

## МОДУЛЯЦИЯ СВЕТА

# Широкоапертурный жидкокристаллический электрооптический модулятор излучения лазера на окиси углерода

А.В.Кузнецов, А.А.Жукович-Гордеева, Ю.М.Климачев, А.В.Казначеев, А.Ю.Козлов, М.В.Минченко, О.А.Рулев, Д.В.Синицын, Е.П.Пожидаев, А.А.Ионин

*Разработаны жидкокристаллические электрооптические модуляторы излучения среднего ИК диапазона, позволяющие при световой апертуре до  $2.5 \text{ см}^2$  управлять состоянием поляризации излучения СО-лазера в диапазоне длин волн  $5.1\text{--}5.6 \text{ мкм}$ . Использование сегнетоэлектрического жидкого кристалла в качестве электрооптической среды, расположенной между скрещенными поляризатором и анализатором, позволило обеспечить термически устойчивую электрооптическую модуляцию излучения СО-лазера с частотой от 1 до 10 кГц при контрастном отношении от 15:1 до 25:1. Обеспечены режимы электроуправляемых полуволновой и четвертьволновой пластинок с временами переключения состояний поляризации от 20 до 50 мкс, а также возможность запоминания полученного состояния поляризации после выключения управляющего напряжения. Минимальное время переключения состояний поляризации составило 1.4 мкс, которое наблюдалось при частоте модуляции 40 кГц и повороте оптической оси жидкого кристалла на угол в несколько градусов, что приводило к уменьшению контрастного отношения до 1.3:1.*

**Ключевые слова:** жидкокристаллический электрооптический модулятор, сегнетоэлектрический жидкий кристалл, СО-лазер.

## 1. Введение

Когерентные источники излучения среднего ИК диапазона представляют большой интерес для широкого круга научных и технологических приложений. Такими источниками являются хорошо отработанные в техническом плане электроразрядные лазеры на окиси углерода (СО-лазеры). Из большого числа различных конструкций данных молекулярных лазеров наиболее компактными являются планарные установки с высокочастотной (ВЧ) накачкой [1]. ВЧ СО-лазеры могут работать как в непрерывном режиме генерации [2, 3], так и в импульсно-периодическом [4, 5]. Излучение ВЧ СО-лазеров применяется для обработки стекла и керамики [1], в производстве изделий микроэлектроники [6], для создания оптических волокон [7, 8], а также в производстве микрофлюидных систем [9, 10].

СО-лазер имеет наиболее широкий спектр генерации из всех газоразрядных лазеров как в непрерывном, так и в импульсном режиме генерации [11]. Он может работать на сотнях узких спектральных линий как основной полосы генерации от  $4.7 \text{ мкм}$  [11] до  $8.7 \text{ мкм}$  [12] с КПД до 50% [11], так и обертоновой ( $\lambda = 2.5\text{--}4.2 \text{ мкм}$ ) [13] с КПД до 16% [14]. Необходимо отметить, что режим модуляции добротности резонатора (МДР) СО-лазера позволяет получать наибольшее число линий генерации в одном микросекундном импульсе при пиковых мощностях до не-

скольких киловатт [15, 16]. Именно этот режим наиболее эффективен для расширения и обогащения спектров излучения ВЧ СО-лазеров за счет преобразования в нелинейных кристаллах (см., напр., обзор [17]). Однако если на данный момент режим МДР в ВЧ СО<sub>2</sub>-лазерах реализован за счет использования компактного акустооптического [18] или электрооптического модулятора [19], то для ВЧ СО-лазеров этот вопрос решен только с помощью внешнего оптического резонатора с вращающимся зеркалом [20, 21].

В связи с этим цель настоящей работы заключается в разработке малогабаритных электрооптических модуляторов среднего ИК диапазона с толщиной менее миллиметра, но при этом с большой световой апертурой (не менее  $2 \text{ см}^2$ ), позволяющих в микросекундном временном диапазоне изменять фазовый сдвиг на  $\pi/2$  (четвертьволновая пластинка) и на  $\pi$  (полуволновая пластинка) при килогерцевых частотах модуляции. Известно, что указанные параметры электрооптической модуляции обеспечиваются в видимом диапазоне спектра при использовании смектических С\* сегнетоэлектрических жидких кристаллов (СЖК) [22–24] в качестве рабочих сред модуляторов, но данные об электрооптике СЖК в среднем ИК диапазоне в известных нам литературных источниках отсутствуют. Восполнение указанного пробела с целью выбора сегнетоэлектрического жидкого кристалла (из разработанных ранее авторами) для электрооптики среднего ИК диапазона – одна из задач этой работы.

## 2. Жидкокристаллические ячейки для электрооптических модуляторов среднего ИК диапазона

Как известно, частота электрооптической модуляции всегда ограничена сверху диэлектрическими потерями, причиной которых являются токи переполяризации в ра-

А.В.Кузнецов, А.А.Жукович-Гордеева, Ю.М.Климачев, А.Ю.Козлов, М.В.Минченко, О.А.Рулев, Д.В.Синицын, Е.П.Пожидаев, А.А.Ионин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: klimachevum@lebedev.ru

А.В.Казначеев. Институт элементоорганических соединений им. А.Н.Несмеянова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 28

Поступила в редакцию 30 сентября 2024 г., после доработки – 11 ноября 2024 г.

бочей среде модулятора любого типа, что приводит к его разогреву, сопровождающемуся термическими неустойчивостями. Предельная частота устойчивой электрооптической модуляции определяется из решения стационарной тепловой задачи о распределении температуры  $T$  в структуре модулятора [25]. В то время как в работе [25] эта задача решена для излучения видимого диапазона, в настоящей работе она теоретически и экспериментально решена авторами для случая электрооптического модулятора среднего ИК диапазона на основе СЖК, что позволило обеспечить его термическую устойчивость и, соответственно, воспроизводимость и устойчивость параметров модуляции при частотах электрооптического отклика до 10 кГц.

### 2.1. Методика изготовления жидкокристаллических электрооптических ячеек и измерение их пропускания в среднем ИК диапазоне

Любой жидкокристаллический электрооптический модулятор состояния поляризации излучения представляет собой жидкокристаллическую ячейку (ЖКЯ), расположенную между поляризатором и анализатором. Механическая конструкция ЖКЯ состоит из двух плоских токопроводящих и прозрачных в заданном спектральном диапазоне подложек, плоскости которых параллельны одна другой, а расстояние  $d$  между ними задается калиброванными диэлектрическими прокладками (спейсерами), определяющими толщину слоя жидкого кристалла (ЖК) между подложками. В качестве подложек были выбраны пластины кремния размером  $24 \times 18$  мм при толщине 0.4 мм, прозрачные в среднем ИК диапазоне, а их поверхностное сопротивление составляло около  $15 \text{ кОм/см}^2$ . При сборке ЖКЯ использовались спейсеры двух типов: калиброванная тефлоновая пленка толщиной 10 мкм и калиброванные стеклянные шарики диаметром 18 мкм. Для формирования монокристаллической структуры СЖК в пространстве между подложками на поверхности кремниевых пластин наносились слои ориентирующего полимера – полиимида ПМДА-ОДА [26] толщиной около 40 нм, которые натирались батистом для придания анизотропии поверхности подложки, находящейся в контакте с жидким кристаллом.

Сборка ЖКЯ выполнялась в чистой комнате класса 1000. Физико-химические и технологические характеристики этого процесса, а также соответствующая контрольно-измерительная аппаратура детально описаны в работах [27, 28]. Склеивка кремниевых пластин после сборки ЖКЯ осуществлялась эпоксидным клеем. Величина зазора  $d$  между пластинами определялась по измеренной электрической емкости изготовленной структуры как плоского конденсатора.

Для сборки ЖКЯ использовались также подложки из  $\text{BaF}_2$ , прозрачные в видимом и среднем ИК диапазонах, что необходимо как для визуального контроля оптического качества слоя СЖК в ячейке, так и для измерения спектра пропускания ЖКЯ в ИК диапазоне. Однако диэлектрические пластины  $\text{BaF}_2$  нельзя было использовать в качестве подложек электрооптического модулятора, т. к. их поверхностное сопротивление крайне велико.

Зазор между подложками под действием капиллярных сил заполнялся сегнетоэлектрическим смектическим  $S^*$  жидким кристаллом СЖК-497 (название по внутренней номенклатуре ФИАНа), разработанным авторами

ранее; его химическая структура и молекулярное строение приведены в работе [28]. Выбор этого СЖК в качестве рабочей среды электрооптического модулятора обусловлен следующими факторами.

