текстура (б) двуосной смектической-С фазы (ВН – волновая нормаль)

В смектике-С директор свободно вращается вокруг z по поверхности конуса с углом θ при вершине. Благодаря этой степени свободы, в поляризационном микроскопе наблюдаются, как и в нематиках, шпирентекстуры, которые видны в центральной части рис. 1.4 (б). С другой стороны, слоевая структура смектика ответственна за веерную текстуру в нижнем левом углу этого же рисунка.

Хиральность молекул нарушает зеркальную симметрию C_{2h} ахиральной смектической-С фазы. Единственным элементом симметрии остается поворотная ось второго порядка C_2 , и точечная группа симметрии становится полярной (C_2). Структура одного смектического-С* слоя (т. е. элементарной ячейки) показана на рисунке 1.5. Как и в ахиральной фазе-С, расположение молекул в слое подчиняется симметрии «голова-хвост», и направление директора $\vec{n} = -\vec{n}$, совпадает с преимущественной ориентацией длинных молекулярных осей, образующих угол θ к нормали \vec{h} к смектическим слоям.

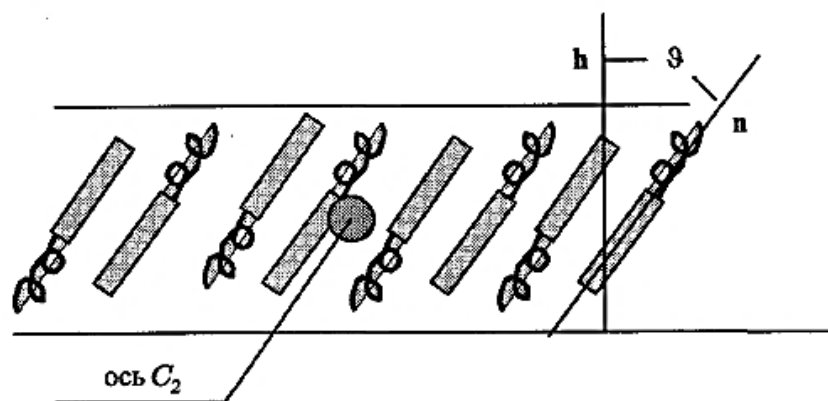


Рис 1.5. Структура монослоя хиральной смектической-С* фазы.

Параметр ориентационного порядка одинаков для смектических-С и С* фаз; это двухкомпонентный угол наклона $\theta e^{-i\varphi}$ с модулем θ и фазой угла φ . Однако, в смектике-С* плоскость рисунка больше не является плоскостью отражения, и ось C_2 оказывается полярной. Направление полярной оси зависит от знака хиральности жидкого кристалла, и ее можно определить по вращению правого или левого винта сквозь плоскость рисунка hn . Хиральная симметрия разрешает наличие вектора спонтанной поляризации P_s (т. е. дипольного момента единицы объема) в направлении полярной оси.

Следовательно, каждый смектический-С* слой полярен и обладает пьезоэлектрическими свойствами. При этом, с помощью электрического поля можно изменять направление спонтанной поляризации в любом направлении.

						Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	

Более того, при подходящей ориентации молекул на границах образца, заданной, например, обработкой ограничивающих его стекол, смектик-С* обнаруживает эффекты памяти, и при таких условиях, каждый смектический слой и весь образец в целом могут считаться сегнетоэлектрическим.

Межмолекулярные взаимодействия хиральной природы закручивают макроскопическую структуру смектика-С* точно так же, как и холестерического жидкого кристалла. Угол закрутки означает вращение плоскости молекулярного наклона φ по мере продвижения вдоль оси z, находится как

$$\varphi(z) = qz = \frac{2\pi z}{P_0} \quad (1.2)$$

где P_0 – шаг спирали хирального смектика С*.

Шаг P_0 этой периодической сверхструктуры несоизмерим с периодом слоевой структуры, т. е. с толщиной смектического слоя.

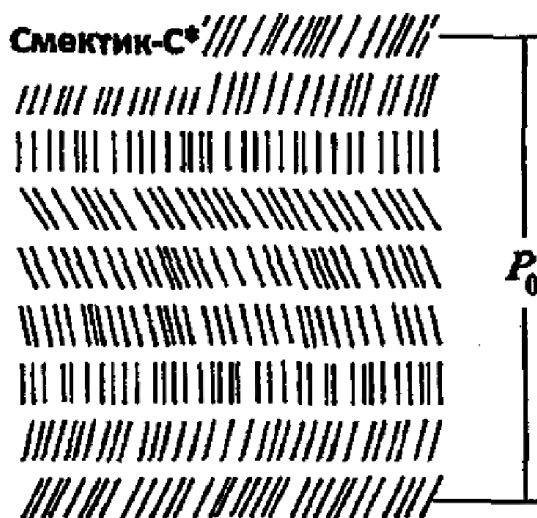


Рис. 1.6. Спиральная структура хирального смектика-С* с шагом спирали P_0

Вообще говоря, образование спирали можно, в какой-то мере, считать вторичным явлением. Конечно, смешивая левые и правые энантиомеры одного и того же вещества, мы тривиально ликвидируем хиральность и получаем смектик-С с неполярными слоями.

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	17

Однако, смешением хиральных изомеров химически различных молекул можем скомпенсировать закрутку спирали, но не полярность смектических слоев. И наоборот, вариацией состава химически различных, правых и левых изомеров мы можем скомпенсировать спонтанную поляризацию, сохранив спиральную структуру [21].

1.2.2 Применение сегнетоэлектрических жидких кристаллов.

По данным маркетинговых агентств *DisplaySearch* и *DisplayBank* общий объем продаж мирового дисплейного рынка составляет более 300 млрд. долларов США в год, причем около $\frac{3}{4}$ устройств на нем являются жидкокристаллическими, а всего их производится порядка одного миллиарда в год. Информационно-коммуникационные системы не только завтрашнего, но уже и сегодняшнего дня требуют существенного повышения скоростивизуализации, отображения и обработки массивов данных (изображений), в том числе кодированных, распознаваемых, принимаемых/передаваемых по интернету, формируемых на экранах компьютерных и телевизионных мониторов и разнообразных смарт-приборов, и др. Тот факт, что разработанные экспериментальные образцы дисплейных СЖК-ячеек при том же, что в НЖК-приборах, и даже меньшем электрическом напряжении показывают близкую к ним по форме модуляционную характеристику (со шкалой полутонов и без гистерезиса), но в 10 и более раз превосходят по быстродействию, позволяет рассчитывать на использование СЖК в большей части жидкокристаллических приборов вместо НЖК, а именно:

- в микродисплеях *FLCoS* с управляющей кремниевой матрицей;
- в проекционных ТВ и в пикопроекторах на основе микродисплея;
- в стандартных активно-матричных экранах смарт-дисплеев;
- в разнообразных трехмерных ТВ, как в стерео-(с очками) и авто-стереоскопических (безочковых), так и с объемным экраном (воллюметрических);

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- в оптических затворах разных приборов (фотокамер и др.);
- в бесполяроидных модуляторах (в том числе пространственных) видимого и ближнего (до 3 мкм) инфракрасного диапазона;
- в фазо-модулирующих многоканальных переключателях света, сенсорах, в фазированных антенных решетках, устройствах адаптивной оптики и голографии;
- в спецтехнике, в том числе в скоростных системах обработки, кодирования и распознавания данных.

Потребителями СЖК-технологии потенциально являются производители всех ЖК-устройств в мире, изготавливаемых в настоящее время по НЖК технологии. Основные производители находятся в Корее, в Японии и в Китае (включая Гонконг и Тайвань). Среди них выделяются два корейских гиганта – компания *Samsung* (занимает около четверти мирового рынка дисплеев) и компания *LG* (более 10 % рынка). Многие компании-разработчики находятся в США и Европе, но используют для изготовления приборов производственную базу Китая и стран юго-восточной Азии. __ Конкурентные преимущества новой СЖК-технологии таковы, что независимо от национальных границ многие компании в мире будут заинтересованы в ее освоении для производства систем 3D-визуализации, смартфонов, проекторов и стерео-очков. К таким компаниям, кроме уже названных, можно отнести также *Philips, Google, Apple, NEC, Merck, Fraunhofer Heinrich-Hertz- Institute, Himax Display, CHI MEI Optoelectronics* и др., в том числе компании, специализирующиеся на изготовлении активных стерео-очков, например, *Xpand, Real D, Eyes3Shut, Bit Cauldron*, и компании, специализирующиеся на производстве компьютерных и проекционных 3D-дисплеев, например, *NVidia, Sony, Panasonic*. Можно предположить, что новое качество и новые функциональные свойства изделий с использованием СЖК обеспечат в будущем не менее 10 % рынка ЖК-приборов, включая в

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

первую очередь требующие повышенного быстродействия смарт-приборы и трехмерные дисплеи.

К сожалению, пока на разработку новых СЖК-материалов в России не обращают внимание ни зарубежные производители (они получают стабильную прибыль от давно профинансированной ими НЖК-технологии), ни инвесторы (по причине недостаточной информированности, мирового финансового кризиса и санкций по отношению к России). В России же разработка остается невостребованной вследствие практически полного отсутствия здесь производителей ЖК-дисплеев и еще худшей финансовой ситуации у инвесторов. И все же разработчики надеются выйти на мировой рынок, что возможно на данном этапе посредством продажи производителям жидкокристаллических приборов лицензий на разрабатываемые технологии изготовления СЖК-материала и СЖК-дисплейных экранов, в предположении модернизации на этой основе существующих технологий, использующих нематические жидкие кристаллы. Возможна также покупка или взятие в лизинг зарубежных предприятий, с целью модернизации существующих на них технологий НЖК-экрана и электронной адресации и последующего производства СЖК-приборов.

