

УДК 535.016

Ввод излучения в планарный волновод с использованием электрооптических эффектов в ферриэлектрических и нематических жидких кристаллах

Кесаев Владимир Валерьевич^{1,2}kesaevvv@lebedev.ru, vvkesaev@rosatom.ru
SPIN-код: 2050-1621Ткаченко Тимофей Павлович^{1(*)}tptkachenko@lebedev.ru
SPIN-код: 6162-5088Копенкин Сергей Сергеевич^{1,3,4}

kopenkinss@yandex.ru

Путилин Николай Андреевич^{1,4}nick.putilin.01@mail.ru
SPIN-код: 6753-7109¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия² ООО «СП «КВАНТ», Москва, Россия³ РТУ МИРЭА, Москва, Россия⁴ МИИГАиК, Москва, Россия

Аннотация. Исследован эффективный и управляемый метод ввода излучения видимого диапазона в планарный волновод с использованием призмы и рельефной дифракционной решетки, иммерсированной в жидкий кристалл. Ввод света обеспечивается за счет разности необыкновенного показателя преломления жидкого кристалла и совпадения обыкновенного показателя преломления с показателем материала решетки или призмы. Эффективность ввода управляется посредством пространственной переориентации директора жидкого кристалла во внешнем электрическом поле, что позволяет реализовать динамическое и пространственно модулированное управление вводимой мощностью. Экспериментально реализован ввод с использованием нематического жидкого кристалла и полимерной дифракционной решетки, изготовленной из фотоотверждаемого гибридного эпоксиакрилатного мономера. Достигнута абсолютная эффективность ввода до 6 % для красного света и до 3 % для синего. Предложенный подход обеспечивает непрерывную регулировку вплоть до полного отключения ввода и представляет собой компактную и адаптируемую платформу для задач интегральной фотоники.

Ключевые слова: нематические жидкие кристаллы, ферриэлектрические жидкие кристаллы, поверхностная энергия, инкаплинг, планарный волновод, дополненная реальность

Light coupling into a planar waveguide using electro-optic effects in ferroelectric and nematic liquid crystals

Kesaev Vladimir Valerievich^{1,2}

kesaevvv@lebedev.ru, vvkesaev@rosatom.ru

SPIN-code: 2050-1621

Tkachenko Timofey Pavlovich^{1(*)}

tptkachenko@lebedev.ru

SPIN-code: 6162-5088

Kopenkin Sergey Sergeevich^{1,3,4}

kopenkinss@yandex.ru

Putilin Nikolay Andreevich^{1,4}

nick.putilin.01@mail.ru

SPIN-code: 6753-7109

¹ P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² LLC SP Quantum, Moscow, Russia

³ RTU MIREA, Moscow, Russia

⁴ MIIGAik, Moscow, Russia

Abstract. An efficient and controllable method for coupling visible light into a planar waveguide is investigated, utilizing a prism and a surface relief diffraction grating immersed in a liquid crystal. Light coupling is enabled by the difference between the extraordinary refractive index of the liquid crystal and the matching of its ordinary refractive index with that of the grating or prism material. The coupling efficiency is controlled by spatial reorientation of the liquid crystal director under an external electric field, enabling dynamic and spatially modulated control of the coupled optical power. The method was experimentally implemented using a nematic liquid crystal and a polymer diffraction grating fabricated from a photocurable hybrid epoxy-acrylate monomer. An absolute coupling efficiency up to 6% for red light and up to 3% for blue light was achieved. The proposed approach enables continuous tunability down to complete decoupling and offers a compact, reconfigurable platform for integrated photonics applications.

Keywords: nematic liquid crystals, ferroelectric liquid crystals, surface energy, incoupling, planar waveguide, augmented reality

Введение. Ввод оптического излучения в планарный волновод является важной задачей в разработке систем дополненной реальности (AR-систем). Современные исследования сосредоточены на использовании голографических оптических волноводов, обеспечивающих широкое поле зрения, компактность и высокое разрешение изображения. Основным элементом таких систем является планарный волновод, в который излучение вводится под углом, обеспечивая распространение по принципу полного внутреннего отражения (ПВО). Это позволяет формировать изображение непосредственно на сетчатке глаза, сохраняя общую прозрачность системы и возможность наблюдать окружающий мир без искажений [1–3].

На сегодняшний день наиболее перспективными для эффективного ввода излучения считаются объемные поляризационные решетки с КПД, теоретически достигающим 100 %. Однако угловая селективность приводит к необ-

ходимости снижения эффективности в пользу однородности интенсивности по полю [4]. Кроме того, такие системы пассивны.

