

ЗАКРУЧЕННЫЕ ПУЧКИ: ОТ РЕНТГЕНА ДО РАДИОДИАПАЗОНА

Борис Александрович Князев

Институт ядерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник; Новосибирский государственный исследовательский университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, профессор кафедры общей физики, тел. (363)329-48-39, (383)363-42-66, e-mail: ba_knyazev@phys.nsu.ru

Владимир Сергеевич Павельев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий кафедрой наноинженерии; Учреждение Российской академии наук «Институт систем обработки изображений» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151, главный научный сотрудник, тел. (846)267-48-43, (846)332-56-20, e-mail: nano@ssau.ru

Валерий Георгиевич Сербо

Новосибирский государственный исследовательский университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики, тел. (383)329-75-55, e-mail: serbo@math.nsc.ru

Юлия Юрьевна Чопорова

Институт ядерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11, младший научный сотрудник; Новосибирский государственный исследовательский университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, ассистент кафедры общей физики, тел. (363)329-48-39, (383)363-42-66, e-mail: Yu.Yu.Choporova@inp.nsk.su

Борис Олегович Володкин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, инженер кафедры наноинженерии, заместитель директора НОЦ нанотехнологий, тел. (846)267-48-43, e-mail: boris-volodkin@yandex.ru

Представлен обзор исследований и применений пучков с орбитальным угловым моментом (оптических вихрей или закрученных пучков). Приведены результаты первых экспериментов по формированию закрученных пучков в терагерцовом спектральном диапазоне с помощью лазера на свободных электронах.

Ключевые слова: пучки с орбитальным угловым моментом, закрученные пучки, лазер на свободных электронах, терагерцовый диапазон.

VORTEX BEAMS: FROM X-RAYS TO RADIOWAVES

Boris A. Knyazev

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Russia, Novosibirsk, Lavrentyeva Prospekt, 11, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Principal Scientist; Novosibirsk State Research University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Professor of General Physics Department, tel. (363)329-48-39, (383)363-42-66, e-mail: ba_knyazev@phys.nsu.ru

Vladimir S. Pavelyev

Samara State Aerospace University, 443086, Russia, Samara, 34, Moskovskoye shosse, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Principal Scientist, Head of Nanoengineering; Image Processing Systems Institute of the RAS, 443001, Russia, Samara, 151 Molodogvardeyskaya St., Principal Scientist, tel. (846)267-48-43, (846)332-56-20, e-mail: nano@ssau.ru

Valery G. Serbo

Novosibirsk State Research University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Professor of Theoretical Physics Chair, tel. (383)329-75-55, e-mail: serbo@math.nsc.ru

Yulia Yu. Choporova

Budker Institute of Nuclear Physics, 630090, Russia, Novosibirsk, 11 Lavrentyeva Prospekt, Junior Scientist; Novosibirsk State Research University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Assistant Professor of General Physics Department, tel. (363)329-48-39, (383)363-42-66, e-mail: Yu.Yu.Choporova@inp.nsk.su

Boris O. Volodkin

Samara State Aerospace University, 443086, Russia, Samara, 34 Moskovskoye shosse, engineer of Nanoengineering Department, vice-director of REC «Nanotechnology», tel. (846)267-48-43, e-mail: boris-volodkin@yandex.ru

A review on studies and applications of the beams with orbital angular momentum (vortex or twisted beams) is presented. First experimental results on the formation of vortex beams in the terahertz spectral range using a free electron laser is described.

Key words: beams with angular orbital momentum, vortex beams, free electron laser, terahertz range.

