

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
(Н И У « Б е л Г У »)

ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

КАФЕДРА ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СЕНСОРА
ПАРОВ ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ**

Выпускная квалификационная работа

студентки *очной* формы обучения
направления подготовки 03.04.02 Физика магистерская программа
Медицинская физика

группы 07001638
Валетовой Елены Александровны

Научный руководитель
доцент, к. ф. – м. н. Кучеев С. И.

Рецензент(-ы)
профессор, д. ф. – м. н. Внуков И. Е.
эксперт – физик по контролю за
источниками ионизирующих и
неионизирующих излучений
отдела технического и радиационного
контроля ОГБУЗ «Белгородский
онкологический диспансер»
Нерябова В. С.

БЕЛГОРОД 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	6
1.1 Органические растворители.....	6
1.2 Классификация и физические принципы работы сенсоров газа.....	10
1.3 Жидкие кристаллы.....	15
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	17
2.1 Конструкция жидкокристаллического сенсора паров органических растворителей.....	17
2.2 Эксперимент.....	20
2.2.1 Реакция ЖК на сухой воздушный поток.....	21
2.2.2 Реакция ЖК на влажный воздушный поток.....	23
2.2.3 Реакция ЖК на пары диметилформаида.....	24
2.2.4 Реакция ЖК на пары изопропилового спирта.....	26
2.2.5 Реакция ЖК на пары толуола.....	31
2.2.6 Реакция ЖК на пары ацетона.....	34
2.2.7 Эксперимент по дифракции.....	37
2.2.8 Концентрация «срабатывания» прототипа жидкокристаллического сенсора.....	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	43
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	44

ВВЕДЕНИЕ

Органические растворители широко используются как в промышленности, так и в быту. Вред растворителей заключается в их воздействии на кожу, слизистые оболочки, на внутренние органы при всасывании в кровь. Большинство органических растворителей хорошо растворяют липиды — жиры, из которых состоит оболочка живой клетки. Сильнее всего реагируют нервная система, лёгкие, печень и почки.

Опасность летучих органических соединений состоит ещё и в том, что они легко воспламеняются и при горении выделяют ядовитые газы, а при накоплении определённой концентрации паров в воздухе они могут стать взрывоопасными. Почти все они обладают наркотическим действием [1].

Толуол — яд общетоксического действия, вызывающий острые и хронические отравления. Длительный контакт с малыми дозами толуола может оказывать влияние на кровь. Представляет опасность проникновение толуола через неповрежденную кожу в организм, поскольку он вызывает эндокринные нарушения и снижает работоспособность. В силу высокой растворимости в липидах и жирах толуол накапливается преимущественно в клетках центральной нервной системы [2].

Ацетон в виде растворителя повсеместно используется в быту для самых разнообразных целей. Но, несмотря на его пользу, ацетон также является весьма опасным для здоровья веществом. Его попадание на кожный покров, в ЖКТ, на слизистую глаза или в легкие (пары ацетона) способно вызвать множество осложнений. В некоторых случаях возможен даже летальный исход, особенно у людей с предрасположенностью к аллергическим реакциям. Опасность отравления парами ацетона в том, что при таком виде отравления очень быстро поражается центральная нервная система. Учитывая то, что ЦНС является регулирующим органом, это может привести к серьезным последствиям и даже летальному исходу. Самый серьезный ущерб будет нанесен сердечнососудистой и легочной системе.

Также очень сильно пострадает головной мозг, что в отдельных случаях может привести к коме [3].

Изопропил – бесцветный спиртовой раствор с резким неприятным запахом. Изопропиловый спирт хорошо растворяется в воде, способен к испарению в условиях закрытого помещения, и при утечке способен накапливаться. При превышении допустимых норм – до 10 мг на 1 м³ может стать крайне опасным. При ингаляционном попадании в организм раздражающему действию наиболее подвержены глаза и органы дыхания. Это нередко провоцирует головную боль и угнетение работы головного мозга [4].

Диметилформамид оказывает на организм местно-раздражающее и общетоксическое действие. Поражает центральную нервную систему и кровь (уменьшение содержания гемоглобина, лейкопения, лимфопения), снижает тонус сосудов [5].

Создание приборов газового анализа – сложная задача. К современным сенсорам предъявляются следующие основные требования:

- высокие качественные характеристики: чувствительность, точность, линейность, воспроизводимость показаний, скорость отклика, взаимозаменяемость, отсутствие гистерезиса и большое отношение сигнал-шум;
- высокая надежность: длительный срок службы, устойчивость к внешней среде, безотказность в работе;
- технологичность: малые габариты и масса, простота конструкции, интегральное исполнение, низкая себестоимость [6].

Задачу газового анализа решают различными способами. По принципу действия газоанализаторы могут быть химическими, электрохимическими, фотоионизационными, хроматографическими, магнитными, оптическими и т. д. Такое многообразие объясняется несколькими причинами. С одной стороны, ни один из методов не является универсальным для всех газов. То есть, для каждого конкретного газа можно использовать только вполне

определенные методы анализа. С другой стороны, каждый из методов имеет как достоинства, так и недостатки. Так, например, металлооксидные газовые датчики хотя и имеют низкую стоимость, но отличаются малой точностью. Традиционные электрохимические и фотометрические датчики наоборот – достаточно точны, но оказываются слишком дорогими [7].

На рынке присутствует малое число газоанализаторов способных регистрировать данные вещества, например, АНТ-3М - Течеискатель - газоанализатор. Стоимость базового комплекта составляет порядка 80000 рублей, а полный комплект со всеми дополнительными блоками порядка 480000 рублей [8].

В таких средах как жидкий кристалл ориентация молекул очень чувствительна к инородным примесям. Целью работы было исследовать влияние паров органических растворителей на ориентацию жидкого кристалла и возможность использования этой реакции ЖК в сенсорах.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) Исследовать влияние сухого и влажного потока воздуха, паров органических растворителей на ориентацию нематического жидкого кристалла 5СВ.
- 2) Выявить механизмы влияния паров органических растворителей на ориентацию молекул жидкого кристалла
- 3) Исследовать возможность многократного использования жидкого кристалла для регистрации паров органических растворителей.
- 4) Выполнить оценку пороговой чувствительности ориентированного нематика 5СВ на пары диметилформамида.

Жидкокристаллический датчик паров органических растворителей может быть использован для мониторинга качества воздуха в помещениях, где используются данные растворители, а также при их производстве. Возможно использование жидкокристаллических датчиков в мультигазовых газосигнализаторах.

ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Газы органических растворителей

В данной работе были рассмотрены четыре наиболее распространенные органические растворители: диметилформамид, изопропиловый спирт, толуол, ацетон.

Диметилформамид является устойчивым химическим веществом, относящимся к группе органических растворителей. Используется в широком спектре производств и разнообразных промышленных проектах и решениях.

Области применения диметилформамида:

- применяется в качестве растворителя в химических процессах синтеза активных фармацевтических ингредиентов и ингредиентов для веществ, используемых для защиты растений;
- используется в медицинской промышленности для производства приборов для диагностических мероприятий *ин-витро*;
- используется в качестве лабораторного химикалия группы растворителей [9].

Диметилформамид оказывает на организм местно-раздражающее и общетоксическое действие. Поражает центральную нервную систему и кровь (уменьшение содержания гемоглобина, лейкопения, лимфопения), снижает тонус сосудов. Присутствие диметилформамида в воздухе в концентрации 3500 ppm вызывает развитие немедленных токсических реакций, опасных для жизни [10].

Метод индикации: фотометрический метод основан на его реакции с гипохлоритом натрия и йодидом калия в присутствии крахмала, позволяет определять 0,001 мг [11].

Структурная формула диметилформаида изображена на рисунке 1.1

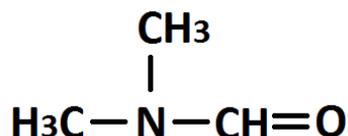


Рис. 1.1 Структурная формула диметилформаида

Изопропиловый спирт – вещество, обладающее свойством растворяться в различных жидкостях (в том числе в воде, эфире и хлороформе), при этом является отличным растворителем. Изопропанол способен растворить эфирные масла, алкалоиды, синтетические смолы. Кроме того, вещество не уступает по антисептическим свойствам этиловому спирту, характеризуясь отличными обеззараживающими свойствами.

Изопропанол активно используется в фармакологии и медицине. На его основе изготавливаются разнообразные эссенции, растворительные смолы, экстрагенты и косметические средства. Во многих препаратах он выступает в качестве растворителя или консервирующего агента.

При ингаляционном попадании в организм раздражающему действию наиболее подвержены глаза и органы дыхания. Это нередко провоцирует головную боль и угнетение работы головного мозга [12]. Мгновенно-опасная для жизни или здоровья концентрация 4907,9 мг/м³.

Метод индикации: фотометрический, реакция с персульфатом калия с образованием ацетона с последующим определением с салициловым альдегидом в щелочной среде, измеряемые концентрации 0,22-2,2 мг/м³ [13].

Структурная формула изопропилового спирта изображена на рисунке 1.2.

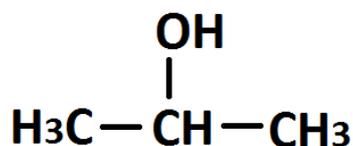


Рис. 1.2 Структурная формула изопропилового спирта

Толуол применяется в медицине и медицинской промышленности как растворитель, а также при изготовлении некоторых лекарственных средств.

Пары толуола токсичны. Они несут опасность для человека (поражают нервную систему и кроветворные органы) в том случае, если длительно вдыхать вещества, содержащие толуол или если работать с такими веществами без надлежащей защиты.

Пары толуола легко образуют взрывоопасные смеси, воспламеняющиеся даже от искры статического электричества [14]. Мгновенно-опасная для жизни или здоровья концентрация 1881 мг/м^3 .

Метод индикации: газохроматографический метод на приборе с пламенно-ионизационным детектором; нижний предел обнаружения $0,0001 \text{ мкг}$, точность измерения $\pm 25\%$, измеряемые концентрации $0,02 - 15 \text{ мг/ м}^3$. Газохроматографический метод, основан на равновесном концентрировании примеси из воздуха в уксусной кислоте, нейтрализации концентрата щелочью в замкнутом объеме и газохроматографическом анализе равновесной паровой фазы над водно-солевым раствором; нижний предел обнаружения $0,005 \text{ г/м}^3$, точность измерения $\pm 25\%$, измеряемые концентрации $0,005 - 5 \text{ мг/ м}^3$ [15].

Структурная формула толуола изображена на рисунке 1.3



Рис. 1.3 Структурная формула толуола

Ацетон применяется как сырьё для синтеза многих важных химических продуктов, также является популярным растворителем:

- в производстве лаков;
- в производстве взрывчатых веществ;
- в производстве лекарственных препаратов;

- в составе клея для киноплёнок компонент для очистки поверхностей в различных производственных процессах.

Отравление организма может наступить в случае попадания данного вещества внутрь при вдыхании его концентрированных паров. При попадании ацетона внутрь организма могут наблюдаться такие симптомы как боли в животе, цианоз кожи, рвота, тошнота. В случае попадания большого количества в организм может наступить потеря сознания, и смерть наступает приблизительно через 7 – 12 часов после приёма этого вещества [16]. Мгновенно-опасная для жизни и здоровья концентрация 5930 мг/м³.

