

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра оптики и биофотоники

Передача классических запутанных световых
пучков через биологические ткани мозга

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2223 группы
направления 03.04.02 «Физика»
Института физики
Сафронова Владимира Юрьевича

Научный руководитель

Профессор, д.ф.-м.н.



подпись, дата

Тучин В.В.

Зав. кафедрой

Профессор, д.ф.-м.н.



подпись, дата

Тучин В.В.

Введение

В оптической визуализации такие важные свойства света, как поляризация, длина волны и пространственные моды, играют важную роль для визуализации в рассеивающих средах. Структурированный свет является активной темой исследований в различных областях классической и квантовой теории запутывания. Рассеяние света размывает изображение, а степень рассеяния зависит от длины волны. Поляризация становится случайной из-за рассеяния. Крупные частицы рассеивают свет в основном в прямом направлении, в отличие от мелких частиц, которые рассеивают свет во всех направлениях с учетом длины волны света [1].

Кроме того, синий свет (более короткая длина волны) рассеивается сильнее, чем красный свет (более длинная длина волны), в результате чего мы видим голубое небо, а также и красные горизонты во время заката и восхода солнца. Интенсивность рассеяния изменяется как обратная величина длины волны, возведенной в степень $n > 2$ для рассеяния.

Из-за неоднородного состава ткани, состоящей из частиц и структур, они являются сильно рассеивающими средами. В этом случае выбор длины волны играет ключевую роль при проведении исследований биологических сред; рассеяние уменьшается, когда длина волны переходит в область ближнего инфракрасного (БИК или NIR) диапазона (780-3000 нм), который включает диапазон коротковолнового инфракрасного (КИК или SWIR) излучения (900-3000 нм). Оптимальным окном прозрачности в SWIR для глубокой визуализации мозга является «золотое окно» (1600-1850 нм) [2].

Более того, поляризация играет важную роль, поскольку она может влиять на глубину, на которой можно зарегистрировать проникающее излучение. Например, известно, что циркулярно поляризованный свет проходит глубже, чем линейно поляризованный [3]. В зависимости от размера рассеивающего элемента поляризация сохраняет оптическую память [4]. Пучок Лагерра-Гаусса (LG) [5], который является вихревым пучком, может нести в себе различные типы поляризации (линейную, круговую, радиальную и азимутальную) вместе с фазовым фронтом, характеризующимся орбитальным угловым моментом (ОАМ) величиной ℓ . Световые пучки с пространственно неоднородным профилем поляризации называются векторными пучками. Различные пространственные моды, такие как радиальные, имеют неразделимые части для круговой поляризации и ОАМ.

Комбинация поляризации и пространственных мод приводит к классической запутанности - группа Форбса [6] использовала классические запутанные векторные пучки для улучшения визуализации в турбулентной среде. Ключевая характеристика векторных пучков, таких как радиальная и азимутальные, объединяет поляризацию и пространственные моды, которые являются неразделимыми и запутанными. Эти характеристики не только уникальны для квантовой запутанности, но также применимы к векторным пучкам, которые классически запутываются локально [6-9]. Более того, характеристика неразделимости в векторных пучках представляет большой интерес не только для оптической визуализации, но и в оптической связи, поскольку его поляризационная степень свободы и пространственный режим используются для кодирования информации [7, 10].

Кроме того, согласно теории [11], более высокие значения ℓ показывают большее пропускание, что приводит к лучшей проникающей способности, следовательно, меньшему рассеянию света и меньшей оптической плотности (OD). Когда световой импульс попадает в сильно рассеивающую среду, такую как ткань, он распадается на три основных компонента: баллистический, змеевидный и диффузный. Баллистический компонент сохраняет первоначальные свойства света, поскольку он когерентно рассеивается в прямом направлении, в то время как диффузный компонент является случайным и отражает блуждание фотонов в неоднородной среде. Змеевидный компонент слегка рассеивается в прямом направлении, проходит меньший путь и сохраняет первоначальную информацию [12].

Данное исследование посвящено анализу литературных данных по передаче вихревых векторных пучков Лагерра-Гаусса через ткань мозга животных в баллистической ($z > l_{tr}$) и диффузионной ($z > l_{tr}$) областях, где z – толщина мутной среды, а l_{tr} – средний свободный путь переноса [13]. Различные типы поляризации в различных специфических точках мозга при различных толщинах исследуются для того, чтобы продемонстрировать роль классической запутанности в потенциальном улучшении визуализации с более высоким потоком фотонов в классическом пределе.

