

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 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 мкм [11] до 8.7 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 СО₂-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 см^2), позволяющих в микросекундном временном диапазоне изменять фазовый сдвиг на $\pi/2$ (четвертьволновая пластинка) и на π (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 24×18 мм при толщине 0.4 мм, прозрачные в среднем ИК диапазоне, а их поверхностное сопротивление составляло около 15 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]. Склеивание кремниевых пластин после сборки ЖКЯ осуществлялось эпоксидным клеем. Величина зазора d между пластинами определялась по измеренной электрической емкости изготовленной структуры как плоского конденсатора.

Для сборки ЖКЯ использовались также подложки из 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 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 поляридами) 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 Δn 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]

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

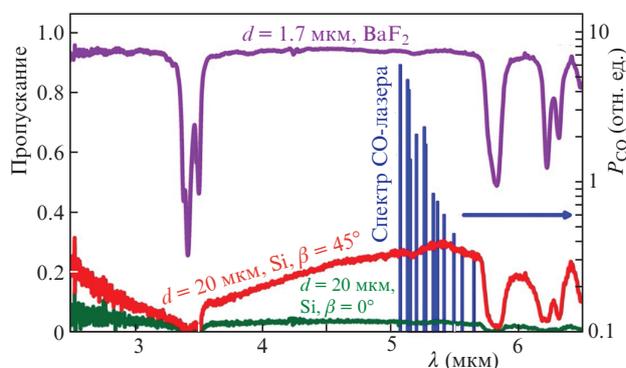


Рис.1. Спектр излучения непрерывного СО-лазера (показан синим цветом), спектр пропускания неполяризованного света ячейкой с подложками из BaF_2 , заполненной СЖК-497 при толщине его слоя 1.7 мкм (фиолетовая кривая), а также спектры пропускания ЖКЯ с кремниевыми плоскопараллельными подложками, расположенной 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.

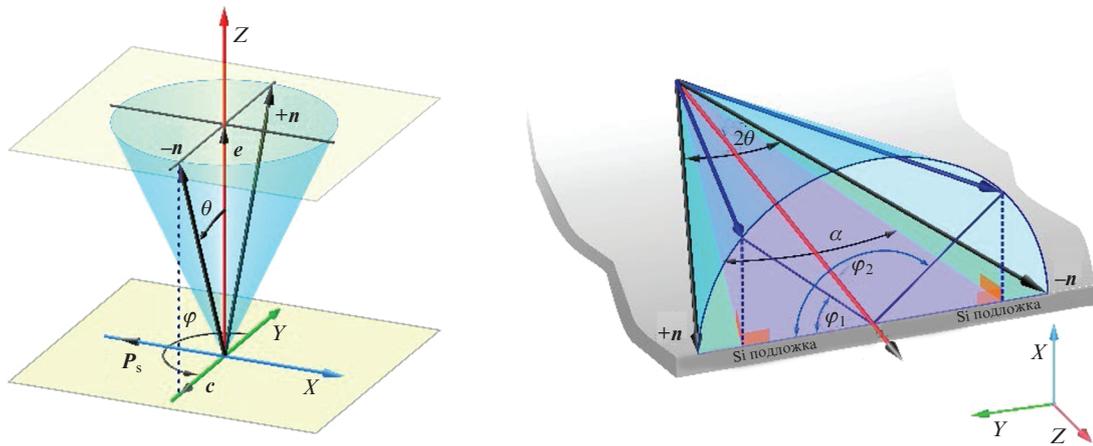


Рис.2. Взаимное расположение векторов: спонтанной поляризации P_s , директора n , нормали e к плоскости смектического слоя и проекции c директора на плоскость смектического слоя сегнетоэлектрической фазы C^* (X – полярная ось, ось Z – нормаль к плоскостям смектических слоев, θ – угол наклона молекул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

