

## Как управлять светом с помощью магнитного поля

В.И. Белотелов

В последнее время идея создания оптических компьютеров приобретает все большую популярность, подкрепляемую, с одной стороны, неиссякающим стремлением к все большим скоростям вычислений, а, с другой стороны, удивительными возможностями современных технологий.

Для того, чтобы обрабатывать и передавать информацию с помощью света, т.е. с помощью фотонов, надо научиться эффективно управлять ими. Хотя электрического заряда у фотонов нет, но наличие поляризации - ориентации их электромагнитного поля, дает определенную надежду на успех. Прежде всего, перенесемся в конец 19-го века в лабораторию великого английского физика Майкла Фарадея, ведь именно оттуда и берет исток наша история.

### Намагнитить луч и осветить магнитную силовую линию

Разнообразные физические явления, связанные с магнитными и оптическими свойствами сред, изучались независимо в течение многих столетий. Свет сопровождает человечество с самого момента его зарождения, а магнетизм известен с древних времен<sup>1</sup>. Однако только в 1845 г. М. Фарадей поставил эксперименты, доказавшие связь между ними. Отчасти это связано с тем, что в обычных условиях магнитооптические эффекты весьма малы и для их открытия требовалась физическая интуиция гения. Удивительно, что это произошло в то время, когда не было ясного понимания ни природы магнитных свойств, ни природы оптических явлений, и уравнения Максвелла еще не были сформулированы.

*“Я уже давно придерживался мнения, что различные формы и силы материи настолько близки и родственны, что могут превращаться друг в друга. Это твердое убеждение побудило меня произвести много изысканий с целью открыть связь между светом и электричеством. Однако результаты оказались отрицательными...”* - так сам Фарадей комментирует свои опыты. *«Эти безуспешные изыскания не могли поколебать моего твердого убеждения, основанного на научных соображениях. Поэтому я недавно возобновил исследование на очень тонких и строгих началах, и в конце концов мне удалось намагнитить и наэлектризовать луч света, и осветить магнитную силовую линию.»*

В словах *«намагнитить луч света»* подразумевается вызываемое магнитным полем вращение плоскости поляризации света – магнитооптический эффект Фарадея. Кроме того, обращают на себя внимание и слова *“осветить магнитную силовую линию”*, намекающие на возможное обратное влияние света на магнетизм. В опытах Фарадея такого явления обнаружено не было, но эти слова указывают на то, что великий физик фактически предсказал и его. Влияние света на магнитные свойства вещества было теоретически доказано гораздо позже в 1960 г. советским физиком Л.П. Питаевским, который показал, что свет, обладающий круговой поляризацией, способен намагнитить среду, которую он освещает. Эффект получил название обратного эффекта Фарадея.

Хотя обратный эффект Фарадея также имеет большую практическую значимость, мы все же обратимся к прямым магнитооптическим эффектам, ведь наша цель – управлять светом, используя магнитное поле.

### Спин и поляризация фотонов

Итак, магнитное поле влияет на поляризацию света. Напомним, что можно выделить естественную поляризацию, т.е. неполяризованный свет, а также три основных состояния

---

<sup>1</sup> Предполагают, что происхождение слово "магнетизм" и открытие магнитных явлений связано с местностью Магнезия в Македонии или с именем пастуха Магнес, впервые нашедшего (примерно в 1500 г. н.э.) природный магнитный камень, который притягивал к себе железный наконечник его палки и гвозди его сапог.

поляризации: плоская, круговая и эллиптическая поляризации. В общем случае поляризованный свет обладает эллиптической поляризацией, т.е. траектория проекции конца вектора напряженности электрического поля волны на плоскость, перпендикулярную направлению ее распространения, является эллипсом. Наибольший практический интерес представляют два крайних случая эллиптической поляризации: линейная поляризация, когда эллипс вырождается в отрезок, и круговая поляризация, при которой эллипс превращается в окружность.

С квантовомеханической точки зрения понятие поляризации света связано с наличием у фотона спина. Фотоны как частицы с нулевой массой покоя могут находиться в двух состояниях со значениями магнитного момента  $\pm \hbar$  ( $\hbar$  - постоянная Планка), направленного вдоль импульса фотона; такие фотоны обладают круговой поляризацией: левой (квантовое число  $m = +1$ ) или правой ( $m = -1$ ). Эллиптически поляризованные фотоны находятся в состоянии, которое складывается из состояний с  $m = \pm 1$ ; при линейной поляризации суперпозиция этих состояний такова, что средняя проекция момента на направление импульса равна нулю.