Целью этой дипломной работы является анализ исследований классических запутанных световых пучков и их возможной роли в передаче света через ткани мозга, выработка требований к экспериментальной установке и протоколу исследований. В работе будет проанализировано состояние

научных исследований в этой области и представлены основные теоретические и экспериментальные результаты, полученные в последнее время.

Работа включает в себя разделы, посвященные обзору классических запутанных световых пучков, исследованию их физических свойств и рассмотрению применения метода передачи света через ткани мозга.

Основное содержание работы

Векторные пучки представляют собой пространственные моды с различными состояниями поляризации. Радиально поляризованные (RP) и азимутально поляризованные (AP) моды могут создавать более сильные продольные электрические и магнитные компоненты поля при фокусировке. RP также может генерировать меньший размер пятна при фокусировке объективом с высокой NA для формирования изображений в нано масштабе. Самое главное, что RP и AP являются неразделимыми пучками (смешанными состояниями) в пространстве и поляризации, являясь классически запутанными.

Ниже представлены четыре состояния поляризации в нотации Дирака и вектора Джонса [6, 8, 9, 23-26]. Уравнение (1) это линейная поляризация, которая является представлением состояний правой и левой круговой поляризации.

$$|LP\rangle = |RH\rangle + |LH\rangle \quad (1)$$

Круговая поляризация может быть записана в более общей форме, как показано в уравнении (2), как чистое состояние:

$$|CP\rangle = \cos\varphi|x\rangle \pm \sin\varphi e^{i\delta}|y\rangle \quad (2)$$

где φ представляет собой азимутальную фазу, сдвинутую на $\pi/4$ относительно оси x , и δ - комплексная фаза, взятая в точке $\pi/2$, $|+\rangle$ и $|-\rangle$ это два общих собственных состояния, которые представляют собой два вектора-столбца $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$.

Уравнение (3) представляет правостороннюю круговую поляризацию:

$$|RH\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} [|+\rangle - i |-\rangle] \quad (3)$$

Уравнение (4) представляет левостороннюю круговую поляризацию:

$$|LH\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} [|+\rangle + i |-\rangle] \quad (4)$$

LG пучки с круговой поляризацией (чистые состояния) представлены уравнением (5):

$$|\ell\rangle|RH\rangle; |-\ell\rangle|RH\rangle; \text{ и } |\ell\rangle|LH\rangle; |-\ell\rangle|LH\rangle \quad (5)$$

где ℓ представляет собой значение ОАМ.

Уравнение (6) показывает радиальную поляризацию (классическое запутанное локальное состояние) с пространственной и поляризацией:

$$|RP\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{pmatrix} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \left[e^{i\varphi} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} + e^{-i\varphi} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \right] = \frac{1}{\sqrt{2}} [e^{i\varphi} |RH\rangle + e^{-i\varphi} |LH\rangle] \quad (6)$$

Обозначение в уравнении (6) показывает, что радиальная поляризация представляет собой суперпозиция двух состояний $|RH\rangle$ и $|LH\rangle$. Экспонента является вариационной фазой и является уникальной характеристикой вихревых пучков.

LG пучки с радиальной поляризацией представлены уравнением (7), которое является смешанным состоянием:

$$|LG_{RP}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|-\ell\rangle|LH\rangle + |\ell\rangle|RH\rangle] \quad (7)$$

Уравнение (8) представляет азимутальную поляризацию (классическое запутанное локальное смешанное состояние) с пространственной неоднородностью и поляризацией:

$$\begin{aligned} |AP\rangle &= \begin{pmatrix} -\sin\varphi \\ \cos\varphi \end{pmatrix} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \left[e^{i(\varphi+\frac{\pi}{2})} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} + e^{-i(\varphi+\frac{\pi}{2})} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left[e^{i(\varphi+\frac{\pi}{2})} |RH\rangle + e^{-i(\varphi+\frac{\pi}{2})} |LH\rangle \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Обозначение в уравнении (8) показывает, что азимутальная поляризация также состоит из суперпозиции $|RH\rangle$ и $|LH\rangle$. Однако вариационная фаза имеет дополнительный $\pi/2$ фазовый сдвиг.

LG пучки с азимутальной поляризацией представлены уравнением (9), которое является смешанным состоянием:

$$|LG_{RP}\rangle = \frac{-i}{\sqrt{2}} [|-\ell\rangle|LH\rangle + |\ell\rangle|RH\rangle] \quad (9)$$

Уравнения (10) и (11) представляют пучки с более высокого порядка радиальной и азимутальной поляризации:

$$|HLG_{AP}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|e\rangle^{i(2\ell_{VR} + \ell_{SLM})\phi} |RH\rangle + e^{-i(2\ell_{VR} - \ell_{SLM})\phi} |LH\rangle] \quad (10)$$

$$|HLG_{AP}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|e\rangle^{i(2\ell_{VR} + \ell_{SLM})(\phi + \pi/2)} |RH\rangle + e^{-i(2\ell_{VR} + \ell_{SLM})(\phi + \pi/2)} |LH\rangle] \quad (11)$$

где $2\ell_{VR} + \ell_{SLM}$ представляет общую ОАМ(ℓ).

