

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРА НА СИСТЕМЕ ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИЙ ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ–ПОЛИМЕРНЫЙ СЛОЙ, ЛЕГИРОВАННЫЙ КРАСИТЕЛЕМ – ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИЙ ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ

Т.М. САРУХАНЫАН*

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: sarukhanyan.tm@gmail.com

(Поступила в редакцию 22 января 2021 г.)

Состояние поляризации важная особенность любого лазерного излучения. Поляризация света важна для обработки лазерных лучей в устройствах, зависящих от поляризации, таких как интерферометры, оптические усилители, оптические модуляторы и т.д. В данной работе экспериментально исследована поляризация пиков, генерируемой системой трехслойный холестерический жидкий кристалл – слой полимера, легированного красителем – холестерический жидкий кристалл. Было показано, что состояние поляризации пиков исследуемой трехслойной системой, является круговой. Экспериментально подтверждена поляризация генерации холестерической жидкокристаллической системы, легированной красителями, которая также является круговой. Показано, что поляризация генерации холестерического жидкого кристалла с изотропным дефектным слоем внутри совпадает с поляризацией генерации холестерической жидкокристаллической системы, легированной красителем. В обоих случаях, лазерное излучение имеет левую круговую поляризацию.

1. Введение

Холестерические жидкие кристаллы (ХЖК) самые известные представители одномерных фотонных кристаллов со свойством самоорганизации структур. ХЖК обеспечивают периодическую модуляцию показателя преломления благодаря периодической спиральной структуре, которая приводит к запрету распространения фотонов в определенном частотном диапазоне, так называемом диапазоне фотонной запрещенной зоны (ФЗЗ). Свойство селективного отражения ХЖК проявляется в ФЗЗ [1]. Отметим, что локализация падающего света на краевых модах ФЗЗ сильно зависит от угла падения света [2].

ХЖК представляют собой интересные материалы не только как отдельная система, но и с комбинациями флуоресцентных красителей, полимеров, наночастиц и т.д. В частности, молекулы красителя, растворенные в жидком кристалле (ЖК), могут изменять оптические свойства ЖК. К примеру, могут увеличить

поглощение жидкого кристалла, легированного красителем, в определенном диапазоне длин волн и обеспечить генерацию с края ФЗЗ [3]. Таким образом, жидкокристаллическая система, легированная красителями, способна обеспечить беззеркальную низкопороговую генерацию. Возможность настраивания структуры ХЖК, а также оптических свойств с помощью различных внешних факторов, таких как температура, гидродинамический поток и т.д., дает возможность достичь управляемой генерации [4–11] в подобных системах. В [12] авторы исследовали возможность получения многоволновой генерации на холестерическом жидком кристалле, легированном красителями (ХЖКЛК), независимо от механизмов переориентации молекул.

Создание оптических дефектов внутри холестерической структуры возможно двумя путями: введением слоя изотропных/анизотропных дефектов или созданием сдвига фаз под действием внешних факторов (индуцированных дефектов). Поляризационные особенности анизотропного дефектного слоя внутри ХЖК экспериментально и теоретически исследованы в [13–19]. Кроме того, наличие дефектного слоя между слоями ХЖК дает возможность генерации либо на дефектных модах внутри ФЗЗ, либо на краевых модах, а излучение содержит как правую, так и левую круговую поляризацию [20]. В случае многослойных систем ХЖК [21,22] ключевым фактором для обеспечения генерации внутри ФЗЗ является плотность фотонных состояний, которая сильно зависит от толщины полимерного слоя [23,24]. В работах [25,26] авторы предлагают различные многослойные структуры ХЖК для получения генерации излучения как с такой же, так и с противоположной поляризацией как знак спирали ХЖК. Следует отметить, что в системе ХЖКЛК лазерное излучение с оптическим возбуждением имеет круговую поляризацию, направление которой зависит от знака спирали используемой ХЖК. В частности, пики лазерного излучения преимущественно содержат то же направление поляризации (для которого ХЖК действует как дифракционное зеркало), что и хиральность ЖК [27].