Задача управления вводом представляет собой самостоятельную и актуальную проблему. Пространственный контроль ввода оптического излучения в планарные волноводы позволяет расширить поле зрения AR-систем, реализовать адаптивные оптические элементы (линзы, корректоры, синтезированные апертуры и пр.), а также чередовать ввод излучения разных длин волн для полноцветного воспроизведения. Кроме того, важной представляется и обратная задача — пространственно-модулированное пропускание. Например, использование двумерных функций Уолша позволит реализовать синтезированные апертуры большой площади. Таким образом, реализация пространственно-временного управления вводом излучения открывает новые перспективы для создания эффективных, компактных и функционально насыщенных систем дополненной реальности и интегральной фотоники.

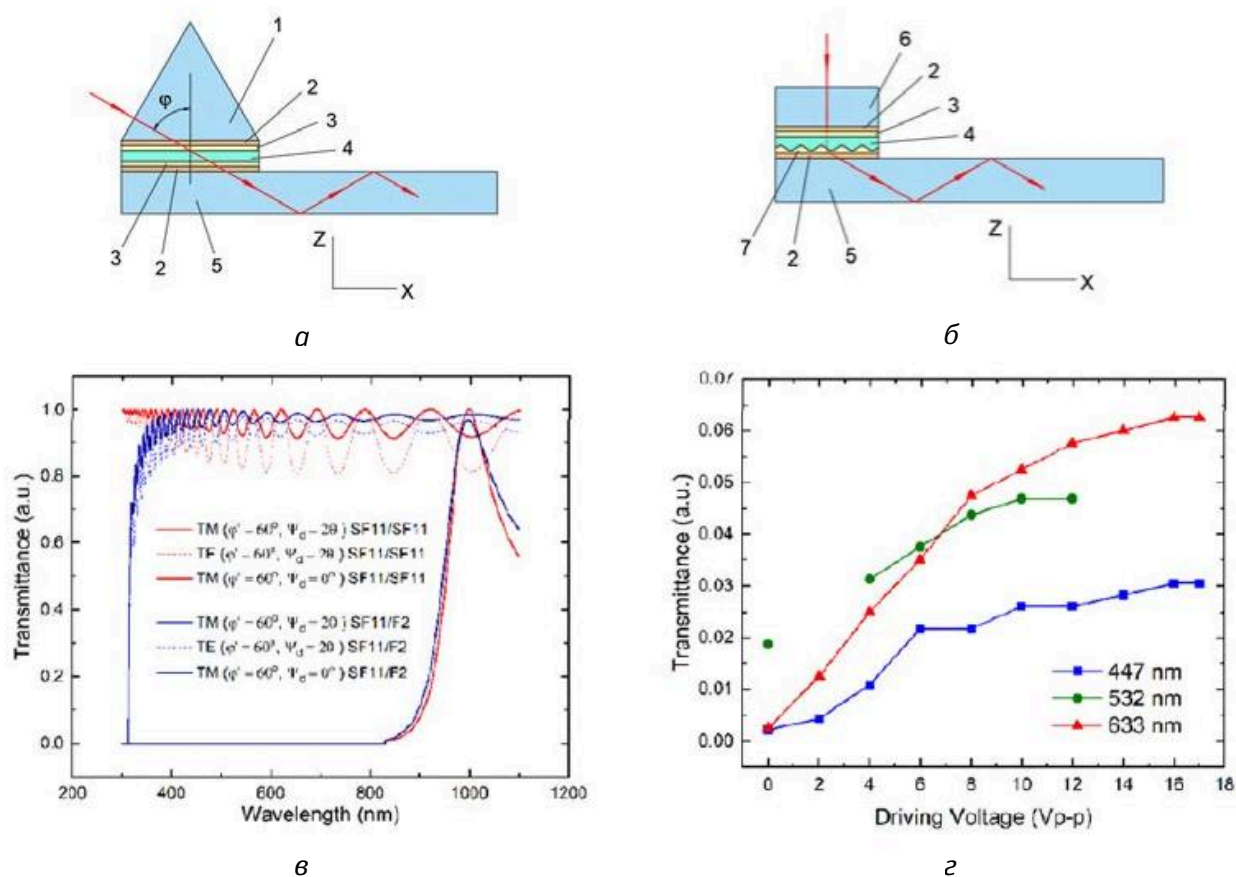
Материалы и методы. В данной работе исследовались два варианта реализации управляемого ввода оптического излучения в планарный волновод с использованием жидких кристаллов (ЖК). В качестве механизмов, обеспечивающих непрерывное и плавное изменение вводимой оптической мощности, в первом случае используется френелевское отражение на границе раздела двух сред, а во втором — эффект иммерсии дифракционной решетки (ДР). Оба подхода проиллюстрированы на рисунке.