Тот факт, что оптическое излучение может нести спиновый угловой момент (СУМ), известен давно. Пучки с линейной и круговой поляризацией могут быть описаны в терминах СУМ. Упоминание об этом можно найти еще в статье Пойнтинга 1909 года [1]. Первый эксперимент, показавший, что циркулярно поляризованные пучки света (пучки с СУМ) могут передавать момент количества движения механической системе, был выполнен в 1936 году [2]. В этом эксперименте поляризованный по кругу световой пучок проходил через подвешенную за ось четвертьволновую пластинку, зеркально отражался и проходил через пластинку еще раз, но со сменившимся направлением поляризации, в результате чего пластинке передавался механический момент вращения. Кроме спинового момента излучение может также нести орбитальный угловой момент (ОУМ). В «долазерную» эру получить и исследовать пучки с орбитальным моментом было достаточно сложно, и широкий интерес к пучкам с ОУМ мог возникнуть только после появления лазеров. Всплеск интереса к пучкам с орбитальным угловым моментом возник после публикации [3] вышедшей в 1992 году, которая в современной литературе считается пионерской и широко цитируется. В этой публикации был предложен способ получения пучков с высокими значениями ОУМ путем трансформации Лаггер-Гауссовских лазерных мод, предложена схема эксперимента по измерению этого момента путем передачи его механической системе, а также обсуждались некоторые возможные применения пучков

с ОУМ, которые часто называются пучками закрученных фотонов. Вообще говоря, о «закрученных пучках» упоминалось и ранее. В качестве примера укажем на работы Б. Я. Зельдовича с соавторами (см., например [4]) и Баженова с соавторами [5], но статья Аллена, действительно, вызвала широкий интерес и инициировала дальнейшие исследования.

Вскоре после выхода статьи [3] появились многочисленные публикации о методах генерации пучков «закрученных фотонов» в оптическом диапазоне [6-19], в том числе в планарном ондуляторе на лазере на свободных электронах [20]. Недавно заявлено о генерации в спиральном ондуляторе излучения с ОУМ с энергией фотонов 99 эВ [21]. Интерес к закрученным фотонам и электронам растет. Это связано с появлением новых эффектов в хорошо изученных фундаментальных атомных процессах. Например, в процессе фотовозбуждения атома закрученными фотонами возникают новые правила отбора, могут возбуждаться новые атомные уровни и изменяться поляризация излученных в послесвечении фотонов [22]. Для процессов фотоэффекта и радиационной рекомбинации с начальными закрученными частицами изменяется угловое распределение конечных частиц [23, 24]. Вопросы, связанные с пучками не света, а частиц с орбитальным угловым моментом выходят за рамки данного проекта, и обзор этих работ мы опускаем. Появляются предложения по использованию закрученных фотонов в различных приложениях. Многочисленные примеры такого рода детально обсуждаются в недавно опубликованной книге [25].

Пучки с ОУМ несколько лет назад получены и в радиодиапазоне [26, 27]. В частности, в работе [22] закрученные пучки радиоизлучения использовались для исследования ионосферы, а в работе [28] (с приложением эффектного видеофильма, доступного по ссылке (<http://iopscience.iop.org/1367-2630/14/3/033001>), авторы продемонстрировали использование дополнительной степени свободы в виде ОУМ для увеличения плотности каналов связи (впрочем, эффективность этого способа оспаривалась в работах, цитировать которые мы здесь не будем). В работах [29, 30] выполнен теоретический анализ распространения пучков с ОУМ через турбулентную атмосферу, в том числе с целью исследовать коммуникационные возможности оптических пучков с ОУМ.

Реализация возможности использования передачи ОУМ пучка молекулам и частицам продемонстрирована в работах [31, 32]. Много работ посвящено пучкам с орбитальным угловым моментом в оптических волокнах. В частности, в работе [33] приведены результаты исследования пучков с ОУМ, сформированных с помощью дифракционных оптических элементов, в ступенчатых волноводах. В [33] на результатах анализа экспериментальных данных показана возможность уплотнения каналов передачи информации в ступенчатых оптоволоконных с помощью формирования и селекции пучков с ОУМ методами дифракционной оптики.