1.3 Релаксационные диэлектрические моды в СЖК

Фазовый переход от хирального смектика С к хиральному смектику А можно описать с помощью феноменологической модели Ландау - Де Жена. В таком случае, свободная энергия жидкого кристалла может быть описана в виде:

$$G = \frac{1}{2} \alpha (\Gamma - T_c) \theta^2 + \frac{1}{4} b \theta^4 + \frac{1}{6} c \theta^6 - \Lambda q \theta^2 + \frac{1}{2} K_{33} q^2 \theta^2 + \frac{1}{2\epsilon} P_S^2 - \mu q P_S - C P_S \theta - d q \theta^4 + \frac{1}{4} \eta, \quad (1.3)$$

где K_{33} - упругий коэффициент Франка;

Λ - коэффициент Лифшица;

						Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	

- C - пьезоэлектрический коэффициент билинейной связи;
- Ω - коэффициент поперечного квадрупольного упорядочения;
- η - коэффициент необходимый для стабилизации;
- d - коэффициент члена, описывающего рост шага геликоида;
- c - коэффициент члена, описывающего температурную зависимость.

При рассмотрении случая, когда внешнее электрическое поле не равно 0, то к выражению свободно энергии необходимо добавить еще одно слагаемое: $g_E(z) = -E \cdot P$. Диэлектрическая проницаемость определяется следующим образом:

$$\varepsilon_0 \Delta \varepsilon_i = \lim_{E \rightarrow 0} \frac{\langle P_i \rangle}{E} \quad (1.4)$$

1.3.1 Голдстоуновская мода.

Мода Голдстоуна связана с изменением фазы поляризации и описывается с помощью искажений волнового вектора смектического ЖК-геликоида. Этот тип колебаний представляет собой искажение азимутального угла θ , в то время как полярный угол остается постоянным. Чтобы определить диэлектрическую проницаемость и частоту релаксации моды Голдстоуна, необходимо минимизировать свободную энергию. При этом были получены следующие выражения:

$$\Delta \varepsilon_G = \frac{1}{2\varepsilon_0 K_{33} q^2} \left(\frac{P_S}{\theta} \right)^2 \quad (1.5)$$

$$f_G = \frac{K_{33} q^2}{2\pi\gamma_G} \quad (1.6)$$

где $\Delta \varepsilon_G$ – диэлектрическая проницаемость Голдстоуновской моды,

f_G – частоту релаксации моды Голдстоуна,

P_S – величина спонтанной поляризации,

ε_0 – электрическая постоянная,

K_{33} – коэффициент упругости Франка,

q – заряд молекулы ЖК,

θ – азимутальный угол наклона жидкокристаллического директора,

						Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	

γ_{ϵ} – коэффициент вязкости.

1.3.2 Мягкая мода

Мягкая мода связана с амплитудными изменениями поляризации, а именно с колебаниями угла наклона молекул θ , расположенных в слое хирального смектика-С (SmC*). Влияние мягкой моды особенно заметно вблизи температуры фазового перехода из фазы смектика-С* - в фазу смектика-А*, поскольку это является причиной электроклинического эффекта.

Диэлектрическая проницаемость и частота релаксации мягкой моды могут быть найдены из следующих выражений:

$$\Delta\epsilon_s = \frac{\epsilon^2 C^2}{\alpha(T - T_C) + (K_{33} - \epsilon\mu^2)q_0^2} \quad (1.7)$$

$$f_s = \frac{\alpha(T - T_C) + (K_{33} - \epsilon\mu^2)q_0^2}{2\pi\gamma_{sf}} \quad (1.8)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость в изотропной фазе (при высоких температурах),

γ_{sf} – вращательная вязкость;

μ – флексоэлектрический коэффициент;

C – пьезоэлектрический коэффициент;

T_C – температура фазового перехода от ЖК смектика С* в ЖК смектик А.

1.3.3 Ионы в жидких кристаллах

Существует несколько причин возникновения ионов в жидком кристалле.

В первую очередь, ионные примеси могут оставаться в жидком кристалле из-за недостаточной очистки вещества после его синтеза, а также появляться, например, при длительном воздействии температуры или ультрафиолетового излучения на вещество. Одним из важнейших источников является намеренное введение ионов в жидкий кристалл для контроля его проводимости. Также

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ионизация нейтральных молекул в объеме может быть вызвана достаточно сильным внешним полем, в частности, вблизи электродов.

Вклад адсорбции ионов в спектр комплексной диэлектрической проницаемости был рассмотрен в работе [22]. Авторы данной статьи решают систему дифференциальных уравнений, включающую в себя текущие уравнения неразрывности, уравнения Пуассона и уравнения Ленгмюра, которые описывают, как меняется поверхностная плотность заряда на подложке ячейки, отсюда можно получить выражения для комплексного импеданса.

В рамках этой концепции влияние адсорбции и десорбции на компоненты диэлектрической проницаемости, а также проводимости можно представить в виде уравнений:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_{\text{eq}}}{1 + \omega^2 \left(\frac{\varepsilon_{\text{eq}}}{\sigma_{\text{eq}}} \right)^2} \quad (1.4)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\omega \left(\frac{\varepsilon_{\text{eq}}}{\sigma_{\text{eq}}} \right)}{1 + \omega^2 \left(\frac{\varepsilon_{\text{eq}}}{\sigma_{\text{eq}}} \right)^2} \varepsilon_{\text{eq}} \quad (1.5)$$

$$\sigma_{\text{eq}} = \frac{\varepsilon_{\text{cl}} \frac{D}{l_D^2}}{1 + \frac{D}{k\tau} \left(\frac{\rho}{1 + \rho} \right)^2} \quad (1.6)$$

$$\varepsilon_{\text{eq}} = \varepsilon_{\text{cl}} \frac{d}{(2l_D)(1 + \rho)} \quad (1.7)$$

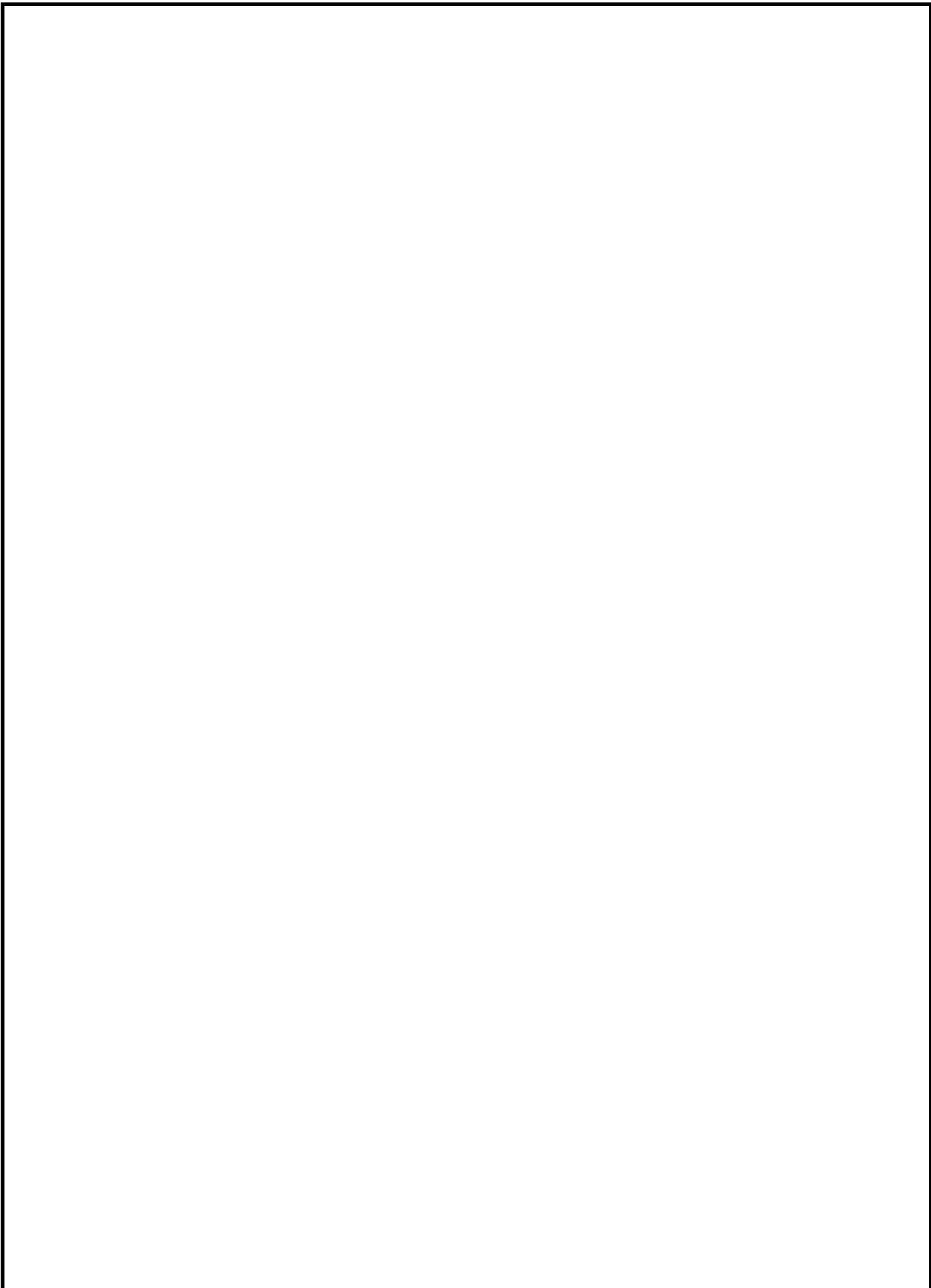
$$\rho = \frac{k\tau}{l_D} \quad (1.8)$$

где κ – коэффициент адсорбции;

τ – коэффициент десорбции.