### Эффект Фарадея

У свободного фотона состояния  $m = +1$  и  $m = -1$  имеют одинаковые энергии (частоты). В квантовой механике такую ситуацию называют вырождением. Снять вырождение можно при помощи внешнего магнитного поля, направленного вдоль волнового вектора (предполагается, что фотон распространяется в среде с показателем преломления  $n$ ): в магнитном поле компоненты с  $m = \pm 1$  будут распространяться с разными фазовыми скоростями:

$$v_{\phi, \pm} = \frac{c}{n} (1 \pm Q).$$

Здесь  $c$  - скорость света, а  $Q$  - специальный магнитооптический параметр. Магнитооптический параметр  $Q$ , в немагнитных средах пропорциональный магнитному полю, и в не очень больших полях (магнитная индукция не превышает 200-300 мТл) имеет типичное значение  $\sim 10^{-6} - 10^{-4}$ . В ферромагнитных материалах параметр  $Q$  отличен от нуля даже в отсутствие поля и достигает величин  $10^{-3} - 10^{-1}$ . Он определяется внутренним магнитным полем, которое создается атомами и ионами кристаллической решетки магнетика.

Но с фазовой скоростью непосредственно связан показатель преломления волны:  $n = \frac{c}{v_{\phi}}$ .

В результате получается, что в магнитной среде волны, поляризованные по- и против- часовой стрелки, преломляются по-разному - возникает явление циркулярного двулучепреломления (гиротропия) среды.

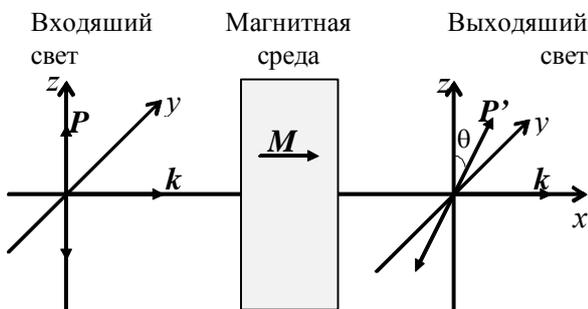


Рис. 1 Эффект Фарадея

Явление гиротропии связано с эффектом Зеемана, т.е. с расщеплением линий поглощения света в магнитном поле. В магнитном поле под действием силы Лоренца резонансные частоты вращения электронов по левому и правому кругу смещаются в различные стороны относительно первоначального значения собственной частоты. Это, в свою очередь, и приводит к отличию показателей преломления для волн, поляризованных по правому и левому кругу. Экспериментально при этом наблюдается эффект Фарадея, проявляющийся в том, что плоско

поляризованный свет, распространяясь вдоль направления намагниченности  $\vec{M}$ , испытывает вращение плоскости поляризации на некоторый угол  $\theta$  (рис. 1).

Чтобы объяснить это явление, представим плоско поляризованную волну как сумму левой и правой циркулярно поляризованных волн (рис. 2). Если обе волны имеют одинаковые фазовые скорости, то, распространяясь вместе, они складываются и дают волну, которая

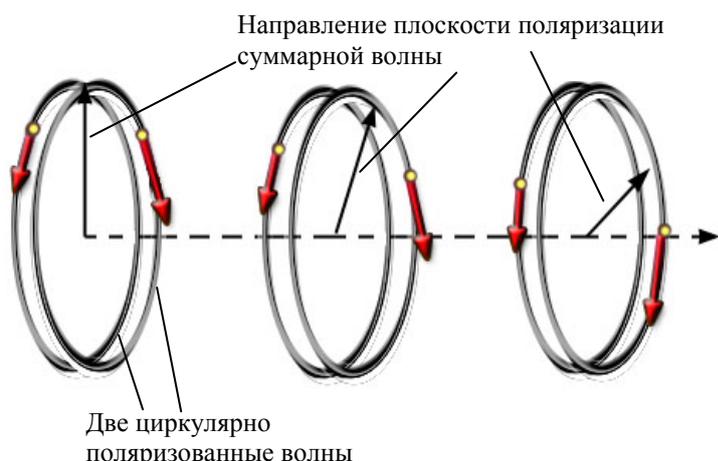


Рис. 2 Эффект Фарадея возникает при сложении двух циркулярнополяризованных волн, распространяющихся с различными фазовыми скоростями.