где λ – длина волны излучения, падающего на слой СЖК, а β – 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 α 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 XY 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 XY) 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

$$\alpha = 2\arctg(\tg\theta \cdot \cos\varphi_1), \tag{2}$$

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

смектических слоев; φ_1 и φ_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 θ и φ 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 α во всем объеме ЖК. Это дает возможность использовать соотношение (1), справедливое в монодоменном случае, для экспериментального определения Δn 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 зависимость 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]

$$T_F = 4n_i n_j / (n_i + n_j)^2, \tag{3}$$

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 сопоставлении

ставлении коэффициента пропускания $T_F = 0.94$ пластины ВаF₂ при $\lambda = 4.5$ мкм и коэффициента T_F ЖКЯ с подложками из ВаF₂. 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 $n_{\text{ВаF}_2} = 1.453 \pm 0.006$ в диапазоне длин волн $\lambda = 3.6-5.6$ 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

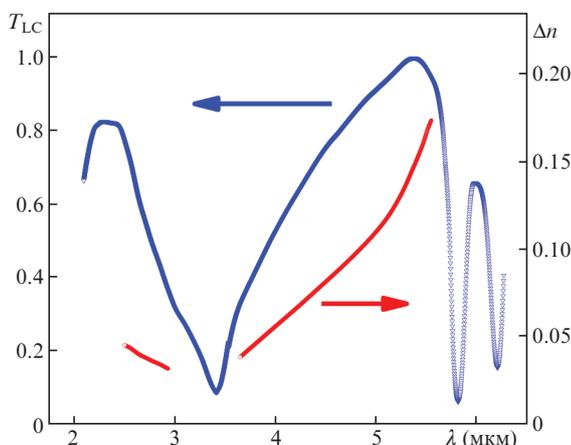


Рис.3. Спектр пропускания T_{LC} излучения среднего ИК диапазона слоем сегнетоэлектрического жидкого кристалла СЖК-497 толщиной 20 мкм, расположенным между скрещенными поляризатором и анализатором при $\beta = 45^\circ$ и $\alpha = 0^\circ$ (синяя кривая); дисперсия двулучепреломления Δn того же СЖК 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 $\Delta n \approx 0.115-0.165$.

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

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

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

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

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

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

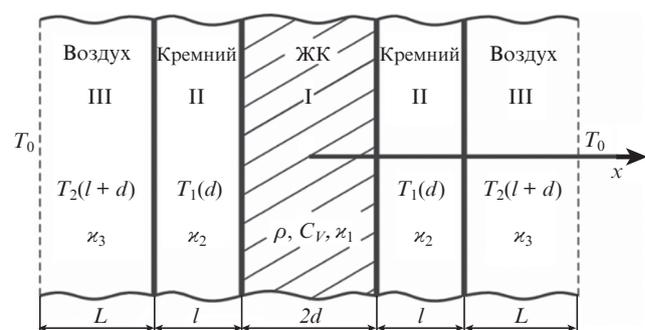


Рис.4. Схема ЖКЯ: I – слой СЖК; II – кремниевые пластины; III – воздух, окружающий ячейку; $2d$ – толщина слоя СЖК; l – толщина кремния; L – характерная толщина окружающего воздуха, при которой температурные градиенты от нагретой ячейки становятся незначимыми; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ – коэффициенты 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 Δt складывается из двух времен Δt_1 – времени действия положительного и отрицательного импульсов, когда выделяется тепло, и двух времен Δt_2 отсутствия напряжения: $\Delta t = 2(\Delta t_1 + \Delta t_2)$. Из этого выражения можно выразить время Δt_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-

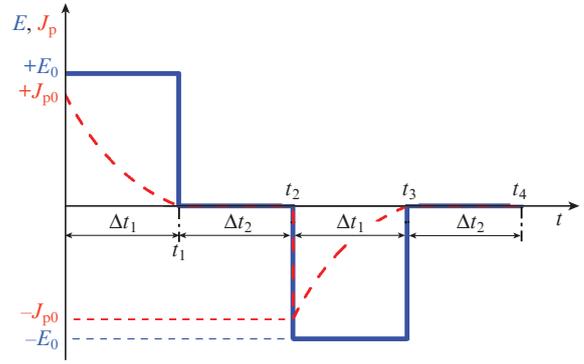


Рис.5. Форма одного периода импульса приложенного к СЖК знакопеременного трехуровневого прямоугольного электрического поля с амплитудой E_0 (сплошная линия) и токов переполаризации СЖК с амплитудой J_{p0} (штриховые кривые). Двухуровневый импульс является частным случаем трехуровневого импульса при $\Delta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

