

Жидкокристаллические устройства для модуляции терагерцового излучения

В. Беляев, д. т. н.¹

УДК 532.783 | ВАК 05.27.01

В последние годы особенно актуальными стали задачи, связанные с использованием терагерцового диапазона спектра для устройств обработки информации, оптоэлектроники, СВЧ-электроники, медицины. Возникает необходимость формирования пучков излучения и даже двумерных изображений в этом диапазоне, как статических, так и в виде динамической последовательности.

Для видимого и инфракрасного диапазонов проблемы формирования пучков излучения и двумерных изображений как статических, так и в виде динамической последовательности решены [1, 2], а для ТГц-диапазона решение таких задач с возможностью промышленного выпуска приборов пока отсутствует. При этом стоит отметить, что устройства ТГц-диапазона для обнаружения скрытых объектов с выводом изображений на визуальные дисплеи известны достаточно хорошо [3–5].

В настоящее время существует несколько подходов в создании модуляторов ТГц-излучения. К ним относятся оптическая и электронная модуляция в полупроводниках и метаматериалах [6], электронная модуляция в графене [7], термальная модуляция [8], а также модуляция фотонными кристаллами [8]. К основным недостаткам вышесказанных методов в той или иной мере можно отнести низкую глубину модуляции, резонансный характер модуляции (модуляция в узкой полосе пропускания), а также низкую скорость модуляции. Исходя из этого, актуальной задачей является поиск новых оптоэлектронных модуляторов терагерцового излучения, имеющих количественное преимущество в рабочих характеристиках перед имеющимися на данный момент устройствами такого типа.

Жидкие кристаллы (ЖК) являются хорошим кандидатом на роль управляющих материалов ввиду высокой величины двойного

лучепреломления как в видимом, так и в микроволновом диапазонах электромагнитного спектра, малого рабочего напряжения, малых времен электрооптического отклика, широкого диапазона рабочих температур [9]. Тем не менее, у таких ЖК-модуляторов есть ряд недостатков, таких как необходимость использования толстых слоев ЖК ввиду большой длины волны в ТГц-режиме, что приводит к высоким рабочим напряжениям и большому времени отклика [10]. Эту проблему можно преодолеть за счет использования ЖК с большой величиной двулучепреломления, методов модуляции, в частности, дифракционных методов, а также за счет изменения условий применения устройства, например вариацией угла падения ТГц-излучения на модулятор.

В современной литературе есть ряд примеров разработки перестраиваемых ЖК-устройств ТГц-диапазона [9, 10].

ЖК-ячейка в работе [9] имеет структуру, изображенную на рис. 1. На стеклянную подложку 1 наносится графеновая пленка 2, которая одновременно выполняет роль как прозрачного электрода, так и поляризатора. Для равномерного ориентирования ЖК необходим

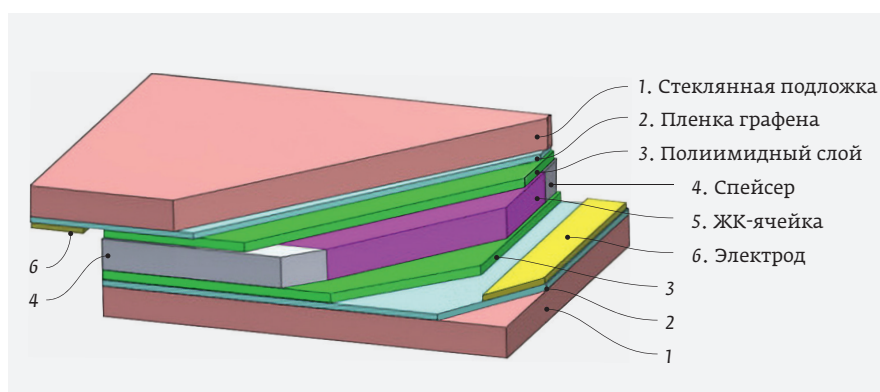


Рис. 1. Схематическая диаграмма многослойной ЖК-ячейки, используемой в качестве фазовращателя в работе [9]

¹ Московский государственный областной университет (МГОУ), профессор, главный научный сотрудник, заведующий кафедрой теоретической физики; инженерная академия Российского университета дружбы народов, профессор департамента механики и мехатроники.