плоскополяризована вдоль фиксированного направления. Но если их фазовые скорости различаются, то при распространении одна волна будет обгонять другую и плоскость поляризации суммарной волны будет постепенно поворачиваться – наблюдается эффект Фарадея.

Угол поворота плоскости поляризации излучения на выходе из ферромагнетика пропорционален магнитооптическому параметру  $Q$  и длине пути волны в намагниченной среде. Эффект Фарадея широко используют для наблюдения

магнитной структуры в прозрачных пленках, в которых намагниченность перпендикулярна или почти перпендикулярна поверхности пленки. Эффект Фарадея — один из наиболее эффективных механизмов управления поляризацией света. Он широко применяется в лазерной технике, информатике и других областях.

Можно сказать, что эффект Фарадея является основой магнитооптики – раздела оптики, в котором изучают влияние магнитного поля на оптические свойства вещества. Наряду с эффектом Фарадея, существует множество других магнитооптических эффектов, среди которых стоит еще упомянуть эффект Керра. Он состоит в изменении характеристик световой волны при отражении от магнитной среды. При этом в зависимости от геометрии падения света, при отражении будет меняться либо его поляризация, либо интенсивность, либо и то, и другое.

### Два пути к совершенству

Магнетизм воздействует на свет, но это действие обычно весьма мало. Но как же тогда магнитное поле сможет управлять светом? Ответ вроде бы очевиден: необходимо магнитооптические эффекты каким-то образом увеличить.

В 70-е – 80 –е годы прошлого века, когда экспериментальная магнитооптика переживала бурное развитие, ученые шли по пути подбора оптимального химического состава. Одним из наиболее распространенных магнитооптических материалов является ферромагнитный диэлектрик – редкоземельный феррит-гранат с ионами висмута. Его химическая формула  $R_xBi_{3-x}Fe_5O_{12}$ . В ней  $R$  обозначает один или несколько редкоземельных ионов, а  $x$  задает относительную концентрацию редкоземельных ионов и висмута. На основании многочисленных экспериментов выявили составы феррита-граната, обеспечивающие в видимом и ближнем инфракрасном свете большие магнитооптические эффекты и малое оптическое поглощение. К примеру, намагниченная пленка феррита-граната состава  $Dy_{0.5}Bi_{2.5}Fe_5O_{12}$  толщиной 10 мкм способна повернуть поляризацию красного света на угол около 20 градусов, что вполне подходит для возможных применений.

Однако, следуя такому подходу, невозможно существенно усилить магнитооптические эффекты. В поиске состава вещества в конце концов наступило насыщение, и прогресс затормозился.

К счастью, существует и другой альтернативный подход, связанный с так называемыми оптическими наноструктурированными материалами – средами, оптические свойства которых

(например, показатель преломления) изменяются в пространстве на масштабе менее нескольких сотен нанометров.

Ярким примером таких материалов являются фотонные кристаллы. Фотонные кристаллы – это периодические диэлектрические или металло-диэлектрические материалы, которые воздействуют на распространяющиеся по ним световые волны аналогичным образом, как и периодический потенциал в кристаллах влияет на движение электронов, приводя к образованию разрешенных и запрещенных энергетических зон. Поскольку в основе идеи фотонного кристалла лежат явления дифракции и интерференции, то период структуры фотонного кристалла должен быть порядка длины волны электромагнитного излучения в веществе, т.е. быть около 300 нм для работы в видимом диапазоне волн. Примером одномерных фотонных кристаллов служит многослойная структура из чередующихся слоев прозрачных веществ с двумя различными показателями преломления (рис.3 а). Система параллельных отверстий в диэлектрическом слое формирует двумерный фотонный кристалл (рис. 3 б), а плотноупакованные наносферы кварца представляют собой трехмерного фотонный кристалл (рис. 3 в).