Для того чтобы генерировать радиально и азимутально поляризованные пучки с более высокими значениями ОАМ, объединили в тандем (см. раздел 2) вихревую фазовую пластинку (VR) и пространственный модулятор света (SLM), как показано математически в уравнениях (10) и (11). Вихревая фазовая пластинка которая генерирует пучки LG с $\ell = 2\ell_{VR}\hbar$, где ℓ_{VR} - топологический заряд, передаваемый от вихревой фазовой пластинки, а \hbar - постоянная Планка, деленная на 2π . Пространственный модулятор света - еще одно устройство, используемое для генерации LG пучков с $\ell = \ell_{SLM}\hbar$, где ℓ_{SLM} может принимать любое целое положительное или отрицательное значение, как и ℓ_{VR} . Комбинация обоих устройств дает более высокий порядок значений ОАМ (ℓ) [27].

Хорошо известно, что, когда фотон (ω) входит в материал, он «одевается» по показателю преломления (dressed by refractive index), $n(\omega)$. Фотон может возбуждать электроны, вызывая колебания, которые соединяются с квазичастицами среды, превращаясь в связанную квазичастицу или поляритон в зависимости от того, как ω приближается к резонансной частоте ω_0 . Эти квазичастицы обычно становятся одними из следующих: оптический фонон, экситон, плазмон и/или магنون-поляритон.

Диэлектрическая среда может быть представлена диполем Лоренца с резонансом ω_0 от взаимодействия квазичастицы с фотоном угловой частоты ω . Кроме того, в зависимости от того, насколько ω близко к ω_0 , можно получить условие генерации предвестников типа Зоммерфельда (высокочастотных) или Бриллюэна (низкочастотных). Известно, что фотоны могут соединяться с плазмонами, оптическими фотонами, магнонами и экситонами. Фотонные возбуждения становятся квазичастицами в результате взаимодействия и становятся «одетыми» [28, 29]. Квазичастицы могут состоять из трех сущностей: Холоны (заряд), орбитоны и спиноны. Квазичастица фотон может быть разделена на спин и орбиту в оптических пучках OAM и SAM пучках.

В мозге могут существовать специальные пути, по которым фотоны могут перемещаться [30]. Мозг очень отличается от других органов тела таких органов, как грудь, шейка матки, кожа и почки. Он имеет особую древовидную структуру с соединениями 86 миллиардов нейронов и ветвями аксонов [31] для хранения и извлечения информации из памяти. Существует шесть различных типов нервных клеток в центральной нервной системе, которые питаются и защищаются нейроглиями или глиальными клетками (клейкие, как клей, среды) [32]. Фотоны попадают в мозг и путешествуют по этому лабиринту, взаимодействуя с существующими хиральными белками и липидными молекулами. Там возможно существование оптических волноводных волоконно-подобных каналов в мозге из микротрубочек, по которым фотон может пройти при выходе из него [30, 33-35]. Если эти классические несепарабельные режимы структуры существуют в хиральных тканях мозга, они могли бы увеличить эффективность передачи света и сохранять когерентность. Эти особые фотонные квазичастицы могут быть более эффективно передаваемыми в ткани при сохранении входных характеристик и быть запутанными с родственными фотонами, что можно назвать C-оп (классический режим) в отличие от Q-оп (квантовый режим) одиночных фотонов. Ввели новый квазичастичный фотон, который отличается от чистых состояний CP и LP в тканях мозга, и определили эту новую квазичастицу классического запутанного фотона, который является смесью радиального и азимутального состояний [38].

Описание материалов и оборудования для проведения экспериментальных исследований

На рисунке 1 показана экспериментальная установка, где в качестве источника света использовался He-Ne лазер мощностью 5 мВт на длине волны 633 нм, фокусирующийся на одномодовом оптическом волокне (ОВ). Выходной пучок из оптического волокна проходил через коллиматор и освещал пространственный модулятор света (SLM), который был настроен на режим отражения. SLM производил LG пучки с различными значениями ℓ , которые генерировались различными вилочными дифракционными картинками. Первая линза использовалась для коллимации дифракции первого порядка через 400-мкм апертуру, уменьшая общее воздействие света на пучок. Затем использовалась вторая линза для повторной коллимации пучка. Затем пучок распространялся через различные типы состояний поляризации (см. раздел 2.2, рис. 2). Затем LG пучок с определенной поляризацией прошел через образец мозга. Наконец, пучок прошел через систему визуализации, состоящую из двух линз ($L3 = 5$ см, $L4 = 10$ см). CCD-камера зафиксировала выходной сигнал.