моугольного напряжения соответствует $k=0$. В течение времени Δt_1 в слое СЖК возникает ток переполаризации J_p , изменяющийся по экспоненциальному закону: $J_p = J_{p0} \exp(-t/\tau)$, где τ – время релаксации тока. Тогда удельная мощность w , выделяющаяся в ЖК-слое за счет протекания тока переполаризации, имеет вид

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

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 γ_φ , угла наклона θ директора относительно нормали к плоскости смектического слоя) СЖК-497 были использованы известные методики. Угол наклона θ измерялся по положению оптической оси СЖК относительно плоскости поляризации зондирующего излучения в соответствии с работой [33]. Вращательная вязкость γ_φ 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.

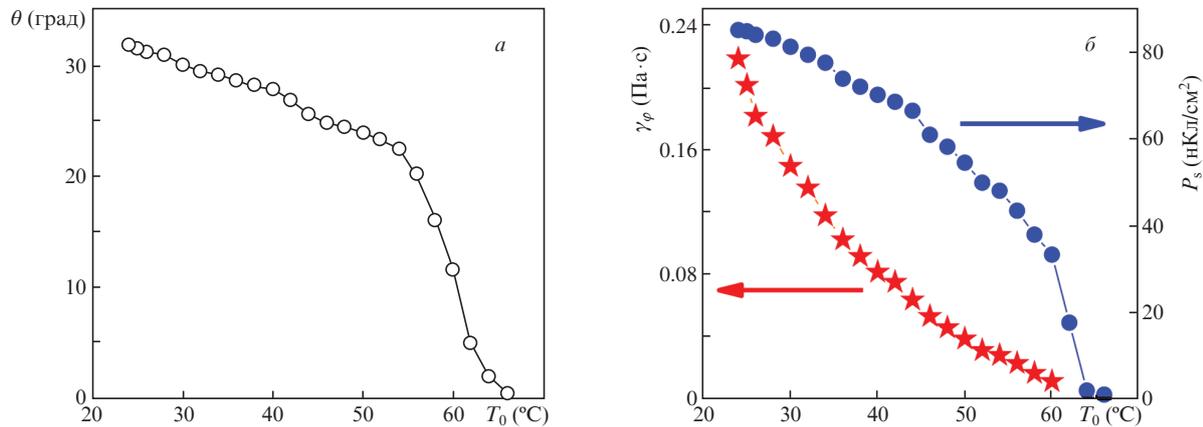


Рис.6. Зависимости угла наклона θ директора относительно нормали к плоскости смектического слоя (а), вращательной вязкости γ_φ и спонтанной поляризации P_s (б) от температуры T_0 , измеренные для СЖК-497 и $f = 20$ Гц при использовании знакопеременного двухуровневого управляющего напряжения, прикладываемого 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 ± 0.1 °C, от -10 °C до 120 °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 $T_0 = 25$ °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 $T_0 = 25$ °C и $f = 300$ Гц измеренное значение $P_s = 85$ нКл/см², как на рис.6 при $f = 20$ Гц и $T_0 = 25$ °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 $T_0 = 25$ °C и $f = 1$ кГц измеренное значение $P_s = 78$ нКл/см², что соответствует температуре 33 °C на рис.6,б, т. е. на частоте 1 кГц диэлектрические потери разогревают слой СЖК до $T_C = 33$ °C (шестая точка слева на рис.7). При $T_0 = 25$ °C и $f = 10$ кГц измеренное значение $P_s = 48$ нКл/см², что соответствует температуре 54 °C на рис.6,б. Таким образом, при $T_0 = 25$ °C и $f = 10$ кГц диэлектрические потери разогревают слой СЖК до $T_C = 54$ °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 °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 κ_2 и κ_3 зависят от температуры, т. е. изменяются в процессе разогрева электрооптического модулятора токами переполаризации. Коэффициент κ_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 κ вместо весьма трудоемкого учета температурных зависимостей этих коэффициентов объективно снижало точность сопоставления результатов расчета с данными эксперимента.