Известны два определения состояния круговой поляризации света. Согласно классическому определению, правая круговая поляризация соответствует электрическому вектору света, вращающемуся по часовой стрелке для наблюдателя, смотрящего на падающий луч [28]. Второе – современное определение, следует закону правого винта: луч света имеет правостороннюю круговую поляризацию, если вращение вектора электрического поля соответствует вращению против часовой стрелки. Согласно терминологии современной физики, угловой момент фотона с правой круговой поляризацией положителен вдоль направления распространения фотона. Таким образом, свет с правой круговой поляризацией, идущий по правозакрученной спирали ХЖК, «не видит» периодичности спирали и, следовательно, не дифрагирует [28,29]. В настоящей статье для определения состояния круговой поляризации света используется современная физическая терминология.

Целью работы является исследование поляризации пиков излучения для системы трехслойный холестерический жидкий кристалл – легированный красителем полимерный слой – холестерический жидкий кристалл (ХЖК–ЛКПС–ХЖК).

2. Экспериментальная установка

Для эксперимента была изготовлена трехслойная ячейка ХЖК–ЛКПС–ХЖК. На очищенные стеклянные подложки наносился слой полиимида (PI) для ориентации молекул ЖК. Для получения равномерно распределенного и тонкого слоя полиимида на подложки использовалось устройство для нанесения покрытий методом центрифугирования в два этапа. Сначала в течение 5 секунд при скорости 500 об/мин, затем в течение 25 секунд при 3000 об/мин. Далее покрытые полиимидом подложки натирали в антипараллельном направлении с помощью шелковой ткани, чтобы обеспечить планарную ориентацию молекул ЖК. В экспериментах для трехслойной системы использовалась хиральная жидкокристаллическая смесь MDA-02-3211 на длине волны 589.3 нм при комнатной температуре (20°C) с шагом $p = 347$ нм и со средним показателем преломления $n = 1.604$ (при $n_e = 1.7013$ и $n_o = 1.5064$ соответственно необыкновенный и обыкновенный показатели преломления) и спираль смесью правозакрученная [30]. Для получения ЛКПС использовали акриловый полимер и флуоресцентный краситель родамин 6G (R6G) с концентрацией красителя в полимере 10^{-4} моль/л, чтобы избежать возможной агрегации. Слой ЛКПС получают фотополимеризацией под действием УФ света. После полимеризации, поглощение красителя R6G, растворенного в полимерной матрице, находится в диапазоне длин волн 509–551 нм, в то время как максимальное поглощение приходится на длину волны 532 нм. Спектр излучения красителя находится в диапазоне 536–579 нм с максимальным излучением около длины волны 560 нм (рис. 1а).

Следует отметить, что ЛКПС является оптически изотропным, поскольку коэффициент пропускания для света с левой (1) и правой (2) круговой

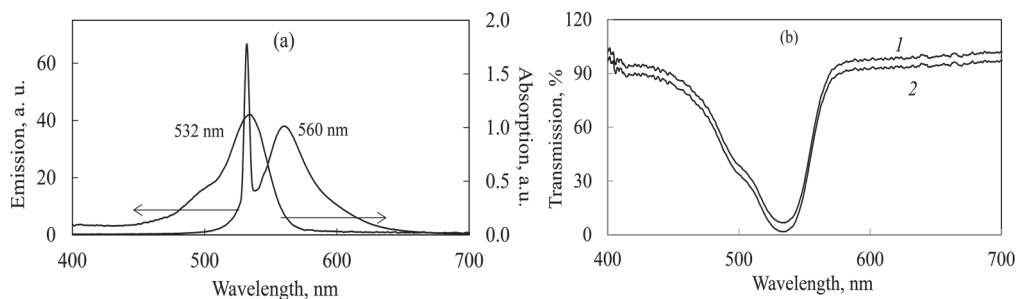


Рис.1. (а) Экспериментально полученные спектры поглощения и спектры излучения ЛКПС, (б) спектры пропускания от слоя ЛКПС для света с левой (1) и правой (2) круговой поляризацией.