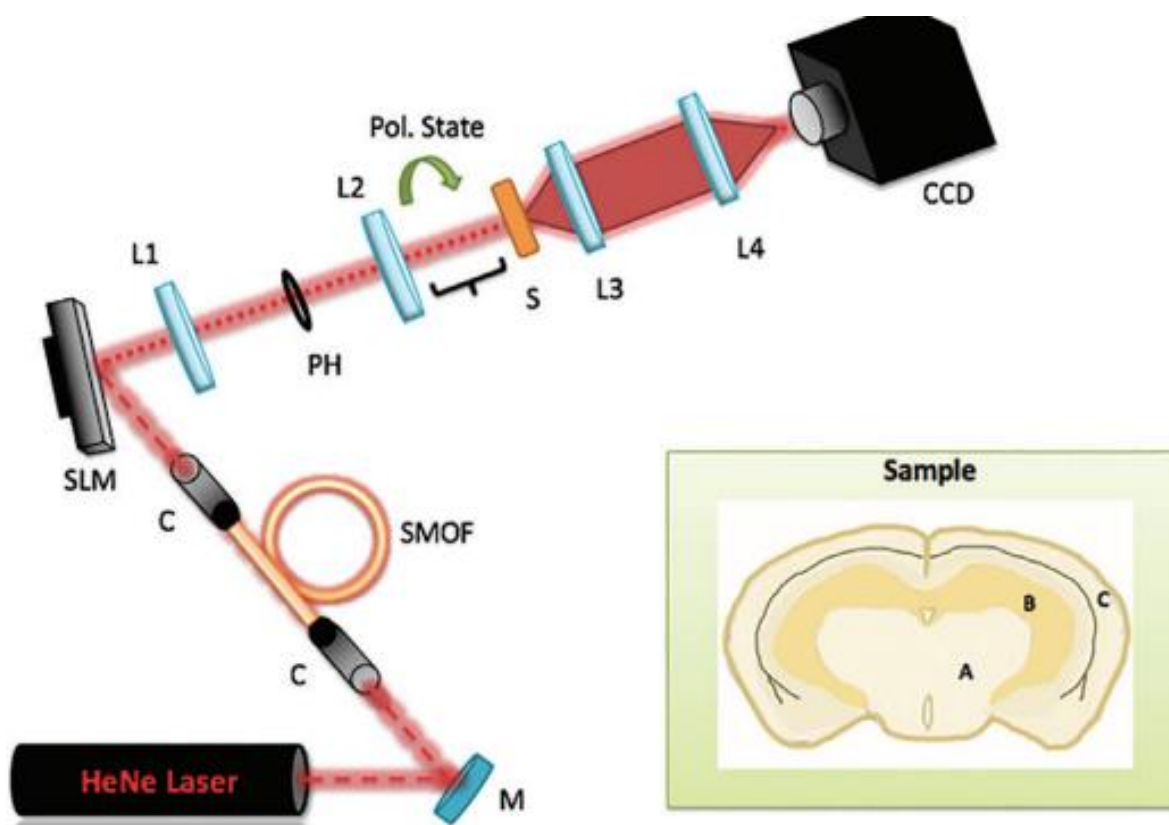


Рисунок 1: Общая экспериментальная установка. М - зеркало; С - коллиматор; SMOF - одномодовое оптическое волокно; SLM - пространственный модулятор света; L - линзы; PH - пинхол; Pol. State, четыре различных типа поляризации; S, образец; CCD, камера прибора с зарядовой связью. Части образца: А, гиппокамп; В, белое вещество; С, кора головного мозга [38].