Более детальный обзор этих работ не входит в наши задачи. Обширную информацию по световым пучкам с орбитальным угловым моментом можно найти в обзорах [34, 35]. Одним из направлений исследований в области пучков с ОУМ является исследование их взаимодействия с киральными средами, с том

числе с молекулами-энантиомерами. Анализ литературы показывает, что публикаций на эту тему не очень много. Почти исчерпывающий список содержит четыре теоретические и экспериментальные работы [36–39]. Во всех этих работах круговой дихроизм, связанный с орбитальным угловым моментом, для киральных молекул не был зарегистрирован. Заметим, что работа [40] описывает изменение орбитального углового момента после полного внутреннего отражения, что также интересно для практических приложений.

Отметим, что все упомянутые выше работы относятся к оптическому спектральному диапазону. Особый интерес для нас представляет терагерцовый диапазон, поскольку в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения (Институт ядерной физики) запущен лазер на свободных электронах, являющийся сегодня самым мощным в мире источником излучения этого спектрального диапазона. Анализ литературы показывает, что имеется всего три работы по закрученным пучкам, выполненные с использованием излучения этого диапазона [41–43]. Эти работы посвящены демонстрации возможности формирования пучков с ОУМ. Все они выполнены с использованием широкополосных источников терагерцового излучения. В работе [41] была продемонстрирована генерация закрученного терагерцового пучка с помощью размещенной на плоскости структуры V-образных антенн с фазовым сдвигом от $-3\pi/4$ до π с интервалом $\pi/4$. Антенны представляли собой прорези в проводящей пластинке. Такая структура с восемью уровнями сдвига фазы является грубым аналогом спиральной фазовой пластинки первого порядка – самого простого устройства для получения пучков с ОУМ. Вследствие малой суммарной площади отверстий коэффициент пропускания структуры не может быть высоким, даже с учетом плазмонного резонанса. Широкополосное излучение (пикосекундный импульс) проходил через пластинку и фокусировался линзой на кристалл ZnTe, использовавшийся для визуализации терагерцового пучка в стандартной time-domain спектроскопии (TDS). Авторы перемещали антенную структуру вместе с линзой относительно кристалла и путем многочисленных измерений и извлечения из фурье-спектра частоты 0,75 ТГц получали, в конце концов, изображение интенсивности пучка. Анализ корреляционных коэффициентов показал, что основной модой ОУМ является +1 с очень малой примесью мод -1, -2, -3 и +3. В фокусе линзы авторы наблюдали скачок фазы в соответствии с эффектом Гюи. С помощью двух других антенных структур были получены моды $l = 2$ и $l = 3$.

В работе [42] авторы использовали другой метод генерации пучка с ОУМ. Сформировав в качестве исходного пучок с радиальным распределением электрического вектора способом, описанным в [44], и пропустив его через четвертьволновую пластинку и поляризатор под углом 45 градусов, они получили линейно поляризованное излучения с фазой, изменявшейся по азимуту на 2π . В результате они получили закрученный пучок в спектральном интервале от 0,75 до 2 ТГц с максимумом при 1,5 ТГц, где эффективность преобразования была 95%.

Наконец, в работе [43] пучок закрученных фотонов был получен с помощью классической спиральной фазовой пластинки из пластика (цурупика), в результате чего были получены моды плюс-минус 1 и 2 при частотах 2 или 4 ТГц, зарегистрированные с помощью терагерцовой камеры.

Этими тремя работами на сегодня и ограничиваются в мировой науке исследования пучков с ОУМ в терагерцовом диапазоне. Заметим, что мощность пучков, использованных в этих работах очень низка по сравнению с мощностью пучка нашего лазера на свободных электронах. Таким образом, поле для фундаментальных исследований с использованием пучков с орбитальным угловым моментом (ОУМ) в сравнении с такими же исследованиями с пучками линейной и круговой поляризации (СОМ) остается открытым. Особый интерес представляет использование достаточно интенсивных пучков монохроматического перестраиваемого по частоте излучения, что позволяет избавиться от ряда недостатков, присущих системам TDS, и выполнять эксперименты с регистрацией изображений в реальном времени.

