

**ШИРОКОПОЛОСНЫЙ МОДУЛЯТОР,
ПРЕОБРАЗУЮЩИЙ ИЗЛУЧЕНИЕ ИНФРАКРАСНОГО
ДИАПАЗОНА В ИЗЛУЧЕНИЕ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА,
РАБОТАЮЩИЙ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНОГО
ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН**

С. И. Валянский¹, М. А. Кононов², И. С. Недосекина¹

В настоящей работе рассмотрена принципиальная возможность создания и оценочный расчёт чувствительности одной из схем модулятора – преобразователя инфракрасного излучения в видимое излучение. Проблема визуализации инфракрасного излучения является актуальной темой исследований. Предложенный нами модулятор, управляемый при помощи света, не повторяет ни одну из известных схем. В основе его работы лежит эффект возбуждения поверхностных плазмонных волн.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, поверхностный плазмонный резонанс.

Разработана модель широкополосного модулятора, преобразующего электромагнитное излучение инфракрасного (ИК) диапазона в видимый свет. В устройстве происходит преобразование ИК-излучения в нагрев пластин пироэлектрика, при этом распределение интенсивности излучения совпадает с изменением температуры пироэлектрических пластин. Эта температура преобразуется в электрическое поле, воздействующее на пленку жидкого кристалла (ЖК), изменяя ее диэлектрическую проницаемость в выбранном направлении. Визуализация и регистрация этих изменений производится описанным ниже устройством, работающим на основе возбуждения поверхностного плазмонного резонанса (ППР).

В работе показана принципиальная возможность соединения нескольких физических эффектов в устройстве визуализации излучения ИК диапазона с использованием

¹ Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, 119049 Россия, Москва, Ленинский пр., 4; e-mail: sergv3@yandex.ru.

² ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: mike@kapella.gpi.ru.

пироэлектриков, жидких кристаллов (ЖК) и технологии ППР-спектроскопии. Известно, что ЖК, как правило, двулучепреломляющие, поэтому в электрическом поле происходит изменение пространственного распределения диэлектрической проницаемости и это, в свою очередь, изменяет распределение интенсивности выходного оптического сигнала за счёт сдвига плазмонной кривой – зависимости амплитуды отраженного света от угла его падения на металлическую поверхность. Кривая, помимо сдвига, меняет свою ширину и амплитуду [1, 2]. Электрическое поле создается системой пироэлектрических элементов. Пироэлектрические элементы формируются с помощью магнетронного напыления пироэлектрика на диэлектрическую подложку в виде квадратных пластин. Они имеют вид прямоугольников размером $\sim 15 \times 15$ мкм с небольшими зазорами между ними, чтобы нагрев одной пластинки не сильно передавался ее соседям. Таким образом, можно визуализировать интенсивность падающего луча в разных точках. Толщина этих квадратов также ~ 15 мкм. Подложка, на которую наносится пироэлектрик, охлаждается приклеенным к ней элементом Пельтье. Элемент Пельтье поддерживает температуру подложки фиксированной. Колеблющаяся заслонка, которая периодически открывает доступ ИК излучения к пироэлектрику, должна охлаждаться, когда не перекрывает пластину пироэлектрика. При появлении в пироэлектрике градиента температур возникает электрическое поле, и чем больше градиент, тем больше возникающий электрический потенциал. С помощью пироэлектриков можно обнаруживать изменение температуры порядка 10^{-6} °С.

Принципиальная схема предложенного преобразователя состоит из прямоугольной призмы, на гипотенузную грань которой нанесена серебряная (Ag) пленка толщиной ~ 55 нм. Серебряная пленка на призме необходима для возбуждения поверхностного плазмонного резонанса (ППР). Подробное описание физики и техники использования этого явления дано в работах [3–7]. На металлическую плёнку нанесён слой оксида алюминия (Al_2O_3) толщиной ~ 3 нм. На поверхности Al_2O_3 формируется промежуточный слой из ЖК толщиной ~ 100 нм, который покрыт тонким слоем диэлектрика также толщиной около ~ 3 нм. Ориентация директора ЖК пленки параллельна гипотенузной грани призмы. На эту пленку помещаются кубики со сторонами $15 \times 15 \times 15$ мкм пироэлектрика. Следующим элементом данной схемы является элемент Пельтье, поддерживающий температуру пластины на несколько градусов меньше, чем температура окружающей среды.