1. СЖК-497 имеет окно прозрачности в среднем ИК диапазоне в спектральном интервале 3.6–5.65 мкм, перекрывающее спектр излучения используемого в эксперименте широкополосного СО-лазера (5.1–5.6 мкм) (рис.1).

2. Этот СЖК – негеликоидальный сегнетоэлектрический жидкий кристалл [29], обеспечивающий возможность формирования одинакового во всем объеме ЖК пространственного положения оптической оси, т. е. оптически однородной структуры [27, 30]. Кроме того, именно в негеликоидальных СЖК могут (при определенных условиях) наблюдаться эффекты бистабильности и мультистабильности [31], позволяющие запоминать любое состояние поляризации света (или светопропускания, если ЖКЯ находится между скрещенными поляризаторами) после выключения управляющего напряжения.

3. Термодинамически устойчивая (энантиотропная) сегнетоэлектрическая смектическая  $S^*$ -фаза СЖК-497 находится в температурном интервале 3–63 °С [28], что удобно для практического использования в фотонных устройствах. При охлаждении этого СЖК наблюдается температурный гистерезис, благодаря которому температурный интервал существования фазы  $S^*$  расширяется до –12 °С.

4. Двулучепреломление  $\Delta n$  у СЖК-497 в области спектра излучения СО-лазера (рис.1), как выяснилось в результате проведенных в данной работе экспериментов, испытывает сильную аномальную дисперсию, изменяясь от 0.115 до 0.165, что близко к показателям двулучепреломления для видимой области спектра [32].

Двулучепреломление, как и в работе [32], вычислялось по измеренному пропусканию  $T_{LC}$  в области прозрачности слоя негеликоидального СЖК, расположенного между скрещенными поляризатором и анализатором. При этом использовалась известная формула кристаллооптики, которая для негеликоидальных СЖК имеет вид [33, 34]

$$T_{LC} = \sin^2(2(\beta + \alpha)) \cdot \sin^2(\pi \Delta n d / \lambda), \quad (1)$$

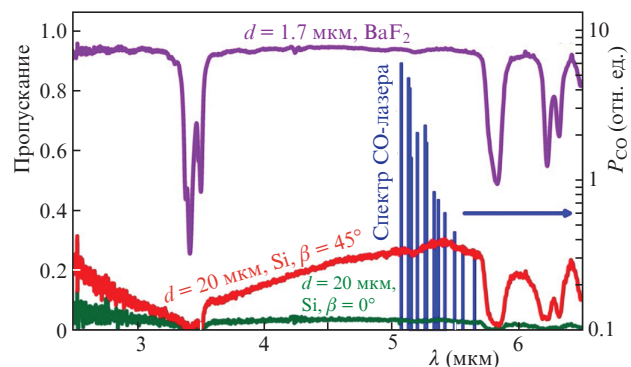


Рис.1. Спектр излучения непрерывного СО-лазера (показан синим цветом), спектр пропускания неполяризованного света ячейкой с подложками из  $\text{BaF}_2$ , заполненной СЖК-497 при толщине его слоя 1.7 мкм (фиолетовая кривая), а также спектры пропускания ЖКЯ с кремниевыми плоскопараллельными подложками, расположенной между скрещенными поляризатором и анализатором, при ориентации оптической оси СЖК-497 вдоль оси поляризатора ( $\beta = 0$ ) (зеленая кривая) и под углом  $\beta = 45^\circ$  к оси (красная кривая). Измерения пропускания выполнены на фурье-спектрометре АФ-3.

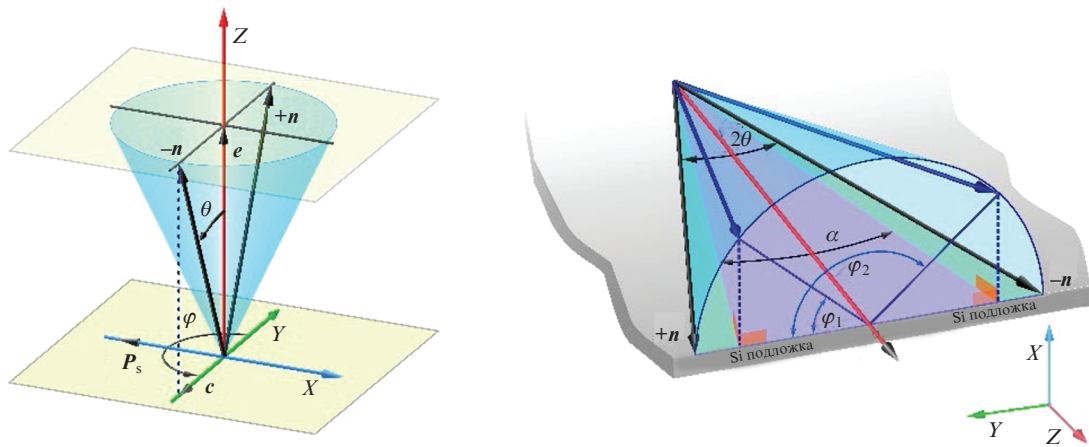


Рис.2. Взаимное расположение векторов: спонтанной поляризации  $P_s$ , директора  $n$ , нормали  $e$  к плоскости смектического слоя и проекции  $c$  директора на плоскость смектического слоя сегнетоэлектрической фазы  $C^*$  ( $X$  – полярная ось, ось  $Z$  – нормаль к плоскостям смектических слоев,  $\theta$  – угол наклона молекул в смектических слоях,  $\varphi$  – азимутальный угол в плоскости смектического слоя (плоскость  $XU$ ) [24, 35]), а также иллюстрация к определению угла  $\alpha$  в плоскости подложек ЖКЯ.

где  $\lambda$  – длина волны излучения, падающего на слой СЖК, а  $\beta$  – произвольный начальный угол между плоскостью поляризации падающего линейно поляризованного излучения и оптической осью СЖК в отсутствие приложенного к слою СЖК напряжения. Отметим, что ориентация оптической оси в случае негеликоидального СЖК совпадает с преимущественной ориентацией длинных молекулярных осей, обозначаемой единичным вектором  $n$ , называемым директором. Символом  $\alpha$  обозначена величина изменения (под действием приложенного напряжения) угла между плоскостью поляризации падающего излучения и проекцией директора  $n$  на плоскость подложек ЖКЯ, как показано на рис.2.

Как известно [22–24], в смектических  $C^*$  сегнетоэлектрических ЖК существует не только ориентационное упорядочение направлений длинных молекулярных осей вдоль направления  $n$ , но и трансляционное упорядочение: центры масс молекул самопроизвольно упорядочиваются в слоях, называемых смектическими, а эти слои ограничивают так называемые плоскости смектических слоев (плоскость  $XU$  на рис.2, слева). Плоскости смектических слоев, как и директор  $n$ , являются удобными и общепринятыми математическими абстракциями для теоретического описания структуры СЖК и переориентации молекул СЖК в электрическом поле. Толщина смектического слоя определяется как расстояние между двумя смектическими плоскостями, которое примерно равно длине молекул и составляет 2.5–3.5 нм, в зависимости от молекулярного строения СЖК и температуры. В целом, структура СЖК представляет собой последовательность мономолекулярных смектических слоев вдоль оси  $Z$ , плоскости которых (т.е. плоскости  $XU$ ) при использовании ориентирующего полимера – полиимида ПМДА-ОДА [30] – и при определенных в работе [30] значениях поверхностного потенциала ориентированы перпендикулярно подложкам ЖКЯ, как показано на рис.2, справа. При выполнении этого условия в каждом смектическом слое выполняется соотношение

$$\alpha = 2 \arctg(\tg \theta \cdot \cos \varphi_1), \quad (2)$$

где  $\theta$  – угол наклона директора и оптической оси СЖК в смектических слоях относительно нормали к плоскостям

смектических слоев;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – азимутальные углы ориентации директора (и оптической оси) в электрических полях  $+E$  и  $-E$  и под действием поверхностных потенциалов  $W_1$  и  $W_2$  соответственно. Формула (2) справедлива в силу симметрии задачи, когда  $\varphi_2 = \pi - \varphi_1$ .