поляризацией почти одинаков (рис.1b). Показатель преломления и толщина ЛКПС составляют 1.68 и 30 мкм соответственно. Подложки с планарной ориентацией отделены прокладкой 10 мкм с одной стороны подложек. В процессе изготовления образца использовался так называемый капиллярный метод. Эскиз клиновидной ячейки ХЖК схематично показан на рис.2. Итак, трехслойная ячейка состоит из изотропного дефектного слоя между двумя идентичными клиновидными слоями ХЖК.

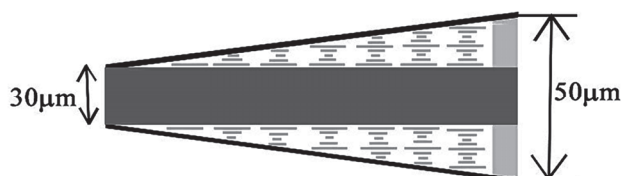


Рис.2. Схематическая диаграмма клиновидной ячейки ХЖК–ЛКПС–ХЖК.

Для регистрации генерации системы ХЖК–ЛКПС–ХЖК была собрана экспериментальная установка, изображенная на рис.3а. Оптическая накачка лазерного красителя осуществлялась импульсным лазером с длиной волны 532 нм с длительностью импульса 12 нс и частотой повторения 12.5 Гц.

Луч лазера накачки после прохождения полуволновой пластины и поляризационного светоделителя фокусировался на образец с помощью линзы с фокусным расстоянием 100 мм под углом 45° по отношению к нормали

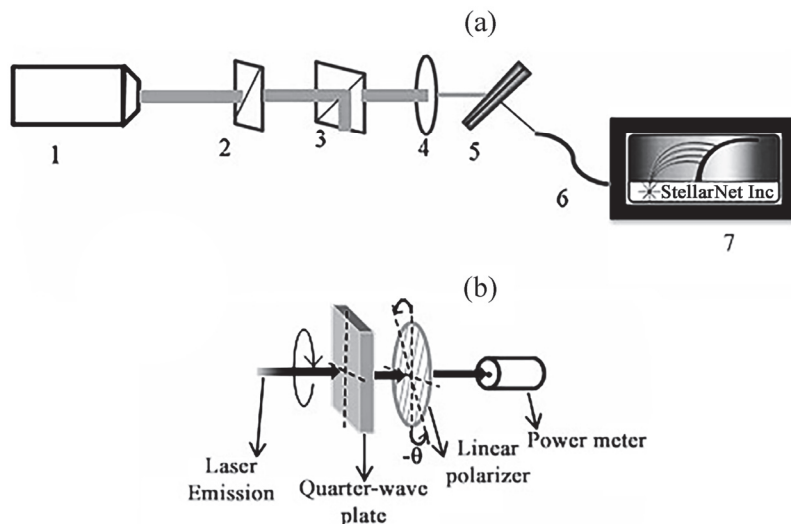


Рис.3. (а) Экспериментальная установка для регистрации лазерного излучения от системы ХЖК–ЛКПС–ХЖК: 1) лазер, 2) волновая пластина $\lambda/2$, 3) поляризационный светоделитель, 4) линза с фокусом 100 мм, 5) ХЖК–ЛКПС–ХЖК образец, 6) Волокно, 7) Спектрометр, (b) экспериментальная установка для исследования поляризации генерации от системы ХЖК–ЛКПС–ХЖК.