Нами были выполнены эксперименты по формированию пучков с орбитальным угловым моментом на Новосибирском лазере на свободных электронах [45], монохроматическое излучение которого может плавно перестраиваться в диапазоне 90 – 240 мкм. Пучок формировался с помощью дифракционного оптического элемента, функционально представлявшего собой бинарную фазовую зонную пластинку Френеля со спиральными зонами. Расчёт бинарного микро рельефа производился с использованием метода, описанного в [46]. Для расчёта использовались следующие параметры оптического элемента: диаметр апертуры – 38 мм, рабочая длина волны – 141 мкм.

Расчётная высота микро рельефа радиально-симметричного ДОЭ определяется формулой [47] $h(r) = \lambda \Phi(r, \varphi) / 2\pi(n - 1)$, где n – показатель преломления материала подложки, $\Phi(r, \varphi)$ – фазовая функция ДОЭ, а φ – азимутальный угол. В данной работе были использованы подложки из кремния HRFZ-Si [48] с двухсторонней полировкой оптического качества диаметром 38 мм и толщиной 1 мм. Бинарный микро рельефа высотой 29,1 мкм на поверхности подложки формировался с помощью реактивно-ионного травления кремния (РИТ) [49], ранее использованного в [50, 51] для изготовления бинарных дифракционных линз и делителей пучка терагерцового диапазона.

Гауссов пучок лазера на свободных электронах падает на фазовую пластинку (рис. 1), после прохождения которой формируется закрученный пучок с заданным топологическим зарядом l . Распределение интенсивности пучка регистрируется матрицей микроболометров [52, 53] с рабочей площадью $16,36 \times 12,24$ мм². Распределение интенсивности пучка по радиусу хорошо описывается функцией Бесселя первого рода, порядок которой соответствует топологическому заряду пучка $(J_l(k_r r))^2$.