Для негеликоидальных СЖК значения  $\theta$  и  $\varphi$  постоянны при фиксированной температуре во всем объеме жидкого кристалла при условии формирования монодоменного слоя СЖК в ЖКЯ, как в работе [27], что обеспечивает постоянство значения угла  $\alpha$  во всем объеме ЖК. Это дает возможность использовать соотношение (1), справедливое в монодоменном случае, для экспериментального определения  $\Delta n$  СЖК. Отмеченное обстоятельство было еще одним аргументом в пользу выбора негеликоидального СЖК-497 в качестве рабочей среды электрооптического модулятора.

## 2.2. Дисперсия двулучепреломления СЖК-497 в среднем ИК диапазоне

Для расчета двулучепреломления СЖК по формуле (1) и измеренным в области прозрачности спектральным зависимостям светопропускания ЖКЯ, расположенной между скрещенными поляризатором и анализатором (см. рис.1), необходимо исключить френелевское отражение на границах раздела «воздух – кремний» и «кремний – жидкий кристалл». Иначе говоря, требуется перенормировка спектра пропускания ЖКЯ на спектр пропускания слоя самого СЖК.

Коэффициент пропускания  $T_F$  излучения после прохождения каждой из четырех имеющихся в ЖКЯ границ раздела сред с разными показателями преломления при нормальном падении излучения определяется френелевским соотношением [36]

$$T_F = 4n_i n_j / (n_i + n_j)^2, \quad (3)$$

где  $n_i$  и  $n_j$  – показатели преломления пограничных сред, в нашем случае воздуха, кремния и жидкого кристалла. В среднем ИК диапазоне показатель преломления кремния равен 3.425, воздуха – 1.000, а для ЖК принимаем в расчет собственную оценку авторами значения показателя преломления  $n_o = 1.453$ . Эта оценка основана на сопо-



ставлении коэффициента пропускания  $T_F = 0.94$  пластины  $\text{BaF}_2$  при  $\lambda = 4.5$  мкм и коэффициента  $T_F$  ЖКЯ с подложками из  $\text{BaF}_2$ . У ЖКЯ коэффициент пропускания также равен 0.94 на той же самой длине волны, что следует из рис.1. Этот результат, в соответствии с формулой (3), может быть только в случае идеальной иммерсии, когда обыкновенный показатель преломления  $n_o$  жидкого кристалла равен показателю преломления  $n_{\text{BaF}_2} = 1.453 \pm 0.006$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 3.6\text{--}5.6$  мкм [37].

Расчет коэффициента  $T_F$  для ЖКЯ с кремниевыми подложками при последовательном использовании формулы (3) для каждой из границ раздела и при указанных выше значениях показателей преломления дает  $T_F \approx 0.31$ . В эксперименте максимальное значение  $T_F \approx 0.295$  для ЖКЯ с кремниевыми подложками, расположенной между скрещенными поляризаторами при  $\beta = 45^\circ$  и  $\alpha = 0^\circ$ , зафиксировано в спектральном интервале 5.3–5.45 мкм при  $d = 20$  мкм (красная кривая на рис.1). Таким образом, предполагая, что наблюдаемый максимум соответствует полуволновой пластинке, т.е.  $T_F \approx T_{LC}$  (см. формулу (1)), получаем в этом случае превышение расчетного значения  $T_F$  над измеренным всего на 5%, что можно объяснить погрешностями измерений, а также светорассеянием на имеющих место пространственных неоднородностях в слое СЖК-497. Некоторое уменьшение измеренного значения  $T_F$  по сравнению с расчетным может быть обусловлено частичной деполяризацией излучения при светорассеянии. Вклад этого процесса можно оценить по спектру пропускания при  $\beta = 0^\circ$  и  $\alpha = 0^\circ$ : для идеального монодомена  $T_F \approx T_{LC}$  и должно быть равно нулю, а в реальности  $T_F \approx 0.035$  (зеленая кривая на рис.1).

С учетом отмеченных погрешностей и полагая, что суммарные потери прошедшего через ЖКЯ излучения в области его прозрачности, связанные с френелевскими отражениями и деполяризацией, составляют 70.5 %, а максимум в спектре пропускания  $T_{LC}$  в спектральном интервале 5.3–5.45 мкм наблюдается при  $\Delta n d / \lambda \approx 1/2$ , восстановим спектр пропускания слоя СЖК-497 (представлен синей кривой на рис.3).

Дисперсия двулучепреломления  $\Delta n(\lambda)$ , вычисленная из спектральной зависимости светопропускания СЖК-497 в области прозрачности по формуле (1) при  $\beta = 45^\circ$  и

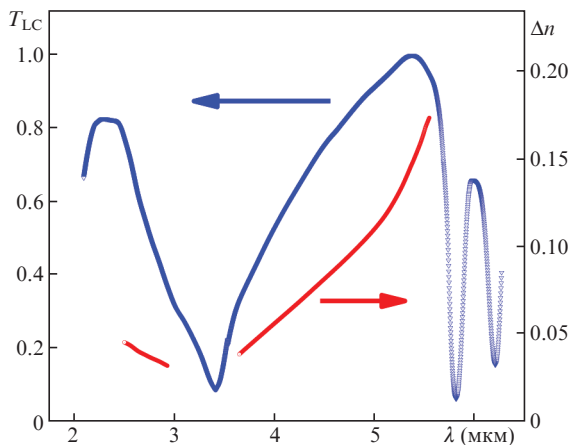


Рис.3. Спектр пропускания  $T_{LC}$  излучения среднего ИК диапазона слоем сегнетоэлектрического жидкого кристалла СЖК-497 толщиной 20 мкм, расположенным между скрещенными поляризатором и анализатором при  $\beta = 45^\circ$  и  $\alpha = 0^\circ$  (синяя кривая); дисперсия двулучепреломления  $\Delta n$  того же СЖК в среднем ИК диапазоне излучения (красная кривая).

$\alpha = 0^\circ$ , показана на рис.3 красной кривой. Отметим, что в области спектра излучения СО-лазера дисперсия является аномальной, а  $\Delta n \approx 0.115\text{--}0.165$ .

### 3. Нагревание модулятора при приложении к нему переменного напряжения

Нами рассмотрен процесс нагревания модулятора за счет диэлектрических потерь при приложении к нему знакопеременного напряжения. Здесь важно выяснить зависимость температуры модулятора от амплитуды и частоты прикладываемого напряжения, а также от толщины слоя СЖК.

#### 3.1. Теоретическая модель распределения температуры в электрооптической ЖКЯ

Авторы работы [38] решили задачу электрического нагрева нематического ЖК (параэлектрика), однако электрооптическая модуляция при этом не рассматривалась. Нами решена стационарная тепловая задача о распределении температуры  $T$  в электрооптической ЖКЯ (рис.4) при приложении переменного электрического напряжения.

Для расчета распределения температуры в ЖКЯ записывается уравнение теплопроводности в каждой среде, а его решения должны удовлетворять условиям сшивки на границах. Стационарное уравнение теплопроводности в слое СЖК имеет вид

$$\kappa_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + w = 0, \quad (4)$$

где  $w$  – удельная мощность тепловыделения;  $T_1$  – поле температуры в СЖК. Его решение определяется как

$$T_1 = -\frac{w}{2\kappa_1} x^2 + A_1 x + B_1. \quad (5)$$

В силу симметрии задачи  $A_1 = 0$ . Для кремния (область II) и воздуха (область III) можно записать стационарные уравнения теплопроводности:

$$\kappa_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} = 0, \quad \kappa_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} = 0, \quad (6)$$

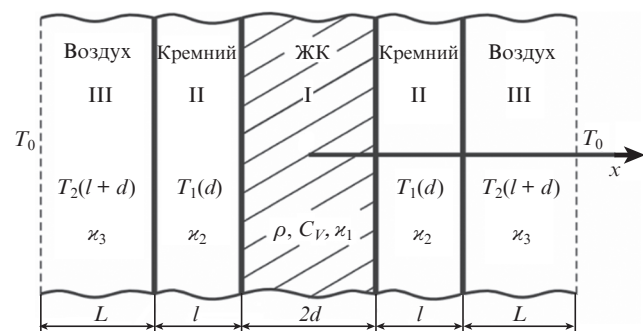


Рис.4. Схема ЖКЯ: I – слой СЖК; II – кремниевые пластины; III – воздух, окружающий ячейку;  $2d$  – толщина слоя СЖК;  $l$  – толщина кремния;  $L$  – характерная толщина окружающего воздуха, при которой температурные градиенты от нагретой ячейки становятся незначительными;  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$  – коэффициенты теплопроводности СЖК, кремния и воздуха соответственно;  $T_1(d)$  и  $T_2(l+d)$  – температуры на границе СЖК–кремний и кремний–воздух;  $T_0$  – температура окружающей среды.