трехслойной системы. Управление мощностью накачки осуществлялось с помощью полуволновой пластины и поляризационного светоделителя. Окончательно лазерное излучение регистрировалось спектрометром (StellarNet) с разрешением 0.75 нм. На рис.3b приводится схема экспериментальной установки для исследования поляризации лазерного излучения трехслойной системы ХЖК–ЛКПС–ХЖК. Лазерное излучение, генерируемое системой ХЖК–ЛКПС–ХЖК, проходило через четвертьволновую пластину и линейный поляризатор, а затем регистрировалось измерителем мощности.

3. Результаты и обсуждение

Как видно из рис.1b слой полимера, легированного красителем, изотропен. Наличие изотропного слоя между двумя идентичными слоями ХЖК обеспечивает сдвиг фазы в ХЖК, что приводит к появлению дополнительных множественных дефектных мод внутри фотонной запрещенной зоны ХЖК. Полимерный слой, легированный флуоресцентным красителем, действует как активная среда для системы ХЖК–ЛКПС–ХЖК, где слои ХЖК работают как дифракционные зеркала. В случае толстого изотропного слоя, например, 30 мкм эти дефектные моды аналогичны модам резонатора Фабри-Перо.

Экспериментально зарегистрированные спектры отражения неполяризованного света и генерации излучения от системы ХЖК–ЛКПС–ХЖК представлены на рис.4. Внутри ФЗЗ имеется несколько мод дефектов, которые в этом случае близки друг к другу из-за толщины изотропного слоя, а также усредняются спектрометром [31]. Из рисунка видно, что лазерные пики находятся внутри ФЗЗ, что означает, что генерация лазера происходит от дефектных мод. Лазерные пики не узкие, как в случае генерации в краевой моде, поскольку моды множественные и близкие друг к другу, что и приводит к перекрытию пиков [32].

После регистрации генерации лазера экспериментальная установка была немного изменена. Вместо спектрометра была добавлена четвертьволновую

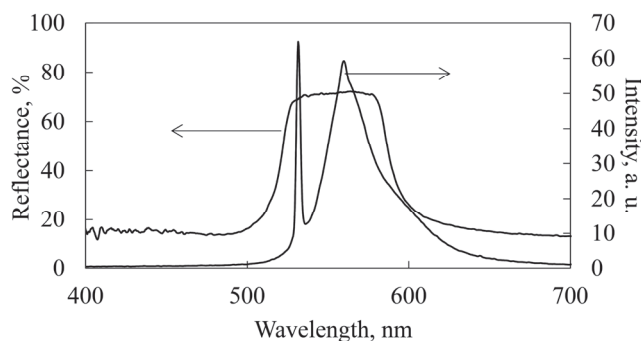


Рис.4. Экспериментально зарегистрированные спектры отражения неполяризованного света и генерации излучения от системы ХЖК–ЛКПС–ХЖК. Толщина слоев ХЖК и ЛКПС составляет 10 мкм и 30 мкм, соответственно.

пластинку, линейный поляризатор и измеритель мощности (см. Рис.3b). Для определения поляризации полученных лазерных пиков сначала перед лазерным излучением устанавливался только линейный поляризатор, вращающийся на 10 градусов, и регистрировалось изменение интенсивности. Во время вращения поляризатора, показания измерителя мощности остаются почти такими же, а это означает, что поляризация лазерного излучения либо круговая, либо неполяризованная. Далее в экспериментальную установку была вставлена четвертьволновая пластинка, а за ней линейный поляризатор и измеритель мощности.

На рис.5 показано, как четвертьволновая пластинка преобразует линейно поляризованный свет в круговой поляризованный свет. В качестве линейно-поляризованного света использовались лазеры с длиной волны 650 нм и 532 нм. Сначала линейный поляризатор вращается до тех пор, пока линейно поляризованный свет блокируется поляризатором, затем между ними вставляется четвертьволновая пластинка под углом 45 градусов к оптической оси.

