

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМЫХ ФАЗОВЫХ ПЛАСТИНОК ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКЕ

*А.С. ГНАТЕНКО, Ю.П. МАЧЕХИН, В.П. ОБОЗНАЯ*

В данной работе были рассмотрены применения жидкокристаллических поляризаторов в области фотоники, а именно в обеспечении ними синхронизации мод кольцевых волоконных лазеров. Представлена математическая модель и метод расчета электроуправляемых фазовых пластинок. Была построена зависимость поворота поляризации проходящего лазерного излучения через жидкокристаллическую ячейку от приложенного к ней напряжения. Полученный результат сравнивается с экспериментальной зависимостью. Полученные в работе результаты подтверждают возможность применения жидкокристаллических поляризаторов для обеспечения синхронизации мод волоконных лазеров.

*Ключевые слова:* лазер, поляризация, кристалл, излучение, фотоника, импульс, поляризатор, энергия, генерация, мода.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования особенностей устройств на основе структур нематических жидких кристаллов (ЖК) уделяется большое внимание. Это связано с практическим использованием принципов их работы в ЖК-дисплеях [1–3] и устройств на основе жидких кристаллов, используемых в фотонике [4].

Широкое распространение оптоволоконных линий связи для телевидения и интернета увеличивает потребность в разнообразных пассивных и активных оптических компонентах для функционирования и обслуживания телекоммуникационных систем и регулирования интенсивности оптического сигнала. Особый интерес для лазерной техники представляют жидко-кристаллических ячеек (ЖК ячеек). ЖК ячейки представляют собой тонкий слой нематических жидких кристаллов, зажатых между двух прозрачных пластинок с нанесенным на них проводящим слоем. Управляющее напряжение (УН), подаваемое на пластины, создает электрическое поле между ними, что приводит к частичной переориентации кристаллов и, как следствие, изменению двулучепреломления среды. ЖК ячейки обладают двумя степенями свободы для изменения состояния поляризации – поворот оптической оси, который осуществляется механическим (ручным) поворотом пластины (не будет использоваться в работе далее), и изменение волновой задержки, которая зависит от величины УН.

ЖК ячейки могут быть различного вида: планарные, гибридноориентированные и допированные наночастицами, могут управляться двухчастотным способом и т.д. Но для разработки устройств фотоники необходимым условием является их теоретическое исследование, а именно: пропускание оптических сигналов, управление поляризацией лазерного излучения, быстроедействие.

В данной работе рассмотрим метод теоретического и численного моделирования ЖК ячеек, которые

применяются в качестве электроуправляемых фазовых пластинок для обеспечения синхронизации мод в волоконных кольцевых лазерах.

### 1. СИНХРОНИЗАЦИИ МОД ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Существует большое количество волоконных лазеров со сверхкороткой длительностью импульсов, в которых синхронизация мод (СМ) осуществляется различными способами. Например, с помощью насыщающихся поглотителей эта реализация получила много внимания [5 - 6]. Тем не менее, как правило, такие лазеры требуют правильной регулировки поляризации внутри резонатора, чтобы получить режим синхронизации мод. Хотя, некоторые конфигурации, основанные на волокне с поддержанием поляризации (ПП), были продемонстрированы в [7], высокая стоимость оптических элементов с поддержанием поляризации является их существенным недостатком. Но еще более важным недостатком таких лазеров есть то, что они, как правило, на выходе имеют более длинные импульсы и гораздо более низкую мощность, по сравнению с лазерами, в которых реализована синхронизация мод за счет нелинейного вращения поляризации (нелинейной эволюции поляризации – НЭП).

Волоконные лазеры с синхронизацией мод излучения за счет нелинейной эволюции состояния поляризации излучения являются уникальными источниками излучения с параметрами, реализуемыми в широком диапазоне значений длительности импульсов и их энергии при различных формах импульсов [8]. В этих лазерах реализована генерация импульсов короче 36 фс [9], получена энергия импульсов 4 мкДж (без дополнительных усилителей) [10].

Как уже упоминалось, метод НЭП режима синхронизации мод - лучший выбор для получения ультракороткого импульса и генерации гребенки оптических частот волоконных лазеров. Типичная опти-

ческая схема лазера на основе НЭП, показана на рис. 1.