Управляя показателем преломления среды, из которой свет падает на границу или на решетку (с помощью внешнего электрического поля), можно добиться либо нарушения полного внутреннего отражения (НПВО), либо полной иммерсии ДР — и тем самым реализовать управление вводом. Оба подхода, основанные на НПВО и на иммерсии, были исследованы теоретически, а последний — также и экспериментально.

Помимо нематических жидких кристаллов (НЖК), в работе рассматривался также ферриэлектрическая смектическая С*-фаза (ФЖК). В последнее время удалось существенно расширить температурный диапазон существования этой фазы [5]. По сравнению с традиционными НЖК, такие материалы демонстрируют на порядок более высокое быстродействие при управляющих напряжениях, меньших характерных пороговых значений для НЖК.

Для реализации управления на основе НПВО (рисунок, а) был использован эффект планарного переключения ФЖК в плоскости, параллельной границе раздела сред. В отсутствие электрического поля большая ось эллипсоида эффективного показателя преломления, была ориентирована под углом $\Psi_d = \theta$ к оси X. При подаче управляющего напряжения на электроды (рисунок, а) этот угол варьировался от нуля до $\Psi_d = 2\theta$ оставаясь в плоскости границы раздела. Подробнее данный электрооптический эффект описан в работах [3, 6]. Для заданного угла падения φ , показатели преломления вводной призмы, ФЖК и волновода подбирались так, чтобы ТМ-волна для угла $\Psi_d = 0^\circ$ испытывала ПВО. При подаче управляющего напряжения условие ПВО нарушалось (режим НПВО), и часть излучения вводилась в волновод.

Отдельно рассмотрено влияние толщины слоя ФСЖК h на эффективность ввода. В данной работе моделировался ФЖК, получивший рабочее название FerrLCM-1 [5], с углом наклона молекул в смектическом слое $\theta = 35,6^\circ$ и эффективными показателями преломления $n_o = 1,531$ и $n_e = 1,644$ при комнатной температуре и длине волны 589,3 нм.



α — схема ввода излучения на основе НПВО; δ — схема ввода излучения на основе иммерсии ДР; ν — пропускание системы (ввод) для НПВО, показано для пар материалов N-SF11/N-SF11 и N-SF11/N-F2; z — пропускание системы (ввод) для иммерсированной ДР в зависимости от амплитуды приложенного сигнала: 1 — призма; 2 — слой прозрачного электрода (ITO) 20–30 нм; 3 — слой ориентанта 30–50 нм (полиимид); 4 — ЖК $h = 5$ мкм; 5 — волновод; 6 — покровное стекло; 7 — ДР (толщина ≈ 10 мкм)

Контроль ввода на основе иммерсии ДР становится возможным благодаря хорошим ориентирующим свойствам (контраст > 1000) рельефных решеток с периодом 200÷500 нм, используемых для ввода излучения. Ключевыми аспектами в этом подходе являются сцепление жидкого кристалла с материалом решетки и долговременная химическая устойчивость полимерного материала ДР к растворяющему действию ЖК. В рамках данной части работы были проведены исследования поверхностной энергии методом Оуэнса — Вендта, а также выполнен подбор оптически согласованных материалов с целью удовлетворения конструкционных требований, обеспечения устойчивой ориентации ЖК и достижения полной иммерсии в видимом диапазоне длин волн. В качестве физического механизма был реализован S-эффект в НЖК, при котором директор ориентирован вдоль штрихов решетки (вдоль оси Y на рисунке δ). Это

обеспечивает согласование обыкновенного показателя преломления с показателем материала решетки. Таким образом, модулировалась ТЕ-волна.

Для экспериментальной реализации в качестве рабочей пары использовались нематический жидкий кристалл E7 (Merck) с показателями преломления 1,5222 (обыкновенный) и 1,7390 (необыкновенный) на длине волны 589,3 нм, а также УФ-фотоотверждаемый гибридный эпоксиакрилатный мономер HE-AR, специально разработанный для АО НПО «КРИПТЕН» (Дубна, Россия) для применения в технологиях наноимпринтинга. Показатель преломления отвержденного полимера составляет 1,527.

Результаты. Для способа, основанного на НПВО, подбирались комбинации материалов призмы и волновода на основе табулированных значений показателей преломления и/или формул дисперсии. Моделировались различные углы падения и толщина слоя ФЖК. Очевидное решение — использование тяжелых флинтгов в качестве материалов сразу приводило к паразитной интерференции и появлению полос Физо. Нежелательная модуляция достигала $\approx 10\%$ при толщине слоя $h = 5$ мкм и стекле N-SF11 (SCHOTT), как показано на рисунке, в. При замене материала волновода на флинт F2 (SCHOTT) модуляцию удалось снизить до $\approx 2\%$. Переключение ФСЖК на угол $\Psi_d = 2\theta$ п позволяет практически полностью ввести излучение в волновод. Управление ФСЖК осуществлялось знакопеременным треугольным сигналом с амплитудой до 2 Вп-п.