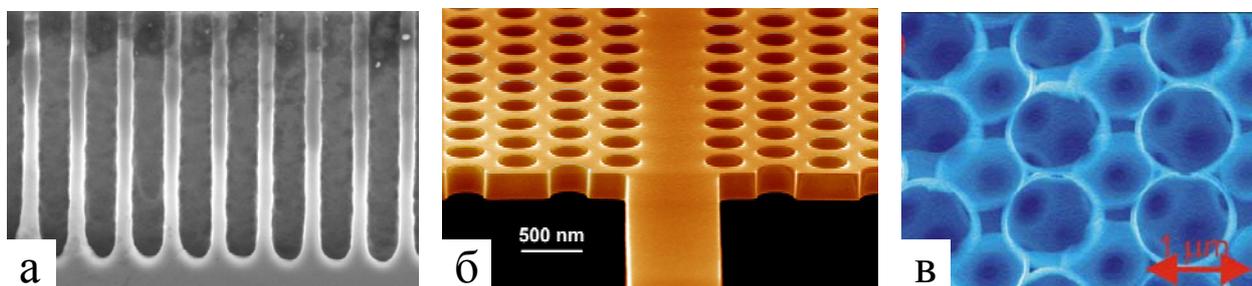


Рис. 3 Одномерные (а), двумерные (б) и трехмерные (в) фотонные кристаллы.

Чем же замечательны наноструктурированные материалы и, в частности, фотонные кристаллы? Тем, что их оптические свойства – направление, интенсивность и поляризация отраженного и прошедшего света, определяются не только и даже не столько показателями преломления веществ, из которых они сделаны, а их структурой. Специально подобранная структура вещества приводит к явлениям интерференции и дифракции, существенно меняющим условия прохождения света через материал. Так, в фотонных кристаллах возникают запрещенные зоны – области частот света, при которых свет не может проникнуть внутрь фотонного кристалла и полностью отражается от него. Появление наноструктурированных материалов фактически открывает новую парадигму в создании оптических сред, в рамках которой необходимые оптические свойства материала достигают не путем подбора оптимального химического состава, как это было в старом подходе, а путем создания геометрической или фазовой структуры с характерным размером, не превышающим нескольких сотен нанометров. Поскольку наноструктурированные материалы создают искусственно, их часто называют метаматериалами.

### **Намагниченные фотонные кристаллы**

Если наноструктурированный материал содержит магнитные вещества, то можно ожидать, что в нем будут наблюдаться магнитооптические эффекты, аналогичные тем, что возникают в обычных однородных средах, но, возможно, несколько измененные. Идея использовать для управления света в фотонном кристалле магнитные вещества впервые была предложена в конце 90-х годов минувшего столетия японскими учеными во главе с профессором М. Иноуе. Они рассмотрели эффект Фарадея в одномерных фотонных кристаллах, представляющих собой многослойные пленки из хаотично чередующихся слоев висмут-замещенного иттриевого феррита-граната и кварца. Для определенных частот излучения при оптимально подобранных параметрах структуры ими было обнаружено

увеличение эффекта Фарадея более чем в 300 раз по сравнению с аналогичной однородной средой.

На примере одномерного случая, можно выделить несколько разновидностей магнитных фотонных кристаллов. Прежде всего, это стандартные системы, состоящие из чередующихся четвертьволновых (толщина равна одной четвертой длины волны света в веществе) магнитных  $M$  (например, церий-замещенный иттриевый феррит-гранат - Ce:YIG) и немагнитных  $N$  (например, гадолиний галлиевый гранат) слоев (рис. 4 в). Такие фотонные кристаллы обладают запрещенной зоной с центром на проектировочной длине волны, т.е. не пропускают свет с длиной волны в некоторой области вокруг данной. Под проектировочной длиной волны подразумевают длину волны света вне кристалла, при которой в каждом из его слоев укладывается одна четвертая длины волны. На рис. 4 (а,б) показаны зависимости коэффициента пропускания и угла Фарадея для одномерного фотонного кристалла, настроенного на ближний ИК диапазон (проектировочная длина волны – 1.55 мкм). Он состоит из 30 пар магнитного и немагнитного слоев. Усиление эффекта Фарадея возникает на границе запрещенной зоны, т.е. в районе длин волн 1.49 мкм и 1.61 мкм. Но почему именно там? Оказывается, именно на этих длинах волн групповая скорость света резко возрастает. Это приводит к тому, что также возрастает и эффективное время взаимодействия волны с намагниченностью материала, а значит и эффект Фарадея.