Изображение конструкции визуализатора с механическим модулятором показано на рис. 1. В качестве устройства для управления параметрами инфракрасного излучения

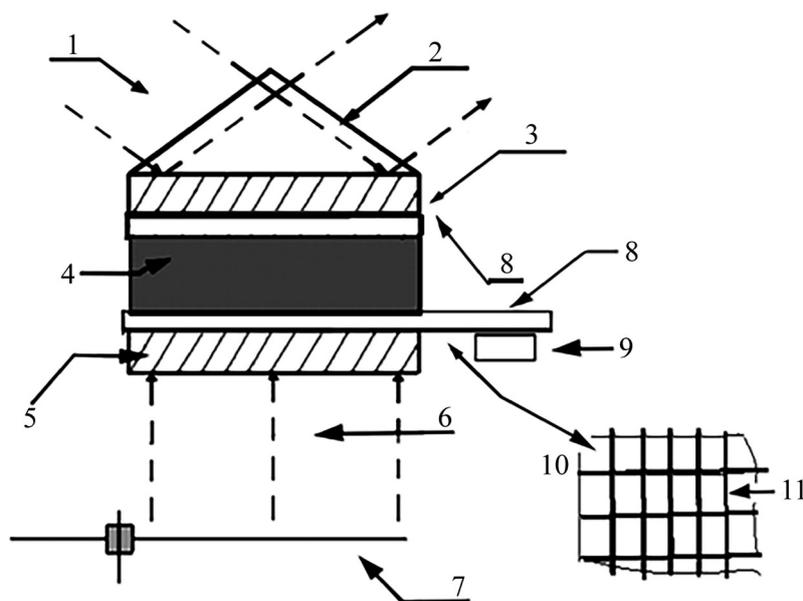


Рис. 1: Схема модулятора: 1 – видимый свет, 2 – призма, 3 – металлическая плёнка, 4 – слой жидких кристаллов, 5 – пироэлектрические кубики, 6 – ИК-излучение, 7 – механический модулятор, 8 – диэлектрическая пленка, 9 – элемент Пельтье, 10 – пироэлектрические кубики, 11 – диэлектрические перегородки.

используется механизм периодического прерывания с помощью колеблющейся заслонки (механического модулятора). ИК-излучение проходит сквозь механический модулятор, который половину времени перекрывает излучение для охлаждения пироэлектрика, а половину времени пропускает его. ИК-излучение создает разность температур между верхними и нижними поверхностями пироэлектрических кубиков.

Уравнение, связывающее изменение P_0 – поляризации и T , – температуры, имеет вид: $\Delta P_{0i} = \gamma_i \Delta T$, где γ_i – пироэлектрический коэффициент, i – номер кубика. Поверхность одного из пироэлектрических кубиков, на которую падает ИК излучение, соединяется проводником с серебряной пленкой, нанесенной на гипотенузную грань призмы. Таким образом, жидкий кристалл окажется в электрическом поле, создаваемом пироэлектриком. Под действием этого поля происходит поворот оси, вдоль которой ориентированы диполи (исходно директор ЖК направлен параллельно гипотенузной грани призмы, на которую нанесена серебряная пленка). Изменение директора жидкого кристалла приводит к изменению диэлектрической проницаемости в направлении, перпендикулярном поверхности серебряной пленки. Именно в этом направлении сориентировано электрическое поле поверхностных плазмонов. В период, когда механиче-

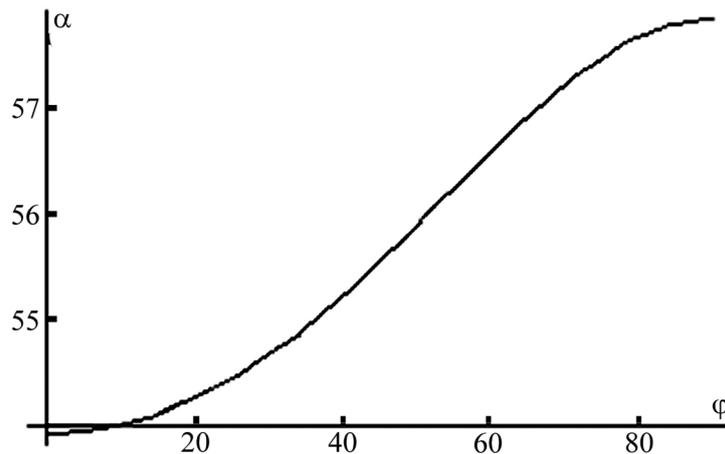


Рис. 2: График зависимости угла α , при котором происходит резонансное возбуждение ППР волн, от угла поворота φ молекул жидкого кристалла.

