Белорусский государственный университет
Физический факультет
Кафедра лазерной физики и спектроскопии

Елена Мельникова

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Improvement of master-level education in the field of physical sciences in Belarusian universities
Physics
Co-funded by the Erasmus+ programme of the European Union

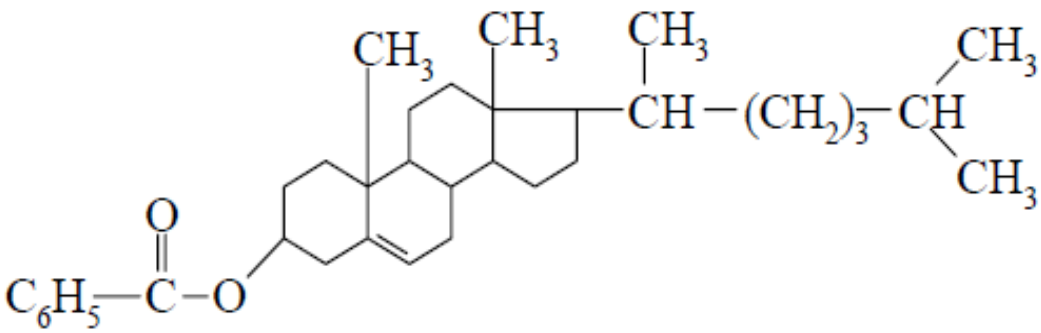
Агрегатные состояния вещества

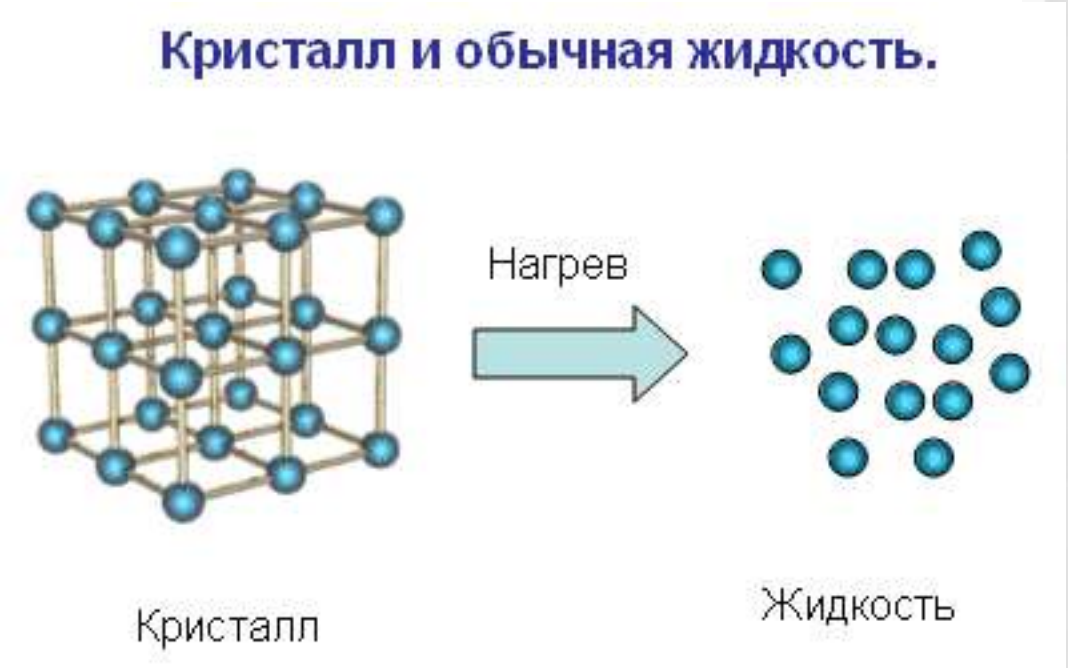
ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ (ЖК) СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

Обнаружено и описано в 1888 г. профессором Ботанического института Высшей технической школы в Граце - Фридрихом Рейнитцером.

