

# Острая фокусировка векторных пучков, не содержащих продольной компоненты электрического поля

С.С. Стафеев

Самарский национальный  
исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
Самара, Россия  
sergey.stafeev@gmail.com

В.В. Котляр

Самарский национальный  
исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
НИЦ «Курчатовский институт»,  
Самара, Россия  
kotlyar@ipsiras.ru

**Аннотация** — В данной работе численно с помощью формул Ричардса-Вольфа была промоделирована острая фокусировка векторных пучков с азимутальной поляризацией и пучков с V-линией неопределённости поляризации. Было продемонстрировано, что в остром фокусе для этих пучков отсутствует продольная составляющая напряжённости электрического поля. Ранее подобный эффект демонстрировался только для азимутально-поляризованных пучков. Отсутствие продольной составляющей напряжённости электрического поля приводит к отсутствию поперечных составляющих спинового углового момента и поперечных составляющих намагниченности. Была показана возможность создания секторных азимутально-поляризованных пучков с помощью векторных волновых пластинок.

**Ключевые слова** — острая фокусировка, векторный пучок, азимутальная поляризация, формула Ричардса-Вольфа, спиновой угловой момент

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отмечается рост интереса исследователей к использованию азимутально поляризованного света [1]. Первоначально азимутальная поляризация предлагалась для получения компактных пятен [2,3]. Однако позднее были найдены и другие ее применения. Например, в работах [4,5] азимутально-поляризованный пучок используется для генерации третьей гармоники в ансамблях кремниевых наночастиц (квадрумеров и тримеров). Именно азимутально поляризованный свет оказался наиболее подходящим для возбуждения Ми резонансов в исследуемых олигомерах — было достигнуто улучшение генерации на два порядка по сравнению с использованием линейной поляризации. В работе [6] предложен оптоволоконный сенсор, в котором в качестве основной моды распространяется азимутально-поляризованная мода.

Достаточно интригующим видится использование азимутально-поляризованного света для манипуляций с намагниченностью, последняя вычисляется как векторное произведение напряжённости электрического поля на ее комплексное сопряжение:  $\mathbf{M} \sim \mathbf{E} \times \mathbf{E}^*$ . В первую очередь повышенный интерес к изучению намагниченности вызван их возможным применением в системах оптомагнитной памяти [7,8]. Из-за отсутствия продольной составляющей электрического поля, намагниченность в азимутально-поляризованном пучке всегда направлена вдоль оси распространения.

В данной работе численно с помощью формул Ричардса-Вольфа была промоделирована острая фокусировка векторных пучков с азимутальной поляризацией и пучков с V-линией неопределённости поляризации. Было продемонстрировано, что в остром фокусе для этих пучков отсутствует продольная составляющая напряжённости электрического поля. Ранее подобный эффект демонстрировался только для азимутально-поляризованных пучков.

## II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТРОЙ ФОКУСИРОВКИ

Моделирование в данной работе было проведено через вычисление в среде Matlab интеграла Ричардса-Вольфа. Была промоделирована острая фокусировка векторных пучков с азимутальной поляризацией (рис. 1а) и пучков с V-линией неопределённости поляризации (рис. 1б-1г).

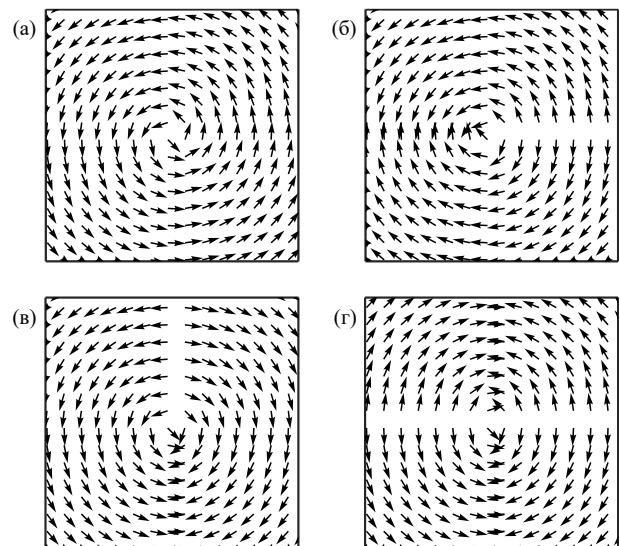


Рис. 1. Направление поляризации в исследуемых пучках: азимутально-поляризованном (а), пучке с V-линией сингулярности (б,в), пучке с двумя V-линиями сингулярности (г)