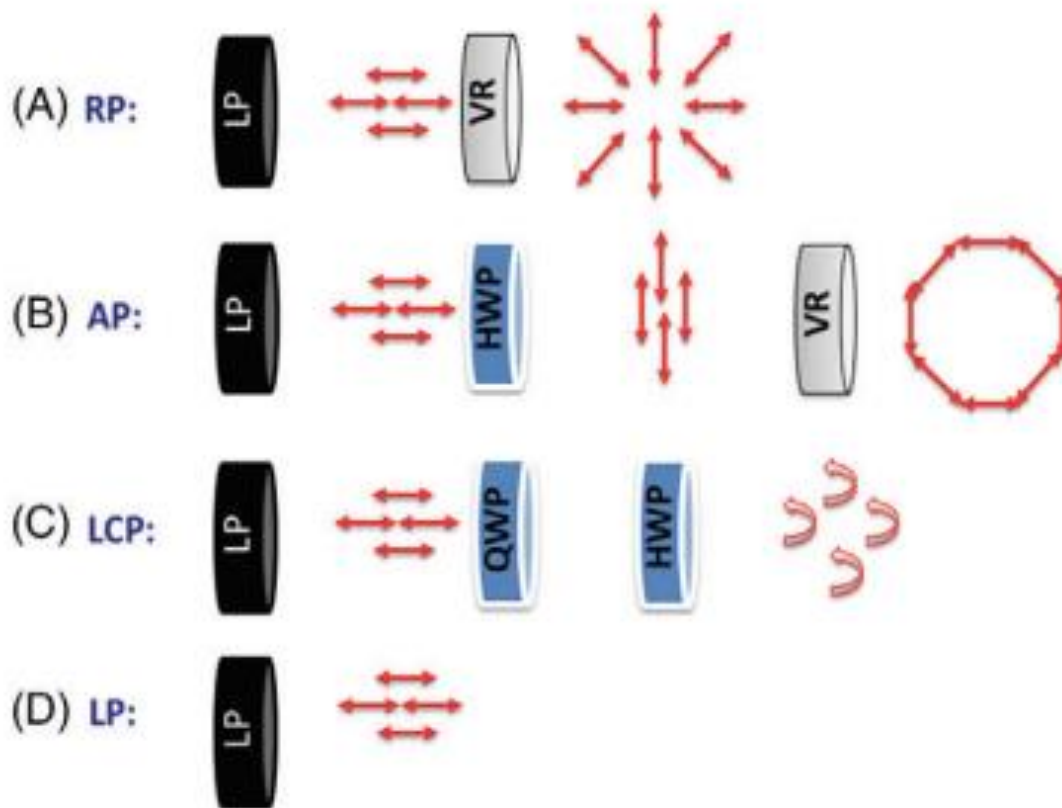


Рисунок 2: Генерация четырех различных состояний поляризации. RP - радиальная поляризация; AP - азимутальная поляризация; LCP - левая круговая поляризация; LP - линейная поляризация. (A и B) векторные пучки; (C и D) скалярные пучки. VR - вихревая фазовая пластинка; HWP - полуволновая пластина, QWP - четвертьволновая пластина [38].

Генерация различных состояний вихревых пучков.

Для генерации векторных вихревых пучков с различными значениями OAM, объединили пространственный модулятор света (SLM) с вихревым замедлителем (VR). SLM - это фазовый и амплитудный модулятор, который генерирует вихревые пучки путем ввода сгенерированных компьютером голограмм на фазу SLM. Вихревая фазовая пластинка (VR) - это пространственно-неоднородный замедлитель. Тот, который используемый в эксперименте, представляет собой вихревую фазовую пластинку $\ell = 1$, который зависит от поляризации. В эксперименте (рис. 1) SLM будет генерировать вихревой пучок с $\ell=1$ - SLM значением. Затем пучок пройдет через набор поляризаторов, а затем через VR (Рисунок 2A,B), который будет объединен с $\ell=1$ - VR, создавая вихревой пучок с общим значением OAM. Для того чтобы сгенерировать векторный пучок с определенной

поляризацией, зафиксировали быструю ось VR в одном направлении. Затем послали в различной ориентации линейную поляризацию относительно оси VR. Чтобы сгенерировать радиально поляризованный пучок, горизонтально поляризованный пучок должен пройти через фазовую пластинку (VR) относительно своей оптической оси (рис. 2А). Один из способов охарактеризовать радиально поляризованный пучок является вставка линейного поляризатора после VR и в результате будут сформированы два лепестка (рис. 3А, вторая и третья колонки). Это также является способом характеристики векторного вихревого пучка, поскольку одной из его характеристик является то, что их результат разложения спиральной моды зависит от входной поляризации. Чтобы сформировать азимутально поляризованный пучок, необходимо использовать вертикально поляризованный (горизонтально поляризованный пучок, проходящий в полуволновую пластину) пучок должен пройти через VR относительно его оптической оси (Рисунок 2В). В этом случае, если мы поместим линейный поляризатор перед VR, то два лепестка сформируются снова, но теперь смещенные на 90 от радиальной поляризации (Рисунок 3В, вторая и третья колонки)[38].