Важной особенностью резонансов на граничных частотах является то, что максимумы прохождения и фарадеевского вращения практически совпадают, что позволяет использовать фотонные кристаллы в качестве миниатюрных элементов, вращающих плоскость поляризации на большие углы. Оптимальный подбор магнитных материалов, их геометрических размеров и расположения, позволит создать новое поколение оптических устройств, управляемых магнитными полями. При этом нужно иметь в виду не только инфракрасный, но и видимый диапазон.

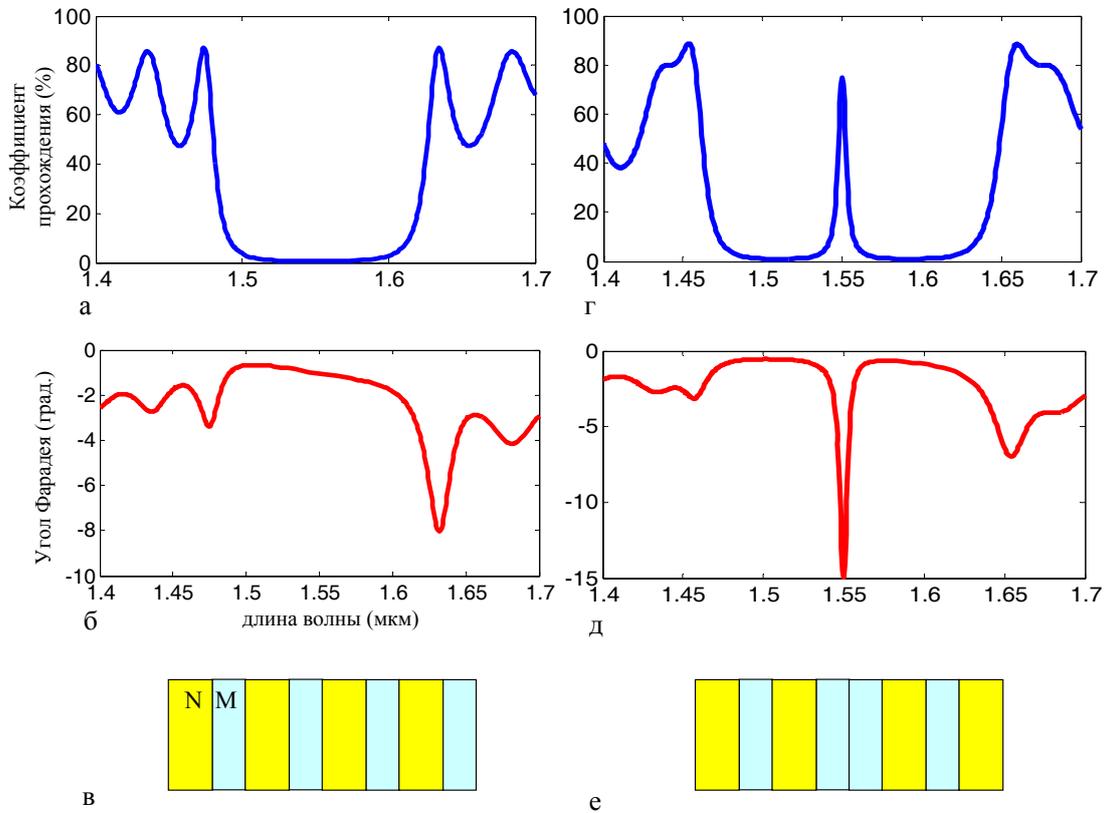


Рис. 4 Оптические свойства в ближнем инфракрасном диапазоне одномерного магнитного фотонного кристалла, состоящего из 30 пар магнитного (Ce:YIG) и немагнитного (гадолиний-галлиевый гранат) слоев с идеальной периодичностью (а-в) и со структурным дефектом (г-е). (а, в) Спектр прохождения света через кристалл. (б,г) Спектр угла Фарадея.

