

Использование жидкокристаллического дисплея в качестве спектрального селектора в спектрометрах видимого диапазона

© Гопалкришна Хегд

Отделение космической техники Научно-исследовательского института Индии
560012 Бангалор, Индия
e-mail: hegopal@aero.iisc.ernet.in

(Поступило в Редакцию 22 сентября 2008 г.)

Экспериментально исследованы поляризационные свойства нематического жидкокристаллического дисплея со скрученной ориентацией молекул (СНЖКД) с целью его использования в качестве селектора длин волн. Излучаемый светодиодом белый свет разлагался на составляющие его длины волн пропорционально приложенному к СНЖКД напряжению с разрешением 2–5 nm. Показано, что СНЖКД может найти применение в качестве селектора длин волн в спектрометре видимого диапазона. Предложена простая и недорогая модель спектрометра на основе светодиода и СНЖКД.

Введение

Хорошо известно, что жидкокристаллические дисплеи (ЖКД) широко употребляются в портативных компьютерах, цифровых часах, микроволновых печах, плеерах на компакт-дисках и в электронных устройствах другого назначения. Пространственные жидкокристаллические (ЖК) модуляторы света обычно используются при промышленном изготовлении проекторов. Работа таких устройств основана на принципе изменения состояния поляризации падающего света с помощью поступающего от компьютера управляющего напряжения. ЖКД получили большое распространение благодаря своим несомненным преимуществам над другими техническими средствами индикации. Они тоньше, легче и потребляют меньше энергии, чем катодные лучевые трубки. На основе жидких кристаллов были разработаны не только дисплеи, но и другие устройства управления оптическим пучком для целей межкомпонентных оптических соединений, оптической связи, создания проекционных дисплеев, изготовления перестраиваемых линз, обработки изображений и для самых разнообразных промышленных применений [1–8]. Наиболее перспективными из таких устройств являются устройства призматического типа. Известно, что хорошо подобранная ЖК-решетка может давать в первом порядке дифракции 100%-ную эффективность [3,5]. Поэтому жидкокристаллические решетки претендуют на первые роли там, где требуются селекция длин волн и высокоэффективное управление лазерными пучками. Существует несколько методов изготовления ЖК-призм и решеток. Однако и изготовление таких дефлекторов, и механизмы управления ими являются достаточно сложными [3,5,9,10]. В настоящей работе предлагается простой способ применения СНЖКД в качестве спектрального селекционного элемента, где используются только его поляризационные свойства и дополнительной модификации ЖК не требуется.

Абсорбционная спектроскопия наиболее широко используется в химии и биологии. Особый интерес для

этих наук представляет диапазон длин волн от 200 до 750 nm при разрешении примерно 10 nm. В состав спектрометров ультрафиолетового и видимого диапазонов обычно входит монохроматор, который используется для разложения света, испускаемого источником, по длинам волн перед тем, как он пройдет через образец и попадет в детектор. Оптическая дисперсия производится решеткой или призмой, а сканирование по длинам волн осуществляется путем их механического поворота, непрерывного или очень малыми шагами, что позволяет проводить измерения с высоким спектральным разрешением.

Спектрометры могут быть либо сканирующего типа с решеткой и спектрографом, которые приводятся в движение мотором, либо спектрографического типа, и тогда в них входит фотодиод или матрица линейных элементов ПЗС вместе с быстрым сигнальным процессором на интегральной микросхеме. В таких аналитических системах в области спектра 340–1100 nm применяются вольфрамовые лампы, а в ультрафиолетовой области спектра от 400 до 180 nm — дейтериевые лампы. Обычно это двулучевые системы сканирующего типа, в которых во время сканирования в области пересечения спектра ламп на заданной длине волны обработка данных на мгновение прерывается. И в этот момент происходит оптико-механическое переключение идущих от разных ламп сфокусированных пучков света с помощью линзы или зеркала и мотора. Двулучевой метод сканирования существенно облегчает внесение поправок, учитывающих работу фильтра, который отсекает высшие порядки дифракции (блокирует гармоники решетки). Введение в эти системы ксеноновых ламп-вспышек (перекрывающих область спектра 180–1100 nm) позволило отказаться от систем с двумя лампами, а также от использования дополнительных устройств и оптико-механических переключателей. Такая система работает вполне хорошо, хотя и имеет известные ограничения.