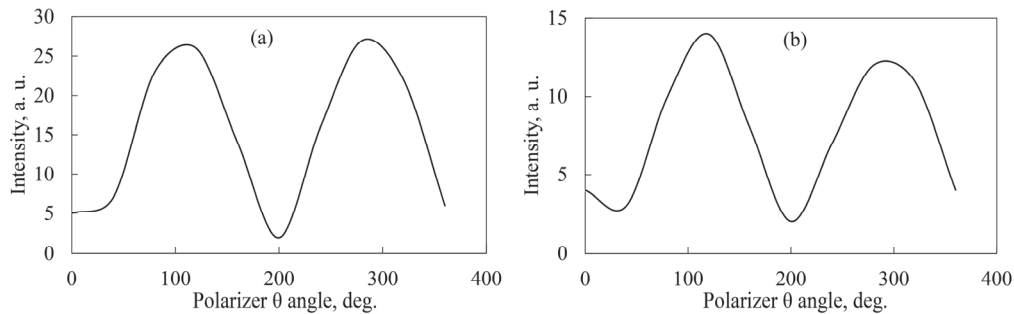


Рис.5. Зависимость интенсивности линейно поляризованного света (прошедшего через четвертьволновую пластину и поляризатор) от угла вращения линейного поляризатора для лазера с длиной волны: (a) 650 нм, (b) 532 нм.

После этого линейный поляризатор поворачивается на 10 градусов и регистрирует поведение выходной интенсивности. Для обоих лазеров выходная интенсивность периодически изменялась между максимальным и минимальным значениями. В идеальном случае интенсивность должна оставаться неизменной. Для этой четвертьволновой пластины разница между максимальным и минимальным значениями интенсивности пренебрежимо мала в случае лазера с длинами волн 650 нм и 532 нм, соответственно. Таким образом, можно сказать, что четвертьволновая пластинка преобразует линейно поляризованный свет в круговой поляризованный свет.

Четвертьволновая пластинка вставляется в экспериментальную установку и вращается с шагом 10 градусов, после чего при вращении поляризатора регистрируется выходная интенсивность излучения лазера. В определенном положении четвертьволновой пластинки при вращении поляризатора интенсивность измеренных лазерных пиков между максимальным и минимальным значениями

изменялась (рис.6а). Максимальное значение интенсивности лазерных пиков означает, что после прохождения четвертьволновой пластинки поляризация излучения становится линейной и направление её совпадает с осью поляризатора, а выходная интенсивность максимальна. В случае минимальной интенсивности направление поляризации лазерного излучения противоположно оси поляризатора.

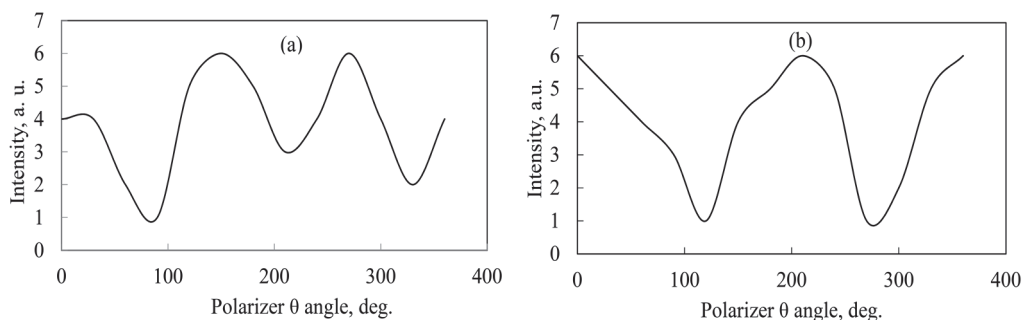


Рис.6. Зависимость интенсивности лазерного излучения от угла вращения линейного поляризатора для (а) системы ХЖК–ЛКПС–ХЖК (б) ячейки ХЖКЛК.