Синхронизация мод получается, когда состояние поляризации внутри резонатора выровнено должным образом. Это обычно достигается набором волновых пластин, которые можно вращать вокруг своей оси. На практике количество волновых пластин зависит от множества факторов и может варьироваться. В некоторых примерах используются два полных контроллера поляризации (КП) (перед и после поляризационного делительного кубика (PBS)) [11], в некоторых схемах при правильном положении волокна гарантируют, что режим синхронизации мод будет получен с одним КП (ставится перед PBS) [12]. Другие примеры включают две [13], три [14] или четыре [15] волновые пластины. Тем не менее, большой проблемой является не количество волновых пластин, а механизм их регулирования. В большинстве случаев положение этих пластин должно быть скорректировано вручную. А т. к. любое движение волокна, изменение температуры или даже включение кнопки накачки может привести к срыву режима синхронизации мод, эти конфигурации требуют постоянной подстройки. Есть примеры систем, где волновые пластины корректируются моторизованными держателями или электронным управлением положения волокна, но это значительно увеличивает стоимость устройства.

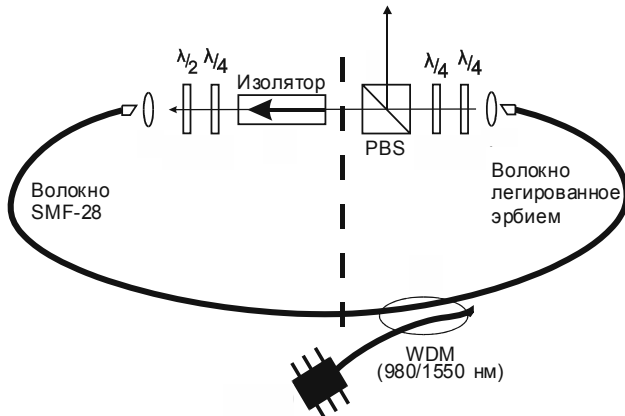


Рис. 1. Типичная схема кольцевого волоконного лазера с НЭП

Таким образом, реализация более совершенного механизма запуска режима СМ на основе НЭП волоконного лазера остаётся сегодня актуальной задачей.

Для решения вышесказанных проблем предлагается использовать ЖК-ячейки управляемые напряжением, вместо волновых пластинок. Оптическая схема показана на рис. 2.

ЖК ячейки обеспечивают полный контроль поляризации света перед PBS. Две дополнительные ячейки были расположены после PBS.

Но, для создания лазера с ЖК контроллерами поляризации, необходимо изучить как теоретические, так и практические, физических принципов работы и свойств управления поляризацией лазерного излучения с помощью жидких кристаллов.

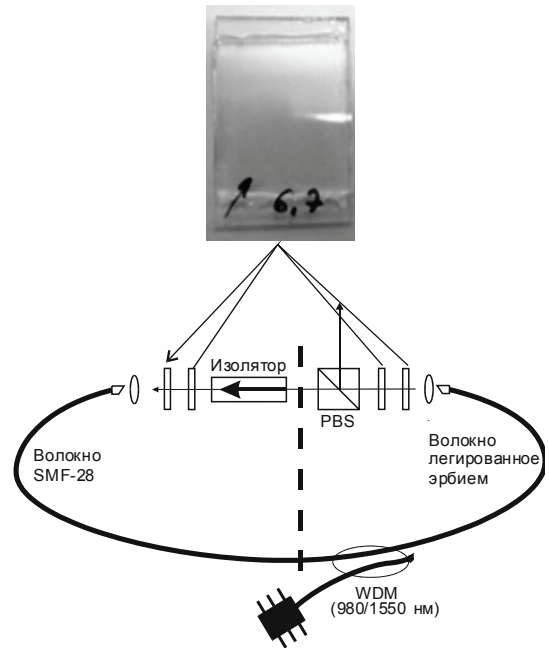


Рис.2. Оптическая схема лазера с ЖК ячейками

## 2. МЕТОД РАСЧЕТА И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖК ЯЧЕЕК

В основе данного метода лежит решение уравнения Озеена-Франка (1). Свободную энергию Озеена-Франка можно представить в виде:

$$F = \int \left\{ \frac{1}{2} K_{22} \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta \epsilon E^2 \sin^2(\theta) \right\}, \quad (1)$$