Следует, правда, заметить, что метод сканирования с помощью решеток продолжает использоваться до сих

пор. Механически движущиеся части отсутствуют и в акустооптических спектрометрах [11,12], хотя фильтр, сортирующий порядки дифракции, имеется. Ограничение скорости сканирования связано у них со временем прохождения акустической волной ширины светового пучка (т.е. со временем доступа). Эффективность дифракции пропорциональна глубине решетки и поэтому пропорциональна амплитудам образующих эту решетку акустических волн, что также требует большой затраты энергии. Появились также сообщения о спектрометрах и другого типа со сложными решетками (где движущиеся части отсутствуют) и детекторами в виде ПЗС-матрицы [13,14]. Такие системы выглядят достаточно многообещающими, однако свет, дифрагированный на составных плоских решетках, обладает складчатым спектром, который должен отображаться на двумерной фокальной плоскости ПЗС-детектора.

Таким образом, во избежание сдвига длин волн и внесения поправок на фильтрование порядков, требуется не только удалить из спектрометра механически движущиеся части, но и повысить скорость сканирования и минимизировать оптические компоненты спектрометра. Настоящая работа представляет собой попытку решить эти задачи.

Многие авторы исследовали возможность использования ЖКД в качестве перестраиваемых фильтров и для генерации света разных цветов [15–19]. В методах цветовой генерации света с помощью жидких кристаллов используются помещенные между поляроидами перестраиваемые замедлители [20], допированные дихроичными красками жидкокристаллические переключатели [21] и жидкокристаллические ротаторы, объединенные с пассивными спектрально-селективными линейно-поляризационными фильтрами [22]. Однако использование СНЖК в традиционных спектрометрах требует дальнейшего изучения. В нашей работе на опыте показано, что СНЖКД, к которому приложено точно управляемое напряжение питания, может быть использован в качестве механизма сканирования длин волн в традиционных спектрометрах, работающих в области спектра от видимого до ультрафиолетового диапазона.

Теория

Традиционная нематическая структура со скрученной ориентацией молекул состоит из тонкой жидкокристаллической пленки, заключенной между двумя параллельными стеклянными пластинками. Поверхности этих пластинок обрабатываются таким образом, чтобы молекулы в пленке были ориентированы параллельно этим поверхностям, но чтобы в пределах толщины пленки их ориентация поворачивалась на 90° . Если на пленку падает свет с поляризацией, параллельной (или перпендикулярной) выделенному на входной поверхности направлению, то после прохождения пленки по всей ее толщине плоскость поляризации света также поворачи-

вается на 90° . Если напряжение к ячейке СНЖК не подается, то свет поляризуется таким образом, чтобы он мог пройти сквозь эту ячейку. Молекулы в ЖК-ячейках изменяют свою ориентацию пропорционально приложенному напряжению вплоть до углов в 90° , блокируя тем самым прохождение света. Путем подачи соответствующего напряжения можно получить все оттенки серого цвета или любую степень пропускания света. Гуч и Тарри изучали оптические характеристики СНЖКД экспериментально и теоретически [23]. Аззам и Башара занимались определением оптических характеристик холестерического жидкого кристалла, используя расчеты Джонса [24]. Гуч и Тарри применили этот метод к анализу оптических характеристик скрученного нематического ЖК.