ский модулятор перекрывает излучение, включается внешнее электрическое поле, направленное параллельно гипотенузной поверхности призмы. Под действием этого поля происходит возврат ориентации молекул ЖК к положению равновесия, т.е. к планарному направлению директора. Время релаксации сегнетоэлектрика пропорционально, $1/\sqrt{T_C - T}$, где T_C – температура фазового перехода пироэлектрика, следовательно, на разных участках пироэлектрика будет создаваться неодинаковая разность потенциалов. Диэлектрическая проницаемость жидкокристаллического слоя напрямую зависит от ориентаций молекул и будет различной в разных участках слоя в зависимости от температуры [8–12]. Максимальное различие достигается в момент наибольшего угла между ориентацией молекул в наиболее и наименее прогретых частях. При этом все время со стороны призмы на границу раздела металл/ЖК-пленка под резонансным углом падает возбуждающее ППР излучение. Так как разные участки слоя ЖК имеют различную диэлектрическую проницаемость, дисперсионные соотношения для возбуждения ППР так же будут различны в различных точках. А именно, коэффициент отражения от основания призмы будет различен в разных участках, т.е. в отражённом свете температурное распределение преобразуется в амплитудное распределение. На рис. 2 показан график зависимости угла α , при котором происходит резонансное возбуждение поверхностных волн, от угла поворота молекул жидкого кристалла, толщина которого $d \approx 100$ нм, а анизотропия диэлектрической проницаемости соответствует $\varepsilon_{\parallel} = 1.7$, $\varepsilon_{\perp} = 1.4$.

После закрытия заслонки система переходит в исходное положение.

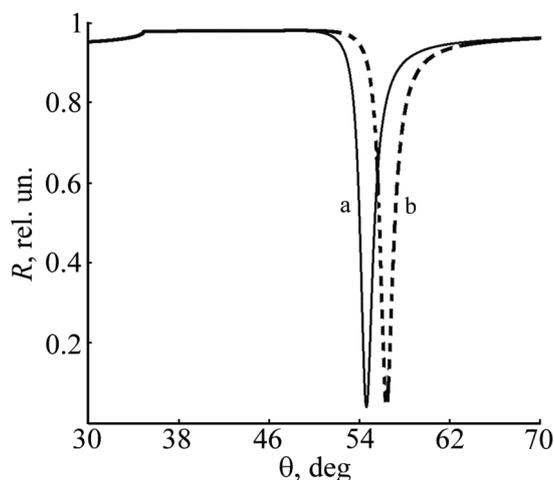


Рис. 3: Зависимость R – коэффициента отражения от θ – угла падения возбуждающего излучения. Кривая (a) – соответствует закрытому окну, кривая (b) – открытому. Кривые даны для красного ($\lambda = 632.8$ нм) излучения, возбуждающего ППР на призме.

Оценим поток ИК-излучения, который в состоянии зафиксировать вышеописанный преобразователь. Из графика, изображённого на рис. 3, видно, что точность, с которой мы можем измерить сдвиг резонансного минимума, составляет менее 0.05%. Данный сдвиг соответствует $\Delta\theta \sim 2^\circ$ между направлениями молекул жидкого кристалла в разных частях промежуточного слоя. Взяв оценочное время релаксации молекулы к положению равновесия $t = 0.01$ с и теплоёмкость жидкого кристалла порядка теплоёмкости воды, получим что поток, который в состоянии зафиксировать визуализатор, порядка 10^{-4} Вт/см². Такой поток фокусирует линза диаметром 6 см и фокусным расстоянием 30 см от человека на расстоянии до 5 км (расстояние в 5 км соответствует случаю, когда изображение человека в приближении геометрической оптики сравнимо с размером дифракционного пятна).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] H. Jussila, Yang He, N. Granqvist, Z. Sun, *Optica* **3**(2), 151 (2016); DOI: 10.1364/OPTICA.3.000151.
- [2] S. A. Maier, *Plasmonics Fundamentals and Applications* (Springer Science & Business Media, 2007).

- [3] С. И. Валянский, С. В. Виноградов, В. В. Савранский, Письма в ЖТФ **18**(5), 70 (1992).
- [4] С. В. Виноградов, М. А. Кононов, Успехи прикладной физики **4**(4), 343 (2016).
- [5] S. V. Vinogradov, M. A. Kononov, V. M. Kononov, et al., Bulletin of the Lebedev Physics Institute **42**(1), 30 (2015).
- [6] C. G. Granqvist, A. Hultaker, Thin Solid Films **1**(411), 1 (2002); DOI: 10.1016/S0040-6090(02)00163-3.
- [7] С. В. Виноградов, М. А. Кононов, В. М. Кононов и др., Прикладная физика, № 4, 5 (2017).
- [8] Е. В. Аксенова, А. А. Каретников, Н. А. Каретников и др., Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики **149**(5), 1087 (2016).
- [9] Bougrenet De La Tosiaye J. L., Liquid crystals **2**(2), 241 (2004); DOI: org/10.1080/02678290410001648570.
- [10] Jun Li, Sebastian Gauza, and Shin-Tson Wu, Appl. Phys. **96**, 19 (2004); DOI: 10.1364/OPEX.12.002002.
- [11] T. K. Devi, B. Choudhury, A. Bhattacharjee, and R. Dabrowski, Opto-Electronics Review **22**(1), 24 (2014); DOI: 10.2478/s11772-014-0171-5.
- [12] H. Chen, T. Lu, W. Cao, Physica **373**, 177 (2006).

Поступила в редакцию 21 марта 2019 г.

После доработки 15 июля 2019 г.

Принята к публикации 16 июля 2019 г.