Метод индикации: хроматографический метод, основан на адсорбции ацетона на силикагеле с последующей десорбцией и газохроматографическим определением на приборе с пламенно-ионизационным детектором; нижний предел обнаружения 0,16 мг/м³, точность определения $\pm 25\%$, измеряемые концентрации 0,16 – 3,5 мг/м³. Фотометрический метод, основан на взаимодействии ацетона с салициловым альдегидом в щелочной среде в щелочной среде после десорбции сконцентрированного на силикагеле ацетона водой, содержание ацетона определяется по изменению оптической плотности окрашенных растворов; нижний предел обнаружения 1 мкг в анализируемом объеме пробы, точность измерения $\pm 15\%$, измеряемые концентрации 0,13 – 2 мг/м³ [17].

Структурная формула ацетона изображена на рисунке 1.4

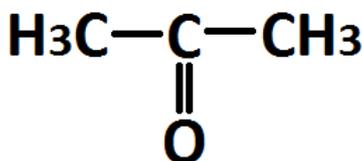


Рис. 1.4 Структурная формула ацетона

Использование вышеперечисленных веществ из-за токсичности (при высокой концентрации в воздухе или вдыхании паров) допустимо только в помещениях, оборудованных качественной вентиляцией.

1.2 Классификация и принцип работы сенсоров газа органических растворителей

Основной функцией газового сенсора преобразование концентрации измеряемого вещества в непрерывное напряжение или какой-либо иной сигнал, позволяющий произвести регистрацию и визуальное отобразить этот сигнал. К настоящему времени разработано огромное количество самых разнообразных газовых сенсоров.

- По виду входных величин:
 - активные газовые сенсоры;
 - пассивные газовые сенсоры.
- По числу воспринимаемых и принимаемых величин:
 - одномерные газовые сенсоры;
 - n-мерные (многомерные) газовые сенсоры.
- По числу выполняемых (измерительных) функций:
 - однофункциональные газовые сенсоры;
 - многофункциональные газовые сенсоры (интеллектуальные газовые сенсоры).
- По числу преобразований энергии и вещества:
 - одноступенчатые газовые сенсоры;
 - многоступенчатые газовые сенсоры.
- По технологии изготовления:
 - элементные газовые сенсоры;
 - интегральные газовые сенсоры.
- По взаимодействию с источниками информации:
 - контактные газовые сенсоры;
 - бесконтактные газовые сенсоры.
- По виду измерительных каналов:
 - аналоговые газовые сенсоры;

- цифровые газовые сенсоры.
 - По принципу действия:
 - химические;
 - электрохимические;
 - фотоионизационные;
 - фотометрические;
 - хроматографические;
 - магнитные;
 - оптические (инфракрасные);
 - металлооксидные и т.д.

Основные типы газочувствительных сенсоров для приборов газового анализа представлены на рисунке 1.5:

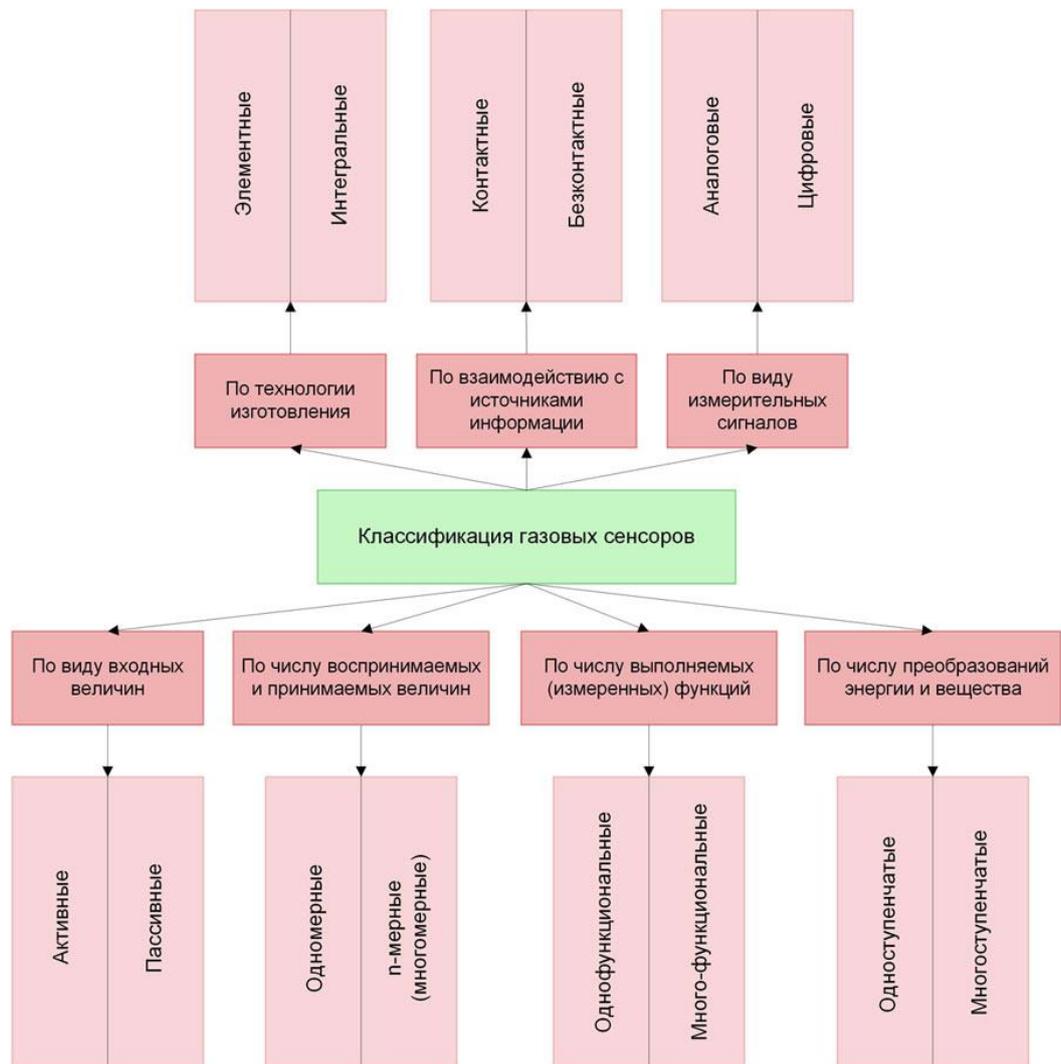


Рис. 1.5 Основные типы газочувствительных сенсоров

Схематически принципы действия газовых сенсоров представлены на рисунке 1.6:

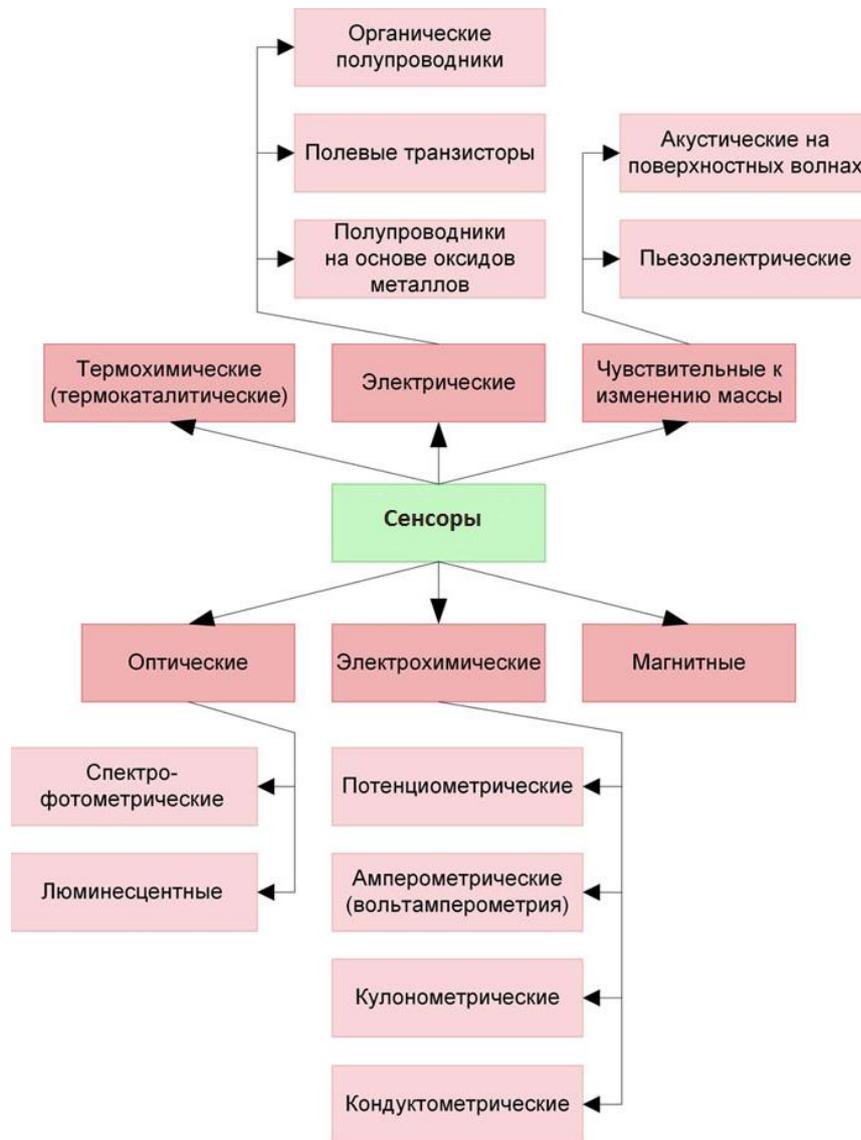


Рис. 1.6 Принципы действия газовых сенсоров

Наиболее распространенными и используемыми в промышленности являются термохимические, электрохимические и полупроводниковые сенсоры.

Принцип действия термохимического (термокаталитического) сенсора основан на прямой зависимости тепла, получаемого при сгорании детектируемого газа, от величины концентрации этого газа (измерении теплового эффекта реакции каталитического окисления газа). Термокаталитический сенсор является комплектующим элементом и может

использоваться в стационарных и переносных газоаналитических приборах. Термохимический сенсор применяется для измерения следующих газов: H_2 , CH_4 , C_3H_8 , LPG и других горючих веществ.

Термокаталитические датчики обладают рядом преимуществ:

- простота конструкции;
- высокое быстродействие;
- как правило, наличие взрывозащищённого исполнения;
- способность обнаружения разнообразных газов.

Однако термокаталитические датчики имеют ряд серьёзных недостатков:

- легко отравить испарениями кремния, серы или свинца;
- требовательны к обслуживанию. Их необходимо регулярно проверять, чтобы убедиться, что они работоспособны;
- датчик может сгореть, если концентрация горючего газа превышает 100% НКПР;
- датчикам для работы необходимо присутствие кислорода; при недостатке кислорода эффективность их работы катастрофически падает;
- при необходимости определения малых концентраций горючих газов, недостаточно стабильны и имеют недостаточное разрешение.

В электрохимических сенсорах проверяемый компонент взаимодействует с чувствительным слоем непосредственно на электроде или в слое раствора проводящего электролита около него. Электрохимическая ячейка, как правило, имеет два или три электрода для совершения электрохимической реакции. Такие сенсоры применяются в газоаналитическом оборудовании и предназначены для количественного и качественного анализа веществ в жидких и газообразных средах.