Комплексная переменная φ описывает поляризационный эллипс как функцию начальной поляризации света φ_0 и проходящего светом в пленке пути z . Переменная φ определяется выражением

$$\varphi(z, \varphi_0) = \frac{(\beta - i\alpha \operatorname{tg} \beta z)\varphi_0 + (-jg_0 \operatorname{tg} \beta z)}{(-jg_0 \operatorname{tg} \beta z)\varphi_0 + (\beta + j\alpha \operatorname{tg} \beta z)} \exp j2\alpha z, \quad (1)$$

где

$$\alpha = 2\pi/p,$$

$$\beta = \frac{\Delta k}{2} \left\{ \left(\frac{2d}{k} \right)^2 + 1 \right\}^{1/2},$$

$$g_0 = \Delta k/2,$$

p — шаг спиральной структуры, k — постоянная распространения волны и Δk — разность между главными значениями постоянных распространения материала. Для СНЖК при линейной поляризации падающего света $\varphi_0 = -1$, и для структуры со скручиванием на угол $\pi/2$ поляризация на выходе может быть получена путем приравнивания z к толщине пленки: $z = p/4 = d$. Отсюда получаем

$$\varphi = \frac{(1+x^2)^{1/2} - j(1+x) \operatorname{tg} \frac{\pi}{2}(1+x^2)}{(1+x^2)^{1/2} + j(1-x) \operatorname{tg} \frac{\pi}{2}(1+x^2)^{1/2}} (-1), \quad (2)$$

где $x = d\Delta k/\pi = 2d\Delta n/\lambda$ и Δn — разность между главными значениями показателя преломления. Уравнение (2) задает эллиптическую поляризацию света. Пусть $\varphi = Z + jY$ описывает параметры эллипса поляризации с эллиптичностью ε , который наклонен под углом θ к направлению, повернутому на угол $\pi/2$, тогда

$$\theta = \frac{1}{2} \arg \varphi = \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \frac{Y}{X} \quad (3)$$

и

$$\varepsilon = \frac{|\varphi| - 1}{|\varphi| + 1} = \frac{(X^2 + Y^2)^{1/2} - 1}{(X^2 + Y^2)^{1/2} + 1}. \quad (4)$$

Зная геометрию эллипса, получим отношение интенсивностей компонент света, поляризованных параллельно и

перпендикулярно направлению директора:

$$R = \operatorname{tg} \left[0.5 \operatorname{cosec} \left\{ \frac{1 - \sin^2 2(\operatorname{ctg} \varepsilon)}{1 + \operatorname{tg}^2 2\theta} \right\}^{1/2} \right]$$

$$= \frac{\sin^2 \frac{1}{2}\pi(1+x^2)^{1/2}}{(1+x^2) - \sin^2 \frac{1}{2}\pi(1+x^2)^{1/2}}, \quad (5)$$

и коэффициент пропускания для света, поляризованного параллельно направлению директора,

$$T = \frac{\sin^2 \frac{1}{2}\pi(1+x^2)^{1/2}}{1+x^2}. \quad (6)$$

Авторы работы [23] построили график зависимости коэффициента пропускания T от θ , ε и R . Результаты эксперимента хорошо согласуются с предсказаниями теории. Отклонение экспериментальных результатов от теоретической кривой может быть объяснено тепловыми флуктуациями в СНЖК-структуре. С такими же теоретическими предсказаниями согласуются и наши экспериментальные результаты.

Эксперимент

Экспериментальная установка, используемая в настоящей работе, изображена на рис. 1. В наших опытах использована СНЖК-ячейка промышленного изготовления (Shenzhen Jinghua Displays Co. Lts.) с 90°-ной спиральной геометрией, толщиной 10 μm и управляющим напряжением от 0 до 5 V. Управляющее напряжение подавалось на ЖК от лабораторного питающего устройства, которое обеспечивало ступенчатую регулировку напряжения с шагом 5 mV. Источниками света служили гелий-неоновый лазер, излучающий на длине волны 632.8 nm, и белый светодиод (синий светодиод на нитриде галлия, покрытый люминофором), излучающий во всей видимой области спектра (380–750 nm). Характеристики СНЖКД измерялись с помощью гелий-неонового лазера (рис. 1, *a*).