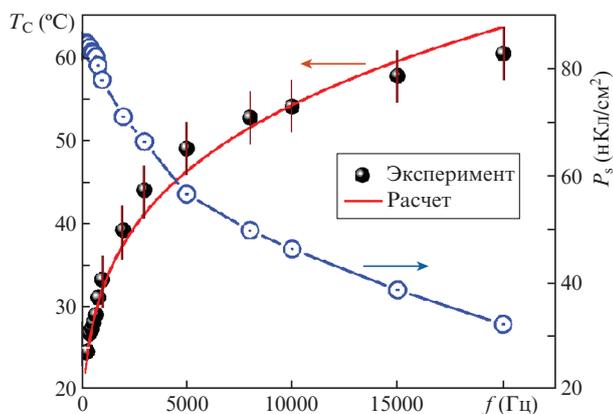


Рис.7. Зависимости температуры T_C в центре ЖК-ячейки от частоты приложенного напряжения: измеренная (точки) при $T_0 = 25$ °C, $E_0 = 7.5$ В/мкм, $d = 10$ мкм и расчетная (сплошная линия), полученная на основании формул (9)–(11) при $k = 0$, а также измеренная зависимость $P_s(f)$ для той же ячейки при температуре $T_0 = 25$ °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°C , что на 10° 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 ~ 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 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-

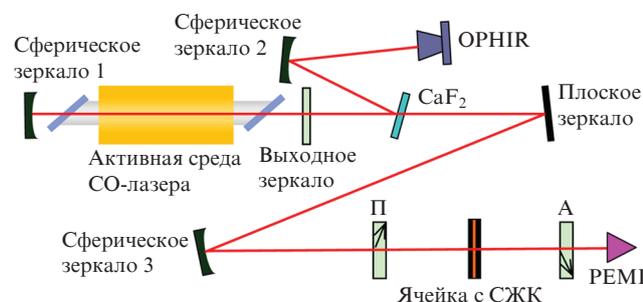


Рис.8. Оптическая схема для исследования электрооптической модуляции излучения СО-лазера.

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 Δt_1 импульсов управляющего напряжения составляет около 100 мкс, а временной интервал Δt_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°C при температуре окружающей среды 23°C , т.е. при бистабильном режиме электрооптической модуляции теплоотвод достаточно легко осуществляется благодаря временным интервалам между импульсами прило-

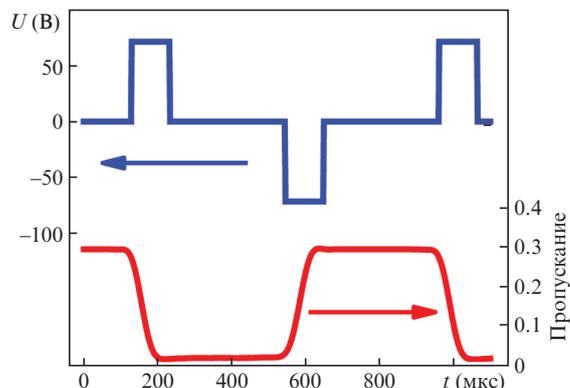


Рис.9. Зависимости от времени напряжения U , приложенного к электрооптической ЖКЯ, и пропускания модулятора излучения СО-лазера при $\beta = 0$. Амплитуда прикладываемого напряжения 72 В ($E_0 = 3.6$ В/мкм), его частота 1.2 кГц. Толщина d слоя СЖК-497 в ЖКЯ 20 мкм. Время включения светопропускания $\tau_{\text{он}}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