Электрохимические датчики обладают следующими преимуществами, при сравнении их с обычным аналитическим оборудованием:

- малые габаритные размеры;
- линейная зависимость сигнала от концентрации целевого компонента;
- удобство использования;
- малое время обработки сигнала;
- независимость сигнала от расхода газа;
- независимость показаний от положения в пространстве;
- малое энергопотребление;
- относительно низкая стоимость.

Недостатки электрохимических сенсоров:

- недостаточная селективность;
- недостаточно большой срок службы;
- возможность течи электролита на границе металл - пластиковый корпус при термоударе или длительной работе;
- возможность испарения электролита.

Работа полупроводникового сенсора основана на регистрации изменений сопротивления при воздействии на него измеряемого газа. Полупроводниковые сенсоры обладают практически полным отсутствием селективности (избирательности), так как любой способный быть донором электронов газ может вызвать их отклик. Этот недостаток устраняют, изменяя рабочую температуру сенсора или применяя газовые фильтры, предохраняющие поверхность полупроводника от воздействия посторонних газов. Так же недостатками полупроводниковых сенсоров являются невозможность контроля двух и более газов в воздухе, отравление газочувствительного слоя некоторыми веществами. Но при этом имеют ряд преимуществ:

- обеспечивают длительную работу в необслуживаемом режиме;
- сравнительно дешёвы и имеют небольшие габаритные размеры;
- обладают высоким быстродействием и чувствительностью к малым концентрациям измеряемых газов;

- имеют высокую технологичность изготовления.

Оптические сенсоры фиксируют изменение оптической плотности исследуемой газовой смеси при определенной длине волны.

К электрическим химическим сенсорам относятся: полевые транзисторы, органические полупроводники и полупроводники с электронной проводимостью на основе оксидов металлов. Измеряемыми величинами являются заряд или ёмкость, проводимость, разность потенциалов, изменяющиеся при воздействии анализируемого вещества.

В основе работы магнитных сенсоров (датчиков магнитного поля) лежит магниторезистивный эффект или эффект Холла.

Чувствительные к изменению массы сенсоры работают за счёт обеспечения преимущественной адсорбции молекул детектируемого газа на поверхности кристалла с помощью нанесения тонкого слоя адсорбирующего материала [18].

1.3 Жидкие кристаллы

В природе встречаются вещества, находящиеся в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном, в зависимости от подвижности отдельных атомов или молекул. Твердое тело сохраняет определенную форму благодаря тому, что атомы и молекулы находятся на фиксированном расстоянии друг от друга. В жидком состоянии молекулы способны перемещаться и жидкость принимает форму сосуда, который она заполняет. В газообразном состоянии между молекулами и атомами существует пространство, что позволяет сжимать его, заполняя определенный объем.

Несмотря на существенные отличия этих трех основных состояний вещества границы между ними не всегда четкие. Жидкие кристаллы представляют собой промежуточное состояние вещества, сочетающее свойства твердого и жидкого состояний. Благодаря текучести можно создавать тонкие слои жидкого кристалла толщиной от нескольких до

десятков микрометров. В отличие от обычных жидкостей молекулы жидкого кристалла обладают способностью к упорядочению в пространстве и формированию дальнего порядка пространственной ориентации молекул. От обычных твердых кристаллов жидкие кристаллы отличает отсутствие жесткой кристаллической решетки.

Жидкие кристаллы состоят из сложных органических молекул. В зависимости от упорядочения осей молекул жидкие кристаллы разделяются на три разновидности: нематические, смектические и холестерические. При температурах выше температуры перехода в изотропное состояние молекулы жидкого кристалла ориентированы произвольно, образуя изотропную жидкость. В определенном интервале температур, соответствующем нематической фазе, молекулы жидкого кристалла по-прежнему способны передвигаться в жидкости, но их длинные оси ориентированы в определенном направлении. Более сложный позиционный порядок молекул характерен для смектических жидких кристаллов, в которых центры молекулярной массы расположены в слоях, а движение ограничено главным образом внутри этих слоев. В холестерических жидких кристаллах молекулы расположены в слоях, а продольные оси одного слоя развернуты на небольшой угол относительно соседнего слоя. Угловое смещение нарастает от слоя к слою по спирали. Порядок расположения молекул жидких кристаллов определяет анизотропию их механических, электрических, магнитных и оптических свойств [19]. Схематически ориентация жидких кристаллов изображена на рисунке 1.7

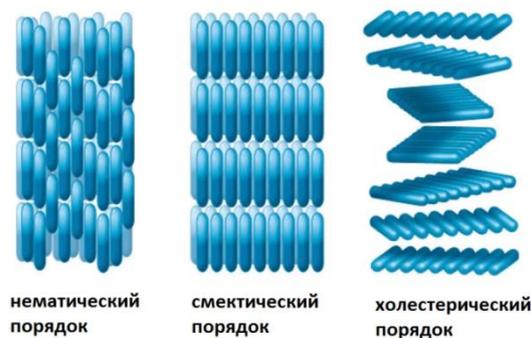


Рис. 1.7 Ориентация молекул жидких кристаллов

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Конструкция жидкокристаллического сенсора паров органических растворителей

Эксперимент проводился на установке, состоящей из поляризационного микроскопа, фотокамеры, компьютера, жидкокристаллической ячейки, гелий-неонового лазера, экрана. Экспериментальная установка изображена на рисунке 2.1

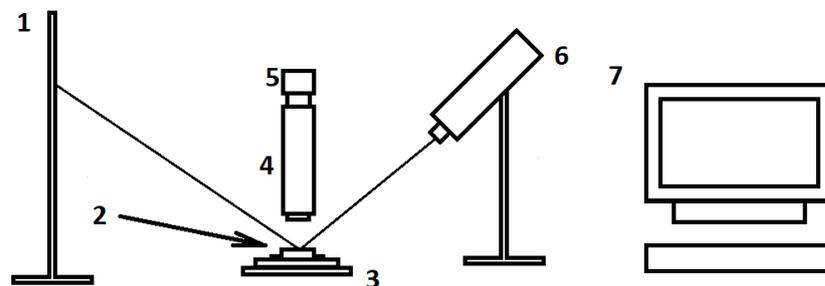


Рис. 2.1 Схематическое изображение экспериментальной установки. 1 – экран, 2 – поток воздуха, 3 – жидкокристаллическая ячейка, 4 – поляризационный микроскоп, 5 – фотокамера, 6 – гелий-неоновый лазер, 7 – компьютер

В качестве исходного элемента была использована кремниевая подложка с наноразмерными пленками углерода. Наноразмерные пленки углерода были нанесены на подложку с помощью электронного микроскопа, они являются хорошими адсорбентами. Схематическое изображение подложки представлено на рисунке 2.2

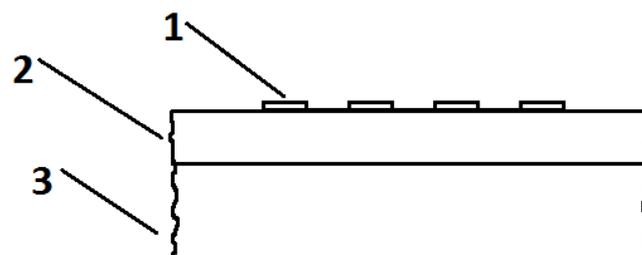


Рис. 2.2 Схематическое изображение кремниевой подложки. 1 – наноразмерные пленки углерода, 2 – окись кремния, 3 – кремний

На подложку был нанесен жидкий кристалл – пентилцианобифенил (5СВ). Ориентация жидкого кристалла очень чувствительна по отношению к чужеродным молекулам. Схематически кремниевая подложка со слоем жидкого кристалла представлена на рисунке 2.3

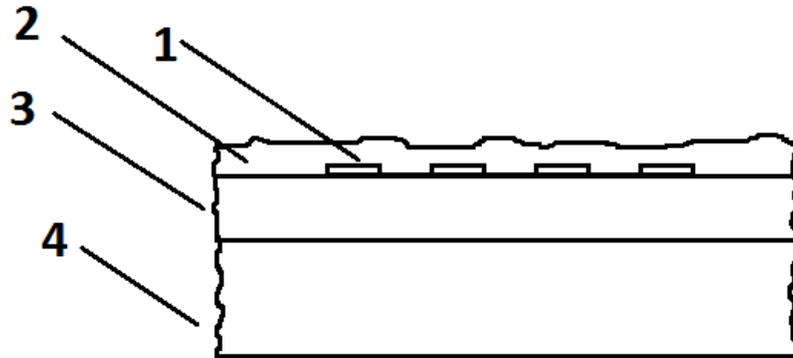


Рис. 2.3 Схематическое изображение кремниевой подложки со слоем жидкого кристалла. 1 – наноразмерные пленки углерода, 2 – жидкий кристалл, 3 – окись кремния, 4 – кремний

С помощью поляризационного микроскопа с камерой было проведено исследование жидкого кристалла на кремниевой подложке. Фотография сделана с помощью микроскопа, при нескрещенных поляризаторах и представлена на рисунке 2.4



Рис. 2.4 Микрофотография кремниевой подложки с жидким кристаллом 5СВ при нескрещенных поляризаторах.

Далее подложка с жидким кристаллом была рассмотрена с помощью микроскопа со скрещенными поляризаторами. Микрофотография подложки с жидким кристаллом представлена на рисунке 2.5



Рис. 2.5 Микрофотография кремниевой подложки с жидким кристаллом при скрещенных поляризаторах

На данной микрофотографии видны наноразмерные пленки углерода, жидкий кристалл распределен по подложке толстым слоем неравномерно.

С помощью воздушного потока жидкий кристалл был распределен тонким слоем по подложке, до появления хороших интерференционных цветов. Микрофотография подложки с тонким слоем ЖК представлена на рисунке 2.6

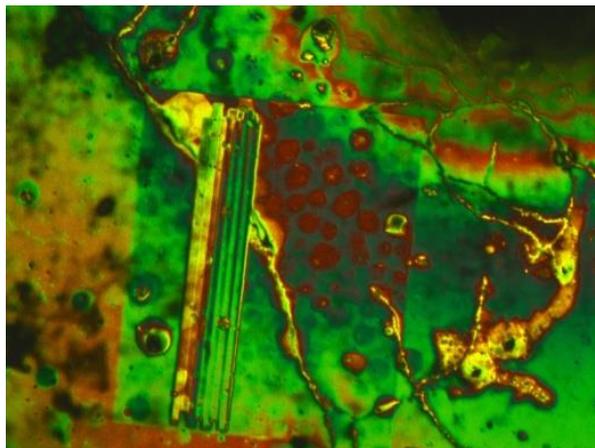


Рис. 2.6 Микрофотография кремниевой подложки с тонким слоем жидкого кристалла

Пары органических растворителей подавались на подложку при их испарении с фильтровальной бумаги, пропитанной интересующим растворителем. Схематически это представлено на рисунке 2.7