Сопоставление полученных в этой теории выводов и результатов эксперимента позволило объяснить наличие релаксационного процесса в ячейке с нематическим жидким кристаллом в низкочастотной области.

						Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	



					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

2.1 Физические принципы измерения импеданса

Цель импедансной спектроскопии – охарактеризовать электрические свойства материалов, используя функцию комплексного импеданса $Z^*(\omega)$, которая определяется отношением напряжения между двумя электродами и результирующим током.

В соответствии с этим определением импеданс подобен электрическому сопротивлению постоянного тока, которое определяет отношение $\frac{U}{I}$, где U и I постоянны во времени. Однако при измерении импеданса переменное синусоидальное напряжение U_0 с фиксированной частотой $\frac{\omega}{2\pi}$ подается на измеряемый образец, что вызывает ток I_0 на той же частоте. Кроме того, в общем случае между током и напряжением будет иметь место фазовый сдвиг, описываемый фазовым углом φ (рис 2.1.).

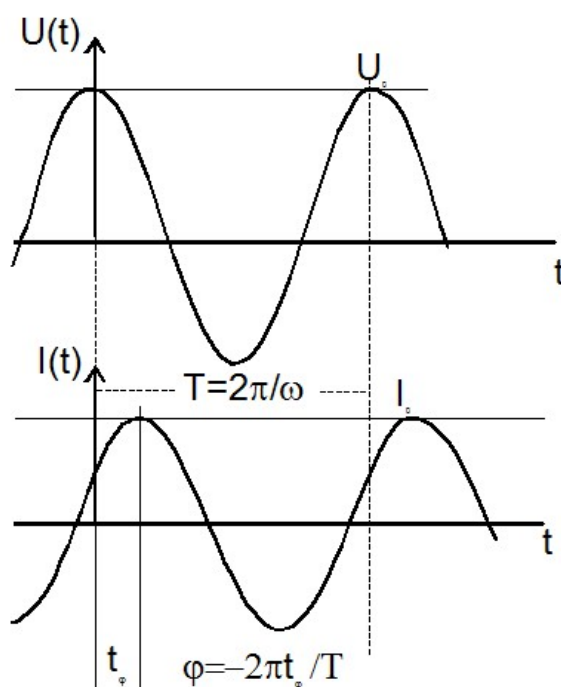


Рис. 2.1. Соотношение амплитуды и фазы между напряжением образца и током при измерении импеданса.

Соотношения между U_0 и I_0 , а также фазовый угол определяются электрическими свойствами образца. Для простого расчета и представления формул удобно использовать комплексные обозначения.

$$U(f, t) = U_0 \sin(2\pi ft) = \operatorname{Re}(U \cdot e^{i2\pi ft})$$

$$I(f, t) = I_0 \sin(2\pi ft + \varphi) = \operatorname{Re}(I \cdot e^{i2\pi ft})$$

Для образца с линейным электрическим откликом отношение $U(f)$ и $I(f)$ не зависит от значения U_0 приложенного напряжения. Текущий через образец ток, записывается как сумма действительной и мнимой части $I^* = I' + iI''$, а комплексное напряжение $U^* = U' + iU'' = U_0$.

Модуль тока можно записать как:

$$I_0 = \sqrt{I'^2 + I''^2} \quad (2.1)$$

А сдвиг фазы находится как:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{I''}{I'} \quad (2.2)$$

В итоге, результат измерений может быть сведен к одной комплексной функции, которая может быть определена с помощью несколько основных представлений.

Наиболее распространенным представлением является импеданс:

$$Z^* = Z' - iZ'' = \frac{U^*}{I^*} \quad (2.3)$$

При измерении импеданса важно точно знать амплитуду и фазу тока, протекающего через образец. В данной работе при решении этой проблемы использовался импедансный спектрометр от Novocontrol.

						Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	

2.2 Анализатор частотного отклика

Бета-анализаторы фирмы novoscontrol включают в себя цифровой анализатор частотного отклика (FRA) с генератором синусоидального сигнала, генератором тока смещения и двумя каналами для анализа. FRA используется в сочетании с диэлектрическим (или импедансным) преобразователем. FRA также может использоваться для самостоятельного анализа частотной характеристики (улучшенное измерение фазы).

FRA измеряет реакцию системы на гармоническое (синусоидальное) возбуждение. Сигнал возбуждения и ответный сигнал являются электрическими напряжениями. Другие физические величины также могут быть измерены, если они являются функциями напряжения.

Ответный сигнал исследуемого образца анализируется с помощью преобразования Фурье. Особый интерес представляют амплитуда и фаза относительно приложенного сигнала возбуждения. По сути, измерение проводится не в одной фиксированной точке, а в последовательности частот, что позволяет расширить диапазон измерений.

Импедансный спектрометр оснащен двухканальной системой анализа спектра, которая позволяет измерять спектр комплексного импеданса, а также измерять передаточную характеристику. Преобразование Фурье выполняется на каждом выходном канале, благодаря встроенным корреляторам. Каждый коррелятор синхронизирован с генератором переменного сигнала.

Выходной сигнал $U(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$ подается на устройство корреляции, выполняя преобразование Фурье. Корреляционное устройство синхронизировано по фазе с генератором, так что частота корреляции $\frac{\omega}{2\pi}$ соответствует частоте генератора и определяется соотношением фаз между генератором и существующей корреляцией.

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Отклик коррелятора на сигнал $U(t)$ составляет два постоянных сигнала, которые не зависят от времени:

$$U'(\omega) = \frac{1}{N \cdot T} \int_0^{N \cdot T} U(t) \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt \quad (2.4)$$

$$U''(\omega) = \frac{1}{N \cdot T} \int_0^{N \cdot T} U(t) \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot dt \quad (2.5)$$

где $U'(\omega)$ – фазовый компонент,

$U''(\omega)$ – ортогональный компонент сигнала $U(t)$,

N – число периодов измеренных коррелирующим устройством.

Амплитуда сигнала $A(\omega)$ и фазовый угол $\varphi(\omega)$ (сдвиг фазы по отношению к генератору) можно рассчитать, как:

$$A(\omega) = \sqrt{U'(\omega)^2 + U''(\omega)^2} \quad (2.6)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg(U'(\omega)/U''(\omega)) \quad (2.7)$$

Ток, текущий через исследуемый материал, можно определить, зная сопротивление нагрузки R :

$$I(\omega) = \frac{U(\omega)}{R} \quad (2.8)$$

Таким образом, зная приложенное напряжение и ток, протекающий в образце, можно найти его полное сопротивление.

						Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	

2.3 Поляризация Максвелла-Вагнера

Поляризация эффекта Максвелла-Вагнера получена из релаксации поляризации на границе раздела двух материалов с различными диэлектрическими свойствами. Когда электрический ток проходит через эти границы раздела, а диэлектрические параметры данных материалов удовлетворяют условию $\sigma_1 \varepsilon_2 \neq \sigma_2 \varepsilon_1$, поверхностные заряды накапливаются на границах раздела, что приводит к процессу релаксации Дебая [23], протекающего с характерной частотой, которая может быть найдена исходя из следующего уравнения:

(2.9)

где f_{mw} – характерная частота релаксации Максвелла-Вагнера;

ε_0 – диэлектрическая постоянная;

ε_1 и ε_2 – диэлектрические проницаемости материалов;

σ_1 и σ_2 – удельная проводимость материалов.

Диэлектрическая прочность может быть найдена из следующего уравнения:

$$\Delta\varepsilon = \frac{(\sigma_1 \varepsilon_2 + \sigma_2 \varepsilon_1)}{(\sigma_1 + \sigma_2)^2 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \quad (2.10)$$

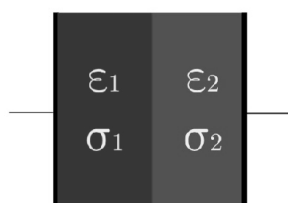


Рисунок 2.2. Двуслойная ячейка с разными диэлектрическими свойствами.

						Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	

Если между границами существуют одиночные наночастицы или сегнетоэлектрический жидкий кристалл, то частота релаксации Максвелла-Вагнера записывается как:

(2.11)

где $A_n = \frac{1}{2} a_1 a_2 a_3 \int_0^\infty \frac{ds}{B(s + a_n^2)}$ и $B = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (s + a_i^2)}$ – деполаризующие коэффициенты;

a_1, a_2, a_3 – полуоси частиц;

ϵ_P и σ_P – диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость частиц.

В случае, если наночастицы обладают формой сферы, то полуоси частиц равны, а деполаризующие коэффициенты $A_1 = A_2 = A_3 = 1/3$. Для упрощения, золотые наностержни можно представить в виде тонкого и вытянутого эллипсоида с соотношением полуосей: $a_1 \gg a_2 = a_3$. При данных условиях деполаризующий коэффициент A_1 стремится к нулю, а коэффициенты $A_2 = A_3$ стремятся к единице. Для наностержней характерны две частоты релаксации Максвелла-Вагнера.