где  $T_2$  и  $T_3$  – поле температур в кремнии и воздухе. Их решения имеют вид:

$$T_2 = A_2x + B_2, \quad T_3 = A_3x + B_3. \quad (7)$$

Для определения коэффициентов  $B_1, A_2, B_2, A_3, B_3$  используем условия сшивки функций (5) и (7) на границах раздела сред. Эти условия заключаются в непрерывности температуры и тепловых потоков на границах раздела сред, т. е.

$$\begin{cases} T_1|_{x=d} = T_2|_{x=d}, \\ \kappa_1 \partial T_1 / \partial x|_{x=d} = \kappa_2 \partial T_2 / \partial x|_{x=d}, \\ T_2|_{x=d+l} = T_3|_{x=d+l}, \\ \kappa_2 \partial T_2 / \partial x|_{x=d+l} = \kappa_3 \partial T_3 / \partial x|_{x=d+l}, \\ T_3|_{x=d+l+L} = T_0, \end{cases} \quad (8)$$

де  $L$  – характерная толщина окружающего воздуха, при которой температурные градиенты от нагретой ячейки становятся незначимыми. Подстановка функций (5) и (7) в систему уравнений (8) позволяет определить все перечисленные выше коэффициенты.

В наших экспериментах с помощью термопары измерялась установившаяся температура  $T_S$  на внешней поверхности кремния. Используя найденные значения коэффициентов, находим эту температуру:

$$T_S = T_2(d+l) = T_0 + \frac{w d L}{\kappa_3}. \quad (9)$$

Для работы модулятора важное значение имеет не температура на его границах, а температура  $T_C$  в центре СЖК-слоя ( $x=0$ ), которая имеет наибольшее значение и определяет качество его работы. Используя функцию (5) и найденные значения  $B_1, A_2, B_2, A_3, B_3$  находим связь температуры  $T_C$  с температурой на границе  $T_S$ :

$$T_C = 2T_S - T_0 + (T_S - T_0) \left[ 2 \frac{\kappa_3}{\kappa_2} \frac{l}{L} + \frac{\kappa_3}{\kappa_1} \frac{d}{L} \right], \quad (10)$$

где  $T_0$  – обозначенная на рис.4 температура окружающей ЖКЯ среды.

Из формулы (9) следует, что температура  $T_S$  должна увеличиваться с увеличением толщины  $d$  слоя СЖК по линейному закону. Это было экспериментально установлено в работе [25], где в качестве граничных поверхностей использовались стекла.

Для расчета зависимости температуры  $T_C$  от частоты поля  $f$  и его амплитуды  $E_0$  необходимо знать зависимость  $w$  от этих величин. В наших экспериментах к СЖК-слою прикладывалось знакопеременное двухуровневое ( $+E_0; -E_0$ ) и трехуровневое ( $+E_0; 0; -E_0$ ) прямоугольное напряжение (рис.5). Трехуровневые импульсы используются с целью уменьшения нагревания СЖК-модулятора при приложении к нему высокочастотного напряжения. Период прикладываемого напряжения  $\Delta t$  складывается из двух времен  $\Delta t_1$  – времени действия положительного и отрицательного импульсов, когда выделяется тепло, и двух времен  $\Delta t_2$  отсутствия напряжения:  $\Delta t = 2(\Delta t_1 + \Delta t_2)$ . Из этого выражения можно выразить время  $\Delta t_1$  через частоту  $f$  прикладываемого напряжения:  $\Delta t_1 = \frac{1}{2} f (1+k)$ , где  $k = \Delta t_2 / \Delta t_1$  – доля времени, в течение которого тепло не выделяется. Случай приложения двухуровневого пря-

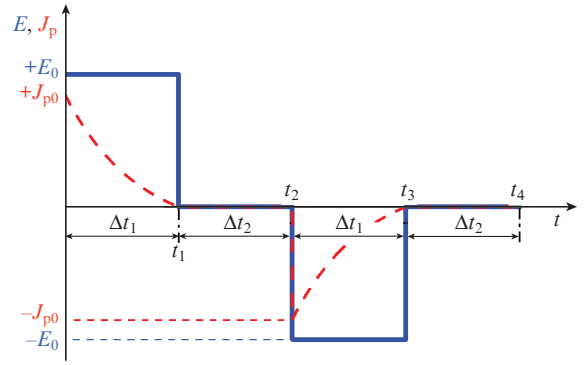


Рис.5. Форма одного периода импульса приложенного к СЖК знакопеременного трехуровневого прямоугольного электрического поля с амплитудой  $E_0$  (сплошная линия) и токов переполаризации СЖК с амплитудой  $J_{p0}$  (штриховые кривые). Двухуровневый импульс является частным случаем трехуровневого импульса при  $\Delta t_2 = 0$ .

моугольного напряжения соответствует  $k=0$ . В течение времени  $\Delta t_1$  в слое СЖК возникает ток переполаризации  $J_p$ , изменяющийся по экспоненциальному закону:  $J_p = J_{p0} \exp(-t/\tau)$ , где  $\tau$  – время релаксации тока. Тогда удельная мощность  $w$ , выделяющаяся в ЖК-слое за счет протекания тока переполаризации, имеет вид

$$w = 2f \int_0^{\Delta t_1} E_0 J_{p0} \exp(-t/\tau) dt = 2J_{p0} E_0 (\tau f) \times \{1 - \exp[-\frac{1}{2} (\tau f)(1+k)]\}, \quad (11)$$

где  $J_{p0}$  – начальная плотность тока переполаризации.

Так как  $J_{p0} \sim E_0$ , то  $w \sim E_0^2$ . Таким образом, измеренная температура  $T_S$  ЖКЯ должна зависеть квадратично от напряженности поля. Из формулы (11) следует, что введение трехуровневого импульса, как и следовало ожидать, приводит к уменьшению тепловыделения  $w$  и, соответственно,  $T_C$ . Зависимость  $T_S$  от квадрата напряженности поля была экспериментально установлена в работе [25], где в качестве граничных поверхностей использовались стекла, а в качестве управляющего напряжения – знакопеременное двухуровневое прямоугольное напряжение.

### 3.2. Результаты измерения температурных зависимостей параметров СЖК-497

Для измерения температурных зависимостей параметров (спонтанной поляризации  $P_s$ , вращательной вязкости  $\gamma_\varphi$ , угла наклона  $\theta$  директора относительно нормали к плоскости смектического слоя) СЖК-497 были использованы известные методики. Угол наклона  $\theta$  измерялся по положению оптической оси СЖК относительно плоскости поляризации зондирующего излучения в соответствии с работой [33]. Вращательная вязкость  $\gamma_\varphi$  определялась по методу, предложенному в работе [35], спонтанная поляризация  $P_s$  – по методу интегрирования токов переполаризации на внешнем калиброванном конденсаторе, обоснованному в работе [39]. Все перечисленные параметры СЖК необходимы для определения условий термически устойчивой электрооптической модуляции, т. е. для определения стационарной температуры  $T_C$  в центре слоя ЖК при заданных значениях частоты модуляции и величины фазового сдвига.

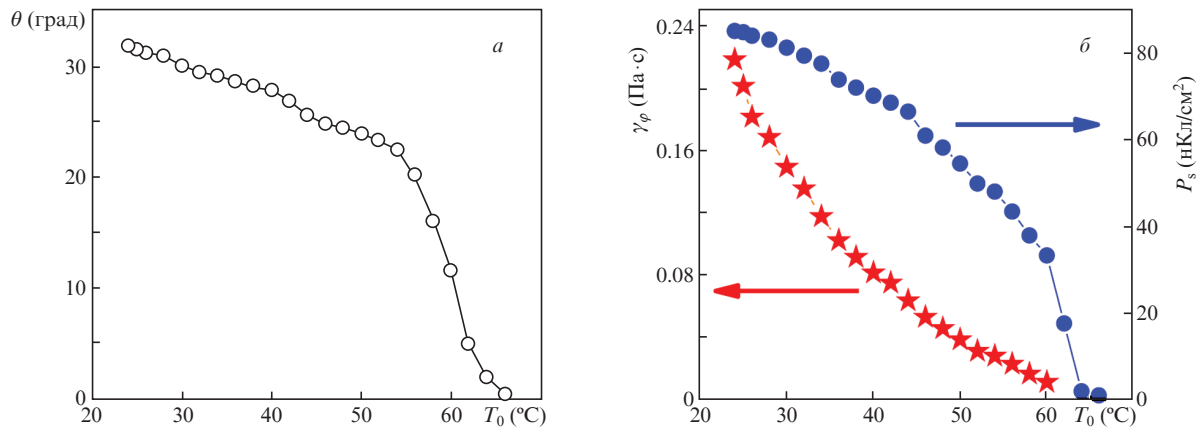


Рис.6. Зависимости угла наклона  $\theta$  директора относительно нормали к плоскости смектического слоя (а), вращательной вязкости  $\gamma_\varphi$  и спонтанной поляризации  $P_s$  (б) от температуры  $T_0$ , измеренные для СЖК-497 и  $f = 20$  Гц при использовании знакопеременного двухуровневого управляющего напряжения, прикладываемого к ЖКЯ. Ошибки измерения укладываются в размеры маркеров.