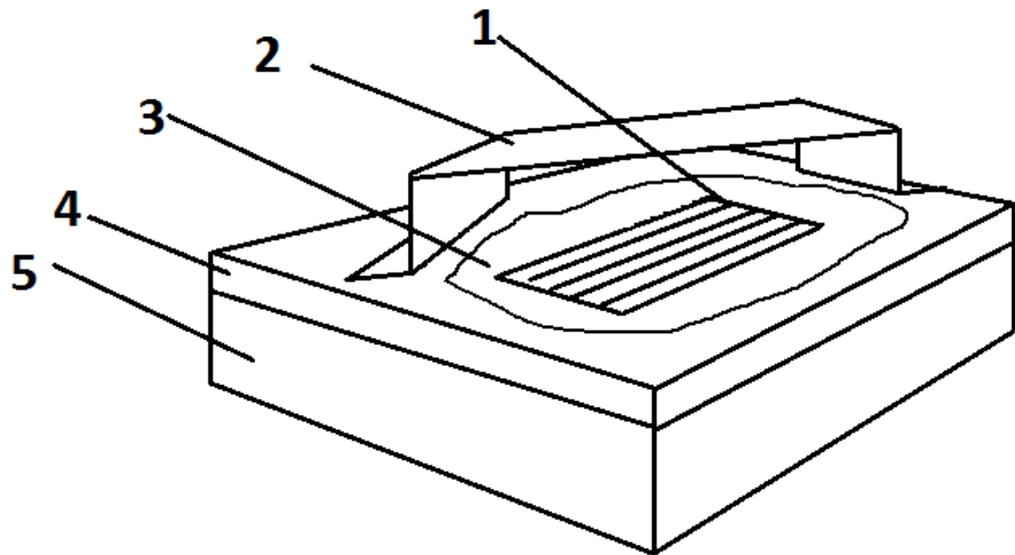


Рис. 2.7 Схематическое изображение подачи паров растворителей на ЖК ячейку. 1 – наноразмерные пленки углерода, 2 – бумага, пропитанная органическим растворителем, 3 – жидкий кристалл, 4 – оксид кремния, 5 – кремний

2.2 Эксперимент

Было проведено несколько экспериментов: действие на сенсор воздушного потока (сухого и влажного), выявление предельной концентрации для диметилформамида, при которой срабатывает сенсор, реакция на четыре органических растворителя, эксперимент по дифракции. Так как по прошествии времени жидкий кристалл на подложке возвращался в исходное состояние, а также не было различия в экспериментах со свеженанесенным ЖК и повторно используемым для регистрации паров, можно говорить о возможности многократного использования ЖК ячейки в сенсоре.

2.2.1 Реакция ЖК на сухой воздушный поток

Был создан большой воздушный поток вблизи подложки с жидким кристаллом с помощью резиновой груши.

Микрофотография подложки с ЖК до подачи на нее воздушного потока представлена на рисунке 2.8

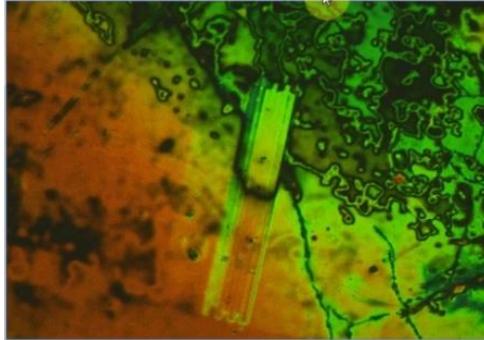


Рис. 2.8 Подложка с жидким кристаллом в начале эксперимента с сухим воздушным потоком

Процесс подачи сухого воздуха на подложку с ЖК представлен на рисунках 2.9, 2.10

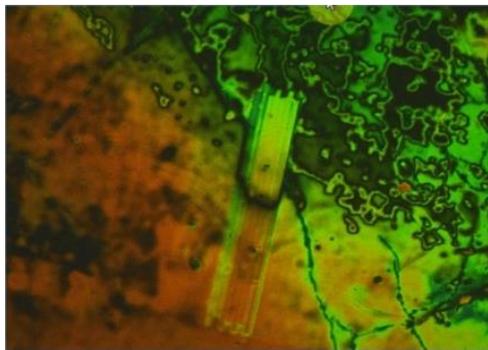


Рис. 2.9 Изменения жидкого кристалла при первом потоке воздуха

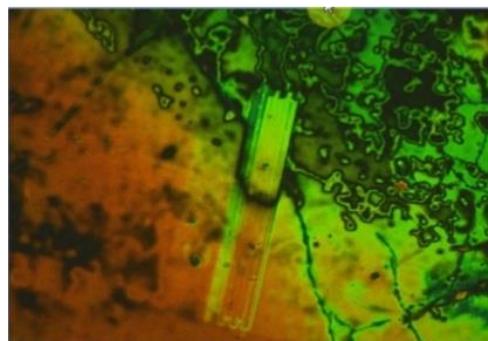


Рис. 2.10 Возвращение жидкого кристалла в исходное состояние после прекращения подачи воздуха

Видно, что после прекращения подачи воздуха подложка с ЖК возвращается в исходное состояние.

Далее эксперимент был повторен со слабым потоком воздуха. Микрофотографии процесса представлены на рисунках 2.11 – 2.13

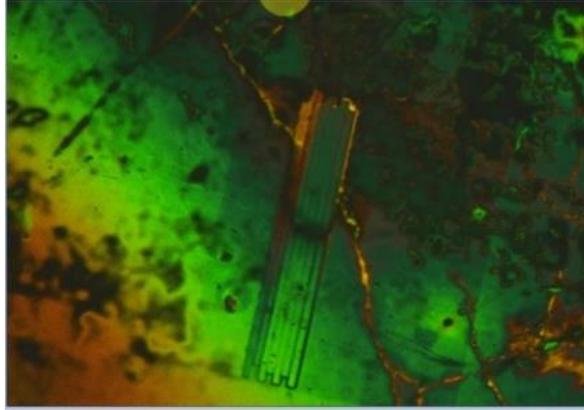


Рис. 2.11 Микрофотография подложки с ЖК до подачи воздуха

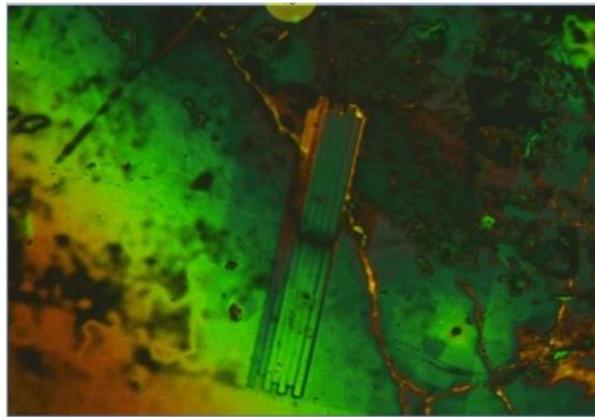


Рис. 2.12 Микрофотография ЖК ячейки в момент подачи воздуха

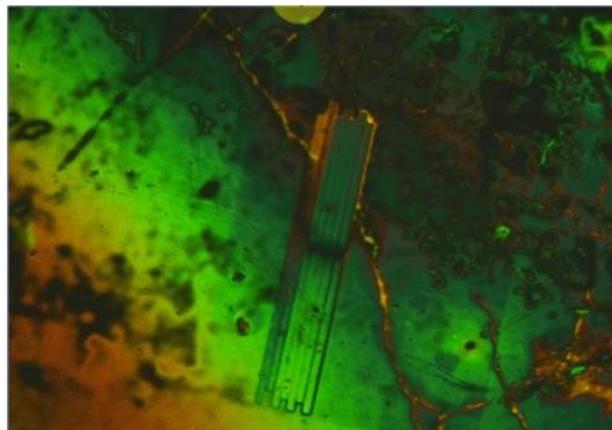


Рис. 2.13 Микрофотография ЖК ячейки после подачи воздуха

Изменений в поведении ЖК не обнаружено. Видно, что жидкий кристалл не реагирует на небольшой поток воздуха.

2.2.2 Реакция ЖК на влажный воздушный поток

Т.к. конструкция сенсора открытая, необходимо убедиться, что влага, содержащаяся в воздухе, не будет создавать помех при детектировании паров сенсором. Микрофотографии процесса представлены на рисунках 2.14 – 2.17

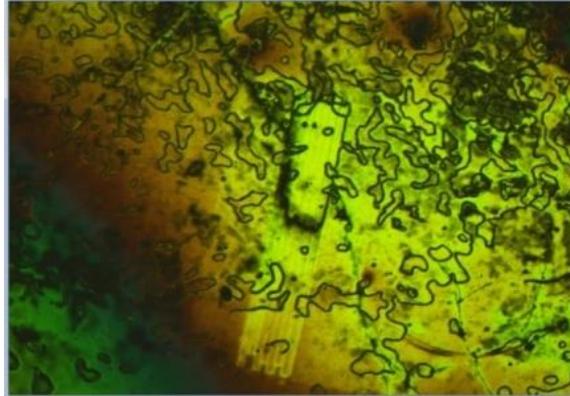


Рис. 2.14 Микрофотография ЖК ячейки до подачи влажного воздуха

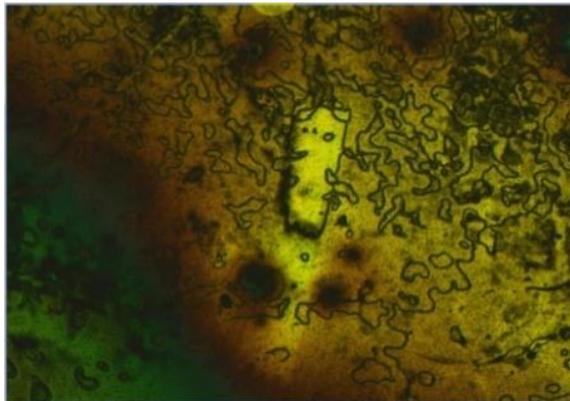


Рис. 2.15 Микрофотография ЖК ячейки в момент подачи влажного воздуха

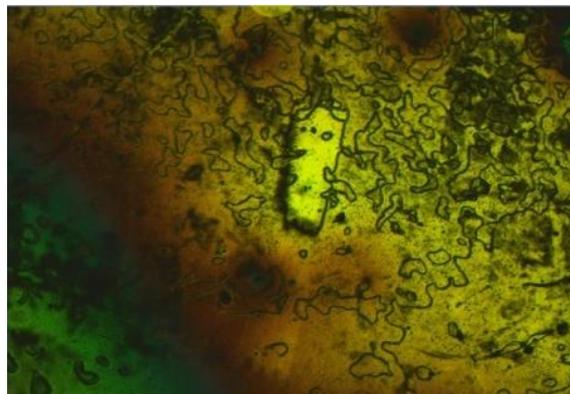


Рис. 2.16 Микрофотография ЖК ячейки в процессе подачи влажного воздуха

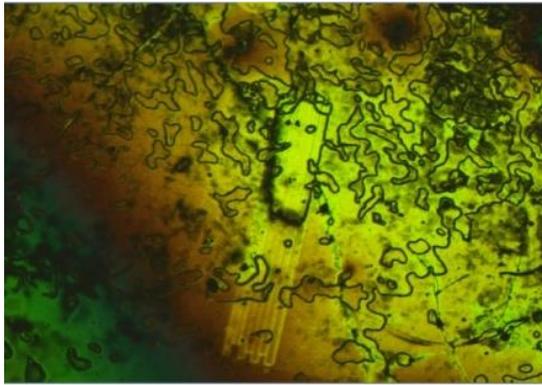


Рис. 2.17 Микрофотография ЖК ячейки после подачи влажного воздуха. Наблюдаются специфические изменения в поведении жидкого кристалла при подаче влажного потока. Поверхность жидкого кристалла покрывается «пятнами» что соответствует оседанию микрокапель воды на поверхности жидкого кристалла. После прекращения подачи влажного воздуха ячейка возвращается в исходное состояние.