предполагая отсутствие кручения жидкого кристалла, где  $K_{22}$  – константа упругости,  $\Delta \epsilon$  – диэлектрическая анизотропия,  $\theta(z)$  – наклон директора кристалла от оси  $z$  и  $E$  – электрическое поле. Равновесное значение функции  $\theta(z)$  таково, что оно минимизирует функционал  $F$ . Принимая вариации первого порядка, находим, что  $\theta(z)$  должно удовлетворять следующему дифференциальному уравнению:

$$K_{22} \frac{d^2 \theta}{dz^2} + \epsilon_0 \Delta \epsilon E^2 \sin(\theta) \cos(\theta) = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) – это дифференциальное уравнение второго порядка. Чтобы решить (2) численно, его сначала нужно преобразовать в систему из двух уравнений первого порядка (3), введя дополнительную переменную. При таких заменах, как  $\theta(z) \rightarrow \theta_1$  и  $\theta'(z) \rightarrow \theta_2$  мы получаем набор из двух связанных линейных уравнений:

$$\begin{cases} \theta_1' = \theta_2, \\ K_{22} \theta_2 + \epsilon_0 \Delta \epsilon E^2 \sin(\theta_1) \cos(\theta_1) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Поскольку жидкий кристалл переориентируется, диэлектрическая проницаемость изменяется, что влияет на электрическое поле. Фактически электрическое поле также должно быть рассчитано путем решения уравнения Лапласа:

$$\nabla \varepsilon \nabla u = 0, \quad (4)$$

где  $u$  – потенциал приложенного напряжения к ЖК кристаллу и  $E = -\nabla u$ . Поскольку у нас есть только одномерная задача, то уравнение (4) сводится к:

$$\frac{d}{dz} \left[ \varepsilon_{zz} \frac{du}{dz} \right] = 0, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{\perp} + \Delta \varepsilon \sin^2(\theta)$ . Тогда по правилу дифференцирования:

$$2\Delta \varepsilon \sin(\theta) \cos(\theta) \frac{d\theta}{dz} \frac{du}{dz} + \left[ \varepsilon_{\perp} + \Delta \varepsilon \sin^2(\theta) \right] \frac{d^2 u}{dz^2} = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) также второго порядка, которое нужно линеаризовать, введя для  $u(z) \rightarrow u_1$  и  $u'(z) \rightarrow u_2$ . Тогда получаем:

$$\begin{cases} \theta_1' = \theta_2, \\ K_{22} \theta_2' + \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 \sin(\theta_1) \cos(\theta_1) = 0, \\ u_1' = u_2, \\ 2\Delta \varepsilon \sin(\theta_1) \cos(\theta_1) \theta_2 u_2 + \left[ \varepsilon_{\perp} + \Delta \varepsilon \sin^2(\theta) \right] \cdot u_2' = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) состоит из четырех линейных дифференциальных уравнений, которая решается, путем нахождения:

$$\left\{ \theta_1', \theta_2', u_1', u_2' \right\}.$$

С тремя упругими постоянными функционал свободной энергии дополняется членами, учитывающими анизотропию изгибного изгиба жидкого кристалла. Существуют три упругие постоянные  $K_{11}$ ,  $K_{22}$  и  $K_{33}$ , которые соответствуют растяжению, скручиванию и деформации изгиба директора жидкого кристалла. Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$F = \int \left( \frac{1}{2} K_{11} (\nabla \cdot \hat{n})^2 + \frac{1}{2} K_{22} (\hat{n} \cdot \nabla \times \hat{n})^2 + \frac{1}{2} K_{33} |\hat{n} \times \nabla \times \hat{n}|^2 - \frac{1}{2} \varepsilon_0 (\vec{E} \cdot \vec{\varepsilon} \cdot \vec{E}) \right). \quad (8)$$

Далее уравнение (8) приводится по вышеописанной методике к системе линейных уравнений и из них находятся интересные параметры.

Используя изложенную математическую модель с помощью математических и численных методов возможно исследовать электрооптические параметры ЖК кристаллов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследована возможность применения электроуправляемых ЖК фазовых пластинок для обеспечения синхронизации мод волоконных лазеров. Была представлена математическая модель расчетов электрооптических свойств ЖК ячеек. На рис.3 представлена зависимость угла поворота поляризации излучения лазера от прикладываемого напряжения к ЖК фазовой пластинке.

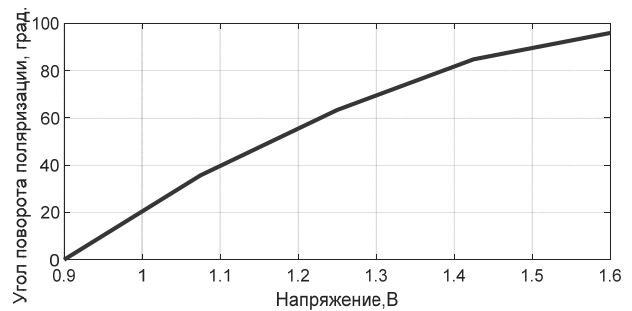


Рис.3. Теоретическая зависимость угла поворота поляризации излучения от прикладываемого напряжения к ЖК ячейке

Из зависимости, можно сделать вывод, что при прикладывании маленького напряжения ЖК поляризатор управляет поляризацией излучения, а именно переориентирует ее в пространстве.