Температурные зависимости перечисленных выше параметров СЖК измерялись при низкой частоте ( $f = 10$ – $20$  Гц) приложенного к ЖКЯ управляющего напряжения, что позволяло полностью избежать разогрева ячейки токами переполаризации, как следует из соотношения (11). Жидкокристаллические ячейки располагались в специально сконструированной термокамере, температура внутри которой регулировалась с точностью  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , от  $-10^\circ\text{C}$  до  $120^\circ\text{C}$ , задавая путем внешнего нагрева температуру  $T_0$  слоя СЖК. При этом разогрев ЖКЯ из-за диэлектрических потерь не наблюдался вследствие низкой частоты  $f$  управляющего напряжения. Результаты измерений представлены на рис.6.

При повышении частоты управляющего напряжения до килогерцевой области ЖКЯ разогреваются вследствие диэлектрических потерь, объемная плотность энергии  $w$  которых возрастает при повышении частоты  $f$  в соответствии с соотношением (11). По этой причине температура  $T_C$  в центре ЖКЯ становится больше температуры  $T_0$  окружающей среды (рис.7).

Температура  $T_C$  в центре слоя СЖК определялась экспериментально путем сопоставления измеренной на частоте 20 Гц температурной зависимости спонтанной по-

ляризации  $P_s(T_0)$ , показанной на рис.6,б, с измеренной частотной зависимостью спонтанной поляризации  $P_s(f)$  при  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  (рис.7). Наблюдаемая в эксперименте зависимость  $P_s(f)$  является проявлением нагрева СЖК токами переполаризации, т. к. спонтанная поляризация, являющаяся термодинамическим параметром сегнетоэлектриков, не может зависеть от частоты  $f$ , а зависит только от температуры [40], до которой разогревается слой СЖК вследствие диэлектрических потерь в килогерцевом диапазоне частот. Поясним получение зависимости, приведенной на рис.7, следующими примерами. При  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  и  $f = 300$  Гц измеренное значение  $P_s = 85$  нКл/см<sup>2</sup>, как на рис.6 при  $f = 20$  Гц и  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ . Следовательно, диэлектрические потери при  $f = 300$  Гц пренебрежимо малы, т. е.  $T_C = T_0$  при  $f = 300$  Гц (первая точка слева на рис.7). При  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  и  $f = 1$  кГц измеренное значение  $P_s = 78$  нКл/см<sup>2</sup>, что соответствует температуре  $33^\circ\text{C}$  на рис.6,б, т. е. на частоте 1 кГц диэлектрические потери разогревают слой СЖК до  $T_C = 33^\circ\text{C}$  (шестая точка слева на рис.7). При  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  и  $f = 10$  кГц измеренное значение  $P_s = 48$  нКл/см<sup>2</sup>, что соответствует температуре  $54^\circ\text{C}$  на рис.6,б. Таким образом, при  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  и  $f = 10$  кГц диэлектрические потери разогревают слой СЖК до  $T_C = 54^\circ\text{C}$  (третья точка справа на рис.7).

Теоретический расчет зависимости  $T_C(f)$  (рис.7) выполнялся по формулам (9), (10) и (11) для случая  $k = 0$ . Коэффициенты теплопроводности для воздуха  $\kappa_3 = 0.0026$  Вт/(м·К) и для кремния  $\kappa_2 \approx 135$  Вт/(м·К) взяты из справочника [41] при температуре  $45^\circ\text{C}$ , т. к. эта температура соответствует примерно середине интервала между температурой фазового перехода из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу (рис.6) и температурой  $T_0$ , а коэффициенты  $\kappa_2$  и  $\kappa_3$  зависят от температуры, т. е. изменяются в процессе разогрева электрооптического модулятора токами переполаризации. Коэффициент  $\kappa_1$  для жидких кристаллов зависит не только от температуры, но и от ориентации молекул СЖК относительно подложки, а также от напряженности электрического поля [42]. Принимая во внимание эти обстоятельства, мы использовали для расчета зависимости  $T_C(f)$  среднее по результатам работы [42] значение  $\kappa_1 \approx 0.2$  Вт/(м·К). Использование средних значений коэффициентов  $\kappa$  вместо весьма трудоемкого учета температурных зависимостей этих коэффициентов объективно снижало точность сопоставления результатов расчета с данными эксперимента.

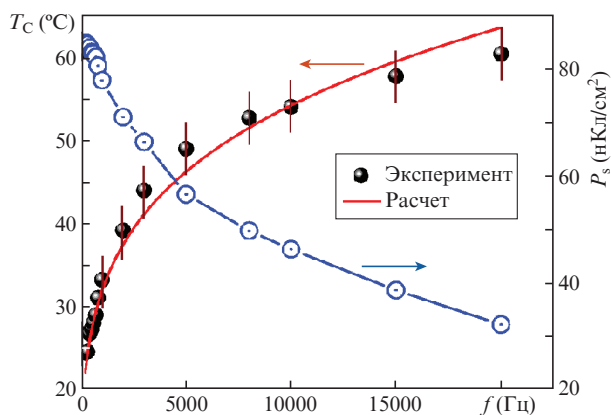


Рис.7. Зависимости температуры  $T_C$  в центре ЖК-ячейки от частоты приложенного напряжения: измеренная (точки) при  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ,  $E_0 = 7.5$  В/мкм,  $d = 10$  мкм и расчетная (сплошная линия), полученная на основании формул (9)–(11) при  $k = 0$ , а также измеренная зависимость  $P_s(f)$  для той же ячейки при температуре  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ . Подложки ячейки – кремний толщиной 0.4 мм. Ошибки измерения  $P_s(f)$  укладываются в размеры маркеров.

Тем не менее измеренные и расчетные значения  $T_C(f)$  совпадают с точностью  $\pm 5\%$  (рис.7), если в соотношениях (9) и (10)  $L \approx 2.5$  мм, т.е. температурные градиенты перестают быть значимыми на расстоянии около 2.5 мм от разогретых токами переполаризации подложек ЖКЯ. Правдоподобность значения параметра  $L$  подтверждена экспериментально: измеренная термопарой температура воздуха на расстоянии 3 мм от нагретой подложки такая же, как и в помещении.

Из рис.7 следует, что термическая устойчивость рассматриваемого модулятора уверенно обеспечивается при  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ , знакопеременном двухуровневом управляющем напряжении с частотой 10 кГц и  $E_0 = 7.5$  В/мкм. При этих условиях угол наклона  $\theta \approx 22.5^\circ$ , а стационарная температура слоя СЖК в модуляторе составляет  $54^\circ\text{C}$ , что на  $10^\circ$  ниже температуры перехода СЖК-497 в параэлектрическую фазу  $A^*$  [28].

## 4. Жидкокристаллические электрооптические модуляторы среднего ИК диапазона

### 4.1. Оптическая схема модуляции излучения СО-лазера

Оптическая схема экспериментов по модуляции излучения СО-лазера с помощью электрооптической ячейки на основе СЖК-497 приведена на рис.8. Эксперименты проводились с использованием непрерывного криогенного СО-лазера, возбуждаемого разрядом постоянного тока, конструкция которого подробно описана в [43]. Газовая смесь  $\text{He}:\text{N}_2:\text{CO}:\text{воздух} = 140:11:2:1$  медленно прокачивалась через лазер при давлении 7.7 Торр. Активная среда СО-лазера возбуждалась от блока питания ИЛГН-706. Напряжение на трубке поддерживалось около 9 кВ при токе 7 мА. Резонатор состоял из полностью отражающего сферического зеркала 1 (радиус кривизны  $R = 9$  м) и диэлектрического плоского выходного зеркала с коэффициентом пропускания 10% для длин волн основных переходов молекулы СО. Лазер использовался в режиме неселективной непрерывной генерации с мощностью до  $\sim 1$  Вт. Спектр излучения лазера, измеренный с помощью спектрографа ИКС-31, состоял из 15 линий в диапазоне 5.1–5.6 мкм (см. рис.1). Все результаты, представленные в разд.4.2, были получены с данными характеристиками лазера.