полиимидный слой 3, а для получения заданной толщины ЖК образца 5 используют спейсеры 4. В отсутствие электрического поля ориентация ЖК в ячейке – планарная, при приложении электрического поля в ячейке формируется гомеотропная ориентация.

К недостаткам использования графена можно отнести сложность создания графенового слоя с минимальным количеством дефектов в узлах решетки, что существенно снижает его электрофизические свойства и дает большой разброс в характеристиках получаемых ячеек. Технология применения графена, конечно, перспективна, но ее промышленное использование возможно только через достаточно длительное время. Поэтому

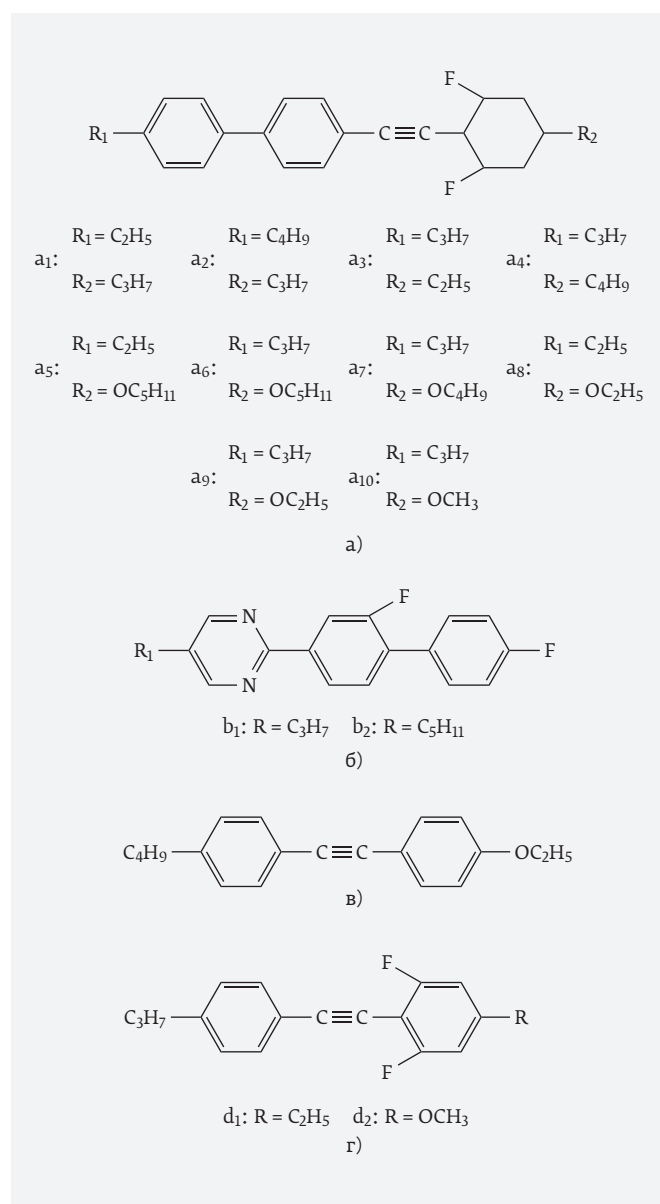


Рис. 2. Молекулярная структура компонент НЖК-смеси NJU-LDn-4

следует использовать доступные, производимые в настоящее время, материалы и технологии с адаптацией их к ТГц-диапазону.

Разработана нематическая ЖК-смесь (НЖК-смесь) NJU-LDn-4 с большой величиной двойного лучепреломления, состоящая из нескольких фторированных производных фенилтолана [10]. Компоненты данной смеси представлены на рис. 2.