Из рис.3 видно, что существует некое напряжение отсечки 0.9 В, что свойственно электроуправляемым поляризаторам. Также можно сделать вывод: изменяя напряжение, прикладываемое к ЖК ячейке, поляризация излучения вращается в пространстве от 0 до 90 град., этот результат свидетельствует о возможности обеспечения синхронизации мод в кольцевых волоконных лазерах с помощью электроуправляемых ЖК поляризаторов.

На рис.4 изображения экспериментальная зависимость угла поворота поляризации излучения от прикладываемого напряжения к ЖК ячейке. Экспериментальная зависимость по форме и данным совпадает с теоретической, что свидетельствует правильному методу расчета электрооптических свойств ЖК ячеек предложенному в данной работе.

Экспериментальные данные были получены на базе Института химии новых материалов НАН Беларуси. Дальнейшей задачей в этом направлении будет заключаться в практической реализации синхронизации мод кольцевого волоконного лазера с применением электроуправляемых ЖК поляризаторов.

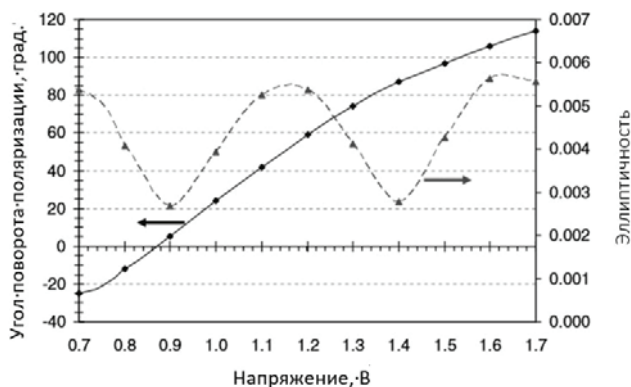


Рис.4. Экспериментальная зависимость угла поворота поляризации излучения от прикладываемого напряжения к ЖК ячейке

Отдельная благодарность за предоставление в пользование ЖК ячеек и возможности их исследования заведующему лабораторией Института химии новых материалов НАН Беларуси Муравскому Александру Анатольевичу.

#### Литература

- [1] F.X. Kurtner, J.A. der Au, and U. Keller // Mode-locking with slow and fast saturable absorbers what's the difference?. IEEE Selected Topics in Quantum Electronics. 1998. Vol.4. - P. 159–168.
- [2] J. Sotor, G. Sobon, and K.M. Abramski // Er-doped fibre laser modelocked by mechanically exfoliated graphene saturable absorber. Opt. Electron. 2012. Rev. 20. P. 362–366.
- [3] N. Nishizawa, Y. Seno, K. Sumimura, Y. Sakakibara, E. Itga, H.Kataura, and K. Itoh // All polarization maintaining Er-doped ultrashort pulse fibre laser using carbon nanotube saturable absorber. Opt. Express. 2008. Vol. 16. - P. 9429 – 9435.
- [4] S. Smirnov [et al.] // Three key regimes of single pulse generation per round trip of all-normal dispersion fiber lasers mode-locked with nonlinear polarization rotation. Optics Express. 2012. Vol. 20, № 24. - P. 27447– 27453.
- [5] F. Ilday [et al.] // Generation of 36-femtosecond pulses from a ytterbium fiber laser. OpticsExpress. 2003. Vol.11, № 26. - P.3550–3554.
- [6] Kobtsev S., Kukarin S., Fedotov Y. // Ultra-low repetition rate mode-locked fiber laser with high-energy pulses. Optics Express. 2008. Vol.16, № 26. - P.21936 – 21941.
- [7] Z. Zu Xing, X. Kun, W. Jian, H.-X. Bing and L.J. Tong // Two different operation regimes of fibre laser based on nonlinear polarization rotation: passive mode-locking and multi wavelength emission // IEEE Photonic Technol. 2008. Lett. № 20. - P. 979 – 981.
- [8] M. Nikodem and K. Abramski // 169 MHz repetition frequency all fibre passively mode-locked erbium doped fibre laser. Opt. Commun. 2010. №283. - P.109 – 112.
- [9] L.M. Zhao, C. Lu, H.Y. Tam, P.K. A. Wai, and D.Y. Tang // High fundamental repetition rate fiber lasers operated in strong normal dispersion regime. IEEE Photonics Technol. Lett. 2009. № 21. - P. 724 – 726.
- [10] J. Chen, J. W. Sickler, E. P. Ippen, and F. X. Kärtner // High repetition rate, low jitter, low intensity noise, fundamentally mode-locked 167 fs soliton Er-fiber laser. Opt. Lett. 2007. № 32. - P.1566 – 1568.