Первую частоту можно связать с релаксацией вдоль перпендикулярного направления:

$$f_{MW}^\perp = \sigma_{FLC} / \epsilon_0 \epsilon_{FLC} \quad (2.12)$$

Вторая частота вдоль продольной оси:

$$f_{MW}^\parallel = \sigma_P / \epsilon_0 \epsilon_P \quad (2.13)$$

Для сферических наночастиц характерна только одна частота релаксации:

						Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	

(2.14)

Для коллоидных дисперсий необходимо преобразовать формулу частоты Максвелл-Вагнеровской релаксации (2.9) по теории Максвелла-Вагнера-Ханая [24]:

$$f_{MWH} = \frac{((1 - \nu)\sigma_P + (2 + \nu)\sigma_{FLC})}{\varepsilon_0((1 - \nu)\varepsilon_P + (2 + \nu)\varepsilon_{FLC})} \quad (2.15)$$

Так же диэлектрическая прочность, исходя из теории Максвелла-Вагнера-Ханая, будет иметь следующий вид:

$$\Delta\varepsilon_{MWH} = \frac{9\nu(1 - \nu)(\varepsilon_{FLC}\sigma_P - \varepsilon_P\sigma_{FLC})^2}{((1 - \nu)\varepsilon_P + (2 + \nu)\varepsilon_{FLC})((1 - \nu)\sigma_P + (2 + \nu)\sigma_{FLC})^2} \quad (2.16)$$

Процессы поляризации Максвелла-Вагнера следует учитывать при изучении неоднородных материалов, таких как суспензии или коллоиды, биологические материалы, разделенные по фазе полимеры, смеси кристаллических или жидкокристаллических полимеров [25].

2.4 Поляризация электродов

Ионы, находящиеся во внешнем электрическом поле с низкой частотой, дрейфуют в направлении электрода, являясь носителями электрического заряда. Результатом того движения является появление областей пространственного заряда вблизи электродов. При изменении полярности внешнего электрического поля, движение ионов меняет свое направление к другому электроду. Если увеличить частоту электрического поля, то формирование областей

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

пространственного заряда не происходит. Это связано с тем, что время передвижения ионов меньше, чем частота переключения. Области пространственного заряда обладают большим значением электрической поляризации, что приводит к возрастанию диэлектрической проницаемости. Данным эффект носит название поляризация электродов и впервые описан в работе [26].

Исходя из данной теории, частотная дисперсия вклада диэлектрической проницаемости моды релаксационной поляризации может быть представлена следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon_L \frac{1 + i\omega\tau_{EP}}{i\omega\tau_{EP} + \tanh(M(1 + i\omega\tau_{EP})^{1/2})} \quad (2.17)$$

где ε_L – диэлектрическая проницаемость без вклада поляризации электродов;

τ_{EP} – постоянная времени релаксации поляризации электродов;

M – отношение толщины образца (L) к удвоенной длины Дебая.

Существует упрощенная модель поляризации электродов [27]. Будем считать, что электроды блокирующие [28], а толщина двойных электрических слоев много меньше, чем толщина ячейки, то есть $M \gg 1$. В этом случае релаксация поляризации электрода описывается с помощью уравнения Дебая:

$$\varepsilon_{EP} = \varepsilon_L + \frac{\Delta\varepsilon_{EP}}{1 + i\omega\tau_{EP}} \quad (2.17)$$

где $\Delta\varepsilon_{EP} = \varepsilon_{L,EP} - \varepsilon_L$ – разница между диэлектрической проницаемостью с вкладом поляризации электродов и без него.

Время релаксации в этом случае примет вид:

$$\tau_{EP} = \frac{L}{2\mu} \sqrt{\frac{\varepsilon_L \varepsilon_0}{nk_B T}} \quad (2.18)$$

где μ – подвижность носителей заряда;

n – концентрация носителей заряда.

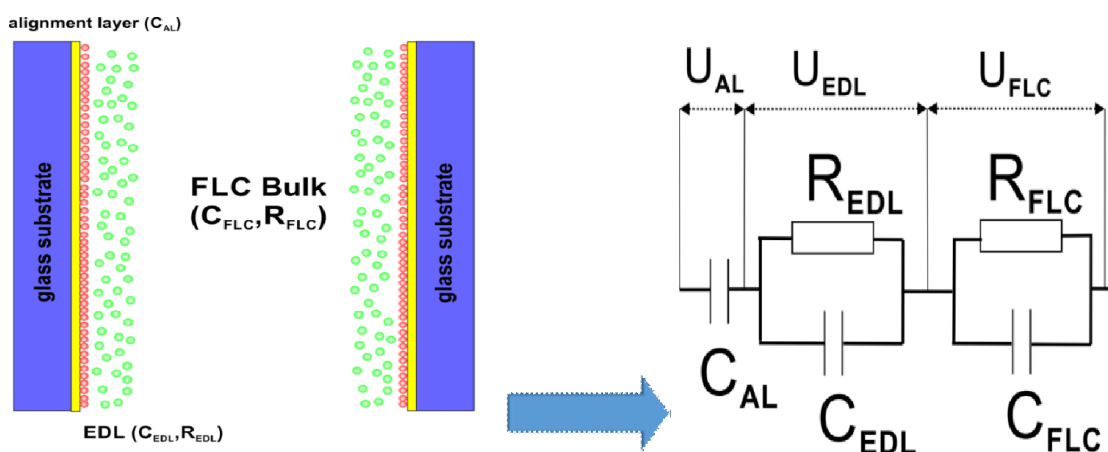
						Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	

Исходя из данной теории, представленной в статье [29], если известны параметры релаксации, то можно оценить концентрацию и подвижность ионов.

3.1 Изготовление СЖК ячейки

3.1.1 Структура СЖК ячейки

Для осуществления измерения импеданса применялась специально изготовленная ячейка, имеющая тривиальную структуру, схематичный вид которой изображен на рисунке 3.1.



$$U_{CELL} = U_{AL} + U_{EDL} + U_{FLC}$$

Рис. 3.1 Эквивалентная электрическая схема ячейки СЖК

В состав измерительной ячейки входят две стеклянные пластины, на каждую из которых напылена тонкая пленка индий оловянного оксида (ITO). В такой ячейке возможно возникновение электрического пробоя, для его предотвращения и контроля емкости на плече делителя напряжения между слоем тонкой пленки и слоем сегнетоэлектрического кристалла, на слой с полупроводником необходимо нанести изолирующий слой. На каждый из проводящих слоев нужно нанести специальный полимерный слой, который будет

выступать в роли ориентирующего слоя. Нанесение данного слоя выполняется в случае необходимости получения ориентированного образа СЖК. При изготовлении ячейки возможна вариация ее толщины, которая зависит от размера частиц исследуемого жидкого кристалла.

Используемая сегнетоэлектрическая жидкокристаллическая (FLC) смесь (CHS1) состоит из трех гомологов, фенилпиримидина и хиральной составной части (Рис. 3.2.).

Эта смесь имеет фазовые переходы, последовательность этих переходов $SmC^*-347\text{ K}-SmA-357\text{ K}-Iso$ и шаг спирали h ($p \approx 510\text{ nm}$, $T = 298\text{ K}$)[20].

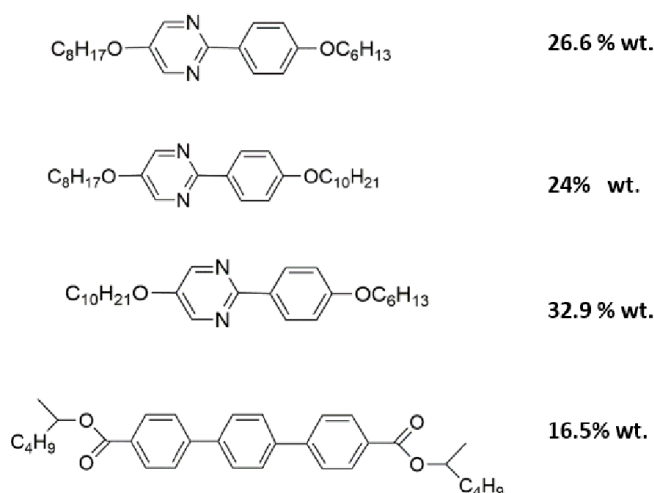


Рис 3.2. Сегнетоэлектрическая жидкокристаллическая смесь

Площадь (S) ячейки и щели (d_{cell}) были равны соответственно 1.6×10^{-5} м² и 4×10^{-6} м.). Эта ячейка обеспечивала плоскостное выравнивание FLC. Пространство, усредненного зазора пустых клеток, оценивали спектроскопическим методом (спектрометр UV-VIS Cary300, спектральное разрешение 1нм, область измерения длины волны: 500нм-800нм.) с использованием свойств многолучевой интерференции в тонких пленках. Поскольку ИТО электроды были покрыты изоляцией, представляющей собой

химически инертные полимерные выравнивающие слои, то можно предположить, такие электроды блокируют (BE), в которых фарадеевские реакции отсутствуют.

3.1.2 Изготовление ориентирующих слоев

Экспериментально доказана важность ориентирующих слоев в сегнетоэлектрической жидкокристаллической ячейке. Известны работы, показывающие, что ориентация молекул сегнетоэлектрического жидкого кристалла возможна не только из-за царапин и канавок на полимерном слое, но и благодаря ориентационному состоянию полимерных цепей [30]. Существует несколько факторов, которые необходимо учесть при изготовлении ориентирующих слоёв необходимо:

- энергия сцепления,
- толщина зазора ячейки,
- толщина полимерного ориентирующего слоя.

Первый фактор влияет на время отклика и рабочее напряжение СЖК, а последние два фактора влияют на пороговое напряжение [31]. Исходя из этого необходим контроль качества полимерных слоёв, которое зависит от типа и качества полимера и чистоты стеклянной подложки, на которую они наносятся. Изготовитель должен осуществлять контроль качества полимера, а также чистоты подложек в процессе их обработки.