Из рис.6а очевидно, что минимальные значения интенсивности не совсем совпадают. Это можно объяснить тем, что поляризация излучения эллиптическая и значения осей почти одинаковы. Следовательно, можно сказать, что состояние поляризации излучения близко к круговой поляризации. Итак, как показывали наши исследования, поляризация лазерных пиков системы ХЖК–ЛКПС–ХЖК является круговой. Для сравнения результатов трехслойной системы, также была исследована поляризация лазерных пиков от системы ХЖКЛК. ХЖКЛК также имеет правозакрученную спираль, и снова используется краситель R6G. Вместо трехслойной системы теперь используется ячейка ХЖКЛК в той же экспериментальной установке (см. Рис.3). Из рис.6б видно, что после прохождения четвертьволновой пластинки и линейного поляризатора интенсивность лазерного пика изменяется между определенными максимальными и минимальными значениями, а это указывает на то, что поляризация лазерного пика круговая.

Таким образом, наличие изотропного слоя, легированного красителем, между двумя идентичными слоями ХЖК не влияет на поляризацию лазерного излучения такой системы. Лазерному излучению из трехслойной системы имеет ту же поляризацию, что и лазерные пики системы ХЖКЛК. Важно отметить, что флуоресцентный краситель R6G сам по себе не обладает молекулярной хиральностью. Стоит отметить, что лазерное излучение из трехслойной системы имеет левую круговую поляризацию, поскольку дифракция от слоев ХЖК происходит для света с левой круговой поляризацией (круговая поляризация определяется на основе современной терминологии).

Лазерное излучение из системы ХЖК–ЛКПС–ХЖК обладает хироптическими свойствами с противоположным направлением спирали, даже несмотря на то, что луч возбуждения имеет линейную поляризацию (см. иллюстративное изображение на рис.7). Таким образом, ХЖК обеспечивает генерацию кругового поляризованного лазерного излучения из ахирального флуоресцентного изотропного полимерного слоя, легированного красителем.

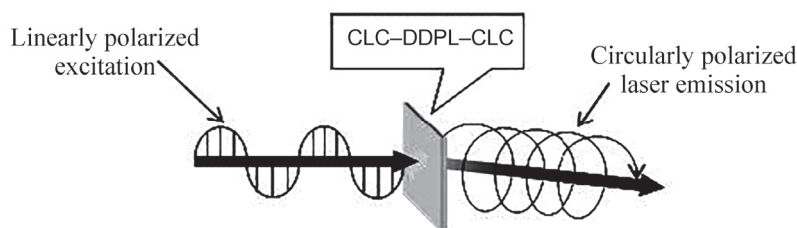


Рис.7. Иллюстративное изображение кругового поляризованного лазерного излучения системы ХЖК–ЛКПС–ХЖК при возбуждении линейно поляризованным лазером с длиной волны 532 нм.

4. Заключение

В работе экспериментально исследовалась поляризация лазерных пиков системы ХЖК–ЛКПС–ХЖК. Было показано, что лазерные пики имеют левую круговую поляризацию, так как свет с правой круговой поляризацией не реагирует периодичность спирали, в то время слои ХЖК действуют как дифракционные зеркала для света с левой круговой поляризацией. Из описанной нами трехслойной системы, а также системы ХЖКЛК можно получить лазерное излучение с круговой поляризацией, используя линейно поляризованный луч возбуждения.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю проф. Р.Б. Алавердян и проф. А.А. Геворгяну за обсуждение результатов работы и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. I.-Ch. Khoo. Liquid Crystals. Wiley, 2007.
2. M.S. Rafayelyan, H. Gharagulyan, T.M. Sarukhanyan, A.H. Gevorgyan, R.S. Hakobyan, R.B. Alaverdyan. Liquid Crystals, **46**(7), 1079 (2019).
3. V.I. Kopp, Zh.-Q. Zhang, A.Z. Genack. Progress in Quantum Electronics, **27**(6), 369 (2003).
4. A. Chanishvili, G. Chilaya, G. Petriashvili. Appl. Phys. Letters, **83**(26), 5353 (2003).
5. S. Furumi, Sh. Yokoyama, A. Otomo, Sh. Mishka. Appl. Phys. Letters, **84**(14), 2491 (2004).