СНЖК освещался линейно поляризованным светом от гелий-неонового лазера (5 mW). Первоначально поляризация падающего лазерного пучка выбиралась при помощи поляроида такой, чтобы свет не проходил сквозь СНЖК. В результате поляризация пучка света от гелий-неонового лазера устанавливалась вертикально, а поляризация на выходной грани ЖКД — горизонтально. Затем изучалось состояние поляризации света, прошедшего сквозь СНЖК, при различных напряжениях. С помощью анализатора при каждом значении напряжения определялось состояние поляризации ЖКД.

На рис. 2 показана зависимость прошедшего сквозь СНЖКД света с длиной волны 632.8 nm от поляризации и напряжения. Поляризация, как и ожидалось, подчиняется закону Малюса. Было отмечено, что сдвиг в состоянии поляризации пропорционален приложенному напряжению. Во второй серии наших опытов (см. рис. 1, *b*)

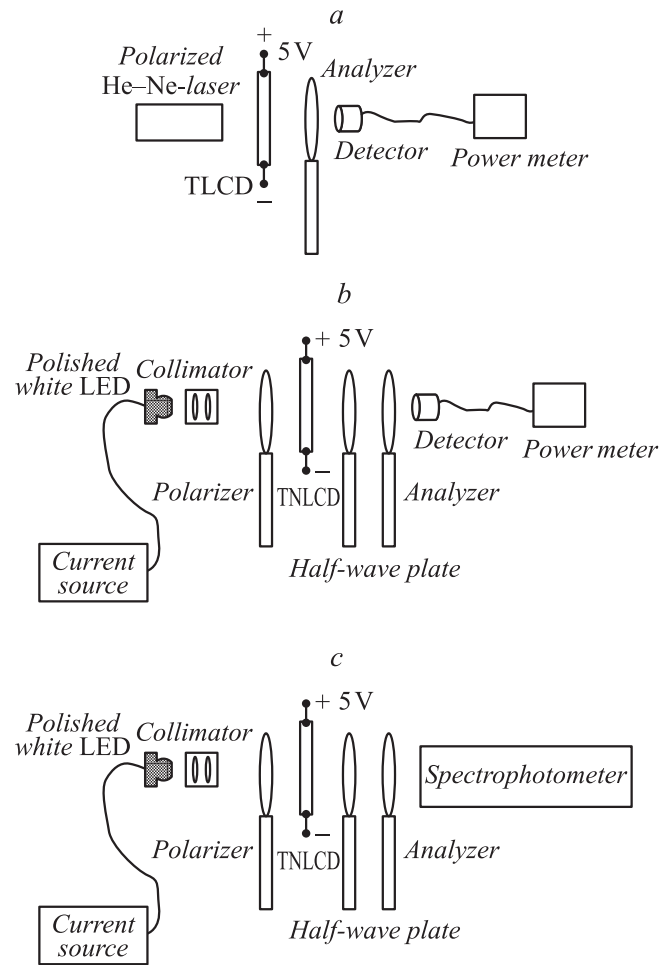


Рис. 1. Экспериментальная установка: *a* и *b* — для исследования поляризации и *c* — для спектральных измерений.

в качестве источника света использовался белый светодиод промышленного производства. Он представляет собой синий галлиево-нитридный светодиод, покрытый

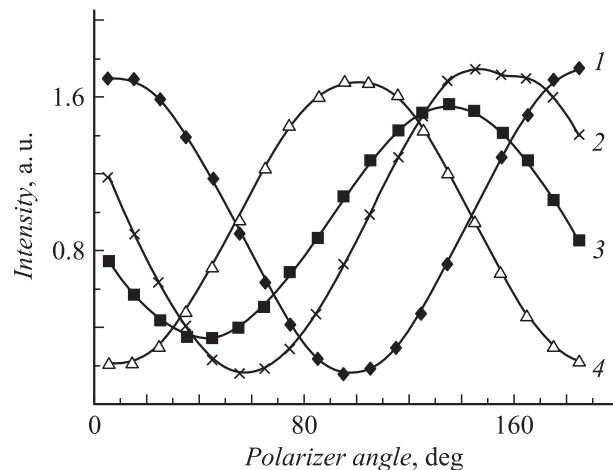


Рис. 2. Поляризационное состояние СНЖКД при использовании гелий-неонового лазера и различных приложенных к нему напряжений: 1 — 0, 2 — 3, 3 — 4, 4 — 5 V.