3.1.3 Обработка подложек

Первым этапом изготовления СЖК ячеек является подготовка стеклянных подложек, для последующего нанесения на них полимерных слоев. Для этого сначала лист из стекла, на который уже нанесен проводящий слой, необходимо нарезать на небольшие пластины, нужного для ячейки размера. Этот размер в данном случае составляет 12 мм на 15 мм. Следующим этапом изготовления

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

является необходимость очищения подложки от проводящего слоя вдоль края. Для этого стеклянную подложку протравили в смеси раствора соляной кислоты $HCl\ 10\%$ и цинкового порошка, предварительно необходимо защитить центральную область подложки от травления, используя фотолитографическую установку или липкую ленту. Области, очищенные от проводящего слоя, в последующих этапах заполняются полимерными микрошариками, называемые спейсерами.

Далее приведены последующие этапы дальнейшей обработки подложки:

1) В первую очередь осуществляется удаление остаточных частиц цинка, которые остались после травления подложки. Для удаления оставшихся частиц стеклянные подложки с проводящим слоем промываются в ультразвуковой ванне в растворе метанола (CH_3OH).

2) В дальнейшем производится удаление различных органических соединений со стеклянной подложки. Для этого подложка промывается в растворе серной кислоты ($K_2Cr_2O_7$ с серной кислотой) в течение пары десятков секунд.

3) Следующей целью является удаление химического раствора $K_2Cr_2O_7$ с H_2SO_4 с подложки, для этого стеклянную подложку промывают в дистиллированной воде в течение нескольких минут.

4) Последующим этапом является удаление оставшихся загрязнений органических веществ, для этого стеклянная подложка промывается в растворе пероксида водорода (H_2O_2), в течение половины часа.

5) После промывания подложки необходимо удалить раствор пероксида водорода (H_2O_2), поэтому стеклянную подложку поласкают в течение десятка в дистиллированной воде.

6) В дальнейшем необходимо удаление оставшейся на подложке, для этого происходит промывка подложки в растворе этанола (C_2H_5OH).

7) Последним этапом является плазменная очистка подложки в течение получаса. Данный тип обработки осуществляется для очистки от углеродосодержащих соединений с поверхности стеклянной подложки.

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для нанесения ориентирующих полимерных слоев важно убедиться в степени чистоты поверхности стеклянной подложки. Для контроля качества очистки в центре подложки размещается капля ориетанта, если произведена качественная очистка поверхности, капля ориетанта равномерно распределяется по всей площади подложки. Проведение данной процедуры выполняется как один из основных критериев качества очистки поверхности, к тому же следует отметить легкость проведения подобного контроля качества.

3.1.4 Нанесение ориентирующих слоев

В роли ориентирующих слоёв применялись полимеры класса полиимидов. Нанесение ориентирующего слоя на стеклянную подложку осуществляется при помощи метода центрифугирования с помощью спинкоутера, изображенного на рисунке 3.3.



Рис. 3.3. Внешний вид спинкоутера, тахометра и генератора

Эмпирически подбираются условия нанесения полимера, скорость и временной период вращения. Данные величины зависят от множества различных факторов, таких как размер и форма подложки, масса подложки, а также необходимая толщина и равномерность нанесения пленки. Исходя из этого не

						Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	

существует универсальных параметров процесса нанесения полиимидной пленки на стеклянную подложку, каждый случай является индивидуальным. В данном случае угловая скорость вращения центрифуги составила $3000 \text{ об.} \frac{\square}{\text{мин}}$, толщина полиимидного покрытия при данных заданных параметрах составила **30 нанометров**. Контроль толщины полиимидного слоя осуществлялся с помощью атомно-силового микроскопа, работающего в контактном режиме. Отсутствие интерференционных цветов тонких пленок являлось важным критерием равномерности нанесения полимерного слоя.

Одним из главных недостатков данного полимера является его высокое влагопоглощение, в связи с этим необходимо уделить большое внимание технологической сушке получившегося покрытия. Выполнение сушки осуществлялось в два этапа:

1) В первую очередь производится нагрев стеклянной подложки с полиимидной пленкой от комнатной температуры до температуры **120 °C** в течение одного часа.

2) Далее происходит запекание стеклянных подложек в течение трех часов при постоянной температуре **185 ± 5 °C**.

Далее после просушивания подложки необходимо натереть ворсистой тканью с помощью специальной машины. Натирание подложек происходило в 10 циклов, угловая скорость вращения валика равна $95 \text{ об.} \frac{\square}{\text{мин}}$.

К полученным подложкам припаивается электрический провод. Для осуществления надежного контакта провода со стеклянной подложкой в первую очередь на край проводящей области тонким слоем наносится раствор клея БФ-2 с этанолом (C_2H_5OH), а уже затем к нанесенному участку припаивается тонкий электрический провод.

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.1.5 Распределение спейсеров по подложке

Для обеспечения однородного зазора между стеклянными подложками используются спейсеры необходимого диаметра. Размер спейсеров варьируется в зависимости от необходимого расстояния между подложками при сборке жидкокристаллической ячейки. Расстояние между подложками определяет необходимую толщину жидкокристаллического слоя. Спейсеры изготавливаются из материала, который обладает диэлектрическими свойствами и инертен по отношению к сегнетоэлектрическому жидкому кристаллу. Примером такого материала является диоксид кремния, а также различные фоточувствительные полимеры, которые используют для создания спейсеров, имеющих столбчатую форму. В данном случае использовались калибровочные полимерные микрошарики, каждый из которых был растворен в изопропиловом спирте, а затем равномерно нанесен вдоль края подложки при помощи тонкой иглы.

3.1.6 Сборка СЖК ячеек

Одним из важнейших этапов производства жидкокристаллической ячейки является сборка ячейки. Процесс сборки жидкокристаллической ячейки показан на рисунке 3.4. Здесь, предварительно обработанные подложки, с уже нанесенными спейсерами совмещаются сдвинутыми друг относительно друга на небольшом расстоянии, порядка 4 мм.

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

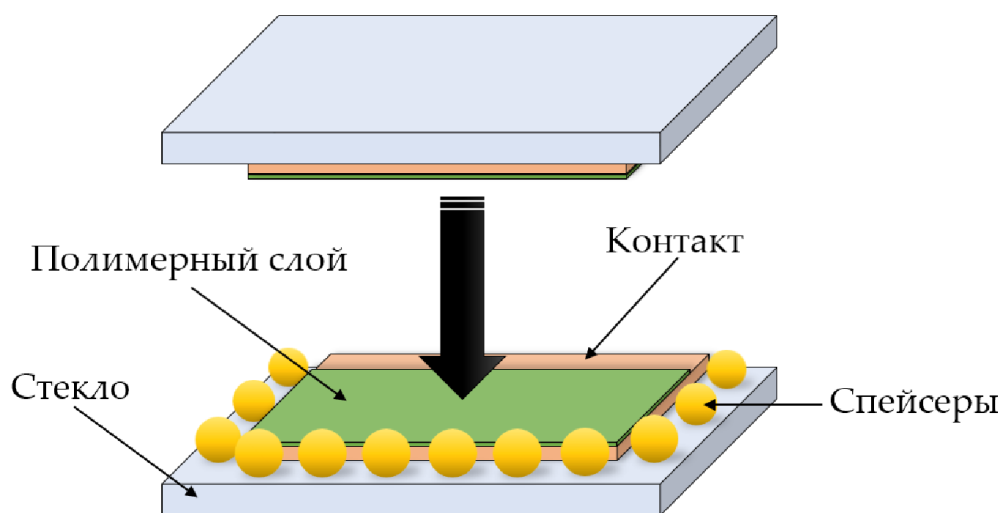


Рисунок 3.4. Схема сборки жидкокристаллической ячейки.

После соединения подложек они фиксируются в специальном устройстве. Такое устройство позволяет контролировать равномерное давления во всей ячейке. В ячейке при фиксации наблюдаются интерференционные полосы, по которым можно контролировать толщину зазора ячейки. Отклонения от заданной толщины можно выровнять, изменяя давление в локальных областях с помощью микрометрических винтов. Толщина ячейки может быть измерена несколькими способами: по электрической емкости и по спектру пропускания пустой жидкокристаллической ячейки.

Следующим этапом ячейка, закрепленная в держателе, нагревается до температуры 120 °, затем постепенно охлаждается до комнатной температуры. После таких операций толщина ячейки становится постоянной и не должна изменяться. Это позволяет предотвратить изменения толщины и появление дефектов текстуры жидкого кристалла.

Ячейка была заполнена смесью сегнетоэлектрического жидкого кристалла при температуре 100-130 °С в вакуумной камере, что предотвращало появление пузырьков воздуха внутри жидкокристаллического слоя. После заполнения ячейки она подвергается склеиванию эпоксидным клеем по краю.

3.2 Расчет электрической проводимости слоя СЖК в ячейке с неблокирующими и блокирующими электродами из мнимой части спектра комплексной проводимости.

Характеристики процесса релаксации Максвелла-Вагнера в ЖК-ячейках могут быть выведены из упрощенной эквивалентной электрической схемы. Эта схема не содержит компонентов, ответственных за вклад от двойных электрических слоев, диффузии ионов, поляризации пространственного заряда, адсорбции / десорбции ионов и процессов релаксации жидкого кристалла.