Основным компонентом является смесь (а) из 10 фторированных соединений бифенил-толанов, составляющая 76% массовой доли. Массовая доля отдельных компонентов этой смеси варьируется от 2 до 10%. Компонент (б) с пиримидиновым кольцом составляет 12% массовой доли, а компоненты (в) и (г) соответственно 5 и 7%.

Зависимость показателя преломления обыкновенного (n_o) и необыкновенного (n_e) лучей, а также двулучепреломления (Δn) в диапазоне 0,4–1,6 ТГц представлена на рис. 3. Среднее значение двулучепреломления в данном диапазоне равно 0,306, а максимальное – 0,314 при 1,6 ТГц. Физические свойства ЖК-материалов на основе толанов и их зависимость от молекулярного строения описаны в [11].

На основе данной НЖК-смеси с высоким двулучепреломлением разработана специальная ячейка, являющаяся перестраиваемым фазовращателем ТГц-излучения. Принципиальная схема данной ячейки изображена на рис. 4. Ячейка состоит из двух подложек из кварцевого стекла с зазором в 250 мкм, заполненным ЖК. На внутренние поверхности подложек наносятся решетки из золота и полиимидный ориентирующий слой. Направления решеток на двух подложках располагают параллельно друг другу. Направление натирания полиимидных слоев, в свою очередь, задают перпендикулярно

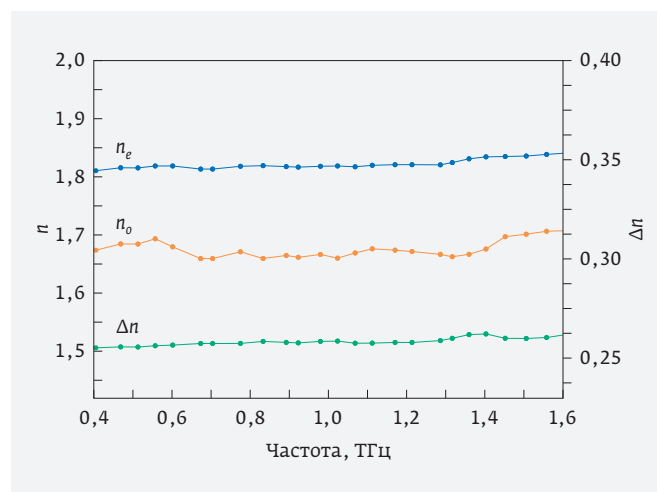


Рис. 3. Частотная зависимость двулучепреломления НЖК-смеси NJU-LDn-4 в диапазоне 0,4–1,6 ТГц

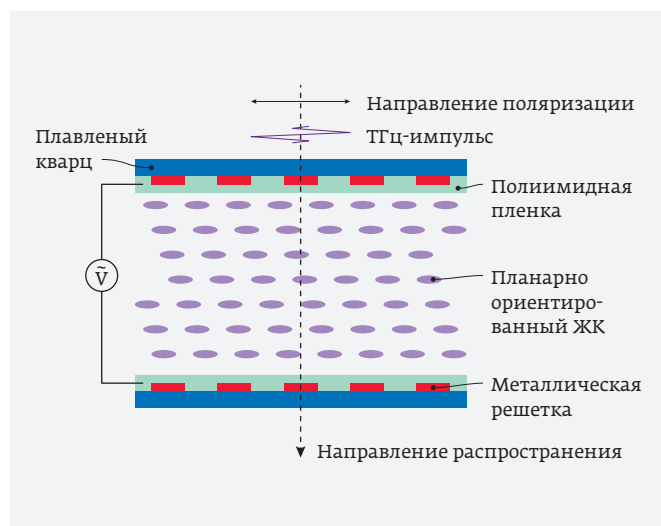


Рис. 4. Схематическое изображение ЖК поляризационного перестраиваемого фазовращателя в ТГц-диапазоне [10]

золотым полоскам, что обеспечивает планарную ориентацию. Период решетки составляет 20 мкм, а ширина 10 мкм, длина волны исследуемых ТГц-волн в таком случае составляет гораздо большую величину. Благодаря этому данная ячейка способна пропускать поперечные магнитные волны, в то время как поперечные электрические волны будут отражаться. Поэтому решетка из золота в данной ячейке выполняет двойную роль: прозрачных электродов и встроенных поляризаторов.