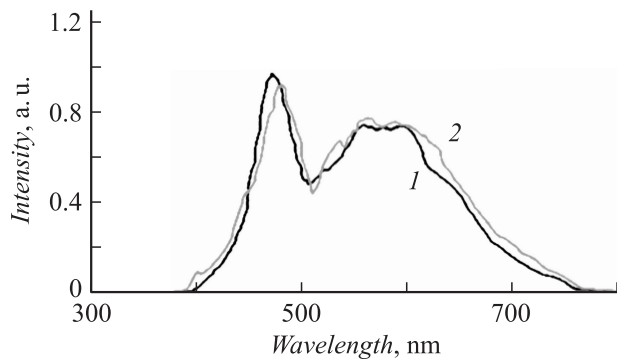


Рис. 3. Сканирование спектра от белого светодиода: 1 — при использовании спектрометра с решеткой, приводимой в движение от мотора; 2 — при использовании сканирующего спектрометра на основе СНЖКД.

люминофором. Последний при возбуждении светом синего светодиода испускает свет в широком диапазоне длин волн. Смешиваясь с синим светом светодиода, он дает в итоге близкий к белому свету синеватого оттенка, по цвету напоминающий свет ртутной лампы уличного освещения. Эмиссионный спектр такого светодиода, который изменялся с помощью спектрофотометра промышленного производства (500MSPEX), изображен на рис. 3 (кривая 1). Так как свет, выходящий из светодиода, был в очень большой степени расходящимся, то следовало видоизменить излучающую поверхность светодиода. Выпуклая часть светодиода была тщательно срезана и затем зеркально отполирована. Такая обработка светодиода приводит к тому, что на выходе получаем пучок максимальной интенсивности, пригодный для коллимации. Нормальный и отполированный светодиоды и соответствующие им эмиссионные профили приведены на рис. 4.

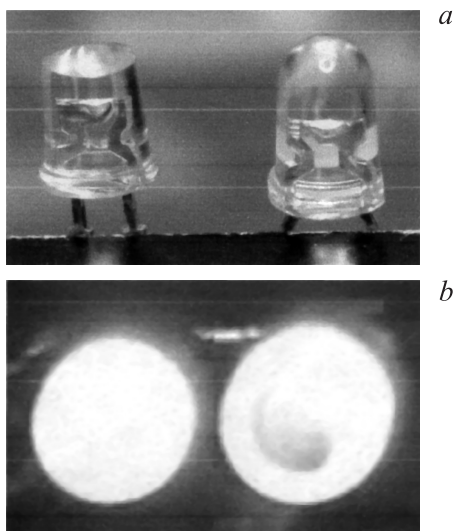


Рис. 4. *a* — отполированный и обычный белый светодиод; *b* — эмиссионные профили отполированного и обычного белого светодиода.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На выходе из белого отполированного светодиода коллимированный пучок света шириной меньше 2 mm поступал в СНЖКД. Было замечено, что если медленно увеличивать приложенное к СНЖКД напряжение, то белый свет будет распадаться на составляющие его цветные компоненты пропорционально напряжению. Это происходит потому, что после прохождения СНЖКД беспорядочно поляризованный свет от диода приобретает частичную плоскую поляризацию. Так как свет каждой длины волны имеет свое собственное состояние поляризации, то в зависимости от ориентации молекул сквозь ЖКД проходит свет только одного цвета. Таким образом, наблюдается разделение цветов. Однако разложение света на разные длины волн происходит в последовательности, не совсем совпадающей с той, которая имеет место при разложении в спектр обычного белого света.