Для вышеприведенной эквивалентной схемы действительная и мнимая части спектров импеданса ($Z = Z' - iZ''$) могут быть записаны как:

$$Z' = \frac{R_{poly}}{(1 + 4\pi^2 f^2 R_{poly}^2 C_{poly}^2)} + \frac{R_{LC}}{(1 + 4\pi^2 f^2 R_{LC}^2 C_{LC}^2)} \quad (3.1)$$

$$Z'' = \frac{2\pi f R_{poly}^2 C_{poly}}{(1 + 4\pi^2 f^2 R_{poly}^2 C_{poly}^2)} + \frac{2\pi f R_{LC}^2 C_{LC}}{(1 + 4\pi^2 f^2 R_{LC}^2 C_{LC}^2)} \quad (3.2)$$

где f – частота синусоидального напряжения;

$R_{pol} = l_{pol} / [(\sigma')_{pol} S]$ и $R_{LC} = l_{LC} / [(\sigma)_{DC} S]$ – сопротивление полимерного ориентирующего слоя и ЖК слоя;

$C_{pol} = \epsilon_{pol} \epsilon_0 S / l_{pol}$ и $C_{LC} = \epsilon_{LC} \epsilon_0 S / l_{LC}$ – ёмкость полимерного ориентирующего слоя и ЖК слоя;

σ'_{pol} и σ_{DC} – проводимость по постоянному току (DC), ориентирующего и ЖК слоя;

ϵ_{pol} и ϵ_{LC} – диэлектрическая проницаемость ориентирующего и ЖК слоя;

l_{pol} и l_{LC} – толщина ориентирующего и полимерного слоя;

S – активная площадь ячейки.

Диэлектрический спектр ячейки может быть получен из выражения для спектра импеданса и после некоторых преобразований сводится к следующему выражению:

$$\varepsilon_{cell} = \varepsilon'_{cell} - i\varepsilon''_{cell} = \frac{1}{i2\pi f C_0 Z} = \varepsilon'_s + \frac{\varepsilon'_s - \varepsilon'_\infty}{1 + i2\pi f \tau} - i \frac{\sigma_{DC}}{2\pi \varepsilon_0 f} \quad (3.3)$$

где C_0 – ёмкость пустой ячейки;

$$\varepsilon'_\infty = \frac{1}{\left(\frac{C_0}{C_{poly}} + \frac{C_0}{C_{LC}} \right)} - \text{диэлектрическая проницаемость ячейки в}$$

высокочастотном пределе ($f \rightarrow \infty$);

$$\varepsilon'_s = \frac{(R_{poly}^2 C_{poly} + R_{LC}^2 C_{LC})}{C_0 (R_{poly} + R_{LC})^2} - \text{диэлектрическая проницаемость}$$

ячейки в низкочастотном пределе ($f \rightarrow 0$);

$$\sigma_{DC} = \frac{\varepsilon_0}{(C_0 (R_{poly} + R_{LC}))} - \text{DC проводимость ячейки;}$$

$$\tau = R_{LC} R_{poly} \frac{(C_{poly} + C_{LC})}{(R_{poly} + R_{LC})} - \text{время релаксации.}$$

Эта формула описывает два фундаментальных процесса в жидкокристаллической ячейке: а) релаксацию спада поляризации Максвелла-Вагнера и б) DC проводимость всей ячейки. Важным следствием выражения (3.3) является то, что невозможно получить правильное значение проводимости по постоянному току жидкого кристалла, заключенного в ячейку, в соответствии с традиционной процедурой нелинейного комплексного метода наименьших квадратов диэлектрического спектра в низкочастотном диапазоне. Вместо этого можно получить интегральную проводимость по постоянному току гетерогенной среды, состоящей из ориентирующих полимерных слоев и жидкого кристалла.

Другим способом получения DC проводимости ЖК является использование формализма спектроскопии комплексной проводимости

$$\sigma = \sigma' + i\sigma'' = i2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon$$

(). Используя формулу (3.3), действительную и мнимую часть проводимости можно записать в виде:

$$\sigma' = \sigma'_{DC} + \frac{4\pi^2 f^2 \varepsilon_0 (\varepsilon'_s - \varepsilon'_{\infty}) \tau}{(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)} \quad (3.4)$$

$$\sigma'' = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''_s + \frac{2\pi f \varepsilon_0 (\varepsilon'_s - \varepsilon'_\infty)}{(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)} \quad (3.5)$$

Действительная часть спектра проводимости следует из степенного закона Джонсэра:

$$\sigma'(f) = \sigma_{DC} + \sum_i A_i f^n \quad (3.6)$$

Правая часть описывает частотно-зависимую проводимость тока смещения, возникающую из-за межфазной поляризации.

Проводимость постоянного тока ячейки с неблокирующими электродами может быть найдена как низкочастотный предел σ_{DC} :

$$\lim_{f \rightarrow 0} \sigma_{DC} \rightarrow \varepsilon_0 / (C_0 (R_{pol} + R_{LC})) \quad (3.7)$$

Это выражение совпадает с тем, что следует из диэлектрических спектров и дает интегральное значение σ_{DC} всей ячейки.

Между тем, σ'' стремится к нулю при:

$$\lim_{f \rightarrow 0} \sigma'' \rightarrow 0 \quad (3.8)$$

В случае ЖК-ячейки с электродами, покрытыми блокирующими полимерными слоями ($R_{pol} \rightarrow \infty$), σ_{DC} приближается к нулю, что следует из уравнения (3.7).

$$\lim_{R_{pol} \rightarrow \infty} \sigma_{DC} \rightarrow 0 \quad (3.9)$$

Блокирующие слои также влияют на время релаксации:

$$\lim_{R_{pol} \rightarrow \infty} \tau \rightarrow R_{LC} (C_{pol} + C_{LC}) \quad (3.10)$$

						Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	

Тем не менее, в обоих случаях невозможно получить правильное значение проводимости постоянного тока жидкого кристалла.

3.3 Измерение диэлектрических спектров

Диэлектрические свойства образца были исследованы с помощью импедансного спектрометра (Alfa System, Novocontrol) в частотном диапазоне $f = 1 \text{ мГц} - 200 \text{ кГц}$. Верхняя частота измерений (0,25 мГц) была ограничена «режимом ИТО», возникающим из-за Максвелл-Вагнеровской релаксации пустой ячейки. Измерения проводились при четырех разных температурах ($T = 300 \text{ К}$, 308 К , 318 К и 328 К) в пределах хирального С смектика. Амплитуда осциллирующего напряжения ($[V]_{pr} = 0,1 \text{ В}$) близка к тепловому напряжению

k_B

($k_B T / e \approx 2.7 \times 10^{-2} \text{ В}$, где $T=300 \text{ К}$, e – элементарный заряд, k_B – постоянная Больцмана). Поэтому можно предположить, что внешнее электрическое поле достаточно мало, чтобы существенно нарушить распределение пространственного заряда внутри ячеек или переключить молекулы СЖК из-за связи с вектором спонтанной поляризации. В результате можно считать, что исследованные жидкокристаллические ячейки имеют линейный диэлектрический отклик и нелинейные эффекты могут быть исключены из дальнейшего анализа. Мы также можем предположить, что приложенное напряжение полностью падает на жидкокристаллическом слое и на других компонентах ячейки.

						Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	

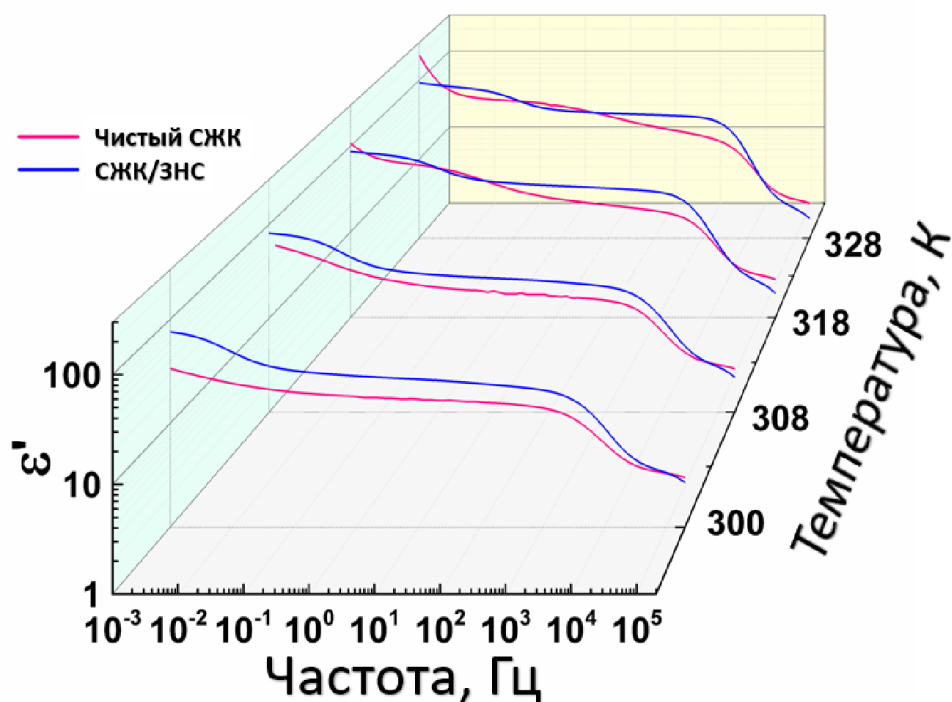
Действительные (ϵ') и мнимые (ϵ'') части комплексной диэлектрической проницаемости были получены из спектров импеданса, используя соотношения:

$$\epsilon' = (Z'' d_{\text{cell}}) / (2\pi f \epsilon_0 S (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)) \quad (3.11)$$

$$\epsilon'' = (Z' d_{\text{cell}}) / (2\pi f \epsilon_0 S (\epsilon'^2 + \epsilon''^2)) \quad (3.12)$$

где ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума ($\epsilon_0 = 0.885 \times 10^{-11}$ Ф/М).

Экспериментально измеренные действительные и мнимые части диэлектрических спектров образцов при разных температурах показаны на рисунке 3.5. Также на рисунке 3.6 представлены действительные и мнимые части спектров проводимости образцов при различных температурах.



