

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ СПИНОВЫЙ ЭФФЕКТ ХОЛЛА ДЛЯ ПУЧКОВ ГАУССА

Н. Алвассити¹, Э. А. Бибикова^{1,2}

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

² Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

E-mail: bibikovaee@susu.ru

Исследован геометрический спиновый эффект Холла для ассиметрично сходящегося полного пучка Гаусса в новых экспериментальных условиях. Компьютерные методы обработки изображения позволили получить значимые сдвига «центра тяжести» интенсивности z -компоненты в перетяжке светового пучка $3,0 \pm 0,5$ мкм.

Ключевые слова: спиновый эффект Холла, поперечный сдвиг перетяжки

Введение

Спиновый и орбитальный моменты фотона принято связывать с поляризацией и траекторией распространения света соответственно. Известно, что в неоднородной или анизотропной среде эти моменты взаимозависимы. Это взаимодействие принято называть спин-орбитальным взаимодействием или оптическим спиновым эффектом Холла для света.

Подобный эффект наблюдается и в свободном пространстве, то есть вне зависимости от взаимодействия света с веществом. Этот эффект известен как геометрический спиновый эффект Холла. Впервые он был теоретически предсказан в работе [1], в которой показано, что при смене знака циркулярности циркулярно поляризованного ассиметрично сходящегося пучка Гаусса в плоскости перетяжки происходит сдвиг его «центра тяжести» в направлении, поперечном оси распространения света. Величина смещения мала и составляет значение порядка радиуса перетяжки пучка. Было показано, что наблюдение этого эффекта возможно в следующей схеме. Плоская циркулярно поляризованная волна распространяется в направлении OZ и падает на линзу. Если перекрыть половину сходящегося монохроматического циркулярно поляризованного пучка непрозрачной заслонкой ($y < 0$), то у него появляется нескомпенсированная E_z -компонента, распределение интенсивности которой при смене знака циркулярной поляризации претерпевает поперечное смещение в направление OX .

Первые наглядные результаты экспериментального обнаружения сдвига перетяжки пучка были представлены в работе [2]. Для формирования сходящегося пучка использовался короткофокусный объектив. С помощью специального экрана пучок перекрывался наполовину. Для визуализации светового пучка в область перетяжки помещалась рассеивающая среда (синтетический опал). В направлении, перпендикулярном оси светового пучка, наблюдалось рассеяние света, вызванное только z -компонентой светового поля. Оптическая система давала изображение фокальной перетяжки, которое записывалось на фотопластинку. Таким образом были получены фотографии пучка, сформированного вследствие рассеяния z -компоненты, для случая лево- и правоциркулярно поляризованного света, визуальное сравнение которых позволило судить о величине сдвига z -компоненты.

Для той же схемы распространения света была предложена обобщенная теория [3], которая применима к пучку с произвольным распределением интенсивности в поперечном сечении. Рассчитана величина сдвига «центра тяжести» в общем случае. Также показано, что одинаковый по значению сдвиг «центра тяжести» сходящегося пучка имеет место во всех сечениях, а не только в плоскости перетяжки. Экспериментально наблюдение сдвига возможно только в фокальной плоскости, поскольку величина сдвига порядка величины перетяжки. Точность теоретических расчётов в работах [1, 3] ограничена параксиальным приближением.

В плоскости, наклонной к направлению распространения света в свободном пространстве было обнаружено расщепление коллимированного пучка Гаусса на две компоненты (с левой и

правой циркулярной поляризацией), что было теоретически и экспериментально продемонстрировано в работах [4, 5]. Экспериментальные исследования геометрического спинового эффекта Холла также были выполнены в работе [6]. В работе [7] рассчитано распределение интенсивности z -компоненты в фокальной плоскости для циркулярно поляризованного пучка Гаусса.

В настоящей работе предлагается экспериментальное исследование сдвига перетяжки полного, а не усеченного, пучка Гаусса при смене знака циркулярности циркулярно поляризованного света в новых экспериментальных условиях, которые позволяют избежать дифракционных явлений на краю экрана [2], а также позволяют перейти от визуального наблюдения сдвига к получению точных результатов с помощью цифровой обработки изображений.

Экспериментальные результаты

Схема экспериментальной установки для наблюдения эффекта представлена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался гелий-неоновый лазер, генерирующий на основной поперечной моде с длиной волны 632,8 нм. Для оценки пространственных параметров светового пучка с помощью ПЗС-камеры были сделаны фотографии его поперечного сечения (рис. 2). Как видно из рисунка, лазерный пучок несколько отличается от гауссовского: хорошо заметна кольцевая структура пучка. Аппроксимация распределения интенсивности гауссовской зависимостью дает приблизительное значение диаметра пучка $\sim 1,5$ мм по критерию e^{-2} от интенсивности в максимуме. Пучок лазерного излучения фокусировался объективом с числовой апертурой 0,11. Оценка радиуса перетяжки пучка в данных экспериментальных условиях дала величину $r \sim 5,5$ мкм. Ожидаемый сдвиг «центра тяжести» перетяжки, согласно работе [1], составляет также 5,5 мкм.