Зависимость интенсивности выделенных длин волн прошедшего излучения от поляризации и напряжения изучались для главных цветов. На СНЖКД подавались различные напряжения, и каждый раз с помощью анализатора определялось состояние поляризации коллимированного белого света от светодиода, прошедшего через СНЖКД. Результаты измерений приведены на рис. 5, *a*. Очевидно, что они согласуются с предсказаниями теории [22], т. е. с кривой зависимости коэффициента пропускания T от θ , характеризуемой уравнением (6). На рис. 5, *b* показано, как изменяется спектр (зависимость нормированной интенсивности от напряжения) после прохождения СНЖК при подаче на него напряжения.

Из рис. 2 и 5, *a* видно, что интенсивность света на выходе и состояние его поляризации ведут себя похожим образом и в случае лазера, и в случае светодиода. Однако в случае белого светодиода наблюдаемый фазовый сдвиг хаотичен, что после прохождения через ЖКД белый свет приобретает частичную поляризацию. Различие в положении минимумов (или максимумов), наблюдаемых на рис. 2 и 5, *a*, вызвано различием в ширине спектральных линий соответствующих источников света: лазер излучает на одной длине волны, а для светодиода характерно широкое спектральное распределение. В качестве устройств для поворота поляризации лазерных пучков, которые позволяют непрерывно перестраивать плоскость поляризации лазерного пучка, оставляя лазер неподвижным, обычно используются полуволновые пластинки. В нашем случае, когда между ЖКД и анализатором была помещена ахроматическая полуволновая пластинка (как это показано на рис. 1, *b*) в таком положении, что она составляет угол в 45 или 135° с главной осью, разделение на цвета с подачей напряжения становилось и последовательным, и более отчетливым. Для поворота плоскости поляризации пучка на выходе из ЖКД использовалась полуволновая пластинка. При сканировании всего спектра анализатор

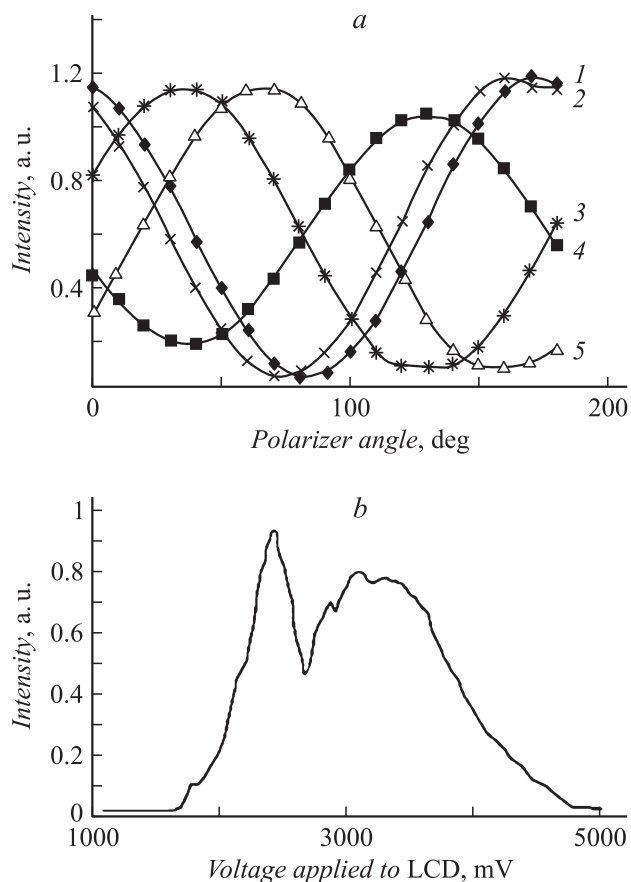


Рис. 5. *a* — поляризационное состояние СНЖКД при освещении его белым светом от светодиода при различных приложенных к нему напряжениях (1 — 1, 2 — 2, 3 — 3, 4 — 3.5, 5 — 4.5 V); *b* — зависимость прошедшего через СНЖК спектра от приложенного напряжения.

находится под углом в 45° к ЖК-директору. Это можно приписать тому обстоятельству, что полуволновая пластинка поворачивает плоскость поляризации на такой угол, что это позволяет пропускать свет только той длины волны, которая соответствует поляризации.