Ф. Рейницер (1857-1927)

Первое жидкокристаллическое соединение – холестерилбензоат

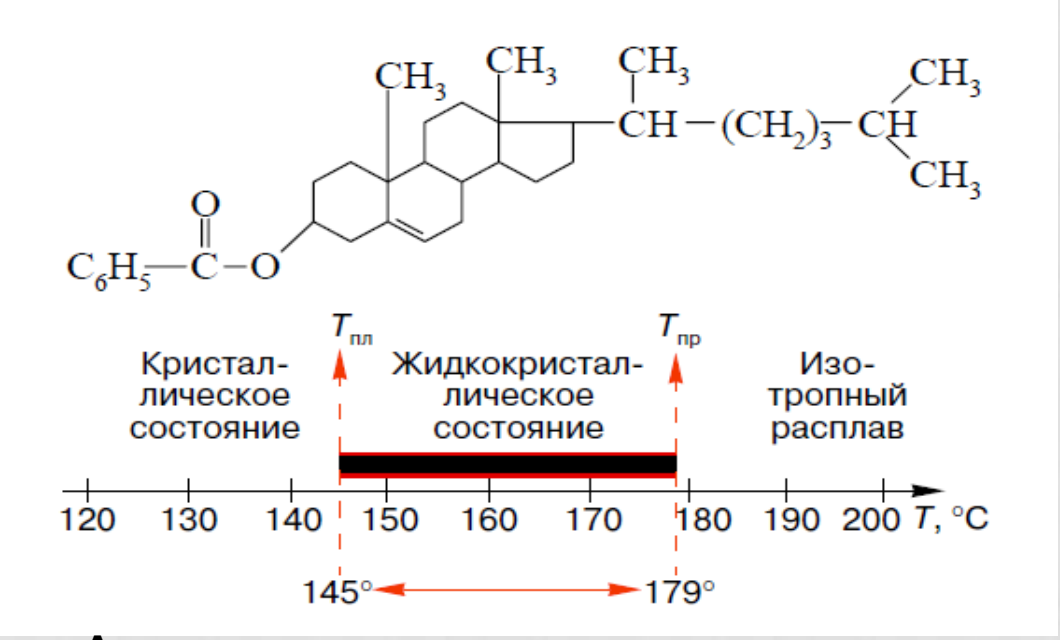




При нагревании до 145° кристаллическая фаза (белый порошок) переходит в странную мутную жидкость, а при дальнейшем нагревании до 179° наблюдается переход в обычную прозрачную жидкость. Он пытался очистить это вещество, так как не был уверен, что имеет чистый холестерилбензоат, но тем не менее эти два фазовых перехода воспроизводились.

О.Леман
(1855-1922)
(Университет Карлсруэ)

Странная фаза, промежуточная между жидким расплавом и кристаллической фазой при нагревании, которой присущи свойства как обычной жидкости (текучесть), так и твердого кристалла (двулучепреломление)



Диаграмма, иллюстрирующая область существования ЖК-фазы.

Леман написал статью о текучих кристаллах, фактически он придумал термин *жидкие кристаллы*.

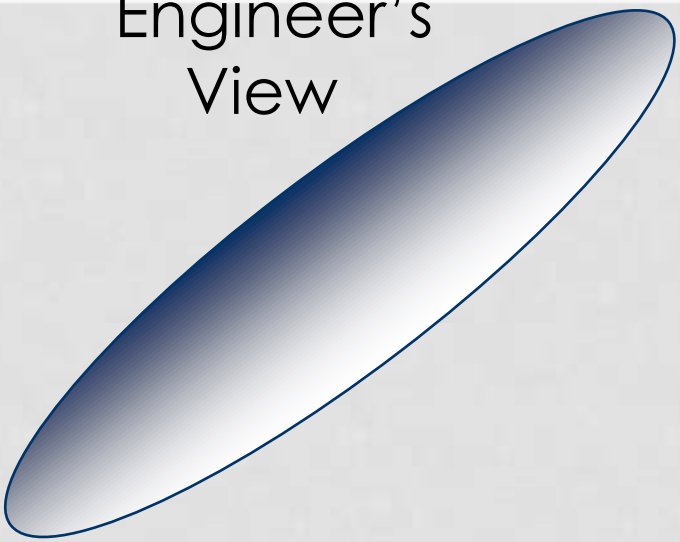
ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ (ЖК) СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

- При нагреве до точки плавления твердое вещество, имеющее жидкокристаллическую фазу, переходит в довольно мутную жидкость. При дальнейшем нагревании она становиться изотропной и поэтому прозрачной. Температура, при которой это имеет место, называется точкой просветления.
- Точки плавления и просветления определяют интервал температур, в котором мезофаза термодинамически устойчива.
- При достижении температуры плавления энергия кристаллической решётки оказывается недостаточной, чтобы удержать молекулы в строго фиксированном состоянии - трёхмерная решетка разрушается. С другой стороны, анизотропия молекул оказывается одним из важных факторов, способствующих сохранению некоторой взаимной упорядоченности. Необходима дополнительная кинетическая энергия, чтобы нарушить и этот относительный порядок. Таким образом, происходит как бы ступенчатый переход от кристаллического порядка к аморфному состоянию вещества.