- [11] Y. Nakajima, H. Inaba, K. Hosaka, K. Minoshima, A. Onae, M. Yasuda, T. Kohno, S. Kawato, T. Kobayashi, T. Katsuyama, and F.L. Hong // A multibranch, fiber based frequency comb with millihertz level relative linewidths using an intracavity electrooptic modulator. Opt. Express. 2010. № 18. - P. 1667 – 1676.
- [12] X. Shen, W. Li, M. Yan, and H. Zeng // Electronic control of nonlinear polarization rotation mode locking in Yb-doped fiber lasers. Opt. Lett. 2012, №37. - P. 3426 – 3428.
- [13] T. Hellwig, T. Walbaum, P. Groß, and C. Fallnich // Automated characterization and alignment of passively mode-locked fiber lasers based on nonlinear polarization rotation. Appl. Phys. 2010. Vol. B101. - P. 565 – 570.
- [14] W. Hossack, E. Theofanidou, J. Crain, K. Heggarty, and M. Birch // High speed holographic optical tweezers using a ferroelectric liquid crystal microdisplay. Opt. Express. 2003, №11. - P.2053–2059.
- [15] D. U. Kim, H. Song, W. Song, M. Sung, and D.Y. Kim // Two photon microscopy using an Yb<sup>3+</sup> doped fibre laser with variable pulse widths. Opt. Express 2012, №20. - P.12341 – 12349.

Поступила в редколлегию 01.06.2017



**Гнатенко Александр Сергеевич**, ассистент кафедры фотоники и лазерной инженерии Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: лазерная и оптоэлектронная техника, волоконные лазеры, лазеры сверхкоротких импульсов.



**Мачехин Юрий Павлович**, доктор технических наук, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженный метролог Украины, академик Академии наук прикладной радиоэлектроники, заведующий кафедрой ФЛИ Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: лазерная измерительная техника и опто-электронные приборы



**Обозная Валерия Петровна**, студентка кафедры фотоники и лазерной инженерии Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: волоконные лазеры, лазеры сверхкоротких импульсов, лазерная спектроскопия.

УДК 621.373.826

Дослідження властивостей електрокерованих фазових пластинок для застосування в лазерній техніці / О.С. Гнатенко, Ю.П. Мачехін, В.П. Обозна // Прикладна радіоелектроніка: наук. – техн. журнал. – 2017. – Том 16, № 1, 2. – С. 88 – 92.

У даній роботі розглянуто застосування рідкокристалічних поляризаторів в області фотоніки, а саме в забезпеченні ними синхронізації мод кільцевих волоконних лазерів. Подано математичну модель і метод розрахунку електрокерованих фазових пластинок. Була побудована залежність повороту поляризації лазерного випромінювання від прикладеної напруги до рідкіснокристалічної комірки. Отриманий результат порівнюється з експериментальною залежністю. Отримані в роботі результати підтверджують можливість застосування рідкокристалічних поляризаторів для забезпечення синхронізації мод волоконних кільцевих лазерів.

*Ключові слова:* лазер, поляризація, кристал, випромінювання, фотоніка, імпульс, поляризатор, енергія, генерація, мода.

Л.: 04. Бібліогр.:15 найм.

UDC 621.373.826

**Investigation of the properties of electrically controlled phase plates for use in laser technology** / A.S. Gnatenko, Yu.P. Machehin, V.P. Obozna // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2017. – Vol. 16, № 1, 2 – P. 88 – 92.

In this paper applications of liquid crystal polarizers in the field of photonics are considered, namely, in their providing the synchronization of modes of ring fiber lasers. A mathematical model and a method for calculating electrically controlled phase plates are presented. The dependence of the rotation of the polarization of the transmitted laser radiation through a liquid crystal cell on the voltage applied to it was constructed. The obtained result is compared with the experimental dependence. The results obtained confirm the possibility of using liquid crystal polarizers to provide mode-locking of fiber lasers.

*Keywords:* laser, polarization, crystal, radiation, photonics, pulse, polarizer, energy, generation, mode.

Fig.: 04. Ref.: 15 items.