Перспективность использования композиционных материалов типа пористая полимерная мембрана – жидкий кристалл (ПМЖК) для модуляции видимого и ТГц-излучения показана в работах [12]. В этой системе достаточно длинный путь распространения волны терагерцовой частоты, позволяющий получить фазовый набег до четверти длины волны, при малом (десятки микрометров) размере переключаемого электрооптического ЖК-элемента в пористой матрице.

Переключаемые фазосдвигатели на основе как обычных ЖК, так и ЖК, диспергированных в полимере [1], описаны в [13, 14].

Таким образом, показана возможность реализации модуляции ТГц-излучения и создания изображений в этом диапазоне с достаточно высоким пространственным разрешением и высокой скоростью модуляции на основе жидкокристаллических элементов.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 19-07-00602_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Беляев В. В.** Жидкокристаллические дисплеи. Технологии настоящего и будущего. Часть 2. Новые технологии

и области применения ЖК-дисплеев // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2015. № 10. С. 124–131.

2. **Грузевич Ю.** Оптико-электронные приборы ночного видения. – Физматлит, 2014.
3. **Sheen D. M., McMakin D. L., Hall T. E.** Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection // IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique. 2001. V. 49. № 9. P. 1581–1592.
4. **Rebeiz G. M., Kasilingam D. P., Guo Y., Stimson P. A., Rutledge D. B.** Monolithic millimeter-wave two-dimensional horn imaging arrays // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1990. V. 38. № 9. P. 1473–1482.
5. **Шашкин В. И., Белов Ю. И., Волков П. В., Горюнов А. В., Закамов В. Р., Илларионов И. А.** Экспериментальное исследование матрицы детекторов системы радиовидения 3-мм диапазона длин волн // Письма в Журнал технической физики. 2013. Т. 39. Вып. 12. С. 44–49.
6. **Karl N., Reichel K., Chen H.-T., Taylor A. J., Brener I., Benz A., Reno J. L., Mendis R., Mittleman D. M.** An electrically driven terahertz metamaterial diffractive modulator with more than 20 dB of dynamic range // Applied Physics Letters. 2014. V. 104. Is. 9. P. 091115.
7. **Sensale Rodriguez B., Yan R., Liu L., Jena D., Xing H. G.** Graphene for Reconfigurable THz Optoelectronics // Proceedings of the IEEE. 2013. V. 101. Is. 7. P. 1705–1716.
8. **Rahm M., Li J.-S., Padilla W. J.** THz Wave Modulators: A Brief Review on Different Modulation Techniques // Journal of infrared, millimeter and terahertz waves. 2013. V. 34. Is. 1. P. 1–27.
9. **Wu Y., Ruan X., Chen C.-H., Shin Y. J., Lee Y., Niu J., Liu J., Chen Y., Yang K.-L., Zhang X., Ahn J.-H., Yang H.** Graphene/liquid crystal based terahertz phase shifters // Optics Express. 2013. V. 21. Is. 18. P. 21395–21402.
10. **Lu Y.-Q., Hu W., Liang X.** THz Devices based on High Birefringence Liquid Crystals // SID Symposium Digest of Technical Papers. 2014. V. 45. Is. 1. P. 491–494.
11. **Беляев В. В.** Определение анизотропии локального поля и параметра порядка 4-алкил-4'-алкокситоланов по рефрактометрическим данным // Журнал физической химии. 2001. Т. 75. Вып. 6. С. 1088–1094.
12. **Pasechnik S., Chopik A., Shmeliova D., Drovnikov E., Semerenko D., Dubtsov A., Zhang W., Chigrinov V.** Electro-kinetic phenomena in porous PET films filled with liquid crystals // Liq. Cryst. 2015. 42. P. 1537–1542.
13. **Ito R., Nose T., Ozaki M., Takeya K., Tonouchi M.** THz Wave Transmission Properties of LC Composite Membrane Films // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2010. 516. P. 144–151.
14. **Ito R., Kumagai T., Yoshida H., Takeya K., Ozaki M., Tonouchi M., Nose T.** THz Nematic Liquid Crystal Devices Using Stacked Membrane Film Layers // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2011. 543. 77/[843]–84/[850].