6. **V.A. Belyakov, A.A. Gevorgyan, O.S. Eritsian, N.V. Shipov.** Sov. Phys. Tech. Phys., **32**(7), 843 (1987).
7. **V.A. Belyakov.** Mol. Cryst. Liq. Cryst., **453**(1), 43 (2006).
8. **A.H. Gevorgyan, K.B. Oganessian, E.M. Harutyunyan, S.O. Arutyunyan.** Opt. Commun., **283**(19), 3707 (2010).
9. **Y. Huang, Y. Zhou, Ch. Doyle, Sh.-Ts. Wu.** Optics Express, **14**(3), 1236 (2006).
10. **T. Dadalyan, R. Alaverdyan, I. Nys, Zh. Ninoyan, O. Willekens, J. Beeckman, K. Neyts.** Liquid Crystals, **44**(2), 372 (2016).
11. **M.-Y. Jeong, J.W. Wu.** Opt. Express, **18**(23), 24221 (2010).
12. **T. Dadalyan, Zh. Ninoyan, I. Nys, R. Alaverdyan, J. Beeckman, K. Neyts.** Liquid Crystals, **45**(9), 1272 (2018).
13. **A.H. Gevorgyan, M.Z. Harutyunyan.** Phys. Rev. E, **76**(3), 031701 (2007).
14. **A.H. Gevorgyan, M.Z. Harutyunyan.** J. Mod. Opt., **56**(10), 1163 (2009).
15. **R.B. Alaverdyan, K.R. Allakhverdyan, A.H. Gevorgyan, A.D. Chilingaryan, Yu.S. Chilingaryan.** Technical Physics, **55**(9), 1317 (2010).
16. **A.H. Gevorgyan.** Opt. Commun., **281**(20), 5097 (2008).
17. **A.H. Gevorgyan.** Optik, **154**, 656 (2018).
18. **R.B. Alaverdyan, A.H. Gevorgyan, H. Gharagulyan, H. Grigoryan.** Mol. Cryst. and Liq. Cryst., **559**(1), 23 (2012).
19. **H. Gharagulyan.** J. Contemp. Phys., **50**, 247 (2015).
20. **M.H. Song, Ki.-Ch. Shina, B. Parka, Y. Takanishia, K. Ishikawaa, J. Watanabe, S. Nishimura, T. Toyooka, Zh. Zhu, T.M. Swager, H. Takezoe.** Science and Technology of Advanced Materials, **5**(4), 437 (2004).
21. **A.H. Gevorgyan, K.B. Oganessian, R.V. Karapetyan, M.S. Rafayelyan.** Laser Phys. Lett., **10**(12), 125802 (2013).
22. **A.H. Gevorgyan, K.B. Oganessian, G.A. Vardanyan, G.K. Matinyan.** Laser Phys., **24**(11), 115801 (2014).
23. **H.-Ch. Yeh, K.-Si. Wun.** Laser Phys. Lett., **14**(8) 086202 (2017).
24. **T. Ali, J.-De. Lin, B. Snow, X. Wang, S.J. Elston, S.M. Morris.** Adv. Optical Mater., **8**(8), 1901891 (2020).
25. **B. Park, M. Kim, S.W. Kim, I.T. Kim.** Optics Express, **17**, 12323 (2009).
26. **Y. Zhou, E.-E.A. Jang, Y. Huang, Sh.-T. Wu.** Optics Express, **15**, 3470 (2007).
27. **S. Furumi.** The Chemical Record, **10**(6), 394 (2010).
28. **L.M. Blinov.** Structure and properties of liquid crystals. Dordrecht: Springer, 2011.
29. **P. Yeh, C. Gu.** Optics of liquid crystal displays. New York: John Willey & Sons, 1999.
30. **M. Rafayelyan, E. Brasselet.** Opt. Lett., **41**(17), 3972 (2016).
31. **H. Gharagulyan, T.M. Sarukhanyan, A.V. Ninoyan, A.H. Gevorgyan, R.B. Alaverdyan.** Optics and Spectroscopy, **128**(10), 1533 (2020).
32. **T.M. Sarukhanyan, H. Gharagulyan, M.L. Sargsyan, H. Grigoryan, A.H. Gevorgyan, R.B. Alaverdyan, R.S. Hakobyan.** Mol. Cryst. & Liq. Cryst., 2020, Accepted.