2.2.3 Реакция ЖК на пары диметилформаида

Жидкокристаллическая ячейка собиралась соответственно описанию, представленному в пункте 2.1. Фильтровальная бумага пропитывалась диметилформаидом и помещалась рядом с жидкокристаллической ячейкой. Попадания растворителя в жидком виде на жидкий кристалл не допускалось. Микрофотография жидкокристаллической ячейки до подачи паров диметилформаида представлена на рисунке 2.18

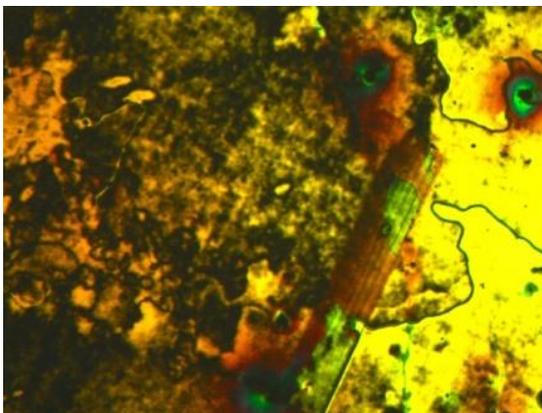


Рис. 2.18 Микрофотография подложки со слоем ЖК по подачи паров диметилформаида

Изменения на подложке регистрировались с помощью видеокамеры. Первый отклик ЖК ячейки был зафиксирован на второй секунде.

Микрофотографии процесса представлены на рисунках 2.19, 2.20

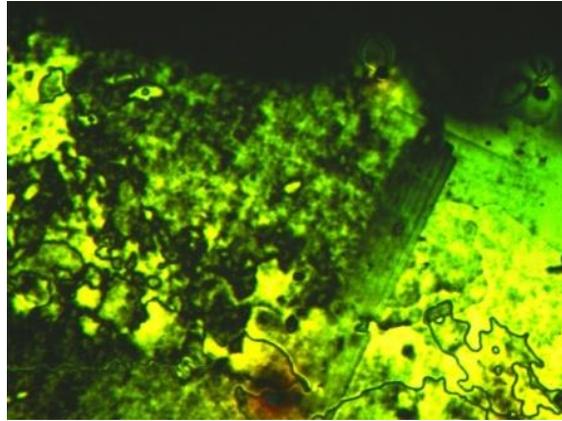


Рис. 2.19 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров диметилформамида

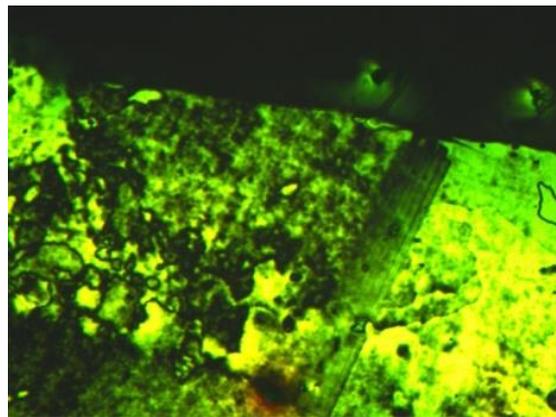


Рис. 2.20 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров диметилформамида

Видно, что по мере испарения растворителя, переход жидкого кристалла в гомеотропное состояние сначала происходит над наноразмерными пленками углерода, а затем над всей подложкой. Наблюдаемая особенность позволяет говорить, что смена ориентации происходит от подложки, в результате адсорбции молекул диметилформамида на углеродных поверхностях. Изменение ориентации жидкого кристалла начинается с той стороны, с которой подаются пары диметилформамида. Это говорит о том что, реакция ЖК ячейки зависит от направления распространения паров.

Механизм реакции ЖК ячейки под действием паров диметилформаида представлен на рисунке 2.21

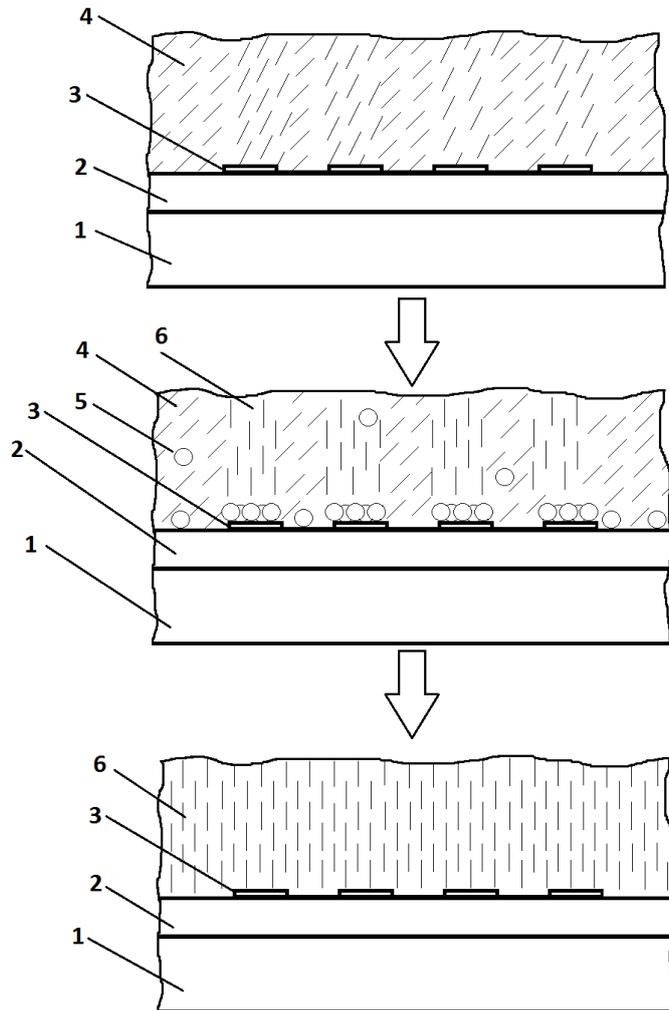


Рис. 2.21 Механизм реакции ЖК ячейки под действием диметилформаида.

1- кремний, 2 – окись кремния, 3 – наноразмерные пленки углерода, 4 – наклонная ориентация ЖК, 5 – молекулы диметилформаида, 6 – гомеотропная ориентация ЖК

2.2.4 Реакция ЖК на пары изопропилового спирта

Затем был проведен эксперимент с парами изопропилового спирта. Была использована та же самая подложка и жидкий кристалл, что говорит о возможности их повторного использования. Жидкий кристалл за прошедшее время распределился толстым слоем по поверхности подложки. ЖК был распределен тонким слоем с помощью воздушного потока.

Микрофотография ЖК ячейки в начале эксперимента представлена на рисунке 2.22

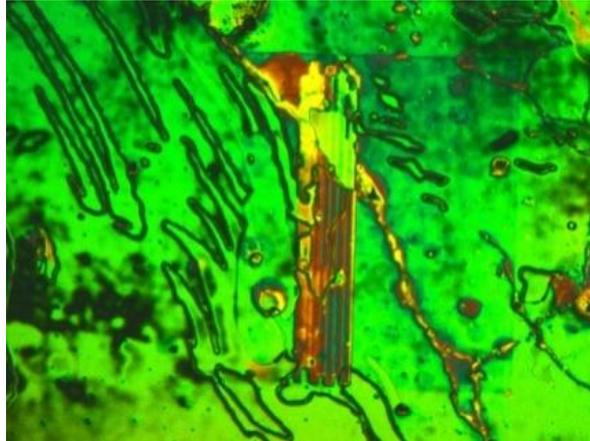


Рис. 2.22 Микрофотография ЖК ячейки в начале эксперимента с
изопропиловым спиртом

Фильтровальная бумага, пропитанная изопропиловым спиртом, была помещена рядом с жидкокристаллической ячейкой. Процесс изменения в ЖК ячейке, при попадании на нее паров изопропилового спирта, представлен на микрофотографиях 2.23 – 2.25. Первый отклик ЖК ячейки был зафиксирован на третьей секунде. Стрелка указывает направление перемещения интерференционных полос, что указывает на утончение слоя жидкого кристалла.

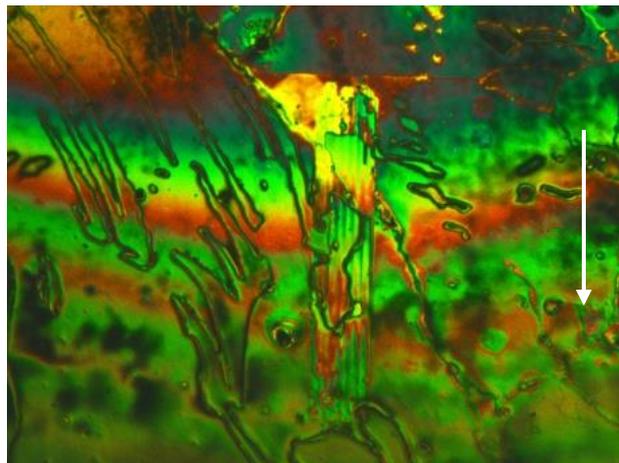


Рис. 2.23 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров
изопропилового спирта

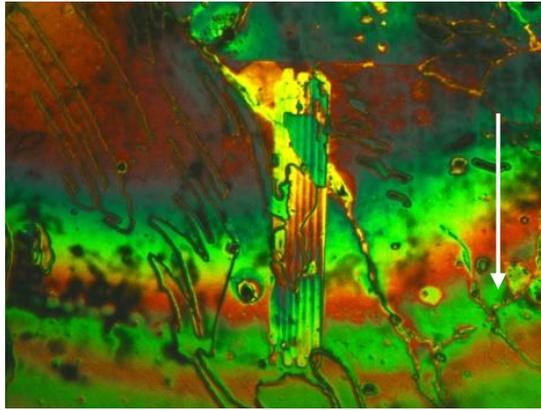


Рис. 2.24 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров
изопропилового спирта

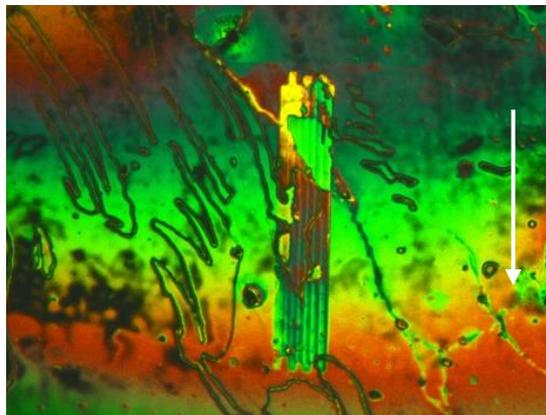


Рис. 2.25 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров
изопропилового спирта

После того как фильтровальная бумага пропитанная изопропиловым спиртом была удалена от подложки с жидким кристаллом, ЖК ячейка начала возвращаться в исходное состояние. Процесс представлен на рисунках 2.26 – 2.28