Обычно жидкокристаллическую фазу образуют молекулы, имеющие палочкообразную или дискообразную форму, то есть они обладают анизометрией формы прежде всего - палочки или диски.

Chemist's View

Physicist's Engineer's View



- Shape Anisotropy
- Length > Width

The molecule above (5CB) is ~2 nm × 0.5 nm

Директор

n

Преимущественное направление длинных осей молекул, принято характеризовать единичным вектором, называемым директором **n**, для которого выполняется условие **n** = **-n**

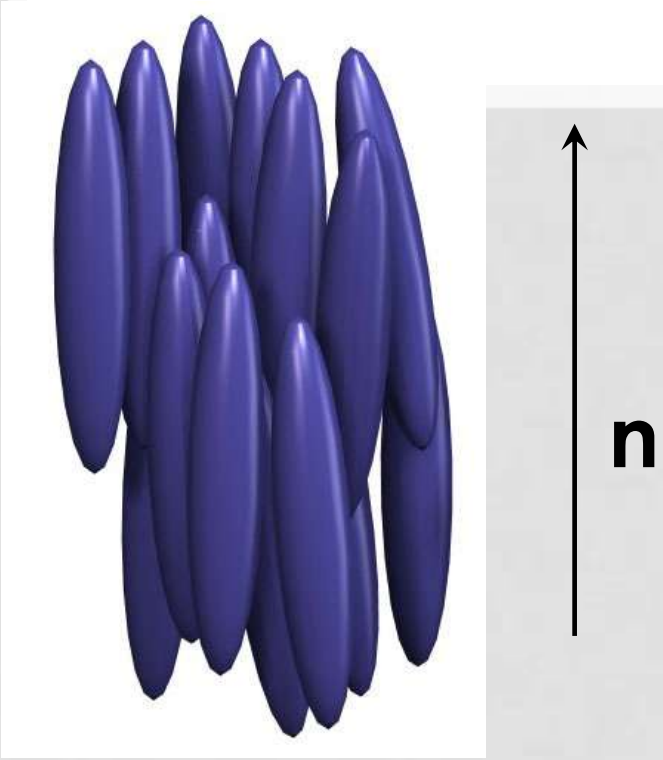
Жидкие кристаллы

Типы мезофаз

нематики
N

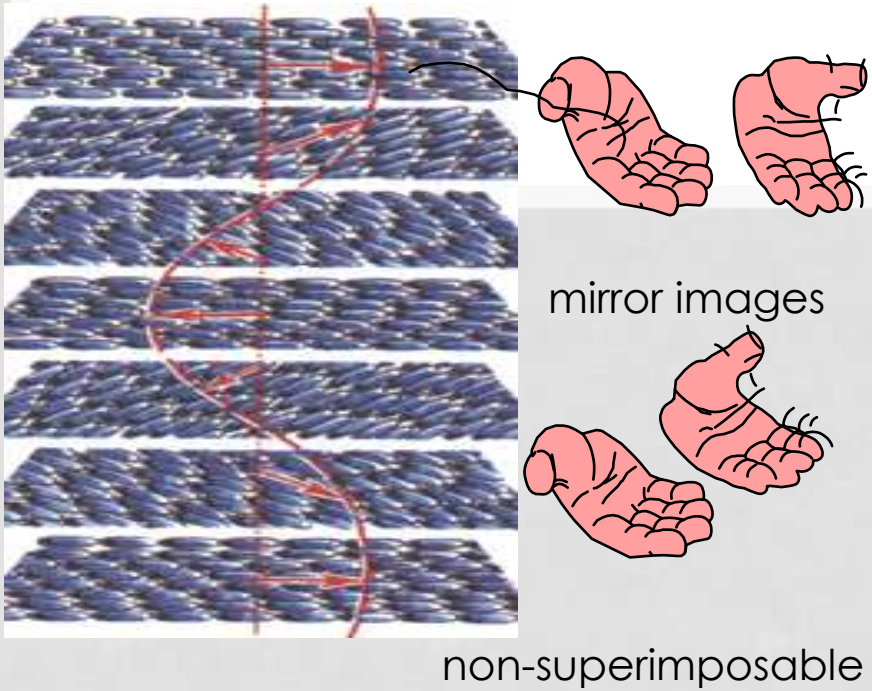
смектики
Sm

холестерики
N^*



НЕМАТИКИ - непроводящие органические жидкости, состоящие из вытянутых молекул, которые в некотором интервале температур имеют направление преимущественной ориентации как у кристалла, а центры тяжести молекул распределены хаотически как у жидкостей.

