

# Полихроматические бесселевы пучки нулевого и первого порядков

Ю.А. Егоров  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
yuriyegorov@cfuv.ru

М.В. Брецько  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
mihailbretcko4@gmail.com

Я.Е. Акимова  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
yana\_akimova\_1994@mail.ru

А.В. Воляр  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
volyar@cfuv.ru

А.Ф. Рыбась  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
rubass@cfuv.ru

**Аннотация**—В данном научном исследовании нами будет показана возможность формирования полихроматических пучков Бесселя-Гаусса как нулевого, так и первого порядков, при помощи широкодиапазонных некогерентных источников света, а доказательством создания таких типов пучков послужат интерференционные картины

**Ключевые слова**— полихроматический пучок Бесселя, топологический заряд, топологический квадруполь.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Как хорошо известно, когерентность оптического волнового фронта играет ключевую роль в формировании инвариантных световых полей Лагерра-Гаусса, Эрмита-Гаусса и Бесселя-Гаусса и представляют интерес в областях кристаллографии, генерации плазмы, и т.п. Если мы будем рассматривать оптическое излучение как суперпозицию конических волн, то сразу становится ясно, что когерентность то базовое свойство, которое играет ключевую роль в формировании таких типов пучков. В данной работе мы на примере пучков Бесселя-Гаусса покажем, что данный тип пучков может быть сформирован при помощи источников света, которые являются временно некогерентными широкодиапазонными (полихроматическими). Используя данный тип источников излучения, мы поясним, каким образом сформированные пучки зависят от функции ширины спектра.

## 2. ПОЛИХРОМАТИЧЕСКИЕ ПУЧКИ БЕССЕЛЯ

Из канонических учебников [1] нам хорошо известно, что характерной волновой характеристикой является дифракция света, которая возникает, если источник излучения является точечным и промодулирован по фазе или амплитуде, что приводит к интерференции волнового фронта с последующим возникновением дифракционных порядков. Дифракция, с точки зрения квантовой механики связана напрямую с представлением де Бройля о частице и принципом неопределенности Гейзенберга и, самое главное, связана напрямую с длиной волны, которая обратно пропорциональна моменту частицы. Именно с этой точки зрения решения уравнения Гельмгольца являются инвариантами и так называемые псевдо-недифрагирующие пучки получили значительный интерес к изучению.

В данной работе нами было показано, что когерентность светового излучения серьезнейшим образом влияет на формирование пучков Бесселя-Гаусса при условии отсутствия дисперсии для различных типов излучения, как для фемтосекундного, так и для непрерывного излучения. Как показывают наши исследования, источники полихроматического света действительно позволяют формировать пучки Бесселя-Гаусса, что, в конечном счете, позволяет нам положительно оценивать свойства таких пучков с учетом пространственной и временной когерентности поля.

Основной характеристикой при формировании пучков Бесселя-Гаусса или других недифрагирующих пучков, является соблюдение требований, связанных с пространственной когерентностью источника оптического излучения [3]. Нами было сформировано недифрагирующее световое распределение поля, которое обладало пространственной когерентностью, но при этом временная когерентность полностью отсутствовала.

Для формирования полихроматических пучков Бесселя-Гаусса была создана экспериментальная установка. Свет от источника оптического излучения при помощи зеркально-линзового конденсора и ахроматического микрообъектива фокусировался на входной торец оптического волокна с диаметром сердцевинны 7,5 мкм и диаметром оболочки 27,5 мкм.

Как показали наши исследования, использование оптического волокна крайне необходимо в связи с тем, что источник полихроматического света не является когерентным. Для создания такого источника излучения с пространственной когерентностью нами были проанализированы и проверены различные виды оптических волокон с сердцевинной от 5 до 100 мкм. Как оказалось если волокно имеет большой диаметр сердцевинны, то интенсивность излучения торца волокна достаточная для формирования пучка Бесселя, но сама картина является размытой вследствие малой длины когерентности. С другой стороны, если мы используем оптическое волокно с малым диаметром, то в этом случае мы можем наблюдать высококонтрастный пучок Бесселя. Но в данном случае интенсивность сформированной картины не позволяет нам зафиксировать требуемое нам изображение.

После прохождения излучения через оптическое волокно мы формировали коллимированный пучок диаметром 5 мм, с помощью ахроматического микрообъектива. В последствии коллимированный пучок направлялся на аксикон - коническую линзу. Фокальную зону, сформированную конической линзой, мы проецировали ахроматическим микрообъективом на CMOS камеру. Результаты представлены на рис. 1(а).