Для контроля мощности СО-лазера часть его излучения ( $\sim 5\%$ ) с помощью плоскопараллельной пластинки из  $\text{CaF}_2$  направлялась на сферическое зеркало 2 ( $R = 1$  м) и фокусировалась на измеритель мощности Орфир-3А. Оставшееся излучение направлялось на сферическое зеркало 3 ( $R = 1$  м), с помощью которого излучение фокуси-

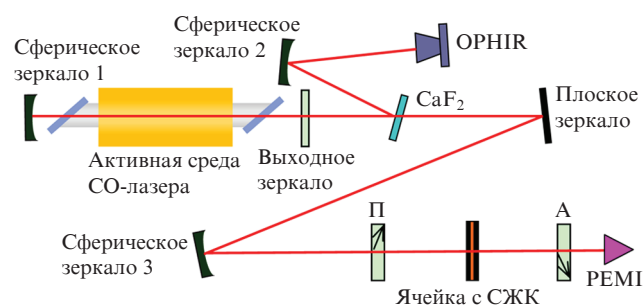


Рис.8. Оптическая схема для исследования электрооптической модуляции излучения СО-лазера.

ровалось на фотодетектор РЕМ1-10.6 (временное разрешение 1 нс). На его пути устанавливались скрещенные ИК поляризатор П и анализатор А, а между ними – электрооптическая ячейка на кремниевых подложках, между которыми находился слой СЖК. С помощью осциллографа Rigol DS1054Z регистрировались зависимости подаваемого на ячейку напряжения и сигнала с фотодетектора от времени.

### 4.2. Временные характеристики промодулированного излучения СО-лазера

Разработанный нами и используемый в настоящей работе СЖК-497 обеспечивает возможность бистабильной электрооптической модуляции излучения (при условии формирования технологическими методами двуосного поверхностного потенциала границы раздела жидкого кристалла и твердых подложек ячейки [30]). Под бистабильностью понимается сохранение ориентаций директора  $+n$  и  $-n$  (см. рис.2), а следовательно, и состояний поляризации прошедшего через слой СЖК излучения после выключения импульса управляющего напряжения. Для наблюдения и практического использования эффекта бистабильности необходимо прикладывать к электрооптическому модулятору трехуровневое прямоугольное напряжение [31]. На рис.9 представлены зависимости приложенного трехуровневого напряжения и оптического пропускания СЖК-ячейки, рассчитанного с учетом максимального пропускания ячейки при нулевом приложенном напряжении, от времени при частоте  $f = 1.2$  кГц. В приведенном примере длительность  $\Delta t_1$  импульсов управляющего напряжения составляет около 100 мкс, а временной интервал  $\Delta t_2$  между импульсами – около 300 мкс, в течение которых светопропускание ЖКЯ (и состояние поляризации излучения) не меняется, разогрева ЖКЯ не происходит, а тепло отводится, что позволяет минимизировать разогрев ЖКЯ токами переполаризации.

В приведенном примере ЖКЯ практически не нагревается (см. рис.7), ее рабочая температура составляет около  $25^\circ\text{C}$  при температуре окружающей среды  $23^\circ\text{C}$ , т.е. при бистабильном режиме электрооптической модуляции теплоотвод достаточно легко осуществляется благодаря временным интервалам между импульсами прило-

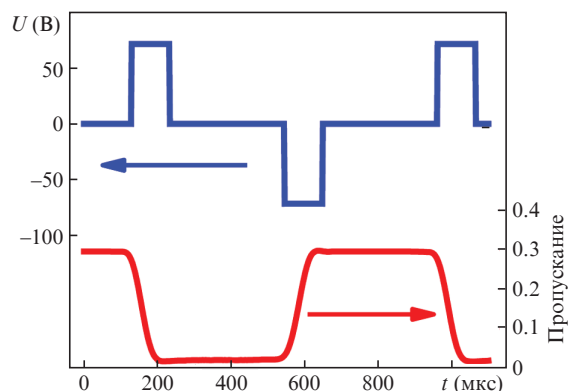


Рис.9. Зависимости от времени напряжения  $U$ , приложенного к электрооптической ЖКЯ, и пропускания модулятора излучения СО-лазера при  $\beta = 0$ . Амплитуда прикладываемого напряжения 72 В ( $E_0 = 3.6$  В/мкм), его частота 1.2 кГц. Толщина  $d$  слоя СЖК-497 в ЖКЯ 20 мкм. Время включения светопропускания  $\tau_{\text{он}} = 44$  мкс, время выключения  $\tau_{\text{оф}} = 40$  мкс.



женного напряжения. При  $25^\circ\text{C}$  угол наклона директора в смектических слоях  $\theta \approx 32^\circ$  (рис.6,а). Однако при бистабильной работе модулятора термодинамически равновесные значения углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  (см. рис.2), согласно работе [30], определяются параметрами двуосного поверхностного потенциала границ раздела слоя СЖК и подложек ячейки. Расчеты по методике [30] дают оценку  $\varphi_1 \approx 35^\circ$ , а  $\varphi_2 \approx 145^\circ$  для исследуемой ячейки. Следовательно, в соответствии с соотношением (2)  $\alpha \approx 44.8^\circ$ ; этот расчет находится в хорошем согласии с прямыми экспериментальными измерениями угла  $\alpha$ . Используя значения  $d = 20$  мкм и  $\Delta n = 0.131$  при  $\lambda = 5.25$  мкм (см. рис.3), рассчитана разность фаз обыкновенной и необыкновенной волн  $\Delta\Phi = 2\pi\Delta n d/\lambda \approx \pi$ . Следовательно, рассматриваемый электрооптический модулятор является полуволновой пластинкой (для длины волны  $\lambda = 5.25$  мкм), которая поворачивает плоскость поляризации падающего света, оставляя свет плоскополяризованным.

На рис.10 приведены зависимости приложенного знакопеременного двухуровневого напряжения и оптического пропускания ЖКЯ от времени при частоте напряжения  $f = 10$  кГц. Толщина  $d$  слоя СЖК-497 в ЖКЯ в данном случае равна 10 мкм. При этих условиях измеренная величина спонтанной поляризации составляет  $48$  нКл/см<sup>2</sup>, что, согласно температурной зависимости спонтанной поляризации  $P_s(T)$  (см. рис.6,б), соответствует температуре слоя жидкого кристалла  $54^\circ\text{C}$ . При этой температуре угол наклона директора в слоях  $\theta \approx 22.4^\circ$  (см. рис.6,а).

Под действием приложенного двухуровневого напряжения (см. рис.10) азимутальные углы ориентации директора (и оптической оси) негеликоидального СЖК-497 изменяются в электрическом поле между  $\varphi_1 = 0$  при  $+E_0$  и  $\varphi_2 = \pi$  при  $-E_0$ , как показано на рис.2, справа. В соответствии с соотношением (2) это означает, что в данном случае  $\alpha = 2\theta \approx \pi/2$ . Используя значения  $d = 10$  мкм,  $\Delta n \approx 0.131$  при  $\lambda = 5.25$  мкм (рис.6), оценим разность фаз  $\Delta\Phi$  между обыкновенной и необыкновенной волнами:  $\Delta\Phi = 2\pi\Delta n d/\lambda \approx 0.5\pi$ .

Подставив полученные значения  $\alpha$  и  $\Delta n$  в формулу (1), можно утверждать, что в данном случае при  $\beta = 0$  модулятор является электроуправляемой четвертьволновой пластинкой, которая преобразует плоскополяризованное излучение в циркулярно-поляризованное на длине волны  $\lambda = 5.25$  мкм (см. рис.3). Необходимо подчеркнуть, что при использовании приложенного двухуровневого на-

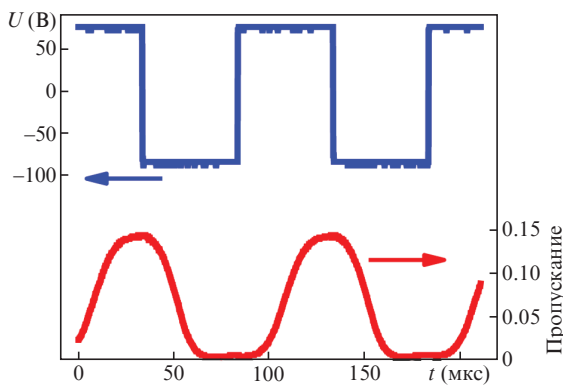


Рис.10. Зависимости от времени напряжения  $U$ , приложенного к ЖКЯ, и пропускания модулятора излучения СО-лазера при  $\beta = 0$ . Амплитуда прикладываемого напряжения 80 В ( $E_0 = 8$  В/мкм), его частота 10 кГц. Толщина СЖК-слоя 10 мкм. Время включения/выключения светопропускания  $\tau = 17 \pm 1$  мкс.