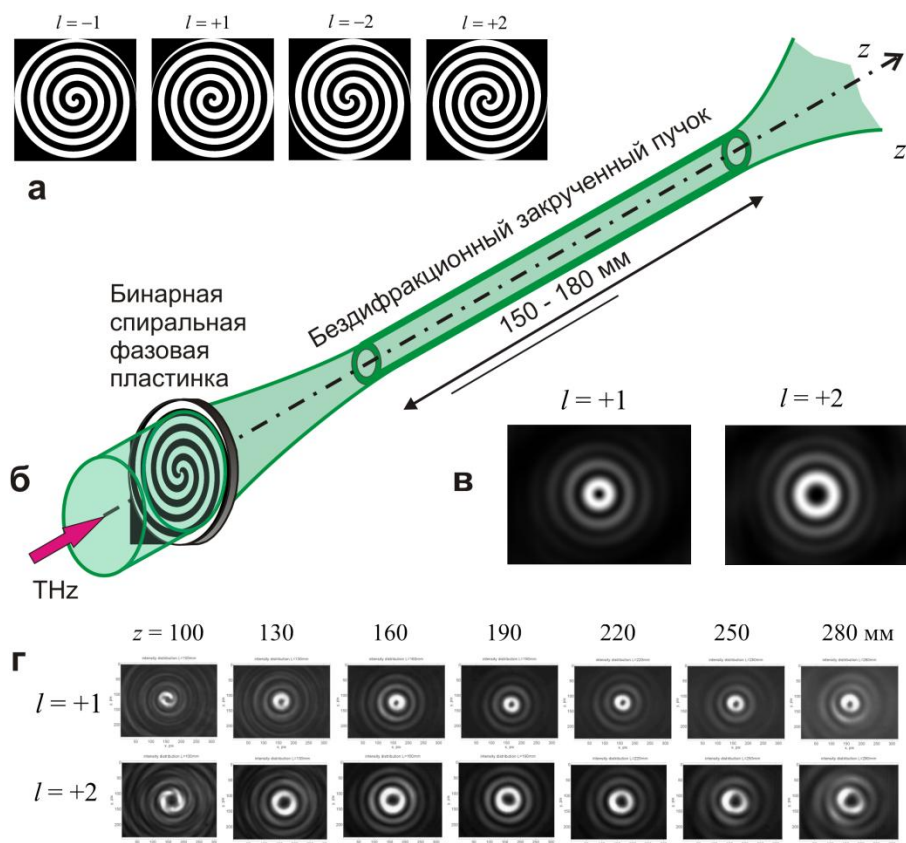


Рис. 1. Формирование закрученного пучка:

(а) бинарные фазовые зонные пластинки для формирования закрученных пучков с разными топологическими зарядами l ; (б) схема эксперимента, (в) распределение интенсивности в пучках с топологическими зарядами $l = \pm 1$ и $l = \pm 2$; (г) сечение пучка как функция расстояния

Экспериментально обнаружено, что распределение интенсивности в пучке сохраняется на расстоянии до 180 мм, после чего по причине ограниченности пучка по радиусу он начинает дифрагировать. Иными словами в определенных пределах пучок может считаться «бездифракционным». Подобные пучки можно использовать для мониторинга объектов сложной формы, для формирования ловушек для микрообъектов, а также для применения в лазерных радарах (лидарах) терагерцового диапазона. Распределение электрического поля по сечению пучка точно соответствует теоретическому значению $E(r, \varphi, z, t) = J_l(k_r r) \exp[i(l\varphi + k_z z - \omega t)]$. Это было экспериментально подтверждено, исследуя интерференцию закрученного пучка с плоской волной в интерферометре Маха-Цендера. Таким образом, описанные эксперименты позволили создать закрученные монохроматические пучки терагерцового диапазона, которые в ближайшее время будут использованы для решения прикладных задач.

Читателей, интересующихся взаимодействием закрученных фотонов с электронами и атомами, мы адресуем, например, к работам [54, 55].