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

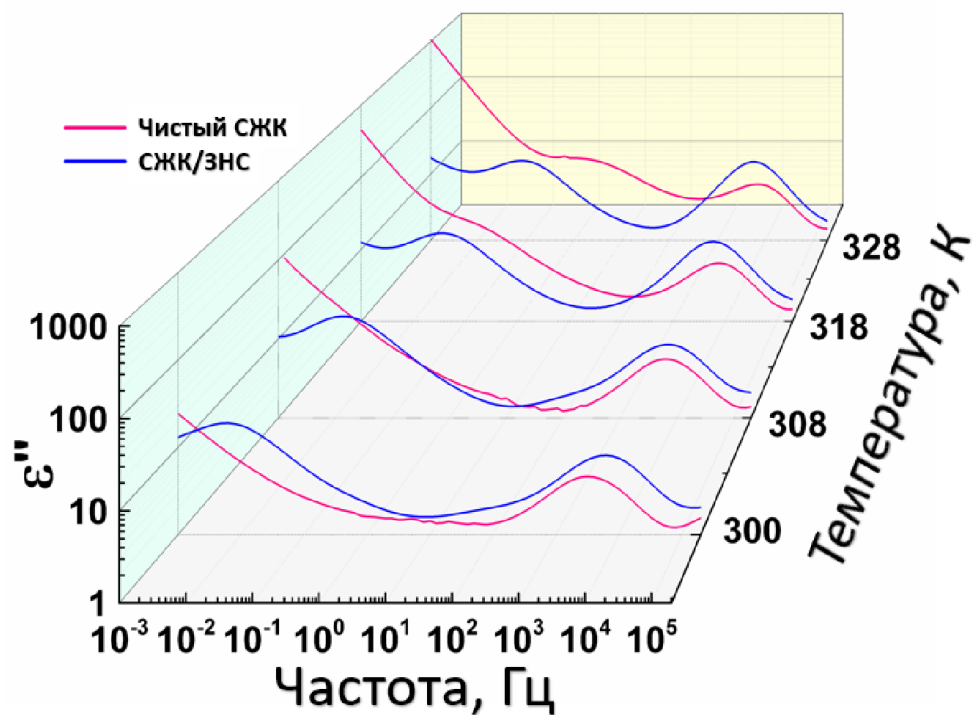
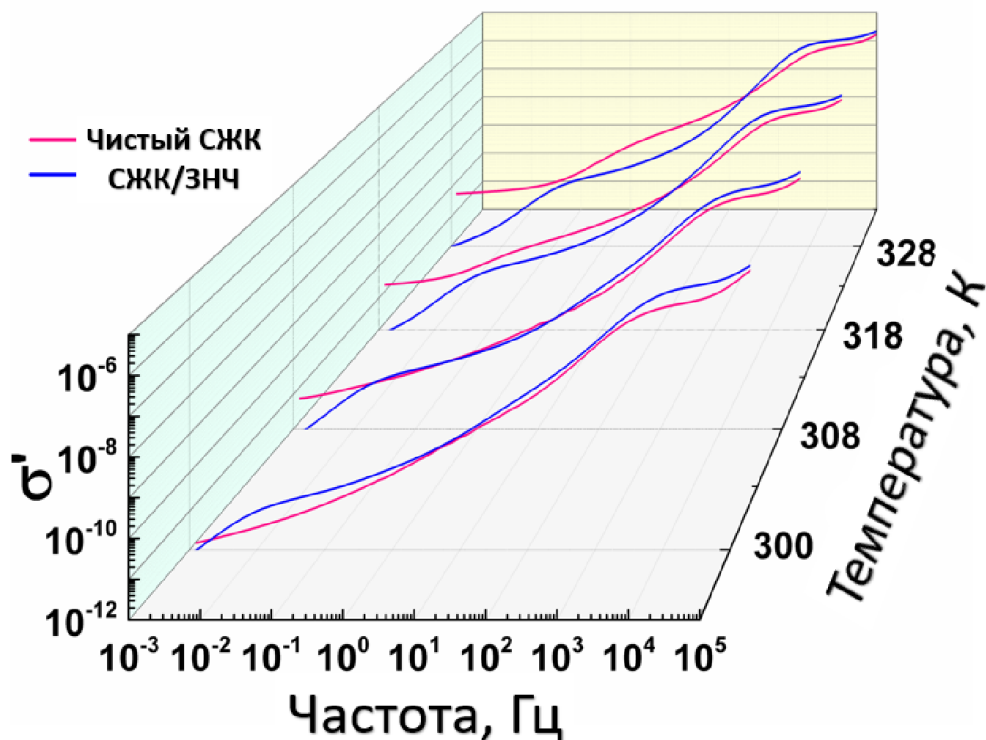


Рисунок 3.5. Зависимость действительных и мнимых частей диэлектрической проницаемости от частоты чистого СЖК и СЖК с наночастицами золота.



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

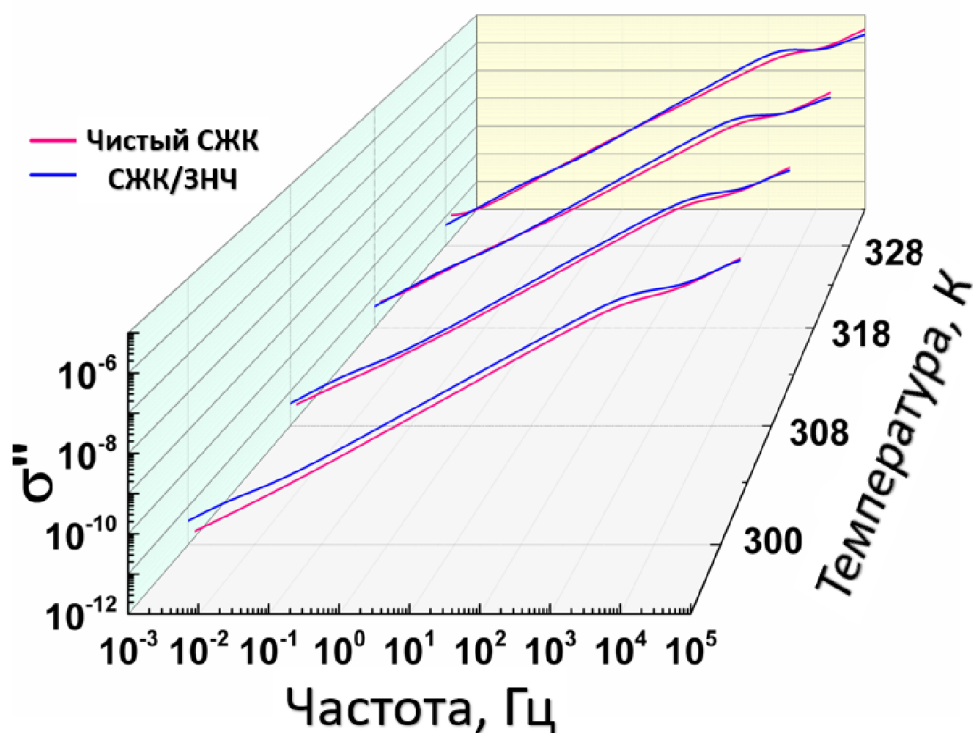


Рисунок 3.6. Зависимость действительных и мнимых частей проводимости от частоты чистого СЖК и СЖК с наночастицами золота.

Проанализировав полученные графики, можно сделать вывод о протекающих в образцах процессах. Наблюдаемые в образцах процессы и характерные частоты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Процессы, наблюдаемые при измерении диэлектрического спектра образцов, и их характерные частоты.

Наблюдаемый процесс	СЖК	СЖК/ЗНЧ
<u>Проводимость по постоянному току</u> Электромиграция ионов	< 10 Гц	Не наблюдается
<u>Режим Шварца</u> <u>Релаксация поляризации противоположно</u>	Отсутствует	10 ÷ 500 мГц

заряженных ионных облаков в электрическом двойном слое вблизи наночастиц		
<u>Режим поляризации электродов</u> Релаксация поляризации электрических двойных слоев вблизи границы ориентирующий слой/СЖК	< 1 Гц	Не наблюдается ()
<u>Релаксация Максвелла-Вагнера</u> Релаксация межфазных зарядов из-за гетерогенной слоистой структуры СЖК	10 ÷ 100	
<u>Голдстоуновская мода</u> Фазовая флуктуация геликоидной структуры СЖК		> 1 кГц

Комплексную диэлектрическую проницаемость данной системы можно расписать следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon'(\infty) + \sum_j \frac{\Delta\varepsilon_j}{(1 + [(\omega\tau_j)]^2)^{1/2} (1 + \beta_j)} + (\sigma_{dc}) / (i\varepsilon_0 \omega) \quad (3.13)$$

Из уравнения (3.3) можно представить отдельно действительную и мнимую часть диэлектрической проницаемости в виде:

$$\varepsilon' = \varepsilon'(\infty) + \sum_j \frac{\Delta\varepsilon_j \left[1 + (2\pi f\tau_j)^{\beta_j} \sin\left(\frac{\pi}{2(1-\beta_j)}\right) \right]}{1 + (2\pi f\tau_j)^{2\beta_j} + 2(2\pi f\tau_j)^{\beta_j} \sin\left(\frac{\pi}{2(1-\beta_j)}\right)} \quad (3.14)$$

$$\varepsilon'' = -\frac{\sigma_{dc}}{2\pi\varepsilon_0 f} + \sum_j \frac{\Delta\varepsilon_j (2\pi f\tau_j)^{\beta_j} \cos\left(\frac{\pi}{2(1-\beta_j)}\right)}{1 + (2\pi f\tau_j)^{2\beta_j} + 2(2\pi f\tau_j)^{\beta_j} \sin\left(\frac{\pi}{2(1-\beta_j)}\right)} \quad (3.15)$$

Аппроксимируя экспериментальные данные функциями (3.15) и (3.16), получены параметры для диэлектрических релаксационных мод для чистого СЖК и СЖК/ЗНС.