На рисунке, г приведена зависимость интенсивности введенного излучения для способа, основанного на иммерсии ДР. Для измерений использовался недавно разработанный оригинальный метод [7] определения периодов волноводных решеток. В данном случае применялась установка, описанная в работе [7], но теперь для вывода излучения из волновода. В качестве управляющего сигнала использовались пакеты однополярных прямоугольных импульсов с периодом от 100 мкс до 1 мс и длительностью пакета от 20 мс до нескольких секунд. В эксперименте варьировалась амплитуда импульсов. На рисунке, г представлены абсолютные значения, нормированные на интенсивность входного излучения. Несмотря на то, что поверхность волновода не была просветлена, отражения на границах (френелевские потери) при расчетах эффективности не учитывались.

Обсуждение полученных результатов. При несомненных преимуществах — высокой скорости переключения (< 250 мкс) и низких управляющих напряжениях (< 2 В) [5], к недостаткам смоделированной реализации ввода на основе НПВО и ФЖК следует отнести ограниченный диапазон вводных углов $\Delta\varphi = 20^\circ$. Тем не менее, данный способ привлекателен своей конструктивной простотой и доступностью. Кроме того, моделирование проводилось на ограниченном наборе материалов, и полученное решение может быть существенно улучшено.

Реализация на основе иммерсии ДР представляется наиболее перспективной. Она обладает минимальными габаритами и массой системы и может быть легко интегрирована в существующие технологические решения. К не-

достаткам следует отнести хроматизм, сравнительно низкую эффективность ввода излучения и высокие управляющие напряжения. Для преодоления этих ограничений требуется создание решеток с большей высотой рельефа, а также применение ЖК с более высокой анизотропией показателя преломления.

Заключение. В данной работе продемонстрированы два метода управляемого ввода излучения в планарный волновод с использованием ЖК: на основе нарушения полного внутреннего отражения и на основе иммерсии рельефной дифракционной решетки. Оба подхода обеспечивают электрически управляемое модулирование вводимой оптической мощности. Моделирование и эксперимент подтвердили возможность непрерывной и обратимой настройки эффективности ввода вплоть до полного его подавления. Экспериментально реализованная схема на основе иммерсионной решетки показала эффективность на уровне, достаточном для практических применений в системах дополненной реальности. Она отличается компактностью, малым весом и высокой степенью интегрируемости с существующими AR-технологиями. Полученные результаты подтверждают перспективность ЖК как материалов для создания адаптивных и миниатюрных оптических компонентов. Продолжение исследований в направлении оптимизации геометрии решеток, выбора ЖК с высокой анизотропией показателя преломления и реализации полноцветных схем открывает путь к созданию управляемых волноводных интерфейсов нового поколения для задач дополненной реальности и интегральной фотоники.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №23-72-01063.

Список источников

- [1] Jang C., Bang K., Chae M. et al. Waveguide holography for 3D augmented reality glasses. *Nature Communications*, 2024, vol. 15, no. 66. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44032>
- [2] Ding Y., Yang Q., Li Y. et al. Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges. *eLight*, 2023, vol. 3, no. 24. <https://doi.org/10.1186/s43593-023-00057-z>
- [3] Lee Y.-H., Wang Y., Chen Y. et al. Prospects and challenges in augmented reality Displays. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 2019, vol. 1, no. 1, art. no. 77. <https://doi.org/10.3724/sp.j.2096-5796.2018.0009>
- [4] Ding Y., Gu Y., Yang Q. et al. Breaking the in-coupling efficiency limit in waveguide-based AR displays with polarization volume gratings. *Light: Science & Applications*, 2024, vol. 13, art. no. 185. <https://doi.org/10.1038/s41377-024-01537-8>
- [5] Tkachenko T.P., Kiselev A.D., Kiselev D.A. et al. Broad temperature range ferroelectric liquid crystal: Temperature dependencies of dielectric and electro-optical properties. *Optical Materials*, 2024, vol. 156, art. no. 115966. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115966>
- [6] Kiselev A.D., Chigrinov V.G., Kwok H.S. Polarization-gratings approach to deformed-helix ferroelectric liquid crystals with subwavelength pitch. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2011, vol. 83, no. 3, art. no. 031703. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.031703>
- [7] Kopenkin S.S., Zubkov V.A., Goryachev A.A. et al. Method for measuring periods of waveguide diffractive optical elements. *Technical Physics Letters*, 2022, vol. 48, no. 15, pp. 38–38. <https://doi.org/10.21883/tpl.2022.15.53818.18953>