пряжения вывод модулятора в режим электроуправляемой четвертьволновой пластинки осуществляется за счет его контролируемого разогрева токами переполаризации. Таким образом, в зависимости от задачи возможно использование как двухуровневого (рис.10), так и трехуровневого (рис.9) знакопеременного напряжения для управления параметрами термически устойчивой электрооптической модуляции в среднем ИК диапазоне.

Максимальное значение светопропускания модулятора, расположенного между скрещенными поляризатором и анализатором при  $\beta = 0$ , рассчитанное по формулам (1) и (3) с учетом френелевских отражений, для случая идеальной четвертьволновой пластинки должно быть равно 0.155, а измеренное значение составляет 0.145 (см. рис.10). Отмеченное расхождение в 7% между теорией и экспериментом можно объяснить полихроматическим излучением, использованным в эксперименте (рис.1), а также ошибками эксперимента и имеющимися дефектами структуры СЖК в электрооптической ячейке. Вместе с тем плотность этих дефектов, которые нам не удалось визуализировать из-за отсутствия в нашем распоряжении соответствующего оборудования, вряд ли может быть высокой, т.к. измеренное по осциллограмме электрооптического отклика (рис.10) контрастное отношение достигает значения 25:1. Этот результат косвенно свидетельствует о приемлемом оптическом качестве слоя СЖК-497 в электрооптическом модуляторе среднего ИК диапазона.

Наименьшие значения времени включения/выключения  $\tau$  светопропускания в ЖКЯ с толщиной слоя СЖК-497  $d = 20$  мкм были получены при использовании знакопеременного двухуровневого напряжения (рис.11). В таком варианте удалось довести частоту модуляции  $f$  до 20 кГц, а амплитуду подаваемого на ячейку напряжения  $U_{\text{ор}}$  до 110 В ( $E_0 = 5.5$  В/мкм). При этом время включения/выключения светопропускания  $\tau = 4.0 \pm 0.6$  мкс.

Наименьшие значения времени включения/выключения  $\tau$  светопропускания в ЖКЯ с толщиной слоя СЖК-497  $d = 10$  мкм также были получены при использовании знакопеременного двухуровневого напряжения (рис.12). При этом удалось довести частоту модуляции  $f$  до 40 кГц, а амплитуду подаваемого на ячейку напряжения  $U_{\text{ор}}$  до 150 В ( $E_0 = 15$  В/мкм). В таком варианте получено время включения/выключения  $\tau = 1.4 \pm 0.1$  мкс.

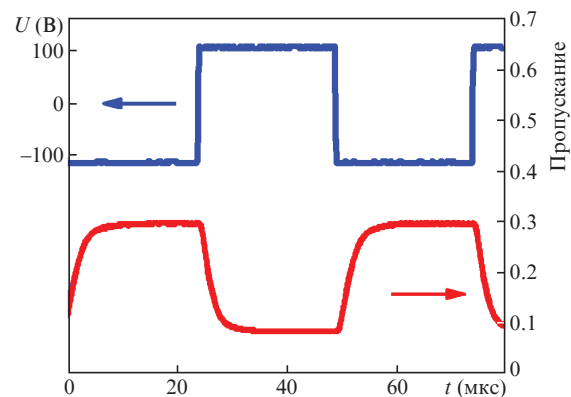


Рис.11. Зависимости от времени напряжения  $U$ , приложенного к электрооптической ЖКЯ, и пропускания модулятора излучения СО-лазера при  $\beta = 45^\circ$ . Амплитуда прикладываемого напряжения 110 В ( $E_0 = 5.5$  В/мкм), его частота 20 кГц. Толщина  $d$  слоя СЖК-497 в ЖКЯ 20 мкм. Время включения/выключения светопропускания  $\tau = 4.0 \pm 0.6$  мкс.



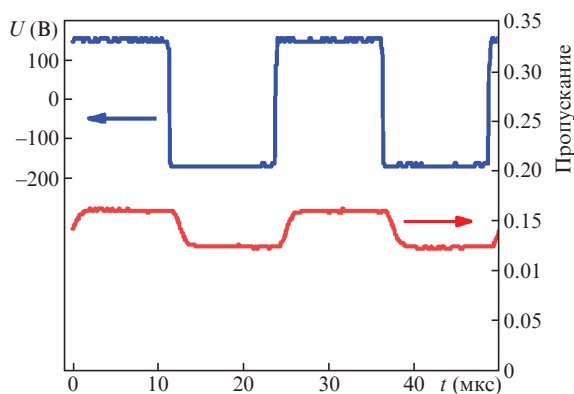


Рис.12. Зависимости от времени напряжения  $U$ , приложенного к электрооптической ЖКЯ, и пропускания модулятора излучения СО-лазера при  $\beta = 45^\circ$ . Амплитуда прикладываемого напряжения 150 В ( $E_0 = 15$  В/мкм), его частота 40 кГц. Толщина слоя СЖК-497 в ЖКЯ  $d = 10$  мкм. Время включения/выключения светопропускания  $\tau = 1.4 \pm 0.1$  мкс.

Важной характеристикой электрооптического модулятора является контрастное отношение, позволяющее оценить глубину модуляции, которое мы рассчитывали как отношение максимального пропускания модулятора излучения СО-лазера к минимальному (см. рис.9–12). Для ячейки толщиной 20 мкм контрастное отношение находилось в диапазоне от 15:1 до 25:1 при частотах от 2 до 7.5 кГц, а при увеличении частоты стало спадать, опустившись до 3.5:1 при 20 кГц. Для ячейки толщиной 10 мкм контрастное отношение составляло около 25:1 при частоте до 10 кГц, а при увеличении частоты практически линейно спадало, опустившись до 1.3:1 при 40 кГц. Более низкое контрастное отношение для ячейки толщиной 10 мкм мы связываем с тем, что без подачи напряжения ее светопропускание в диапазоне генерации СО-лазера отличалось в 3.5 раза при повороте ячейки на  $45^\circ$ , тогда как максимальное и минимальное светопропускание ячейки толщиной 20 мкм в тех же условиях отличалось в 10 раз.

## 5. Заключение

Разработаны широкоапертурные (световая апертура  $2.5 \text{ см}^2$ ) жидкокристаллические электрооптические модуляторы излучения среднего ИК диапазона, позволяющие в килогерцевом диапазоне частот управлять состоянием поляризации излучения лазера на окиси углерода в диапазоне длин волн 5.1–5.6 мкм. В качестве рабочей среды этих модуляторов выбран негеликоидальный сегнетоэлектрический жидкий кристалл СЖК-497 (название по внутренней номенклатуре ФИАНа), позволяющий обеспечить эффект бистабильности в электрооптических модуляторах.

Впервые измерена дисперсия двулучепреломления  $\Delta n(\lambda)$  сегнетоэлектрического жидкого кристалла в области среднего ИК диапазона длин волн. Показано, что в спектральной области излучения СО-лазера эта дисперсия является аномальной, а значения  $\Delta n$  в среднем ИК диапазоне сопоставимы с таковыми в видимой области спектра.

Для решения вопроса о минимизации нагрева модулятора в процессе его работы за счет диэлектрических потерь теоретически решена и экспериментально исследована стационарная тепловая задача. В результате, для

минимизации нагрева модулятора предложено использовать знакопеременное прямоугольное трехуровневое напряжение. Это стало возможным благодаря эффекту бистабильности в электрооптических модуляторах на основе СЖК-497. Кроме того, определены дополнительные возможности и ограничения на термическую стабильность, возникающие при использовании знакопеременного двухуровневого прямоугольного управляющего напряжения.