С помощью тонкой регулировки напряжения от лабораторного источника питания (с точностью до нескольких милливольт) возможно отсканировать всю область спектра белого светодиода с разрешением примерно в $2\text{--}5\text{ nm}$. В таких экспериментах (см. рис. 1, *c*) напряжение на ЖКД варьировалось ступенчатым образом при минимально возможном шаге (5 V), и каждый раз спектрометр (500MSPEX) сканировал ожидаемую область длин волн, записывая пиковую интенсивность и соответствующую длину волны. Было отмечено, что каждый раз, когда приложенное к СНЖКД напряжение увеличивалось на 5 mV , сдвиг прошедшей длины волны составлял от 3 до 6 nm . В наших измерениях среднеквадратичное отклонение было равно 4.5 nm . Все эти данные были отложены на графике (на кривой зависимости нормированной интенсивности от длины волны) с целью получения спектра белого светодиода

методом сканирования с помощью СНЖКД (рис. 3, кривая 2).

Наблюдалось также, что при некоторых значениях приложенного напряжения длина волны волны претерпевала внезапный сдвиг, тем самым нарушалась воспроизводимость длины волны. Это может быть связано с изменениями в структуре СНЖК. Для проверки таких сдвигов в длинах волн спектрометр был откалиброван при помощи стандартного источника белого света. Для сравнения излучение того же светодиода исследовалось с использованием обычного метода сканирования с помощью решетки, приводимой в движение мотором (спектрофотометра 500MSPEX).

На рис. 3 проводится сравнение результатов сканирования белого спектра светодиода с использованием СНЖКД и с использованием решетки, приводимой в движение мотором. На некоторых длинах волн наблюдалась потеря интенсивности в 5% за счет прохождения света сквозь СНЖК. Было определено, что в предложенном методе (когда используется лабораторное оборудование) точность воспроизводимости длины волны составляет $2\text{--}5\text{ nm}$, т.е. цифра эта слишком велика по сравнению с методом сканирования с помощью решетки, где она равна 0.2 nm . Предельное разрешение при селекции длин волн этим методом определяется малостью шага изменения питающего напряжения. Другие факторы, которые влияют на разрешение и воспроизводимость, объяснены своим происхождением структуре СНЖК и тепловым флуктуациям в этой структуре. Однако сочетание правильно подобранного и удачно изготовленного СНЖКД с подходящим механизмом регулирования напряжения может заметно улучшить воспроизводимость и разрешение системы. Как и в случае сканирующего спектрометра с решеткой, полосу пропускания можно настраивать, используя щель спектрометра. Однако при ширине щели 0.1 nm ширина полосы равна примерно 2 nm .

Так как функция ЖКД основана на ориентации молекул кристалла приложенным к нему напряжением, то ограничение скорости сканирования определяется механикой регулирования напряжения и другой электроникой. Таким образом, еще одно преимущество нашего метода заключается в его способности обеспечивать более высокую скорость сканирования. Поскольку дифракция света для селекции длин волн не используется, то фильтры для сортировки порядков дифракции здесь не нужны. Полоса пропускания системы только областью видимого света не ограничена. С теми же результатами сканирование осуществляется вплоть до спектральной области 1100 nm при использовании вольфрамовой лампы. Работа с ультрафиолетовым источником требует дальнейшего изучения. На имеющейся экспериментальной установке более высокого разрешения добиться невозможно. Однако существует большой простор для совершенствования оборудования, что может повысить разрешающую способность системы. Предложенная нами схема может быть использована для создания про-

стого и недорогого спектрометра видимого света, в котором сканирование по длинам волн осуществляется без включения в его состав движущихся узлов, а также фильтра для подавления высших порядков дифракции, который обязательно входит в состав спектрометров видимого и ультрафиолетового диапазонов.