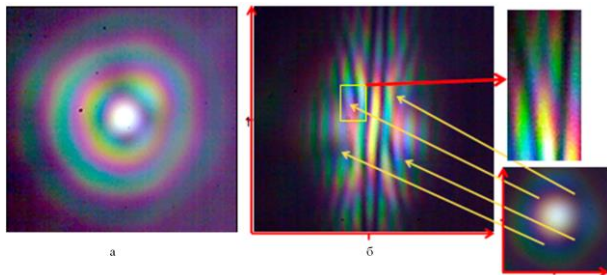


Рис. 1. Пучок Бесселя-Гаусса нулевого порядка (а) и его интерференционная картина (б)

Анализ интерференционной картины, сформированной бипризмой Френеля, и представленной на рис. 1(б) указывает на то, что на оси в центре пучка гладкий волновой фронт, а вблизи оси наблюдаются регулярные интерференционные полосы. Как можно заметить интерференционные полосы имеют нерегулярную структуру, и их искажение формирует «вилочную» структуру. Следует отметить, что «вилки» в классической интерференционной картине являются структурами, которые получили название – оптические вихри и соответствуют точкам волнового фронта, где амплитуда обращается в ноль, а фаза неопределена [4,6].

Наличие вилок в пучке Бесселя-Гаусса нулевого порядка характеризуется типологическим квадруполем. Ориентация «вилок» характеризует знак топологического заряда оптического вихря. Как можно заметить из рис. 1(б) нижние и верхние «вилки» одинаковы, но соответствуют разным топологическим зарядам

Нами были проведены сравнения оптических свойств недифрагирующих полей при использовании различных типов световых источников. В данном исследовании нами было показано, что существует возможность создания полихроматических пучков Бесселя не только нулевого, но и второго порядков.

В результате распространения недифрагирующего пучка Бесселя через систему поляризатор – кристалл – поляризатор [7,8] на оси пучка было сформировано изображение (рис. 2(а)) с минимумом интенсивности, что соответствует оптическому вихрю.

При детальном изучении сформированной интерференционной картины (рис. 2(б)) при помощи бипризмы Френеля, на оси пучка мы можем наблюдать цветную «вилку», которая полностью совпадает с расположением минимума интенсивности пучка Бесселя-Гаусса первого порядка. Данный факт свидетельствует о том, что наши предварительные предположения о наличии оптического вихря на оси полихроматического пучка Бесселя-Гаусса первого порядка, полностью подтвердилось.

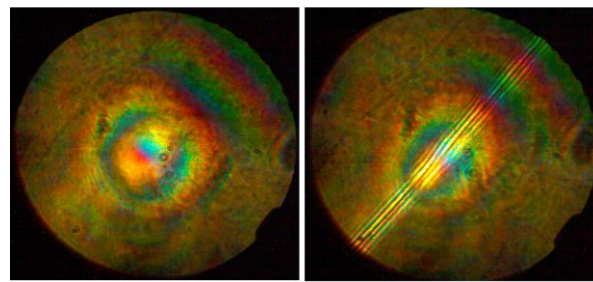


Рис. 2. Пучок Бесселя-Гаусса первого порядка (а) и его интерференционная картина (б)

### 3. ВЫВОДЫ

В данной работе на примере пучков Бесселя-Гаусса показано, что данный тип пучков может быть сформирован при помощи источников света, которые являются временно некогерентными широкодиапазонными (полихроматическими). В данной работе нами было показано, что когерентность светового излучения серьезнейшим образом влияет на формирование пучков Бесселя-Гаусса при условии отсутствия дисперсии для различных типов излучения, как для фемтосекундного, так и для непрерывного излучения. Как показывают наши исследования, источники полихроматического света действительно позволяют формировать пучки Бесселя-Гаусса нулевого и первого порядков и представляют интерес в областях кристаллографии, генерации плазмы, и др.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 20-37-90068, № 20-37-90066, № 19-29-01233).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nye, J.F. Natural Focusing and Fine Structure of Light. Caustics and Wave Dislocations / J.F. Nye // Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1999. – 327 p.
- [2] Снайдер, А. Теория оптических волноводов / А. Снайдер, Дж. Лав. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
- [3] Fischer, P. White light propagation invariant beams / P. Fischer, C.T.A. Brown, J.E. Morris, C. López-Mariscal, E.M. Wright, W. Sibbett, K. Dholakia // Optics Express. – 2005. – Vol. 13(17). – P. 6657-6666.
- [4] Soifer, V.A. Laser beam mode selection by computer-generated holograms / V.A. Soifer, M.A. Golub. – Boca Raton: CRC Press, 1994. – 224 p.
- [5] Kotlyar, V.V. Vortex Laser Beams / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.P. Porfirev. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 404 p.
- [6] Basisty, I. Optical wavefront dislocations and their properties / I. Basisty, M. Soskin, M. Vasnetsov // Opt. Commun. – 1995. – Vol. 119. – P. 604-612.
- [7] Volyar, A.V. Vector singularities of Gaussian beams in uniaxial crystals: Optical vortex generation / A.V. Volyar, T.A. Fadeeva, Y.A. Egorov // Technical Physics Letters. – 2002. – Vol. 28(11). – P. 958-961.
- [8] Volyar, A.V. Fine structure of white optical vortices in crystals / A.V. Volyar, Y.A. Egorov, A. Rubass, T.A. Fadeeva // Technical Physics Letters. – 2004. – Vol. 30(8). – P. 701-704.