В одномерных магнитных фотонных кристаллах, можно создать структурные дефекты – несколько раз инвертировать порядок следования слоев, и тем самым получить один или несколько слоев с удвоенной толщиной (рис. 4 е). Наличие таких дефектов приводит к появлению в фотонной запрещенной зоне узких резонансных уровней, на частотах которых прохождение света близко к 100 процентному (рис. 4 г). Вместе с тем, групповая скорость излучения на этих резонансах вновь оказывается очень малой, и эффект Фарадея при этом резко возрастает (рис. 4 д). В результате удается получить пик пропускания нужной ширины и большой угол Фарадея. К примеру, на длинах волн ближнего инфракрасного диапазона с помощью таких фотонных материалов удается получить угол поворота поляризации света на 45° на расстоянии, равном всего 1.5 мкм, в то время как для той же однородной среды, указанный угол поворота достигается на расстоянии, в 150 раз большем. Поэтому магнитные фотонные кристаллы с дефектами чередования слоев очень важны для практических применений.

Тем не менее, усиление эффекта Фарадея в фотонных кристаллах впервые было экспериментально продемонстрировано японскими учеными на структуре другого типа. Она задается формулой:  $(\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5)^6/\text{Bi:DyIG}/(\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)^6$ , где пары слоев  $(\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5)$  чередуются по 6 раз. Эта система является магнитным микрорезонатором – внутрь немагнитного резонатора помещают слой магнитного материала. Хотя изготовить такую систему проще, чем предыдущие разновидности магнитных фотонных кристаллов, она демонстрирует все же менее впечатляющие результаты.

В последние несколько лет начали исследовать и многомерные магнитные фотонные кристаллы. Работа с такими системами существенно расширяет круг наблюдаемых эффектов, а также приводит к новым интересным применениям. Экспериментальные и теоретические исследования двумерных и трехмерных магнитных фотонных кристаллов активно ведут в МГУ им. М.В. Ломоносова, в Физико-техническом институте им. М.Я. Иоффе, а также в Японии, Австралии, Швеции и ряде других стран. В большинстве случаев экспериментальной реализации эти структуры представляют собой коллоидные растворы упорядоченных частиц сферической или цилиндрической формы. Например, созданы двумерные коллоидные фотонные кристаллы, состоящие из стеклянных волокон, покрытых никелем. Резкое увеличение эффекта Фарадея было зафиксировано в трехмерных коллоидных кристаллах из кварцевых сфер, промежутки между которыми заполнены магнитной жидкостью насыщенного раствора нитрата диспрозия в глицерине.

До сих пор мы говорили только про усиление в фотонных кристаллах эффекта Фарадея. Однако, необходимо отметить, что и другие магнитооптические эффекты могут быть так же существенно усилены благодаря специально подобранной оптической структуре среды. Следовательно, имея в руках образец такого фотонного кристалла толщиной всего несколько микрометров, можно действительно эффективно управлять светом, меняя в первую очередь его поляризацию.

### **Магнитооптика на службе**

Настало время поговорить о том, где магнитооптика может пригодиться. Начнем с передачи информации. Поскольку в оптических компьютерах биты информации передаются световыми волнами, то для их реализации нужно научиться менять или, говоря иначе, модулировать с высокой частотой интенсивность света. Вот здесь и должен пригодиться усиленный эффект Фарадея.

Действительно, магнитооптический модулятор можно организовать так: расположить магнитный фотонный кристалл с большим магнитооптическим параметром между двумя поляризаторами, скрещенными под углом 45 градусов, и менять его намагниченность внешним магнитным полем в таких пределах, что угол поворота плоскости поляризации также составит 45 градусов. Тогда при максимальной намагниченности вдоль оси ОХ поляризация света на выходе из слоя окажется параллельной направлению пропускания анализатора, и почти вся световая энергия пройдет через модулятор. В то же время, при максимальной

намагниченности слоя против оси ОХ плоскость поляризации света повернется в противоположную сторону и будет перпендикулярна оси анализатора – свет полностью поглотится. При промежуточных значениях намагниченности угол Фарадея будет меньше 45 градусов, и только часть излучения выйдет наружу. Получается, что, изменяя магнитное поле, удается влиять на интенсивность прошедшего света. Очень важным фактором при этом является скорость переключения. Магнитные материалы позволяют достигать частот переключения вплоть до десятков гигагерц, что соответствует времени переключения порядка долей наносекунды. Для сравнения стоит сказать что, переключение в жидкокристаллических веществах проходит за микросекунды.