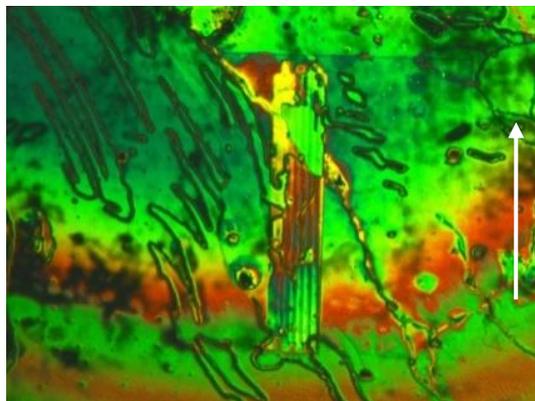


Рис. 2.26 Микрофотография ЖК ячейки при возвращении в исходное
состояние

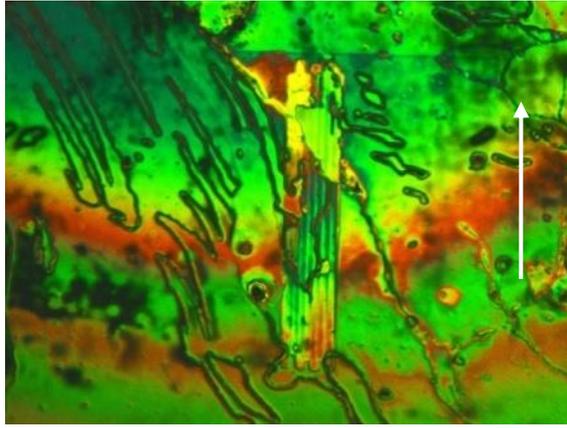


Рис. 2.27 Микрофотография ЖК ячейки при возвращении в исходное состояние

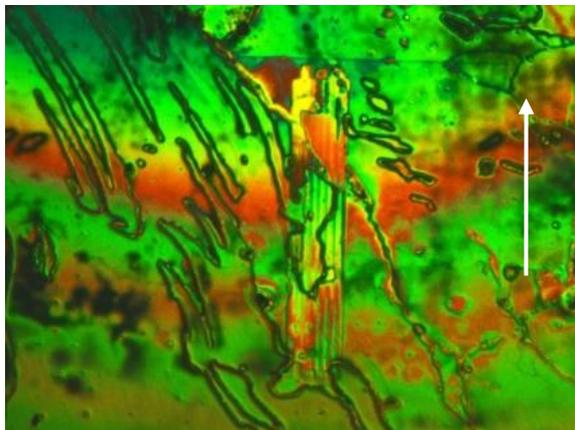


Рис. 2.28 Микрофотография ЖК ячейки при возвращении в исходное состояние

Как и в предыдущем опыте, реакция ЖК ячейки зависит от направления поступления паров. Видно, что изменения, в отличие от прошлого опыта, происходили не на подложке, а непосредственно со слоем жидкого кристалла. Это говорит что механизм изменений в этих двух экспериментах разный. В первом устанавливается гомеотропная ориентация жидкого кристалла сначала на наноразмерных пленках углерода, а затем по всей подложке. А во втором меняется поверхностное натяжение жидкого кристалла, что изменяет толщину слоя ЖК. При увеличении концентрации паров изопропилового спирта наблюдается переход ЖК в изотропное состояние.

Механизм реакции представлен на рисунке 2.29

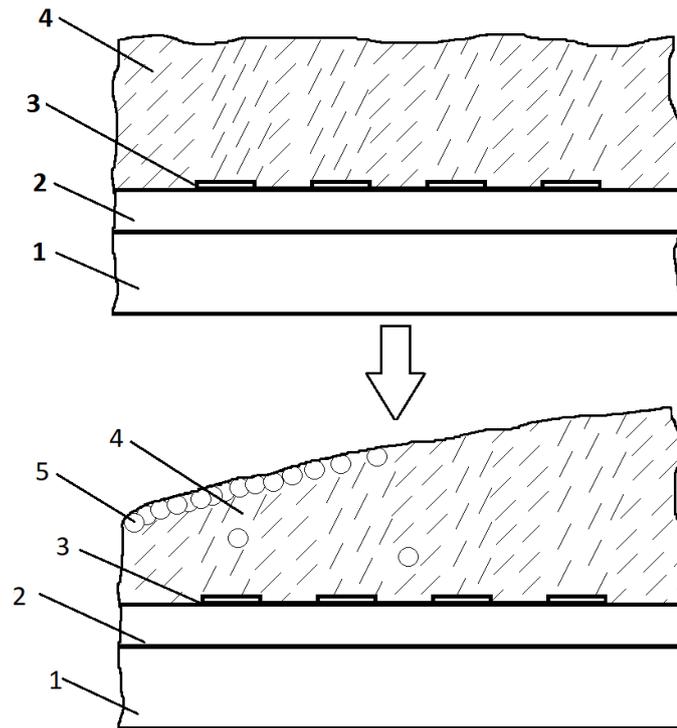


Рис. 2.29 Механизм реакции. 1-кремний, 2- окись кремния, 3- наноразмерные пленки углерода, 4- наклонная ориентация ЖК, 5- молекулы изопропилового спирта.

В процессе эксперимента на поверхности жидкого кристалла была обнаружена инородная частица. Наблюдалось ее движение по поверхности жидкого кристалла, что наглядно показывает направление движения жидкого кристалла при попадании на ЖК ячейку паров изопропилового спирта. Процесс представлен на рисунке 2.30. Частица обозначена красным кругом.

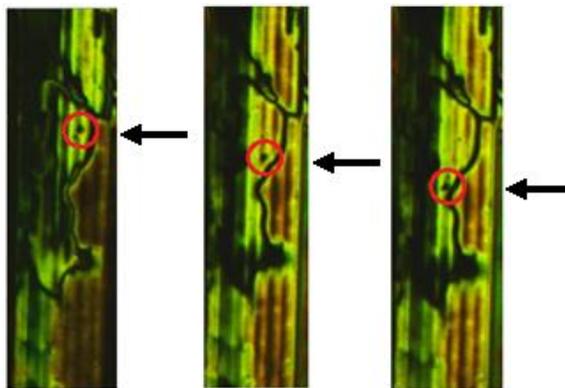


Рис. 2.30 Движение частицы по поверхности жидкого кристалла при попадании на него паров изопропилового спирта

2.2.5 Реакция ЖК на пары толуола

Далее был проведен эксперимент с толуолом. Подложка и жидкий кристалл были использованы с прошлого эксперимента. ЖК вновь распределился толстым слоем по поверхности кремниевой подложки. Микрофотография жидкокристаллической ячейки с толстым слоем ЖК представлена на рисунке 2.31

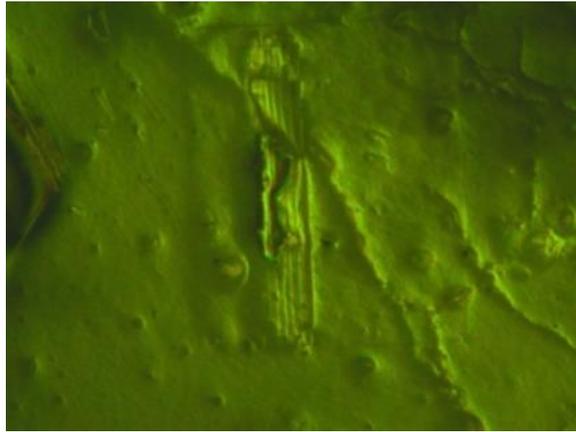


Рис. 2.31 Микрофотография жидкокристаллической ячейки с толстым слоем ЖК

С помощью воздушного потока жидкий кристалл был распределен тонким слоем по поверхности кремниевой подложки. Микрофотография ЖК ячейки с тонким слоем жидкого кристалла представлена на рисунке 2.32

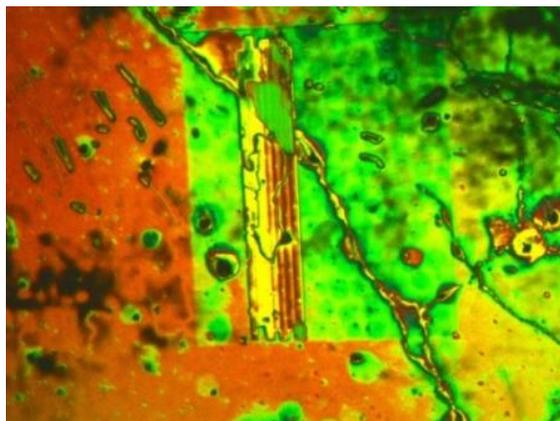


Рис. 2.32 Микрофотография ЖК ячейки с тонким слоем жидкого кристалла

Бумага с нанесенным на нее толуолом была помещена рядом с подложкой с жидким кристаллом. Процесс, происходящий с ЖК ячейкой,

был записан на видео и представлен на рисунках 2.33 – 2.36. Первый отклик ЖК ячейки был зафиксирован на первой секунде.

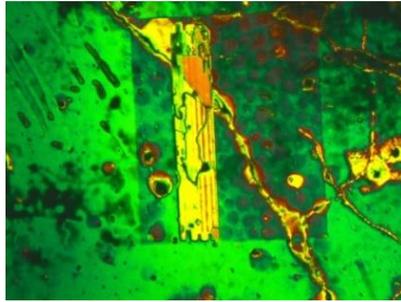


Рис. 2.33 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров толуола

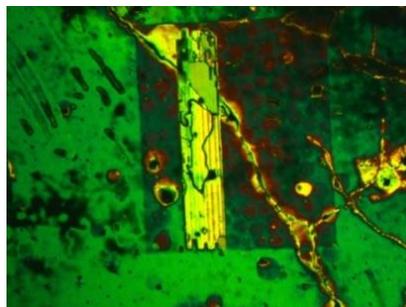


Рис. 2.34 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров толуола

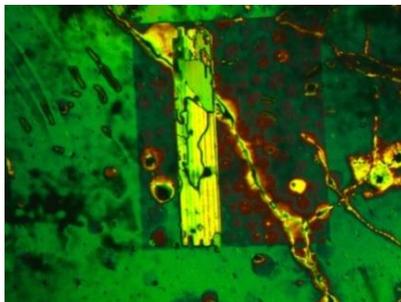


Рис. 2.35 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров толуола

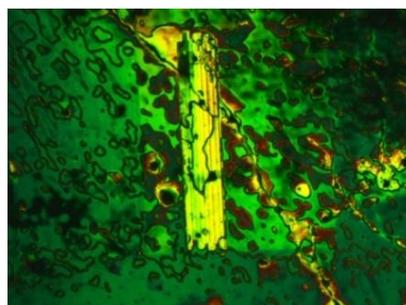


Рис. 2.36 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров толуола.

Реакция ЖК ячейки зависит от направления поступления паров. Наблюдаются изменения в ориентации жидкого кристалла по сравнению с исходным состоянием (см. рис.2.32). Устанавливалась кратковременная гомеотропная ориентация жидкого кристалла, схематически это изображено на рисунке 2.37. Произошел фазовый переход жидкий кристалл – изотропная жидкость, схематически это представлено на рисунке 2.38. Бумага, пропитанная толуолом, была удалена от ЖК ячейки. Ячейка не сразу вернулась в начальное состояние.