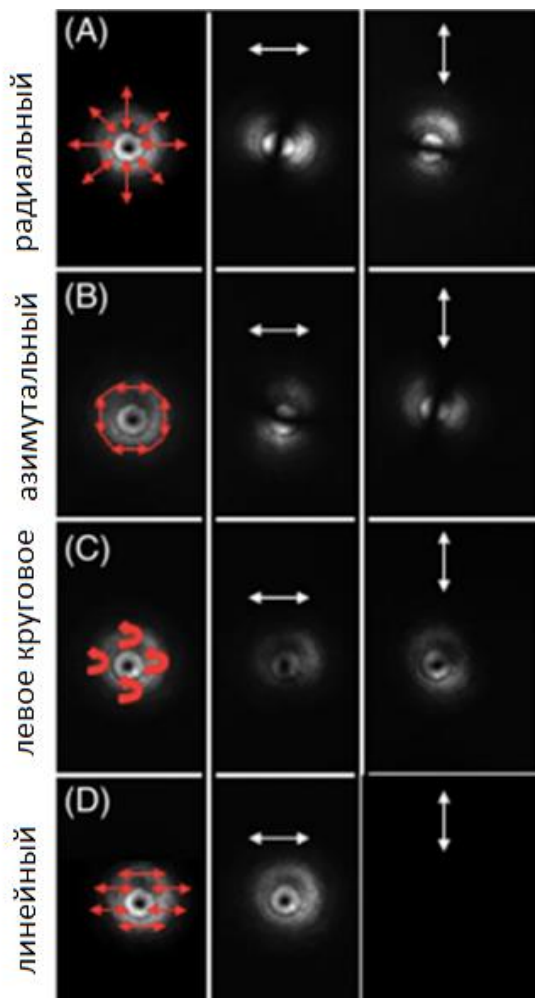


Рисунок 3: Характеристика вихревых пучков. Для этого случая полная ОАМ составляет $\ell = 1$ (А) Радиальная поляризация с электрическим полем, направленным в радиальном направлении от центра пучка. (В) Азимутальная поляризация с ее электрическим полем, направленным по касательной к пучку. (С) Левая круговая поляризация характеризующаяся вращательным характером электрического поля, вращающегося против часовой стрелки. (D) Линейная поляризация, электрическое поле которой направлено вдоль горизонтали направления. Первая колонка - вихревые пучки без анализатора. Второй столбец показывает анализатор, установленный горизонтально поляризованным. Третий столбец показывает анализатор с вертикальной поляризацией [38].

На рисунке 3 показаны различные типы вихревых пучков и их профиль интенсивности, характеризуемый анализатором. Для векторных пучков (Рисунок 3А,В), SLM был установлен на $\ell = 0$, в то время как VR всегда давал вклад $\ell = 1$. В этом случае векторный пучок создал суперпозицию 1, что дало общее значение ОАМ значение $\ell = 0$. Для левого циркулярного и линейного поляризованного пучка, SLM был установлен на $\ell = 1$ (Рисунок 3С, D). Для более высоких значений векторных или скалярных пучков SLM может быть установлены более высокие значения ℓ .

Подготовка мозговой ткани

Взрослую мышь дикого типа анестезировали изофлураном. После того как мышь была полностью анестезирована (подтверждено отсутствие реакции на щипок пальца), ее декапитировали и мозг был вскрыт и зафиксирован в 4% параформальдегиде на ночь. С помощью компрестомы (VF300, Precision Instruments, Greenville, NC) при двух различных толщинах (120 и 600 мкм, соответственно). Точность в толщине среза ткани составляла 1 мкм.

Данные были собраны для мозговой ткани толщиной 120 мкм и 600 мкм. ткани для линейно, циркулярно, радиально и азимутально поляризованных пучков при различных положительных значениях ℓ ($\ell = 0, 1, 3, 5$). Кроме того, размер пучка ОАМ для каждого значения ℓ учитывался при направлении его через каждую область образца мозга. В ткани толщиной 120 мкм, пучок LG проникал в кору, гиппокамп и белое вещество (рис. 1). Распространение пучка LG считается баллистическим, поскольку толщина образца приводит к отсутствию рассеяния и помех на траектории пучка LG, создавая прямой путь движения [12]. В ткани толщиной 600 мкм пучок LG проник в кору

головного мозга и белое вещество (Рисунок 1). Распространение пучка LG считается диффузным, так как увеличение толщины образца приводит к большему рассеиванию пучка LG [12]. Кроме того, эталонный пучок также измерялся без образца, чтобы учесть изменение толщины образца, чтобы учесть изменение падающего света при расчете коэффициента пропускания. Наконец, данные были проанализированы с помощью программы ImageJ и по уравнению (12), как показано ниже:

$$\text{Передаваемая интенсивность} = \frac{T_s}{T_{ns}} = 10^{-OD} = e^{\frac{-kz}{c}} \quad (12)$$

где T_s - передаваемая интенсивность с образцом, T_{ns} - передаваемая интенсивность без образца, k - вероятность перехода, z - образец мозга, k/c - коэффициент поглощения интенсивность излучения без образца, k - вероятность перехода, z - толщина образца мозга, и k/c - коэффициент поглощения.