БЛАГОДАРНОСТИ

Экспериментальные исследования поддержаны Минобрнауки РФ и грантом РФФИ 15-02-06444. Разработка и изготовление ДОО выполнены при поддержке Минобрнауки РФ, в том числе в рамках Программы повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013-2020 гг., Государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности, проект № 1879 и гранта РФФИ 13-02-97007. Оборудование для исследования характеристик ДОО изготовлено при поддержке гранта Российского научного фонда 14-50-00080. Эксперименты выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Сибирский Центр синхротронного и терагерцового излучения (ЦКП СЦСТИ)».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Poynting J. H. The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light // *Proc. Royal Society A*, 1909. – Т. 82. – С. 560–567.
2. Beth R. A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light // *Physical Review*. – 1936. – V. 50 – С. 115–127.
3. Allen L., Beijersbergen M. W., Spreeuw R. J. C., Woerdman J. P. Orbital angular-momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes // *Physical Review A*. – 1992. – V. 45, № 11. – С. 8185–8189.
4. Baranova N. B., Zel'dovich B. Ya. Dislocations of the wave-front surface and zeros of the amplitude // *Soviet Physics JETP*. – 1981. – V. 53, № 5. – P. 925–929.
5. Баженов В. Ю., Васнецов М. В., Соскин М. С. Лазерные пучки с винтовыми дислокациями волнового фронта // *Письма в ЖТФ*. – 1990. – Т. 52, № 8. – С. 1037–1039.
6. Алексеев А. Н., Алексеев К. Н., Бородавка А. С., Воляр А. В., Фридман Ю. А. Конверсия пучков Эрмита-Гаусса и Лагерра-Гаусса в астигматичной оптической системе: 1 эксперимент // *Письма в ЖЭТФ*. – 1998. – Т. 24, № 17. – С. 68–73.
7. Воляр А. В., Шведов В. Г., Фадеева Т. А. Вращение волнового фронта оптического вихря в свободном пространстве // *Письма в ЖТФ*. – 1999. – Т. 25, № 5. – С. 87–94.
8. Kennedy S. A., Szabo M. J., Teslow H., Porterfield J. Z., Abraham E. R. I. Creation of Laguerre-Gaussian laser modes using diffractive optics // *Physical Review A*. – 2002. – Oct. – Т. 66, № 4.
9. Berry M. V., Jeffrey M. R., Mansuripur M. Orbital and spin angular momentum in conical diffraction // *J. Opt. A-Pure and Applied Optics*. – 2005. – Nov. – Т. 7, № 11. – С. 685–690.
10. Marrucci L., Manzo C., Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media // *Physical Review Letters*. – 2006. – Apr 28. – V. 96, № 16. – 163905.
11. Allen L., Padgett M. Equivalent geometric transformations for spin and orbital angular momentum of light // *J. Modern Optics*. – 2007. – Mar 10. – V. 54, № 4. – С. 487–491.
12. Wang X.-L., Chen J., Li Y., Ding J., Guo C.-S., Wang H.-T. Optical orbital angular momentum from the curl of polarization // *Physical Review Letters*. – 2010. – Dec 13. – V. 105, № 25. – 253602, 4 pp.
13. Marrucci L., Karimi E., Slussarenko S., Piccirillo B., Santamato E., Nagali E., Sciarrino F. Spin-to-orbital conversion of the angular momentum of light and its classical and quantum applications // *Journal of Optics* – 2011. – June. – V. 13, № 6. – 064001, 13 pp.

14. Mirhosseini M., Magana-Loaiza O. S., Chen C., Rodenburg B., Malik M., Boyd R. W. Rapid generation of light beams carrying orbital angular momentum // *Optics Express*. – 2013. – Dec. 16. – T. 21, № 25. – C. 30196–30203.