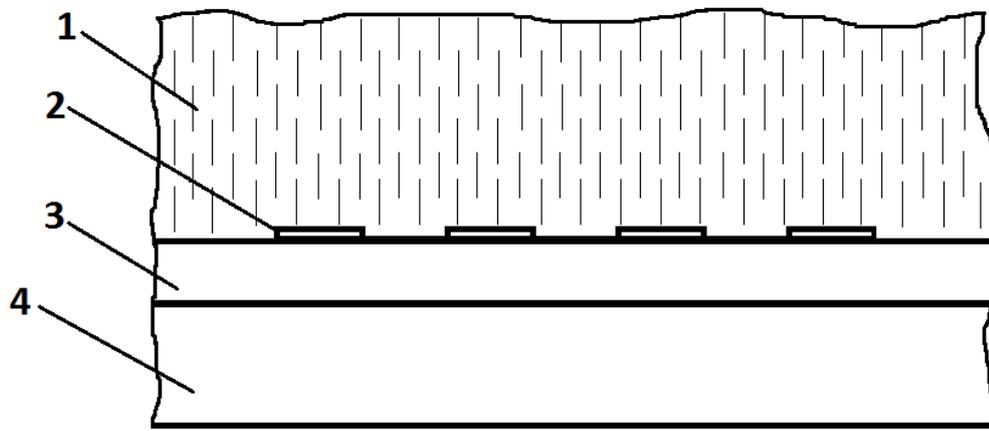


Рис. 2.37 Гомеотропная ориентация жидкого кристалла. 1-гомеотропная ориентация ЖК, 2 - наноразмерные пленки углерода, 3-окись кремния, 4- кремний

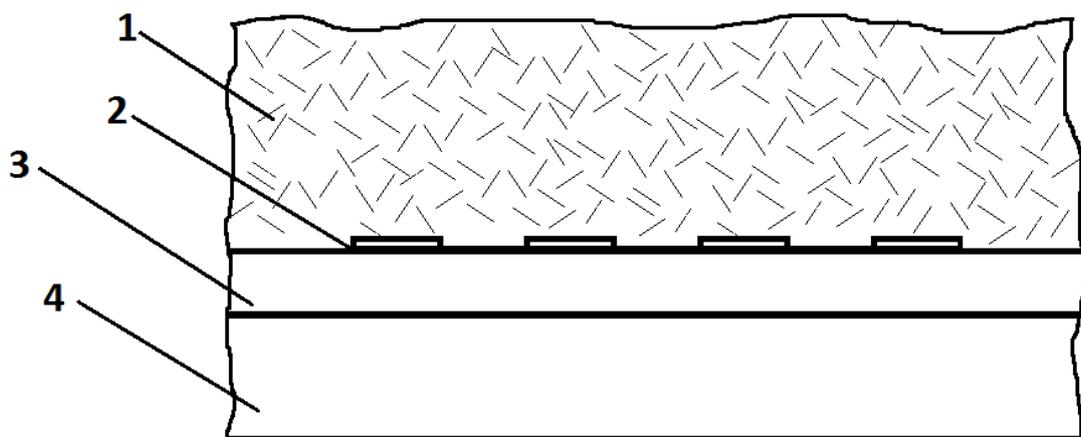


Рис. 2.38 Фазовый переход. 1 – жидкий кристалл в изотропной фазе, 2 – наноразмерные пленки углерода, 3 – окись кремния, 4 – кремний

Микрофотография подложки после фазового перехода представлена на рисунке 2.39

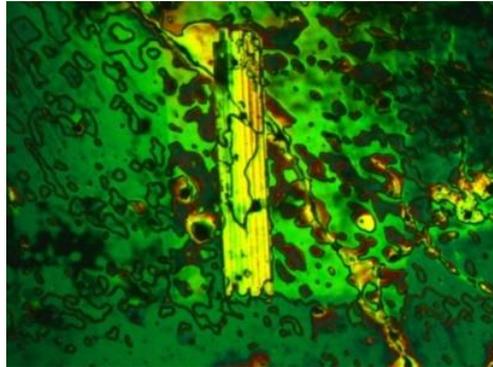


Рис. 2.39 Микрофотография подложки после фазового перехода в жидком кристалле и возврата в жидкокристаллическое состояние.

При долгосрочной релаксации наблюдается полный возврат в исходное состояние.

2.2.6 Реакция ЖК на пары ацетона

Затем был проведен аналогичный эксперимент с ацетоном. Жидкокристаллическая ячейка вернулась в начальное состояние. ЖК по подложке распределился толстым слоем. С помощью воздушного потока жидкий кристалл был распределен тонким слоем по подложке. На фильтровальную бумагу был нанесен ацетон. Бумага с ацетоном помещена рядом с ЖК ячейкой. Попадания ацетона на жидкий кристалл не допускалось. Микрофотография до подачи паров ацетона представлена на рисунке 2.40

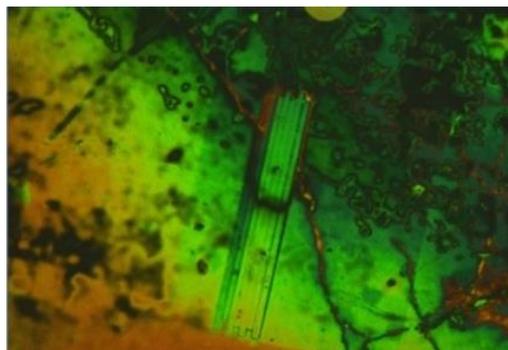


Рис. 2.40 Микрофотография ЖК ячейки до подачи паров ацетона

Микрофотографии процесса, происходящего с ЖК ячейкой, под действием паров ацетона, представлены на рисунках 2.41 – 2.44. Первый отклик ЖК ячейки был зафиксирован на первой секунде.

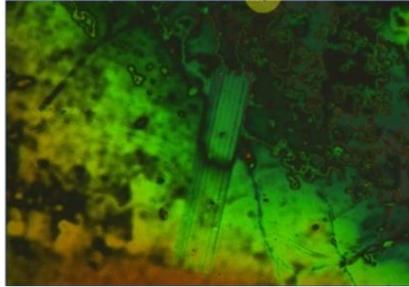


Рис. 2.41 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров ацетона

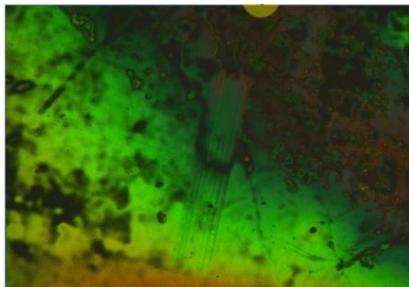


Рис. 2.42 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров ацетона

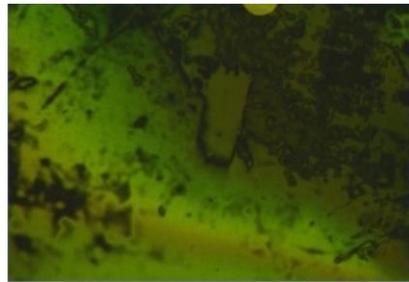


Рис. 2.43 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров ацетона



Рис. 2.44 Микрофотография ЖК ячейки при попадании на нее паров ацетона

Наблюдаются изменения в ориентации жидкого кристалла по сравнению с исходным состоянием (см. рис. 2.40). Реакция ЖК ячейки зависит от направления поступления паров. После того, как бумага пропитанная ацетоном, была удалена от ЖК ячейки, подложка не сразу возвращается в исходное состояние. Микрофотографии подложки после воздействия на нее паров ацетона представлены на рисунках 2.45, 2.46. Устанавливалась кратковременная гомеотропная ориентация жидкого кристалла (см. рис. 2.47) Произошел фазовый переход жидкий кристалл – изотропная жидкость (см. рис. 2.38)

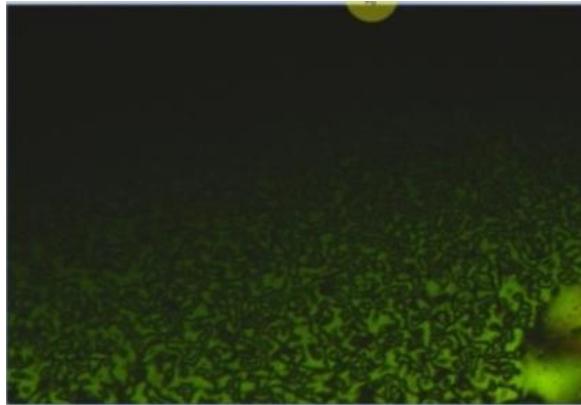


Рис. 2.45 Микрофотография ЖК ячейки после воздействия на нее паров ацетона

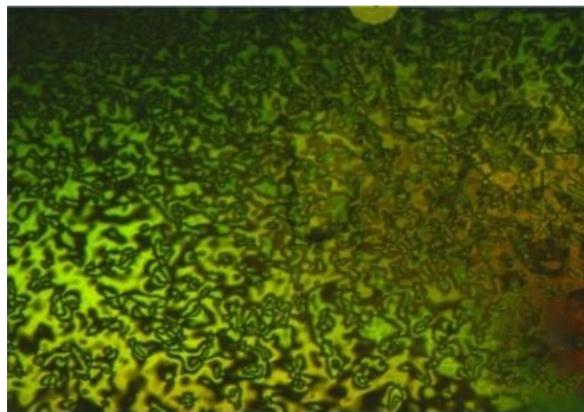


Рис. 2.46 Микрофотография ЖК ячейки после воздействия на нее паров ацетона

При долгосрочной релаксации наблюдается полный возврат в исходное состояние.

2.2.7 Эксперимент по дифракции

С целью выяснить возможность автоматизации сенсора был проведен следующий эксперимент. В качестве исследуемого растворителя был выбран диметилформамид, так как он сравнительно медленно испаряется.

При освещении кремниевой подложки с толстым слоем жидкого кристалла (см. рис. 2.5) гелий-неоновым лазером, на экране видно размытое пятно, так как наноразмерные пленки углерода имеют несущественное влияние на ориентацию жидкого кристалла. Фото экрана представлено на рисунке 2.47

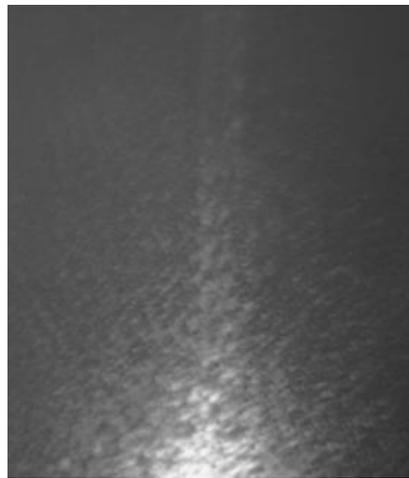


Рис. 2.47 Фото экрана при освещении кремниевой подложки с толстым слоем жидкого кристалла гелий-неоновым лазером.