женного напряжения. При 25°C угол наклона директора в смектических слоях $\theta \approx 32^\circ$ (рис.6,а). Однако при бистабильной работе модулятора термодинамически равновесные значения углов φ_1 и φ_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 α . 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/см², что, согласно температурной зависимости спонтанной поляризации $P_s(T)$ (см. рис.6,б), соответствует температуре слоя жидкого кристалла 54°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 α и Δn 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-

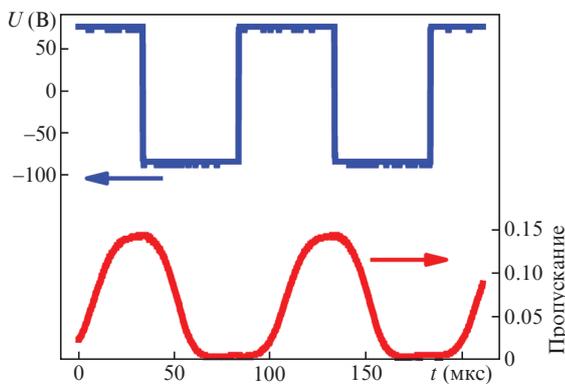


Рис.10. Зависимости от времени напряжения U , приложенного к ЖКЯ, и пропускания модулятора излучения СО-лазера при $\beta = 0$. Амплитуда прикладываемого напряжения 80 В ($E_0 = 8$ В/мкм), его частота 10 кГц. Толщина СЖК-слоя 10 мкм. Время включения/выключения светопропускания $\tau = 17 \pm 1$ мкс.

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 τ 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 $U_{ор}$ 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 τ 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 $U_{ор}$ до 150 В ($E_0 = 15$ В/мкм). В таком варианте получено время включения/выключения $\tau = 1.4 \pm 0.1$ мкс.

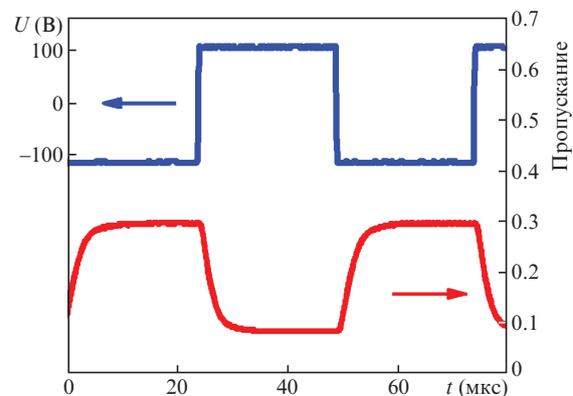


Рис.11. Зависимости от времени напряжения U , приложенного к электрооптической ЖКЯ, и пропускания модулятора излучения СО-лазера при $\beta = 45^\circ$. Амплитуда прикладываемого напряжения 110 В ($E_0 = 5.5$ В/мкм), его частота 20 кГц. Толщина d слоя СЖК-497 в ЖКЯ 20 мкм. Время включения/выключения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

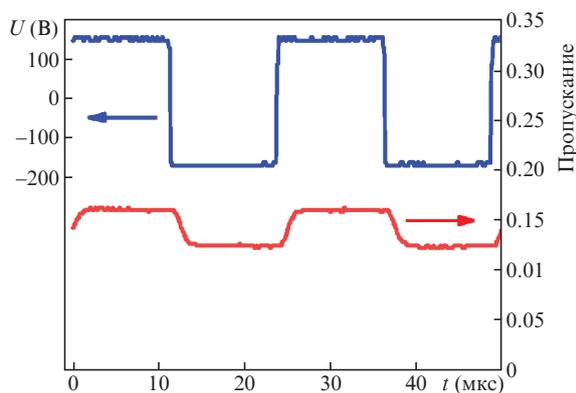


Рис.12. Зависимости от времени напряжения U , приложенного к электрооптической ЖКЯ, и пропускания модулятора излучения СО-лазера при $\beta = 45^\circ$. Амплитуда прикладываемого напряжения 150 В ($E_0 = 15$ В/мкм), его частота 40 кГц. Толщина слоя СЖК-497 в ЖКЯ $d = 10$ мкм. Время включения/выключения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