Заключение

В заключение следует сказать, что были исследованы поляризационные свойства СНЖКД промышленного производства с целью его использования в качестве спектрального селектора. Было показано, что его применение в спектрометре видимого и ультрафиолетового диапазона в этом качестве позволило обойтись без проектирования или изготовления каких-либо дополнительных к СНЖКД приспособлений. При подходящем сочетании хорошо подобранного СНЖКД и источника питающего напряжения, способного обеспечить ступенчатое регулирование в несколько микровольт, можно получить лучшее, чем обычно, разрешение по длинам волн при высокой скорости сканирования. Представленные в работе результаты исследования могут быть полезными при создании новой серии недорогих спектрометров для видимой области спектра, в которых не используются ни механическое сканирование с помощью решетки, ни фильтр для сортировки порядков отражения.

Авторы хотели бы поблагодарить за помощь и поддержку Т.С. Эндрю.

Список литературы

- [1] He Z., Nose T., Sato S. // Jpn. J. Appl. Phys. 1995. Vol. 34. P. 2392–2398.
- [2] Wenicke G., Kruger S., Gruber H., Demoli N., Durr M., Teiwes S. // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4596. P. 182–187.
- [3] Ren H., Fan Y.H., Wua S.T. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. P. 3168–3170.
- [4] Kang S.W., Sprunt S., Chien L.C. // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76. P. 3516–3518.
- [5] Wang X., Wilson D., Muller R., Marker P., Psaltis D. // Appl. Opt. 2000. Vol. 39. P. 6545–6555.
- [6] Wenicke G., Kruger S., Kamps J., Gruber H., Demoli N., Durr M., Teiwes S. // J. Opt. Commun. 2004. Vol. 25. P. 141–145.
- [7] Moreno I., M'arquez A., Davis J.A., Campos J., Yzuel M.J. // Opt. Pur. and Apl. 2005. Vol. 38. P. 1–6.
- [8] Pishnyak O., Sato S., Lavrentovich O.D. // Appl. Opt. 2006. Vol. 45. P. 4576–4582.
- [9] Love G.D., Major J.V., Purvis A. // Opt. Lett. 1994. Vol. 19. P. 1170–1182.
- [10] Resler D.P., Hobbs D.S., Sharp R.C., Friedman L.J., Dorschner T.A. // Opt. Lett. 1996. Vol. 21. P. 689–691.
- [11] Freidman N., Kaplan A., Davidson N. // Opt. Lett. 2000. Vol. 25. P. 1762–1764.
- [12] Kaplan A., Friedman N., Davidson N. // Opt. Lett. 2001. Vol. 26. P. 1078–1080.

- [13] Han T., Wei-Ming N., Zhou P., You H.Y., Jia J.H., Wang S.Y., Chen L.Y. // Rev. Sci. Instrum. 2003. Vol. 74. P. 2973–2976.
- [14] Helg T.L., Barnes T.H., Haskell T.G. // Opt. Lasers Eng. 1998. Vol. 29. P. 413–422.
- [15] Masterson H.J., Sharp G.D., Johnson K.M. // Opt. Lett. 1989. Vol. 14. P. 1249–1251.
- [16] Sharp G.D., Johnson K.M., Doroski D. // Opt. Lett. 1990. Vol. 15. P. 523–525.
- [17] Sharp G.D., Doroski D., Johnson K.M. // Opt. Lett. 1991. Vol. 16. P. 875–877.
- [18] McMurdy J.W., Crawford G.P., Jay G.D. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2007. Vol. 476. P. 307–322.
- [19] Gebhart S.C., Thompson R.C., Mahadevan J.A. // Appl. Opt. 2007. Vol. 46. P. 1896–1910.
- [20] Matsumoto S. US Patent 4, 097, 128. 1978.
- [21] Aftergut S. US Patent 4, 581, 608. 1986.
- [22] Buzak T.S. US Patent 4, 674, 841. 1987.
- [23] Gooch C.H., Tarry H.A. Elect. Lett. 1974. Vol. 10. P. 2–4.
- [24] Azzam R.M.A., Bashara N.M. // J. Opt. Soc. Am. 1972. Vol. 62. P. 1252–1257.