15. Khonina S. N. Simple phase optical elements for narrowing of a focal spot in high-numerical-aperture conditions // *Optical Engineering*. – 2013. – Sep. – V. 52, № 9. – 091711.
16. Yu H., Zhang H., Wang Y., Han S., Yang H., Xu X., Wang Z., Petrov V., Wang J. Optical orbital angular momentum conservation during the transfer process from plasmonic vortex lens to light // *Sci. Reports*. – 2013. – Nov. 12. – V. 3. – 3191.
17. Mokhun I., Arkhelyuk A. D., Galushko Y., Kharitonova Y., Viktorovskaya Y. Angular momentum of an incoherent Gaussian beam // *Applied Optics*. – 2014. – Apr. 1. – T. 53, № 10. – C. B38–B42.
18. Yu N., Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces // *Nature Materials*. – 2014. – Feb. – V. 13, № 2. – P. 139–150.
19. Хонина С. Н., Алмазов А. А. Формирование гауссовых пучков с помощью винтовых ДОЭ // *Компьютерная оптика*. – 2002. – № 24. – С. 102–109.
20. Hemsing E., Knyazik A., Dunning M., Xiang D., Marinelli A., Hast C., Rosenzweig J. B. Coherent optical vortices from relativistic electron beams // *Nature Physics*. – 2013. – Sep. – V. 9, № 9. – P. 549–553.
21. Bahrtdt J., Holldack K., Kuske P., Mueller R., Scheer M., Schmid P. First Observation of Photons Carrying Orbital Angular Momentum in Undulator Radiation // *Physical Review Letters*. – 2013. – July 15. – V. 111, № 3. – 034801.
22. Scholz-Marggraf H. M., Fritzsche S., Serbo V. G., Afanasev A., Surzhykov A. Absorption of twisted light by hydrogenlike atoms // *Physical Review A*. – 2014. – V. 90. – 013425.
23. Matula O., Hayrapetyan A.G., Serbo V.G., Surzhykov A., Fritzsche S.. Atomic ionization of hydrogen-like ions by twisted photons: angular distribution of emitted electrons // *J. Phys. B-Atomic Molecular and Optical Physics*. – 2013. –V. 46. – 05002.
24. Matula O., Hayrapetyan A.G., Serbo V.G., Surzhykov A., Fritzsche S.. Radiative capture of twisted electrons by bare ions // *New Journal of Physics*. – 2014. – V. 16. – 053024.
25. Twisted Photons: Applications of Light with Orbital Angular Momentum. Ed. by J. P. Torres and L. Torner. – Wiley-VCH Weinheim, Germany, 2011. – 243 p.
26. Leyser T. B., Norin L., McCarrick M., Pedersen T. R., Gustavsson B. Radio Pumping of Ionospheric Plasma with Orbital Angular Momentum // *Physical Review Letters*. – 2009. – Feb 13. – V. 102, № 6. – 065004.
27. Thide B., Then H., Sjöholm J., Palmer K., Bergman J., Carozzi T. D., Istomin Y. N., Ibragimov N. H., Khamitova R. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain // *Physical Review Letters*. – 2007. – Aug 24. – V. 99, № 8. – 087701.
28. Tamburini F., Mari E., Sponselli A., Thide B., Bianchini A., Romanato F. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test // *New Journal of Physics*. – 2012. – Mar. 1. – V. 14. – 033001.
29. Gbur G., Tyson R. K. Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation // *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*. – 2008. – Jan. – V. 25, № 1. – P. 225–230.
30. Аксенов В. П., Погуца Ч. Е. Флуктуации орбитального углового момента лазерного пучка, несущего оптический вихрь, в турбулентной атмосфере // *Квантовая электроника*. – 2008. – Т. 38, № 4. – С. 343–348.
31. Babiker M., Bennett C. R., Andrews D. L., Romero L. C. D. Orbital angular momentum exchange in the interaction of twisted light with molecules // *Physical Review Letters*. – 2002. – Sep 30. – V. 89, № 14. – 043601.