Показано, что использование СЖК в качестве электрооптической среды позволяет обеспечить термически устойчивую электрооптическую модуляцию излучения СО-лазера с частотой от 1 до 10 кГц при контрастном отношении от 15:1 до 25:1. При этом реализуются режимы электроуправляемых полуволновой и четвертьволновой пластинок с временами переключения состояний поляризации излучения от 17 до 44 мкс, а также возможность запоминания полученных состояний поляризации после выключения управляющего напряжения.

Наименьшие значения времени включения/выключения модулятора были получены при использовании знакопеременного двухуровневого напряжения. Для ЖКЯ толщиной  $d = 20$  мкм они составили  $\sim 4.0 \pm 0.6$  мкс при частоте модуляции 20 кГц, а для ЖКЯ толщиной  $d = 10$  мкм – около  $1.4 \pm 0.1$  мкс при частоте модуляции 40 кГц.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФИАН – FFMR-2024-0009 –Тема 2 – Фундаментальные проблемы физики лазерных, плазменных, электромагнитных и оптоэлектронных процессов для развития фотоники, лазерного термоядерного синтеза, ускорения заряженных частиц, информационных и биомедицинских технологий (подпункт – разработка лазерных систем среднего и дальнего ИК диапазонов на основе молекулярных газовых лазеров и методов нелинейной оптики) и Государственного задания ИНЭОС РАН № 075-00277-24-00 Министерства науки и высшего образования РФ.

1. Shi C., Ermold M., Oulundsen G., Newman L. *Proc. SPIE*, **10911**, 109110M (2019).
2. Mineev A.P., Nefedov S.M., Pashinin P.P., et al. *Proc. SPIE*, **7994**, 799402 (2011).
3. Игнатов Н.А., Огарь М.А., Минеев А.П., Нефёдов С.М. *Ученые современные радиоэлектроники*, № 2, 145 (2016) [*J. Achievements of Modern Radioelectronics*, (2), 145 (2016)].
4. Ionin A.A., Ionin M.V., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Y.M., Kozlov A.Yu., Rulev O.A., Sinityn D.V. *Opt. Quantum Electron.*, **55**, 763 (2023).
5. Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Yu., Rulev O.A., Sinityn D.V., Ionin M.V. *Infrared Phys. Technol.*, **120**, 103921 (2022).
6. Rosenthal P., Müller D., Oulundsen G. (2019); <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14221544/co-lasers-benefit-via-drilling-and-wafer-debonding>.
7. Oriekhov T., Harvey C.M., Mühlberger K., Fokine M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **38**, 130 (2021).
8. Harvey C.M., Mühlberger K., Oriekhov T., Maniewski P., Fokine M. *J. Opt. Soc. Am. B*, **38**, 122 (2021).
9. Ionin A.A., Ionin M.V., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Rulev O.A., Sinityn D.V. *Infrared Phys. Technol.*, **133**, 104842 (2023).
10. Ионин А.А., Ионин М.В., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Ситин Д.В., Рулев О.А. *Изв. вузов. Приборостроение*, **66**, 789 (2023) [*J. of Instrument Engineering*, **66**, 789 (2023)].
11. Ionin A., in *Gas Lasers*. M.Endo, R.F. Walter (Eds) (Boca Raton: CRC Press, 2007, p. 201).
12. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., Kozlov A.Y. *Opt. Lett.*, **42**, 498 (2017).
13. Ionin A.A., Kurnosov A.K., Napartovich A.P., Seleznev L.V. *Laser Phys.*, **20**, 144 (2010).

14. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Курносов А.К., Напартович А.П., Рулев О.А., Селезнев Л.В., Синецын Д.В., Хагер Г., Шнырев С.Л. *Квантовая электроника*, **36**, 1153 (2006) [*Quantum Electron.*, **36**, 1153 (2006)].
15. Puerta J., Herrmann W., Bourauel G., Urban W. *Appl. Phys.*, **19**, 439 (1979).
16. Андреев Ю.М., Ионин А.А., Киняевский И.О., Климачёв Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Ланский Г.В., Шайдуко А.В. *Квантовая электроника*, **43**, 139 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 139 (2013)].
17. Ионин А.А., Киняевский И.О., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Сагитова А.М., Селезнев Л.В., Синецын Д.В., Рулев О.А. *ЖПС*, **89**, 443 (2022) [*J. Appl. Spectrosc.*, **89**, 613 (2022)].
18. [https://www.coherent.com/content/dam/coherent/site/en/resources/datasheet/lasers/COHR\\_DiamondCx-10LQS\\_DS\\_0118\\_3.pdf](https://www.coherent.com/content/dam/coherent/site/en/resources/datasheet/lasers/COHR_DiamondCx-10LQS_DS_0118_3.pdf).
19. Tian Zh., Hussein B., Wang Q. *Opt. Eng.*, **44**, 024202 (2005).
20. Ionin A.A., Kochetkov Yu.V., Kozlov A.Yu., Mokrousova D.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., Zemtsov D.S. *Laser Phys. Lett.*, **14**, 055001 (2017).
21. Ionin A.A., Kinyavskiy I.O., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Rulev O.A., Sagitova A.M., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. *Appl. Phys. B*, **124**, 173 (2018).
22. Meyer R.B., Libert L., Strzelecki L., Keller P.J. *Phys. Lett.*, **36**, L-69 (1975).
23. Береснев Л.А., Блинов Л.М. *УФН*, **143**, 391 (1984) [*Phys. Usp.*, **27**, 492 (1984)].
24. Pozhidaev E.P., Torgova S.I., Barbashov V.A. *J. Mol. Liq.*, **367**, 120493 (2022).
25. Пожидаев Е.П., Кузнецов А.В., Казначеев А.В., Торгова С.И., Ткаченко Т.П. *Жидкие кристаллы и их практическое использование*, **23**, 94 (2023) [*Liquid Crystals and their Application*, **23**, 94 (2023)].
26. Zhukov A.A., Pozhidaev E.P., Bakulin A.A., Babaevskii P.G. *Crystallogr. Rep.*, **51**, 680 (2006).
27. Кузнецов А.В., Жукович-Гордеева А.А., Смирнов Н.А., Пожидаев Е.П. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **50** (5), 3 (2023) [*Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **50** (5), 159 (2023)].
28. Tkachenko T.P., Zhukov A.A., Torgova S.I., Pozhidaev E.P. *Crystallogr. Rep.*, **68**, 1222 (2023).
29. Береснев Л.А., Байкалов В.А., Блинов Л.М., Пожидаев Е.П., Пурванецкас Г.В. *Письма в ЖЭТФ*, **33**, 553 (1981) [*JETP Lett.*, **33**, 536 (1981)].
30. Kaznacheev A., Pozhidaev E., Rudyk V., Emelyanenko A.V., Khokhlov A. *Phys. Rev. E*, **97**, 042703 (2018).
31. Pozhidaev E.P., Chigrinov V.G. *Crystallogr. Rep.*, **51**, 1030 (2006).
32. Pozhidaev E., Torgova S., Barbashov V., Kesaev V., Laviano F., Strigazzi A. *Liq. Cryst.*, **46** (6), 941 (2018).
33. Островский Б.И., Чигринов В.Г. *Кристаллография*, **25**, 322 (1980).
34. Xue J.-Z., Handshy M.A., Clark N.A. *Ferroelectrics*, **73**, 305 (1987).
35. Пожидаев Е.П., Осипов М.А., Чигринов В.Г., Байкалов В.А., Блинов Л.М., Береснев Л.А. *ЖЭТФ*, **94**, 125 (1988) [*JETP*, **67**, 283 (1988)].
36. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. *Физическая оптика: Учебник*, 2-е изд. (М.: Изд-во МГУ, Наука, 2004).
37. <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=BaF2&page=Li>.
38. Yin Y., Shiyanovskii S.V., Lavrentovich O.D. *J. Appl. Phys.*, **100**, 024906 (2006).
39. Panov V., Vij J.K., Shtykov N.M. *Liq. Cryst.*, **28**, 615 (2001).
40. Пикин С.А. *Структурные превращения в жидких кристаллах* (М.: Наука, 1981, с. 336).
41. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. *Теплофизические свойства компонентов горючих систем* (М.: НПО Информ ТЭИ, 1993).
42. Ahlers G., Cannell D.S., Berge L.I., Sakurai S. *Phys. Rev. E*, **49**, 545 (1994).
43. Vetoshkin S., Ionin A., Klimachev Yu., Kotkov A., Kozlov A., Rulev O., Seleznev L., Sinitsyn D. *J. Russ. Laser Res.*, **27**, 33 (2006).