ХОЛЕСТЕРИКИ



Локально, на расстоянии порядка нескольких молекулярных длин, холестерический жидкий кристалл имеет такую же структуру, как нематики. Молекулы преимущественно ориентированы вдоль директора и отсутствует пространственная периодичность в их центрах тяжести. Однако, директор не имеет постоянного направления в пространстве. Существует направление, называемое холестерической осью, при движении вдоль которой направление директора периодически меняется. Возникающая структура является спиральной

$$\varphi = 2\pi\left(L/s_0\right)$$

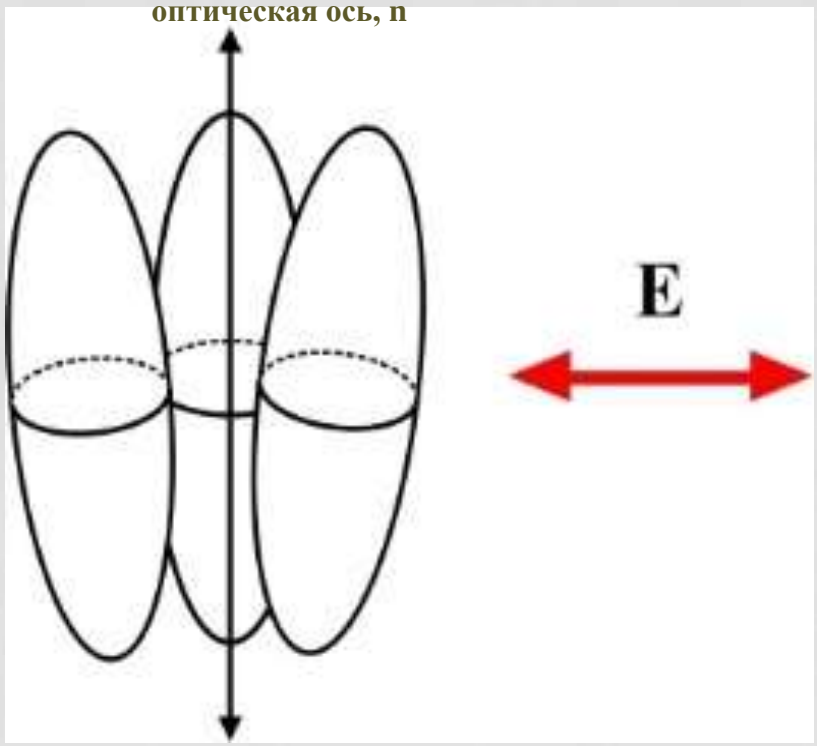
СМЕКТИКИ

Каждая молекула может двигаться в двух измерениях, оставаясь в слое, и вращаться вокруг своей продольной оси. При этом длинные оси молекул в каждом слое могут располагаться как перпендикулярно плоскости слоя (ортогональные смектики), так и под некоторым углом (наклонные смектики). Толщина смектического слоя определяется длиной молекул.