С помощью воздушного потока жидкий кристалл был распределен тонким слоем по поверхности подложки. Далее подложка с тонким слоем ЖК (см. рис. 2.6) была освещена гелий-неоновым лазером. На экране можно увидеть чередующиеся максимумы и минимумы, это говорит о том, что ориентированный жидкий кристалл на наноразмерных пленках углерода исполняет роль дифракционной решетки. Дифракционная картина нечеткая, потому что мало штрихов (углеродных наноразмерных пленок) в дифракционной решетке. Дифракционная картина появляется за счет слоя жидкого кристалла, так как углеродные пленки без жидкого кристалла

дифракцию не дают. Фото экрана с дифракционной картиной представлено на рисунке 2.48, стрелками указаны максимумы

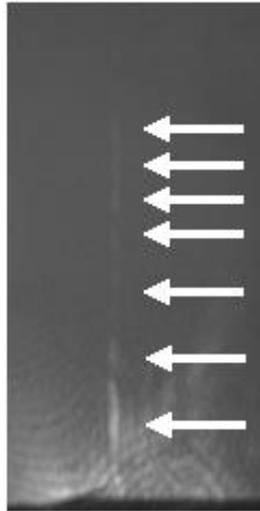


Рис. 2.48 Дифракционная картина на экране при освещении кремниевой подложки с тонким слоем ЖК гелий-неоновым лазером

Освещая гелий-неоновым лазером ЖК ячейку при подаче на нее паров растворителя, дифракционной картины больше не наблюдается, это видно на рисунке 2.49

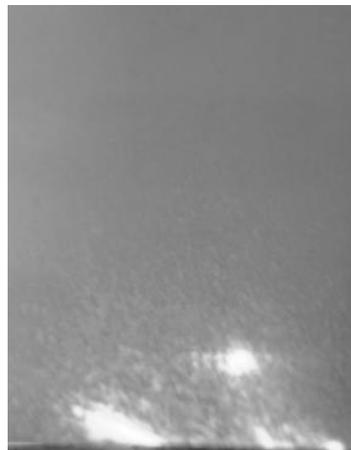


Рис. 2.49 Отсутствие дифракционной картины на экране от ЖК ячейки при попадании на нее паров органических растворителей.

Использование явления дифракции от жидкого кристалла над наноразмерными пленками углерода дает возможность регистрации диметилформамида без использования дорогостоящей поляризационной оптики.

2.2.8 Концентрация «срабатывания» прототипа жидкокристаллического сенсора

При анализе смесей различных газов с целью определения их качественного и количественного состава пользуются следующими основными единицами измерения:

- мг/м³;
- ppm или млн⁻¹;
- % об. д.;
- % НКПР.

Массовая концентрация токсичных веществ и предельно допустимая концентрация (ПДК) горючих газов измеряется в мг/м³. Единица измерения мг/м³ применяется при обозначении концентрации измеряемого вещества в воздухе рабочей зоны, атмосфере, а также в отходящих газах, выраженная в миллиграммах на кубический метр. При выполнении газового анализа, как правило, конечные пользователи часто переводят значения концентраций газов из ppm в мг/м³ и наоборот.

Миллионная доля газов и различных веществ является относительной величиной и обозначается в ppm или млн⁻¹. ppm - единица измерения концентрации газов и других относительных величин, аналогична по смыслу промилле и проценту. Наиболее распространённой единицей измерения концентраций горючих веществ в воздухе рабочей зоны, а также кислорода и углекислого газа является объёмная доля, которая обозначается сокращением % об. д. Объёмная доля - является величиной, равной отношению объёма какого-либо вещества в газовой смеси к объёму всей пробы газа. Объёмную долю газа принято выражать в процентах (%).

Нижний концентрационный предел распределения пламени (% НКПР), минимальная концентрация горючего взрывоопасного вещества в

однородной смеси с окислительной средой, при которой возможен взрыв [20].

Для расчёта предельной концентрации жидкокристаллического сенсора был проведен следующий эксперимент, кремниевая подложка с жидким кристаллом была помещена под чашу Петри. В качестве исследуемого вещества был выбран диметилформамид, так как он медленно испаряется. На фильтровальную бумагу наносилась одна капля диметилформамида и помещалась под чашу (попадания растворителя в жидкий кристалл не допускалось). Наблюдение за поведением ориентации молекул жидкого кристалла в присутствии диметилформамида проводилось с помощью микроскопа. Первые изменения были зафиксированы через 2 минуты после помещения диметилформамида под чашу Петри. Затем бумага, пропитанная одной каплей диметилформамида, делилась на две части, и одна половинка помещалась под чашу. Изменения в поведении жидкого кристалла под действием растворителя были зафиксированы через 3,3 минуты. Далее бумага, пропитанная диметилформамидом, делилась на три части, $\frac{1}{3}$ бумаги помещалась под чашу. Время срабатывания сенсора составило 5,5 минут. Предельной концентрацией будем считать $\frac{1}{5}$ капли, т.к. это последнее значение, при котором были зафиксированы изменения в ориентации молекул жидкого кристалла, через 15 минут.

Схематически эксперимент представлен на рисунке 2.50

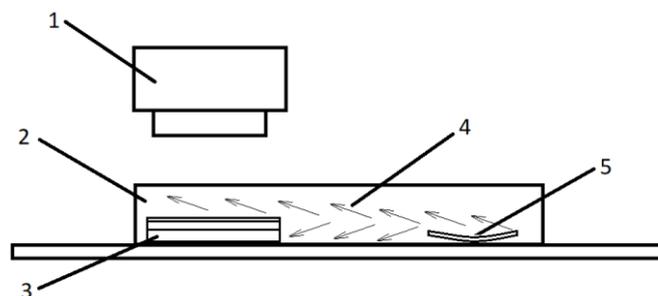


Рис. 2.50 Схематическое изображение эксперимента. 1 – микроскоп, 2 – чаша Петри, 3 - кремниевая подложка с жидким кристаллом (сенсор), 4 – направление распространения паров диметилформамида, 5 – фильтровальная бумага, пропитанная диметилформамидом

Предельная концентрация жидкокристаллического сенсора для диметилформаида была посчитана по формуле 2.1

$$N = \frac{m_d}{V}, \quad (2.1)$$

где

m_d - масса капли диметилформаида,

$V=9,42 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ - объем чаши Петри.

Масса капли диметилформаида была посчитана по формуле 2.2

$$m_d = \frac{2\pi R\delta}{g}, \quad (2.2)$$

где

$\pi=3,14$,

$R=0,001 \text{ м}$ – радиус капилляра,

$\delta=35,2 \cdot 10^{-3} \text{ н/м}$ – поверхностное натяжение жидкости,

$g=9,81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения.

Масса капли диметилформаида $m_d=22,5 \text{ мг}$.

Предельная концентрация для диметилформаида $N=4777,1 \text{ мг/м}^3$ или $1598,96 \text{ ppm}$, что меньше опасной для жизни и здоровья концентрации 3500 ppm .

Так как молекулы диметилформаида частично абсорбируются на стекле и при этом испарение растворителя из бумаги не полное, реальная концентрация паров порога изменения ориентации нематика будет значительно меньше концентрации приведенной выше. По литературным данным относительная чувствительность терموкаталитического сенсора для ацетона 2.5% НКПР ($2,5 \cdot 10^4 \text{ ppm}$), для изопропилового спирта 2.15% НКПР ($2,15 \cdot 10^4 \text{ ppm}$). Относительная чувствительность электрохимических сенсоров для ацетона 1000 ppm (сенсор CO (тип ECO-Sure (2e) Sixth Sense

Великобритания)), для хлора 20 ppm (сенсор NH₃ (тип NH₃/MR100 Membrarog Швейцария)) [21]. Из приведенных выше данных следует, что исследуемый в работе жидкокристаллический сенсор не уступает по чувствительности термокatalитическим сенсорам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были получены следующие результаты:

- 1) Экспериментально установлено, что под действием паров органических растворителей (диметилформамид, изопропиловый спирт, толуол, ацетон) происходит изменение ориентации жидкого кристалла 5СВ. Такое изменение ориентации ЖК может быть положено в качестве физического принципа функционирования сенсора паров органических растворителей.
- 2) Предложены механизмы влияния паров органических растворителей при пороговых концентрациях на ориентацию молекул жидкого кристалла:
 - посредством обратимого изменения поверхностного натяжения жидкого кристалла (изопропиловый спирт);
 - через предварительную адсорбцию молекул растворителя на поверхности кремниевой подложки (диметилформамид);
 - посредством обратимого фазового перехода жидкий кристалл-изотропная жидкость (толуол, ацетон).
- 3) Градиент концентрации паров в пространстве может регистрироваться изменением ориентации ЖК в плоскости ячейки, что позволяет определять направление их распространения. Отметим, что подобное свойство прототипа ЖК сенсора не реализуется в промышленных сенсорах.
- 4) Показана возможность использования явления дифракции от ориентированного жидкого кристалла на наноразмерных пленках углерода для автоматизации сенсора.
- 5) Показана возможность многократного использования ЖК ячейки для регистрации паров растворителей.
- 6) Оценка предельной концентрации изменения ориентации жидкого кристалла 5СВ для диметилформамида даёт $4777,1 \text{ мг/м}^3$ или $1598,96 \text{ ppm}$, что согласно литературным данным меньше опасной для жизни и здоровья человека концентрации 3500 ppm .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отравление растворителем. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://otravleniy.com/ximicheskie-otravleniya/otravlenie-rastvoritelem.html>
2. Вред летучих органических соединений на здоровье. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://biofile.ru/bio/22663.html>
3. К чему может привести отравление ацетоном? [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://fragmed.ru/otravleniya/aceton-vred-opasnost.html>
4. Чем опасен изопропиловый спирт. Отравление изопропанолом. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://otravlenye.ru/vidy/himicheskie/chem-opasen-izopropilovyj-spirit.html>
5. Отравление диметилформамидом. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://extremed.ru/toksik/77-industrtox/1987-dymetyl>
6. Электронные датчики химического состава. Классификация датчиков // Файловый архив студентов. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/3536009/page:43/>
7. Миниатюрные газовые датчики от Synkerf // WEB – портал для разработчиков электроники. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.terraelectronica.ru/news/4420>
8. АНТ – 3М- Течеискатель – газоанализатор (на 23 вещества). [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://ekosf.ru/58-produktsiya/khimicheskie-factory/gazoanalizatory/582-ant-3m>
9. Диметилформамид. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://chem-portal.ru/chemistry-custom/syre-dlya-proizvodstva-poliuretanov-i-kleya/187-dimetilformamid>
10. Отравление диметилформамидом (ДМФ) и его побочные эффекты. [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://meduniver.com/Medical/toksikologia/otravlenie_dimetilformidom.html

11. N, N – диметилформамид // Ассистент диагностики. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.rihtop.ru/diagnoseassistant/Substance.aspx?id=122>
12. Изопропиловый спирт: применение в медицине. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.medic-bis.com.ua/news-44-0-119-0.php>
13. Изопропиловый спирт // Ассистент диагностики. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.rihtop.ru/diagnoseassistant/Substance.aspx?id=37>
14. Сфера и области применения толуола. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://naruservice.com/articles/sfera-primeneniya-toluola>
15. Толуол // Ассистент диагностики. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.rihtop.ru/diagnoseassistant/Substance.aspx?id=30>
16. Ацетон. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://hpk-penza.com/word/%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82/%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D1%8B/%D0%B0%D1%86%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%BD/>
17. Ацетон // Ассистент диагностики. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.rihtop.ru/diagnoseassistant/Substance.aspx?id=15>
18. Что такое сенсор для газоанализаторов? [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.sensorgas.ru/poleznoe.html&art=1>
19. Коншина Е. А. Оптика жидкокристаллических сред. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/1004.pdfm>
20. Конвертер единиц концентрации газов. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.gazoanalizators.ru/converter.html>
21. «КОМЕТА – М» переносной мультигазовый газосигнализатор серии ИГС – 98. Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.gazoanalizators.ru/tech/kometa-m-re-mp.pdf>