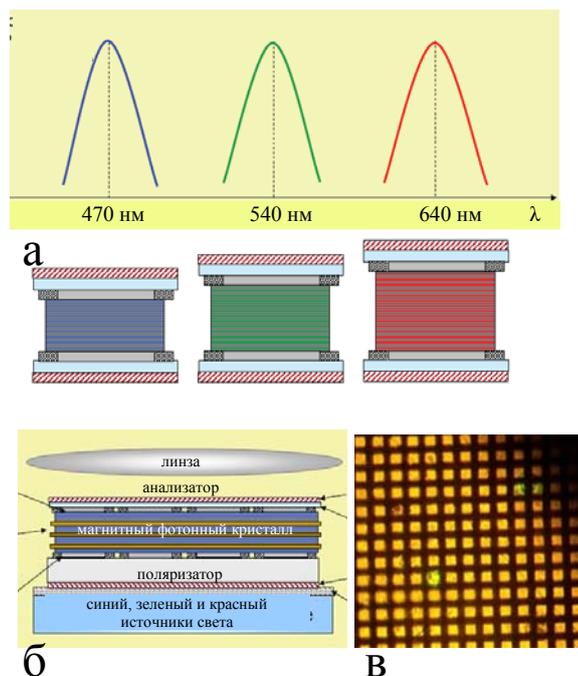


Рис. 5 Принцип действия магнитооптического видео-проектора. (а) три магнитных фотонных кристалла, настроенные на синюю ( $\lambda=470$  нм), зеленую ( $\lambda=540$  нм) и красную ( $\lambda=640$  нм) длины волн, и спектры их пропускания. (б) Схема магнитооптической ячейки. (в) пиксельная структура магнитооптического дисплея.

Эффективно и быстро изменять интенсивность светового потока крайне важно не только в фотонных чипах оптических компьютеров будущего, но и в других оптических устройствах. Например, на базе магнитного фотонного кристалла можно создать миниатюрные ячейки, пропускающие свет заданного цвета – красного, синего или зеленого (рис. 5). Такие ячейки можно объединить в единую систему и из получившихся пикселей создать монитор или видео-проектор. Адресно прикладывая внешнее магнитное поле к цветным пикселям, можно управлять яркостью того или иного цвета и придавать пикселу требуемый оттенок, формируя яркое, насыщенное цветное изображение. Разработка аналогичных устройств сейчас ведется в Японии и США.

Сейчас все большую популярность приобретает так называемая электронная бумага – гибкий монитор, позволяющий читать электронные книги и газеты. В настоящее время уже появились такие устройства, обеспечивающие черно-белое изображение. Оказывается, магнитное поле здесь тоже может оказаться полезным. Как следует из совсем свежей работы корейских ученых, магнитные фотонные кристаллы, состоящие из магнитных наночастиц в полимерных микросферах, могут позволить сделать следующий шаг – создать цветную электронную бумагу. Принцип действия элемента схематически изображен на рис. 6. Микросфера с магнитным фотонным кристаллом внутри может свободно вращаться, будучи взвешена в машинном масле. Если излучение падает в направлении магнитной цепочки (или под острым углом меньше  $15^\circ$ ), то цвет отраженного излучения определяется в основном расстоянием между наночастицами. Если же под действием магнитного поля частица

повернется так, что цепочки магнитных частиц ориентируются перпендикулярно лучу света, то микросфера станет бесцветной. Таким образом, в данном случае магнитное поле помогает управлять цветом не непосредственно через магнитооптические эффекты, а опосредованно – ориентирует фотонный кристалл нужным образом. В то же время, и про эффект Фарадея тоже не стоит забывать. Не исключено, что и в данной структуре он окажется полезным для дополнительного воздействия на поляризацию света.