Таблица 2. Параметры диэлектрических релаксационных мод СЖК/ЗНС.

T, K	300	308	318	328
$\Delta\varepsilon^{(1)}$	3.15	3.02	2.41	2.27
$\tau^{(1)}$, с	4.19×10^{-7}	4.62×10^{-7}	4.60×10^{-7}	4.06×10^{-7}
$\beta^{(1)}$	0.97	0.91	0.85	0.83
$\Delta\varepsilon^{(2)}$	16.98	18.15	26.83	32.36
$\tau^{(2)}$ с	2.62×10^{-5}	2.27×10^{-5}	2.75×10^{-5}	2.88×10^{-5}
$\beta^{(2)}$	0.93	0.92	0.94	0.95
$\Delta\varepsilon^{(3)}$	7.48	5.44	6.44	5.2
$\tau^{(3)}$, с	1.40×10^{-3}	7.74×10^{-3}	3.35×10^{-3}	8.82×10^{-3}
$\beta^{(3)}$	0.51	0.59	0.42	0.47
$\Delta\varepsilon^{(4)}$	3.56	5.16		

$\tau^{(4)}$, с	3.19×10^{-1}	3.84×10^{-1}	Не наблюдается	
$\beta^{(4)}$	0.68	0.54		
$\Delta\varepsilon^{(5)}$	54.55	50.5	49.29	45.07
$\tau^{(5)}$, с	29.0	12	4.97	2.21
$\beta^{(5)}$	0.77	0.81	0.75	0.08

Таблица 3. Параметры диэлектрических релаксационных мод чистого СЖК.

T, K	300	308	318	328
$\Delta\varepsilon^{(1)}$	3.12	2.99	2.86	2.61
$\tau^{(1)}$, с	2.51×10^{-7}	2.45×10^{-7}	2.40×10^{-7}	2.33×10^{-7}
$\beta^{(1)}$	1	1	1	1
$\Delta\varepsilon^{(2)}$	10.21	12.06	12.94	15.82
$\tau^{(2)}$, с	3.02×10^{-5}	2.57×10^{-5}	2.10×10^{-5}	2.63×10^{-5}
$\beta^{(2)}$	0.91	0.91	0.94	0.87
$\Delta\varepsilon^{(3)}$	5.8	5.38	5.13	74.32
$\tau^{(3)}$, с	9.07×10^{-3}	1.16×10^{-2}	7.48×10^{-4}	1.43×10^{-1}
$\beta^{(3)}$	0.44	0.39	0.54	0.51
$\Delta\varepsilon^{(4)}$				

$\tau^{(4)}, \text{с}$	Не наблюдается			
$\beta^{(4)}$				
$\Delta\varepsilon^{(5)}$	440.6	452.8	97.86	91.37
$\tau^{(5)}, \text{с}$	1×10^5	4.07×10^3	4.08	37.3
$\beta^{(5)}$	0.42	0.48	0.55	0.91
$\sigma, \text{См/м}$	9.42×10^{-13}	4.38×10^{-12}	2.63×10^{-11}	6.00×10^{-11}

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1) В данной работе детально исследованы электрические свойства жидкокристаллических ячеек, заполненных сегнетоэлектрическим жидким кристаллом.
- 2) В результате выполнения работы предложен метод измерения проводимости слоя ЖК в ячейки с блокирующими электродами, используя емкостный отклик всей ячейки.
- 3) Используя предложенный метод, измерена температурная зависимость проводимости по постоянному току для СЖК.

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

- 1) Podgornov, F. V., Gavriyak, M., Karaawi, A., Ishmurzina, A., Kolmakova, N. S., & Haase, W. Mesophase Materials as Smart Media for Emerging Pressure Sensors: Capacitive Method of Measurement of DC Conductivity //2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). – IEEE, 2018. – С. 1-5.

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беляев Б. А. и др. Диэлектрическая анизотропия жидкого кристалла 5ЦБ в дециметровом диапазоне длин волн //Физика твердого тела. – 2000. – Т. 42. – №. 3. – С. 564-566.
2. Ларионов А. Н. и др. Диэлектрическая релаксация и вязкоупругие свойства нематических жидких кристаллов //Конденсированные среды и межфазные границы. – 2015. – Т. 17. – №. 3. – С. 364-370.
3. Kahn F. J. Orientation of liquid crystals by surface coupling agents //Applied Physics Letters. – 1973. – Т. 22. – №. 8. – С. 386-388.
4. Schiekel M. F., Fahrenschon K. Deformation of nematic liquid crystals with vertical orientation in electrical fields //Applied Physics Letters. – 1971. – Т. 19. – №. 10. – С. 391-393.
5. Leslie F. M. Distortion of twisted orientation patterns in liquid crystals by magnetic fields //Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 1970. – Т. 12. – №. 1. – С. 57-72.
6. Fan C., Stephen M. J. Isotropic-nematic phase transition in liquid crystals //Physical Review Letters. – 1970. – Т. 25. – №. 8. – С. 500.
7. Chen H. W. et al. Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives //Light: Science & Applications. – 2018. – Т. 7. – №. 3. – С. 17168.
8. Томилин М. Г., Невская Г. Е. Дисплеи на жидких кристаллах //СПб.: СПбГУ ИТМО. – 2010.
9. Lai Y. T. et al. A tactile sensing array with tunable sensing ranges using liquid crystal and carbon nanotubes composites //Sensors and Actuators A: Physical. – 2012. – Т. 177. – С. 48-53.
10. Moreno I. et al. Complete polarization control of light from a liquid crystal spatial light modulator //Optics Express. – 2012. – Т. 20. – №. 1. – С. 364-376.

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

11. Андреев А. Л., Компанец И. Н. Применения сегнетоэлектрических жидких кристаллов-реальные и возможные //Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2015. – Т. 15. – №. 3. – С. 28-40.
12. Chigrinov V. G., Srivastava A. Ferroelectric liquid crystal cells for advanced applications in displays and photonics //Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2014. – Т. 595. – №. 1. – С. 39-49.
13. Garbovskiy Y. Time-dependent electrical properties of liquid crystal cells: unravelling the origin of ion generation //Liquid Crystals. – 2018. – Т. 45. – №. 10. – С. 1540-1548.
14. Geary J. M. et al. The mechanism of polymer alignment of liquid-crystal materials //Journal of applied physics. – 1987. – Т. 62. – №. 10. – С. 4100-4108.
15. Murakami S., Naito H. Electrode and interface polarizations in nematic liquid crystal cells //Japanese journal of applied physics. – 1997. – Т. 36. – №. 4R. – С. 2222.
16. Podgornov F. V. et al. Mechanism of electrooptic switching time enhancement in ferroelectric liquid crystal/gold nanoparticles dispersion //Liquid Crystals. – 2018. – Т. 45. – №. 11. – С. 1594-1602.
17. Yang D. K. Fundamentals of liquid crystal devices. – John Wiley & Sons, 2014.
18. Stannarius R. Structures and properties of liquid crystals , by Lev M. Blinov //Liquid Crystals Today. 2012. Т. 21, № 4. 79-80 с
19. Meyer R.B. и др. Ferroelectric liquid crystals, // J. Phys. Lettres. 1975. Т. 36, № Ferroelectric liquid crystals. С. 69–71.

					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

20. Чилая Г. С., Чигринов В. Г. Оптика и электрооптика хиральных смектических С жидких кристаллов //Успехи физических наук. – 1993. – Т. 163. – №. 10. – С. 1-28.

21. Кудрейко А. А., Мигранов Н. Г. Формирование макроструктур в сегнетоэлектрических жидких кристаллах под воздействием электрических и магнитных полей //Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. – 2019. – Т. 19. – №. 1.

22. Barbero G., Durand G. Selective ions adsorption and nonlocal anchoring energy in nematic liquid crystals //Journal of applied physics. – 1990. – Т. 67. – №. 5. – С. 2678-2680.

23. Schwan H. P. Electrode polarization impedance and measurements in biological materials //Annals of the New York Academy of Sciences. – 1968. – Т. 148. – №. 1. – С. 191-209.

24. Adohi B. J. P. et al. Application of the Maxwell–Wagner–Hanai effective medium theory to the analysis of the interfacial polarization relaxations in conducting composite films //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – Т. 42. – №. 1. – С. 153-162.

25. Böhmer R., Kremer F. Dielectric Spectroscopy and Multidimensional NMR—a Comparison //Broadband Dielectric Spectroscopy. – Springer Berlin Heidelberg, 2003. – С. 625-684.

26. Schwan H. P. Electrode polarization impedance and measurements in biological materials //Annals of the New York Academy of Sciences. – 1968. – Т. 148. – №. 1. – С. 191-209.

27. Serghei A. et al. Electrode polarization and charge transport at solid interfaces //Physical Review B. – 2009. – Т. 80. – №. 18. – С. 184301.

28. Huang V. M. W. et al. The apparent constant-phase-element behavior of an ideally polarized blocking electrode a global and local impedance analysis //Journal of the Electrochemical Society. – 2007. – Т. 154. – №. 2. – С. C81-C88.

						Лист
					ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

29. Klein R. J. et al. Modeling electrode polarization in dielectric spectroscopy: Ion mobility and mobile ion concentration of single-ion polymer electrolytes //The Journal of chemical physics. – 2006. – Т. 124. – №. 14. – С. 144-903.

30. Geary J. M. et al. The mechanism of polymer alignment of liquid - crystal materials //Journal of applied physics. – 1987. – Т. 62. – №. 10. – С. 4100-4108.

31. Jiao M. et al. Alignment layer effects on thin liquid crystal cells //Applied Physics Letters. – 2008. – Т. 92. – №. 6. – С. 061102.

						Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ - 11.04.04.2019.263 ПЗ ВКР	