Предлагаемая схема экспериментальной установки для исследования срезов тканей мозга

При распространении светового пучка через ткань, взаимодействие с клетками ткани приводит к поглощению или рассеянию фотонов. Вероятность поглощения фотонов на единицу длины определяется коэффициентом поглощения, μ_a . Рассеяние является упругим, и в отличие от поглощения, где энергия преобразуется в другой вид энергии, рассеянный фотон испускается повторно со своей первоначальной энергией, но с вероятностью изменения своего пути. Для биологической ткани переизлучение каждого фотона с высокой вероятностью происходит в прямом направлении, но в результате множественности событий рассеяния получается случайное направление распространения. Вероятность рассеяния фотонов на единицу длины задается исследуемой биотканью. Эффект многократного рассеяния учитывается с помощью приведенного коэффициента рассеяния $\mu'_s = \mu_s (1 - g)$, где g - коэффициент анизотропии рассеяния; обычно значение g для ткани колеблется от 0,80 до 0,98. Коэффициент ослабления для биологической ткани рассчитывается как

сумма коэффициента поглощения и приведенного коэффициента рассеяния.

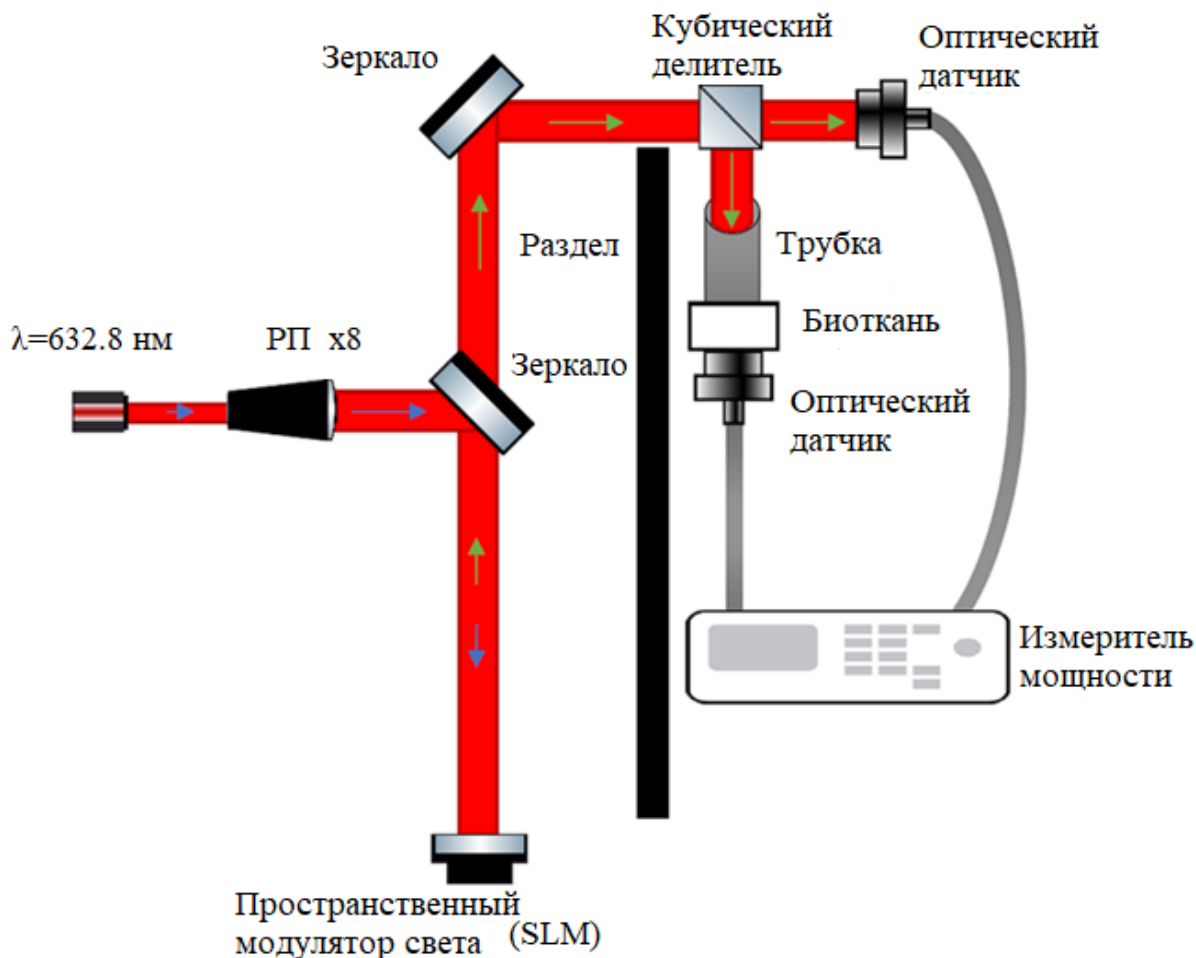


Рисунок 17. Схематическая диаграмма оптической установки. Источником является гауссовский (G) пучок с длиной волны 632,8 нм. Синие стрелки указывают направление распространения пучка G, а зеленые стрелки - направление распространения пучка LG.

Экспериментальная установка, которую можно использовать для исследования вихревых пучков, распространяющихся в сильно рассеивающих биологических тканях, представлена на рис. 17. Установка включает гелий-неоновый лазер мощностью 5 мВт и длиной волны 632,8 нм в качестве источника света (Melles Griot 05 LHP-123-496). Созданный лазером гауссов пучок поступает в расширитель пучка (РП) с 8-кратным увеличением. Расширенный луч направляется алюминиевым зеркалом в центр кристалла SLM. Когда гауссов пучок падает на центр SLM, преломленный луч представляет собой LG луч с ℓ -порядком, близким к ℓ -порядку проецируемой вилочной голограммы на устройство. Результирующие LG пучки направляются другим алюминиевым зеркалом в

зону измерения. Затем пучки LG были разделены кубическим делителем пучка 50:50 (B.S Torlabs CCM1-BS013/M) на два пучка. Первый луч используется для измерения мощности через диффузную среду P_{DM} , а второй луч - для измерения мощности через свободное пространство P_{FS} . Черная трубка была подключена на первом выходе разделителя пучка, чтобы гарантировать, что только первый порядок дифракции появится на другой стороне, а остальная часть порядка дифракции будет заблокирована трубкой. С другой стороны трубки на пути первого