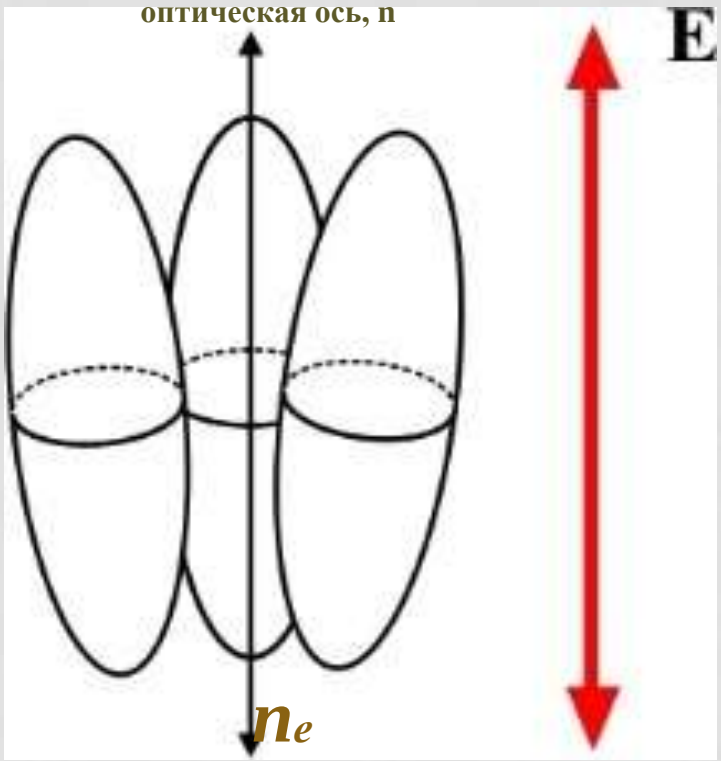
Кроме того, возможно упорядоченное и неупорядоченное расположение молекул в самих слоях. Все это обусловливает возможности образования различных полиморфных модификаций. Т.О. Структурированные **смектические жидкие кристаллы обладают дальним порядком** в расположении молекул в слоях и имеют регулярную двумерную решетку.

Известно свыше десятка полиморфных смектических модификаций, обозначаемых буквами латинского алфавита: смектики A, B, C и т. д. (или SA, SB, SC и т. д.)