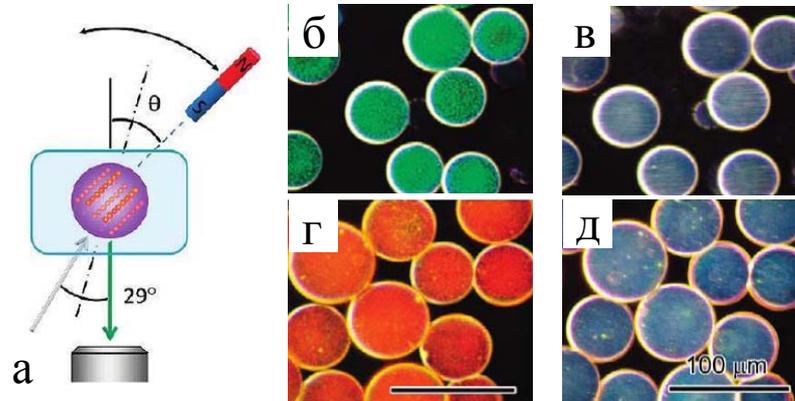


Рис. 6 (а) Полимерная микросфера с фотонным кристаллом внутри изменяет цвет отраженного излучения при повороте под действием магнитного поля. (б-д) Микросферы двух различных размеров: б), г) во “включенном” состоянии (ориентация цепочек магнитных наночастиц в фотонном кристалле параллельна лучу зрения), в), д) в “выключенном” состоянии (ориентация перпендикулярна лучу зрения).

Усиленное влияние магнитного поля на свет можно использовать не только ради изменения характеристик света, а также для мониторинга самого магнитного поля – в сверхчувствительных сенсорах. Оказывается, что в магнитных фотонных кристаллах и ряде других наноструктурированных магнитных материалах (например, в перфорированных металло-диэлектрических пленках) величина и положение резонансного пика прохождения очень чувствительны к внешнему магнитному полю. Следовательно, помещая магнитную наноструктуру во внешнее магнитное поле можно, измеряя интенсивность прошедшего света, судить о его величине и направлении.

### Магнитофотоника

Мы обсудили лишь несколько применений магнитооптических эффектов, которые далеко не исчерпывают все возможности и преимущества управления светом с помощью магнитного поля. В настоящее время постоянно появляются новые идеи и разрабатываются новые магнитооптические устройства. Недавно даже было введено специальное название для этого направления исследований – магнитофотоника. Это дополнительно свидетельствует об его актуальности. Знаменитый французский математик А.Пуанкаре отметил, что иногда достаточно изобрести новое слово, и это слово впоследствии становится творцом. Так получилось, к примеру, и с фотонными кристаллами: название предложили в 1987 г, а через несколько лет возник настоящий шквал исследований, приведший к новым научным и техническим открытиям. Что принесет термин «магнитофотоника», какие новые открытия нас ждут, чем еще окажется полезным открытая Фарадеем взаимосвязь между вечно сосуществующими друг с другом оптикой и магнетизмом – покажет время. Может быть фантазии научного художника на тему оптических наносхем - фотонного микрополиса станут явью именно благодаря магнитофотонике (рис. 7).

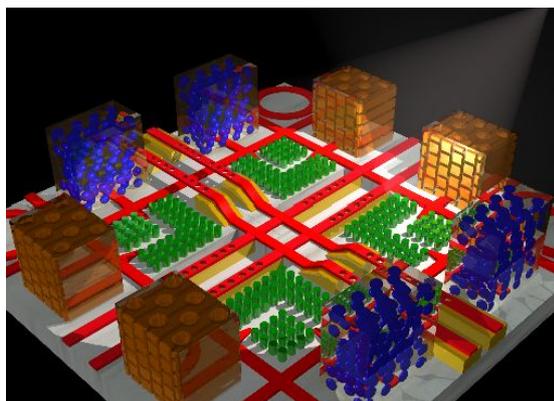


Рис. 7. Фантазия художника - фотонный микрополис – оптическая наносхема, в которой световые потоки обрабатываются фотонными кристаллами и другими наноструктурированными материалами, среди которых есть и магнитооптические.

### **Краткая научная биография автора**

В.И. Белотелов окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 2001 г. В 2004 г. стал кандидатом физико-математических наук, защитив диссертацию по теме “Особенности взаимодействия электромагнитного излучения с магнитными наноструктурами”. С 2004 г. работает на кафедре фотоники и физики микроволн физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова сначала в должности старшего научного сотрудника, а затем в должности доцента. Область научных интересов включает нанофотонику, плазмонику и магнитооптику.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ № 10-02-11504-с.