32. Скиданов Р. В., Хонина С. Н., Морозов А. А. Оптическое вращение микрочастиц в гипергеометрических пучках, сформированных дифракционными оптическими элементами с многоуровневым микрорельефом // *Оптический журнал*. – 2013. – Т. 80, № 10. – С. 3–8.
33. Карпеев С. В. Анализ и формирование многомодовых лазерных пучков методами дифракционной оптики. – М.: Радио и связь, 2005. – 120 с.
34. Yao A. M., Padgett M. J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications // *Advances in Optics and Photonics*. – 2011. – June. – V. 3, № 2. – P. 161–204.
35. Molina-Terriza G., Torres J. P., Torner L. Twisted photons // *Nature Physics*. – 2007. – May. – V. 3, № 5. – P. 305–310.
36. Andrews D. L., Romero L. C. D., Babiker M. On optical vortex interactions with chiral matter // *Optics Communications*. – 2004. – July 1. – V. 237, № 1–3. – P. 133–139.
37. Araoka F., Verbiest T., Clays K., Persoons A. Interactions of twisted light with chiral molecules: An experimental investigation // *Physical Review A*. – 2005. – May. – V. 71, № 5. – 055401.
38. Löffler W., Woerdman J. P. Cholesteric polymers and the orbital angular momentum of light // *Complex Light and Optical Forces VI*. – 2012. – V. 8274. – 827404.
39. Andrews D. L., Coles M. M. Measures of chirality and angular momentum in the electromagnetic field // *Optics Letters*. – 2012. – Aug. 1. – V. 37, № 15. – P. 3009–3011.
40. Löffler W., Hermosa N., Aiello A., Woerdman J. P. Total internal reflection of orbital angular momentum beams // *Journal of Optics*. – 2013. – Jan. – V. 15, № 1. – 014012.
41. He J., Wang X., Hu D., Ye J., Feng S., Kan Q., Zhang Y. Generation and evolution of the terahertz vortex beam // *Optics Express*. – 2013. – Aug. 26. – V. 21, № 17. – P. 20230–20239.
42. Imai R., Kanda N., Higuchi T., Konishi K., Kuwata-Gonokami M. Generation of broadband terahertz vortex beams // *Optics Letters*. – 2014. – July 1. – V. 39, № 13. – P. 3714–3717.
43. Miyamoto K., Suizu K., Akiba T., Omatsu T. Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate // *Applied Physical Letters*. – 2014. – June 30. – V. 104, № 26. – 261104.
44. Imai R., Kanda N., Higuchi T., Zheng Z., Konishi K., Kuwata-Gonokami M. Terahertz vector beam generation using segmented nonlinear optical crystals with threefold rotational symmetry // *Optics Express*. – 2012. – Sep. 24. – V. 20, № 20. – P. 21896–21904.
45. Knyazev V. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements // *Measurement Science and Technology*. – 2010 – V. 21. – 054017. – 13 p.
46. Heckenberg, R. N., McDuff, R., Smith, C. P. & White, A. G. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms // *Optics Letters*. – 1992. – V. 17. – P. 221–223.
47. Дифракционная компьютерная оптика / Головашкин Д. Л., Досколович Л. Л., Казанский Н. Л., Котляр В. В., Павельев В. С., Скиданов Р. В., Сойфер В. А., Хонина С. Н.: под ред. В. А. Сойфера. – М., Физматлит, 2007.
48. Silicon [Electronical resource]. – <http://www.tydexoptics.com/pdf/Si.pdf>
49. Ayón A. A. Characterization of a time multiplexed inductively coupled plasma etcher / A. A. Ayón, R. Braff, C. C. Lin, H. H. Sawin, M. A. Schmidt // *Journal of the Electrochemical Society*. – 1999. – V. 146, Issue 1. – P. 339–349.
50. Агафонов А. Н., Володкин Б. О., Кавеев А. К., Князев Б. А., Кропотов Г. И., Павельев В. С., Тукмаков К. Н., Чопорова Ю. Ю. // *Компьютерная оптика*. – 2014. – Т. 38, № 4. – С. 763–769.
51. Агафонов А. Н., Володкин Б. О., Кавеев А. К., Князев Б. А., Кропотов Г. И., Павельев В. С., Сойфер В. А., Тукмаков К. Н., Цыганкова Е. В., Чопорова Ю. Ю. Кремниевые дифракционные оптические элементы для мощного монохроматического терагерцового излучения // *Автометрия*. – 2013. – Т. 49, №2. – С. 98–105.

52. Dem'yanenko M. A., Esaev D. G., Knyazev B. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A. Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser // *Applied Physics Letters*. – 2008. – V. 92. – 131116.

53. Knyazev B. A., Cherkassky V. S., Choporova Yu. Yu., Gerasimov V. V., Vlasenko M. G., Dem'yanenko M. A., Esaev D. G. Real-time imaging using a high-power monochromatic terahertz source: comparative description of imaging techniques with examples of application // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2011. – V. 32, Issue 10. – P. 1207–1222.

54. Jentschura U. D., Serbo V. G. Generation of High--Energy Photons with Large Orbital Angular Momentum by Compton Backscattering // *Physical Review Letters*. – 2011. – V.106. – 013001.

55. Scholz-Marggraf H. M., Fritzsche S., Serbo V. G., Afanasev A., Surzhykov A. Absorption of twisted light by hydrogenlike atoms // *Physical Review A*. – 2014. – V. 90. – P. 013425.

© Б. А. Князев, В. С. Павельев, В. Г. Сербо, Ю. Ю. Чопорова, Б. О. Володкин, 2015