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ



ПРОЕКТИРОВАНИЕ



ГЕНЕРАЦИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ



КОНТРОЛЬ
ФОТОШАБЛОНОВ



РЕМОНТ
ФОТОШАБЛОНОВ



ФОТОЛИТОГРАФИЯ



КОНТРОЛЬ
ПЛАСТИН



СБОРКА ИЗДЕЛИЙ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

БЕЗМАСОЧНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Многоканальные лазерные генераторы изображений
- Проектная норма 0.35, 0.6 μm
- Высокая точность совмещения
- $\varnothing 200, 150, 100 \text{ мм}$



ГЕНЕРАТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ

- Диапазон UV, DUV
- Проектная норма 90, 130 нм
- 16/32-лучевая архитектура
- Фазосдвигающие шаблоны
- Быстрая переналадка пластина — шаблон



КОНТРОЛЬ ФОТОШАБЛОНОВ

- Проектная норма 90, 130, 250 нм
- Твердотельный лазер
- Контроль методом D2DB, D2D
- Высокая производительность
- Контроль неплоскостности



РЕМОНТ ФОТОШАБЛОНОВ

- Фемтосекундный лазер
- 0.15/ 0.3/ 0.5 μm min элемент
- Размер шаблона до 9"x9"
- Ремонт копированием
- Ремонт через пелликл
- Прозрачные / непрозрачные дефекты



КОНТАКТНАЯ ЛИТОГРАФИЯ

- Ручная и автоматизированная загрузка
- Двусторонняя литография
- Высокая точность совмещения
- Низкий уровень генерации дефектов
- Высокая энергоэффективность



СТЕППЕРЫ

- Проектная норма 0.35, 0.8 μm
- Автоматический масштаб
- Двустороннее совмещение
- $\varnothing 200, 150, 100 \text{ мм}$
- Твердотельный источник света



КОНТРОЛЬ ТОПОЛОГИИ

- Контроль привносимых дефектов пластин без топологии
- Автоматический микро и макро контроль дефектов пластин с топологией
- Высокая производительность



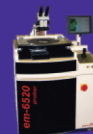
АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ

- Контроль микроразмеров
- Контроль неплоскостности
- Контроль координат
- Контроль толщин
- Контроль рассовмещения



ЗОНДОВЫЙ КОНТРОЛЬ

- $\varnothing 200, 150, 100 \text{ мм}$
- $\pm 4 \text{ мкм}$ погрешность контактирования
- Ручное / полуавтоматическое / автоматическое оборудование



РАЗДЕЛЕНИЕ ПЛАСТИН И ПОДЛОЖЕК

- $\varnothing 300, 200, 150, 100 \text{ мм}$
- 2 независимые зоны разделения в одной установке
- 2.4 кВт мощность электрошпинделя
- Полуавтоматическое / автоматическое оборудование



Создаем традиции будущего!

- Единое таможенное пространство
- 58 лет опыта в разработке и производстве прецизионного оптико-механического и сборочного оборудования
- Высокий уровень применяемых технологий и современного оборудования
- Полный цикл разработки и производства, высококвалифицированный персонал
- Высокое качество изделий подтверждено национальными и международными стандартами
- Возможность комплексной поставки оборудования, адаптированного для Российского рынка, программного обеспечения для поддержки процессов изготовления фотошаблонов и 3D-моделирования для фотолитографии компании GenISys (Германия) 