Ниже показаны результаты фокусировки пучка с одной V-линией неопределённости поляризации (рис. 1б). Напряжённость электрического поля фокусируемого пучка имеет вид:

$$E(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} \cos(2\varphi) - 1 \\ \sin(2\varphi) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\phi$  — азимутальный угол. На рис. 2 показано распределение интенсивности и её отдельных составляющих в плоскости фокуса для пучка (1). В моделировании считалось, что зонная пластинка с  $NA = 0,95$  фокусирует плоскую волну с длиной волны 532 нм в воздухе  $n = 1$ .

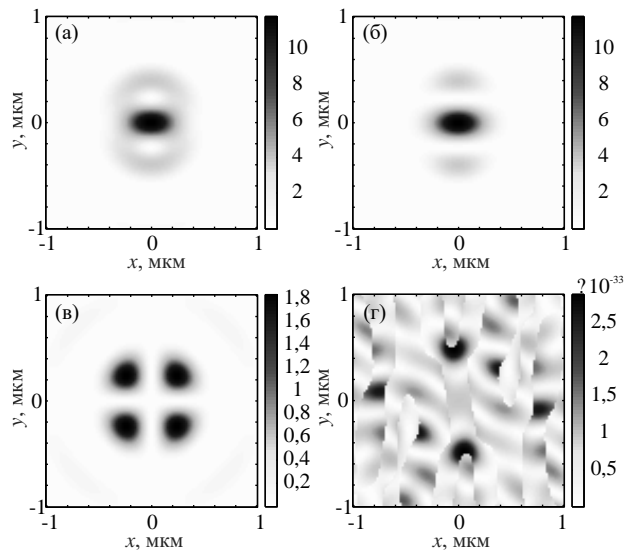


Рис. 2. Двумерные распределения интенсивности и её отдельных составляющих в фокусе пучка с V-линией неопределённости поляризации:  $I = I_x + I_y + I_z$  (а),  $I_x$  (б),  $I_y$  (в),  $I_z$  (г)

Получить пучки (1) можно с помощью q-пластинки (векторной волновой пластинки). Для этого можно пропустить через нее линейно-поляризованный вдоль оси  $x$  пучок, но такой, в котором поляризация нижнего сегмента отличается знаком от верхнего сегмента, например, пучок Гаусса-Эрмита (0,1). Нами для получения пучка Гаусса-Эрмита использовался пропускающий модулятор Нолые LC2012. Затем пучок совмещался с центром q-пластинки. Получившийся пучок фокусировался линзой с малой числовой апертурой на камеру, перед которой помещался поляризатор-анализатор. Результат фокусировки показан на рис. 3. Из рис 3 видно, что несмотря на малую числовую апертуру фокусирующей линзы, картина распределения интенсивности в фокусе согласуется с моделированием (рис. 2).

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе численно с помощью формул Ричардса-Вольфа была промоделирована острая фокусировка векторных пучков с азимутальной поляризацией и пучков с V-линией неопределённости поляризации. Было продемонстрировано, что в остром фокусе для этих пучков отсутствует продольная составляющая напряженности электрического поля. Ранее подобный эффект демонстрировался только для азимутально-поляризованных пучков. Отсутствие продольной компоненты напряженности электрического поля приводит к тому, что вектор спинового углового момента содержит только продольную компоненту.

Была также показана возможность экспериментальной генерации исследуемых пучков.