ԽՈՒՆԵՐԻԿ ՀԵՂՈՒԿ ԲՅՈՒՐԵՂ – ՆԵՐԿԱՆՅՈՒԹՈՎ ՀԱՐՍՏԱՅՎԱԾ
ՊՈԼԻՄԵՐԱՅԻՆ ԹԱՂԱՆԹ – ԽՈՒՆԵՐԻԿ ՀԵՂՈՒԿ ԲՅՈՒՐԵՂ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻՑ ԳԵՆԵՐԱՅՎԱԾ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ
ԲԵՎԵՌԱՑՈՒՄԸ

Տ.Մ. ՍԱՐՈՒԽԱՆՅԱՆ

Յուրաքանչյուր լազերի կարևոր առանձնահատկություն է հանդիսանում նրա ճառագայթման բևեռացումային վիճակը: Լույսի բևեռացումը կարևոր է բևեռացումից կախված այնպիսի սարքավորումների համար, ինչպիսիք են ինտերֆերոմետրերը, օպտիկական ուժեղացուցիչները, օպտիկական մոդուլատորները և այլն: Այս աշխատանքում փորձական եղանակով ուսումնասիրվել է խոլեստերիկ հեղուկ բյուրեղ – ներկանյութով հարստացված պոլիմերային թաղանթ – խոլեստերիկ հեղուկ բյուրեղ եռաշերտ համակարգից գեներացվող լազերային ճառագայթման բևեռացումը: Ցույց է տրվել, որ լազերային գեներացիան նշված եռաշերտ համակարգից շրջանային բևեռացված է: Փորձականորեն ստուգվել է նաև ներկանյութով հարստացված խոլեստերիկ հեղուկ բյուրեղից լազերային գեներացիայի բևեռացումը, որը կրկին շրջանային է: Ցույց է տրվել, որ իզոտրոպ պոլիմերային շերտով խոլեստերիկ հեղուկ բյուրեղից և ներկանյութով հարստացված խոլեստերիկ հեղուկ բյուրեղական համակարգից ստացված լազերային գեներացիայի բևեռացումները համընկնում են և երկու դեպքում էլ լազերային գեներացիան ձախ շրջանային բևեռացված է:

THE POLARIZATION OF LASER GENERATION FROM THE CHOLESTERIC
LIQUID CRYSTAL – DYE-DOPED POLYMER LAYER – CHOLESTERIC
LIQUID CRYSTAL SYSTEM

T.M. SARUKHANYAN

The state of polarization is an important feature of any laser emission. The polarization of light is important for the processing of laser beams in polarization-dependent devices such as interferometers, optical amplifiers, optical modulators, etc. In this paper, the polarization of lasing generated from the three-layered cholesteric liquid crystal – dye-doped polymer layer – cholesteric liquid crystal system was investigated experimentally. It was shown that the polarization state of lasing peaks generated from the above-mentioned three-layered system is circular. The polarization of lasing from the dye-doped cholesteric liquid crystalline system is verified experimentally which is also circular. It was shown that the polarization of the lasing from the cholesteric liquid crystal with isotropic defect layer inside coincides with the polarization of lasing from the dye-doped cholesteric liquid crystalline system. For both cases, laser emission is left-handed circularly polarized.