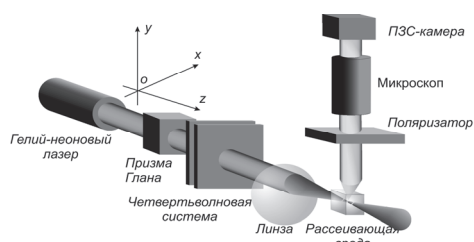
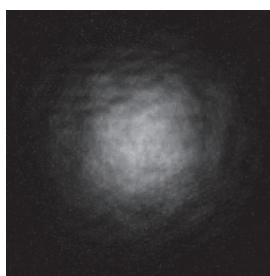
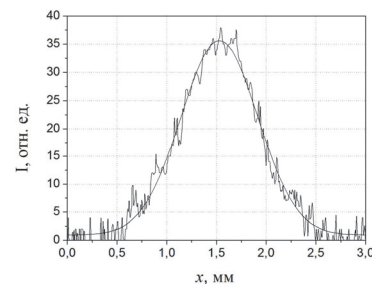


Рис. 1. Схема экспериментальной установки



а)



б)

Рис. 2. Световой пучок на выходе лазера: а) фотография поперечного сечения пучка, б) зависимость интенсивности от координаты x в поперечном сечении пучка

Необходимо было сформировать асимметричный сходящийся световой пучок, для этого свет распространялся через верхнюю (либо нижнюю) половину объектива. Это позволяло избежать паразитных дифракционных явлений, как это было бы при использовании экрана, перекрывающего половину линзы [2]. Для получения циркулярно поляризованного света лазерный луч распространялся через призму Глана и составную четвертьволновую систему [8], состоящую из двух слюдяных пластинок. Поляризационные параметры пластинок были предварительно измерены с большой точностью, что позволило рассчитать и настроить систему для получения лево- и правоциркулярно поляризованного излучения с точностью 0,99 %.

Для визуализации светового пучка в область перетяжки помещалась рассеивающая среда (синтетический опал). В направлении OY , перпендикулярном оси светового пучка, наблюдалось рассеяние света. Поляризатор устанавливался таким образом, чтобы его ось пропускания была параллельна оси распространения света, что позволяло избавиться от рассеяния света, вызванного x -компонентой светового поля и наблюдать рассеяние только z -компоненты. Микроскоп позволял получить увеличенное изображение фокальной перетяжки, которое регистрировалось ПЗС-камерой. На рис. 3 представлены фотографии z -компоненты пучка для лево- и правоциркулярно поляризованного света при условии, что свет распространяется через верхнюю половину линзы. Специальная компьютерная программа рассчитывала центр тяжести и ширину пучка, используя полученные изображения. Согласно этим результатам, радиус перетяжки составил ~ 10 мкм, что превышает значение $\sim 5,5$ мкм для идеального гауссовского пучка с таким же углом схождения. Такое различие можно объяснить, во-первых, более сложной угловой структурой лазерного пучка, а во-вторых, абберационными искажениями. Очевидно, что в условиях экс-

перимента, когда пучок в перетяжке уширен, эффект должен проявляться менее отчетливо, а наблюдаемый сдвиг может быть меньше, чем предсказанная величина. В результате полученных данных было определено направление сдвига перетяжки, оно соответствовало теоретически предсказанному [1], и менялось на противоположное, если пучок распространялся через другую половину линзы. Величина сдвига составила $3,0 \pm 0,5$ мкм. Погрешность была определена за счет многократного повторения эксперимента после переюстировки установки.



Рис. 3. Изображения фокальной перетяжки, полученные в результате рассеяния z-компоненты пучка: а) для право- и б) для лево-циркулярно поляризованного света. Область изображения 100 мкм на 130 мкм. Стрелками изображено направление сдвига

Сдвиг «центра тяжести» происходит лишь в результате геометрического спинового эффекта Холла и не связан с изменениями распространения луча вследствие перестройки четвертьволновой системы для получения циркулярной поляризации различных знаков. Для проверки этого в экспериментальную установку между объективом и составной четвертьволновой системой был помещен дополнительный поляризатор. Таким образом, через объектив распространялся линейно поляризованный свет. Изменения настройки составной пластинки не вызывали какого-либо существенного смещения «центров тяжести» изображений перетяжки пучка. В этом случае сдвиг был порядка погрешности измерений $0,3$ мкм.

Заключение

Исследован геометрический спиновый эффект Холла, а именно влияние спинового углового момента фотона на его орбитальный момент на примере ассиметрично сходящегося полного пучка Гаусса в новых экспериментальных условиях. Экспериментально установлено, что направление сдвига «центра тяжести» интенсивности z-компоненты в перетяжке светового пучка зависит от знака циркулярной поляризации и от направления асимметрии. Компьютерные методы обработки изображения позволили получить значение сдвига $3,0 \pm 0,5$ мкм.

Дальнейшее исследование геометрического спинового эффекта Холла предполагается провести для пучка Бесселя с ненулевым топологическим зарядом. Это представляет интерес, поскольку позволяет учесть влияние той части орбитального момента фотона, которая связана с пространственной структурой поля (т.е. с дислокацией волнового фронта).

Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 0389-2014-0030.

Литература

1. Baranova, N.V. Transverse shift of a focal spot due to switching of the sign of circular polarization / N.V. Baranova, A.Yu. Savchenko, B.Ya. Zel'dovich // Письма в ЖЭТФ. – 1994. – Т. 59. – С. 216–218.
2. Зельдович, Б.Я. Наблюдение поперечного сдвига фокальной перетяжки при смене знака циркулярной поляризации / Б.Я. Зельдович, Н.Д. Кундикова, Л.Ф. Рогачева // Письма в ЖЭТФ. – 1994. – № 59. – С. 737.
3. Bekshaev, A.Y. Improved theory for the polarization-dependent transverse shift of a paraxial light beam in free space / A.Y. Bekshaev // Ukr. J. Phys. Opt. – 2011. – № 12. – P. 10–18.
4. Transverse Angular Momentum and Geometric Spin Hall Effect of Light / A. Aiello, N. Lindlein, C. Marquardt, G. Leuchs // Physical review letters. – 2009. – № 103. – P. 100401.
5. Korger, J. Observation of the Geometric Spin Hall Effect of Light / J. Korger, A. Aiello, V. Chille // Physical review letters. – 2014. – № 112. – P. 113902.

6. Neugebauer, M. Geometric spin Hall effect of light in tightly focused polarization tailored light beams / M. Neugebauer, P. Banzer, T. Bauer // *Phys. Rev. A.* – 2014. – Vol. 89. – P. 013840.
7. Zhao, Y. Spin-to-orbital angular momentum conversion in a strongly focused optical beam / Y. Zhao, J.S. Edgar, G. Jeffries // *Physical review letters.* – 2007. – Vol. 99. – P. 073901.
8. Bibikova, E.A. Properties of an adjustable quarter-wave system under conditions of multiple beam interference / E.A. Bibikova, N.D. Kundikova // *Applied optics.* – 2013. – Vol. 52. – P. 1852–1856.

Поступила в редакцию 8 апреля 2016 г.

DOI: 10.14529/mmph160209

GEOMETRIC SPIN HALL EFFECT FOR GAUSSIAN BEAM

N. Al-wassiti¹, E.A. Bibikova^{1,2}

¹ *South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

² *Institute of Electrophysics of UD RAS, Ekaterinburg, Russian Federation*

E-mail: bibikovaea@susu.ru

We report the results of experimental observation of the influence of light polarization on its propagation in free space (Geometric spin Hall effect of light) for the whole Gauss beam under new experimental condition. We experimentally confirm the existence of the effect of the focal waist shift under the change of the sign of the circular polarization of light passed through the upper (or lower) half of a lens. Computer methods of image processing have allowed to obtain the shift value $3,0 \pm 0,5 \mu\text{m}$.

Keywords: Geometric spin Hall effect of light; transverse shift of the waist.

References

1. Baranova N.B., Savchenko A.Y., Zel'dovich B.Y. Transverse shift of a focal spot due to switching of the sign of circular polarization. *JETP Lett.*, 1994, Vol. 59, pp. 232–234.
2. Kundikova N.D., Podgornov F.V., Rogacheva L.F., Zel'dovich B.Ya. Manifestation of spin-orbit interaction of photon in a vacuum. *Pure Appl. Opt.*, 1995, Vol. 4, pp. 179–183. DOI: 10.1088/0963-9659/4/3/005
3. Bekshaev A.Y. Improved theory for the polarization-dependent transverse shift of a paraxial light beam in free space. *Ukr. J. Phys. Opt.*, 2011, Vol. 12, pp. 10–18. DOI: 10.3116/16091833/12/1/10/2011
4. Aiello A., Lindlein N., Marquardt C., Leuchs G. Transverse angular momentum and geometric spin hall effect of light. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, Vol. 103, P. 100401. DOI: 10.1103/physrevlett.103.100401
5. Korger J., Aiello A., Chille V., Banzer P., Wittmann C., Lindlein N., Marquardt C., Leuchs G. Observation of the Geometric Spin Hall Effect of Light. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, Vol. 112, pp. 113902. DOI: 10.1103/physrevlett.112.113902
6. Neugebauer M., Banzer P., Bauer T., Orlov S., Lindlein N., Aiello A., Leuchs G. Geometric spin Hall effect of light in tightly focused polarization tailored light beams. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, Vol. 89, pp. 013840. DOI: 10.1103/physrev.89.013840
7. Zhao Y., Edgar J.S., Jeffries G.D.M., McGloin D., Chiu D.T. Spin-to-orbital angular momentum conversion in a strongly focused optical beam. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, Vol. 99, p. 073901. DOI: 10.1103/physrevlett.99.073901
8. Bibikova E.A., Kundikova N.D. Properties of an adjustable quarter-wave system under conditions of multiple beam interference. *Applied optics*, 2013, Vol. 52, pp. 1852–1856. DOI: 10.1364/ao.52.001852

Received April 08, 2016