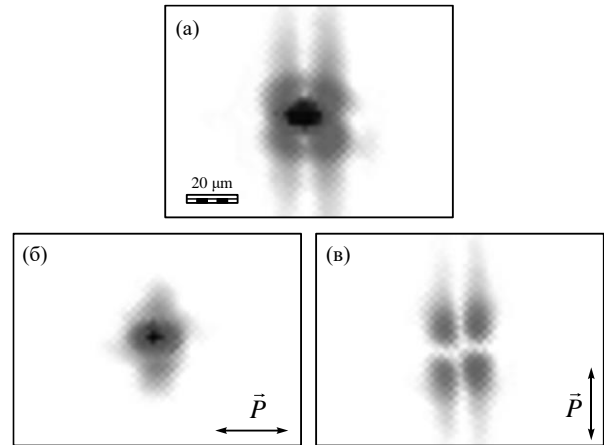


Рис. 3. Изображение сфокусированного пучка с V-линией неопределённости поляризации (1) на камере без анализатора (а) и с анализатором, повернутым на угол 0 (б) и 90 градусов (в)

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 23-12-00236) в части «Моделирование» и НИЦ «Курчатовский институт» в части «Эксперимент».

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zhan, Q. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications / Q. Zhan // *Adv. Opt. Photonics*. – 2009. – Vol. 1(1). – P. 1–57.
- [2] Hao, X. Phase encoding for sharper focus of the azimuthally polarized beam. / X. Hao, C. Kuang, T. Wang, X. Liu // *Opt. Lett.* – 2010. – Vol. 35(23). – P. 3928–3930.
- [3] Yuan, G.H. Nondiffracting transversally polarized beam / G.H. Yuan, S.B. Wei, X.-C. Yuan // *Opt. Lett.* – 2011. – Vol. 36(17). – P. 3479.
- [4] Kroychuk, M.K. Enhanced Nonlinear Light Generation in Oligomers of Silicon Nanoparticles under Vector Beam Illumination / M.K. Kroychuk, A.S. Shorokhov, D.F. Yagudin, D.A. Shilkin, D.A. Smirnova, I. Volkovskaya, M.R. Shcherbakov, G. Shvets, A.A. Fedyanin // *Nano Lett.* – 2020. – Vol. 20(5). – P. 3471–3477.
- [5] Kroychuk, M.K. Tailored Nonlinear Anisotropy in Mie - Resonant Dielectric Oligomers / M.K. Kroychuk, D.F. Yagudin, A.S. Shorokhov, D.A. Smirnova, I.I. Volkovskaya, M.R. Shcherbakov, G. Shvets, Y.S. Kivshar, A.A. Fedyanin // *Adv. Opt. Mater.* – 2019. – Vol. 7(20). – P. 1900447.
- [6] Sharif, V. High-performance surface plasmon resonance fiber sensor based on cylindrical vector modes / V. Sharif, H. Pakarzadeh // *Sci. Rep.* – 2023. – Vol. 13(1). – P. 4563.
- [7] Khorsand, A.R. Role of Magnetic Circular Dichroism in All-Optical Magnetic Recording / A.R. Khorsand, M. Savoini, A. Kirilyuk, A.V. Kimel, A. Tsukamoto, A. Itoh, T. Rasing // *Phys. Rev. Lett.* – 2012. – Vol. 108(12). – P. 127205.
- [8] Ignatyeva, D.O. Plasmonic layer-selective all-optical switching of magnetization with nanometer resolution / D.O. Ignatyeva, C.S. Davies, D.A. Sylgacheva, A. Tsukamoto, H. Yoshikawa, P.O. Kapralov, A. Kirilyuk, V.I. Belotelov, A.V. Kimel // *Nat. Commun.* – 2019. – Vol. 10(1). – P. 4786.
- [9] Nie, Z. Spherical and sub-wavelength longitudinal magnetization generated by  $4\pi$  tightly focusing radially polarized vortex beams / Z. Nie, W. Ding, D. Li, X. Zhang, Y. Wang, Y. Song // *Opt. Express*. – 2015. – Vol. 23(2). – P. 690.