луча была помещена диффузная среда. Для измерения мощности P_{DM} измерительный датчик (Ophir Optronics PD300-UV SENSOR) был помещен рядом и почти касался диффузной среды. На пути второго пучка был установлен еще один измерительный датчик для измерения мощности P_{FS} . Оба датчика были подключены к измерителю мощности с двумя измерительными каналами (Ophir Optronics Centauri Dual Channel), где датчик, измеряющий P_{DM} , был подключен к первому каналу. Датчик измерения P_{DM} был расположен на оси распространения первого пучка. Таким образом, почти все баллистические и змеевидные фотоны достигали датчика. Остальные фотоны пучка либо рассеивались, либо поглощались в среде. Использование двух каналов измерителя мощности позволило рассчитать передачу (T) на узкой апертуре в направлении распространения пучка, а также учесть отражения, где расчет производится по формуле $T = P_{ChannelA}/P_{ChannelB}$.

Заключение

Исследование векторного пучка привело к существенному результату, что пропускание пучков LG через ткань мозга демонстрирует сильную положительную зависимость от ОАМ для коллимированных, радиально, азимутально и левого циркулярно поляризованного LG пучка.

Классический запутанный пучок радиальной и азимутальной поляризации давал наибольшую передачу по мере того, как значения ℓ увеличиваются как в баллистической, так и в диффузионной областях. Кроме того, эти векторные пучки дали четкие тенденции при нацеливании на различные области мозга в баллистической и диффузной областях. Кроме того, радиальная поляризация дала наибольшую дальность передачи в диффузионной области, в то время как левая круговая поляризация показала наибольшую передачу для баллистической области. Более того, при нацеливании на гиппокамп, кору и белое вещество, радиально поляризованный свет оказался наиболее эффективным, за ним следуют азимутально поляризованные пучки. С другой стороны, линейно

поляризованный свет показал положительную зависимость от ℓ , но эта зависимость оказалась менее значительной по сравнению с зависимостью от других испытанных поляризаций. Следовательно, эти результаты поддерживают идею о том, что передача света через различные области мозга неодинакова.

Более того, эти результаты позволяют оптимизировать оптическую визуализацию мозга в зависимости от того, на какую область мозга необходимо направить внимание. Например, нацеливаясь на конкретные области, пораженные нейродегенеративными заболеваниями, можно будет понять и узнать больше о этих заболеваниях, с целью их предотвращения и лечения. Кроме того, использование этого метода визуализации в различных областях мозга позволит отличить аномальную ткань мозга от нормальной.

21.06.2023 *Wang*