Оптические свойства нематика



n_0

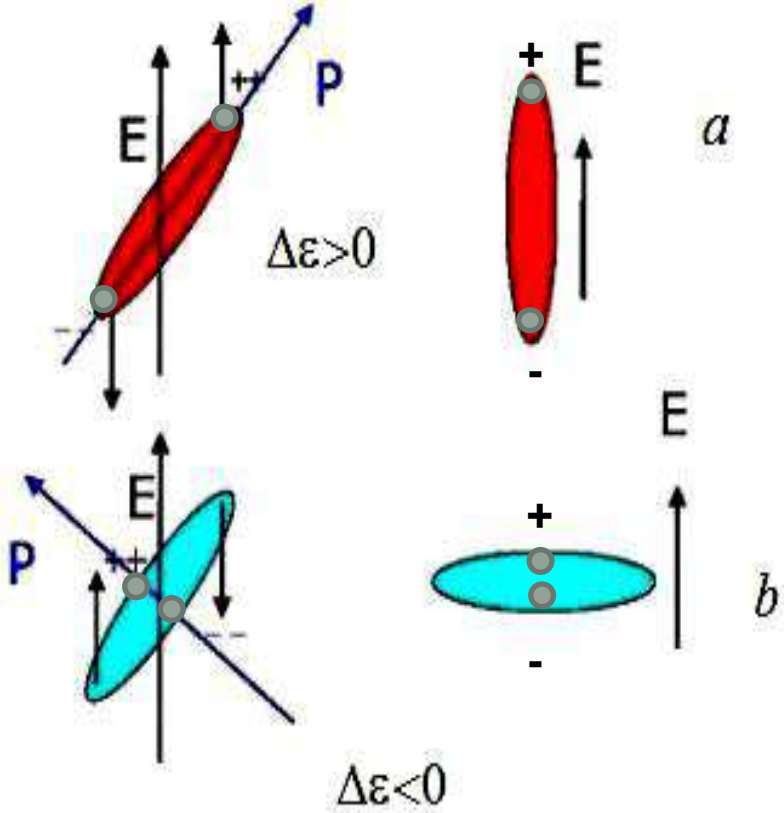


n_e

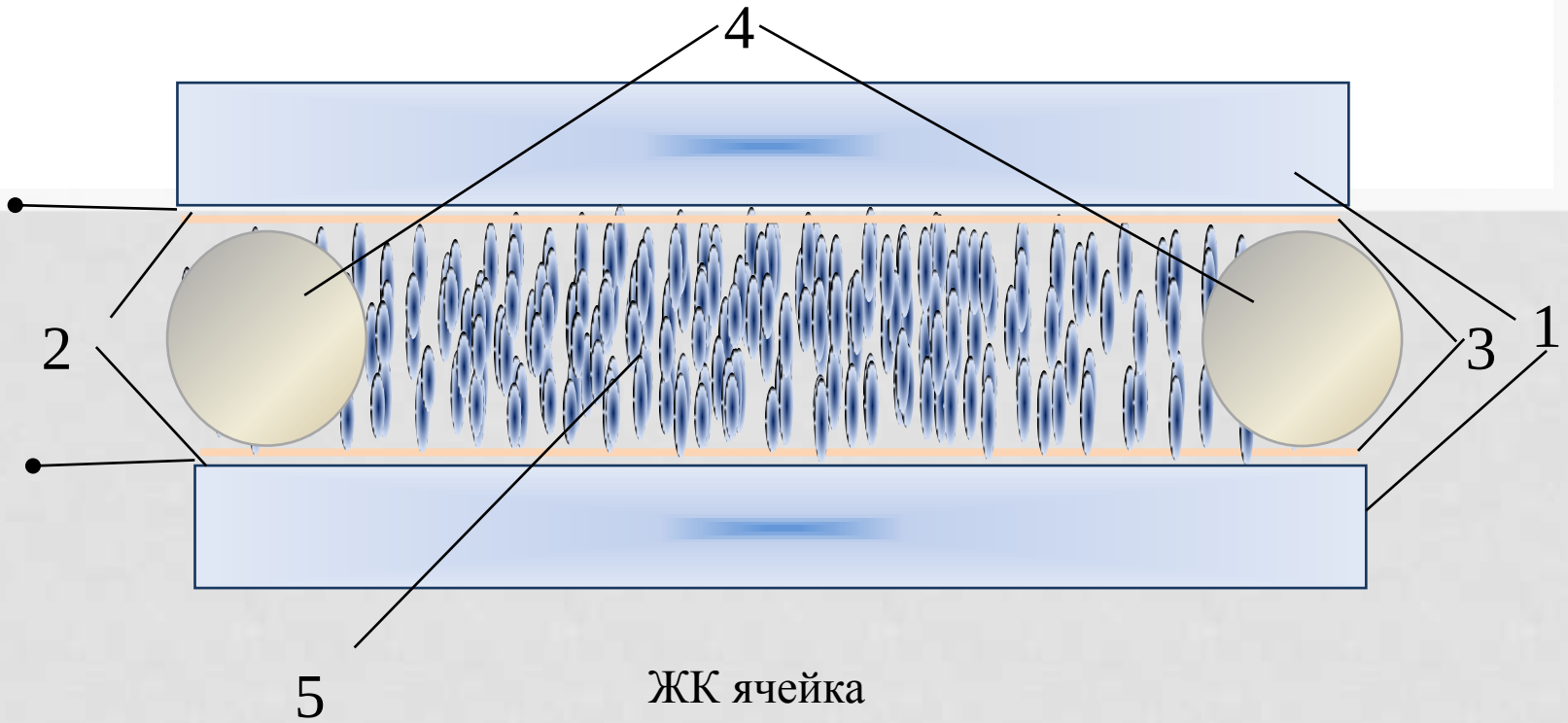
Советские ученые В.К. Фредерикс и В.Н. Цветков в 30-ых годах 20 века впервые исследовали свойства жидких кристаллов в электрических и магнитных полях.

Всеволод Константинович ФРЕДЕРИКС (1885—1944) — российский физик и геофизик, основатель школы молекулярной физики полимеров и жидких кристаллов Санкт-Петербургского Государственного

Виктор Николаевич ЦВЕТКОВ (*1910 -1999*) — советский химик и физик. Член-корреспондент АН СССР Основатель кафедры физики полимеров ЛГУ



Диэлектрическая проницаемость анизотропной среды является тензором, характеризуемым двумя главными значениями диэлектрической проницаемости, соответствующими параллельной и перпендикулярной *директору* жидкого кристалла составляющими.

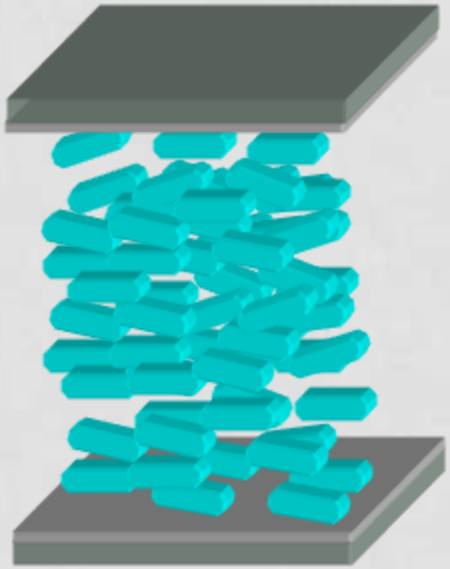


ЖК ячейка

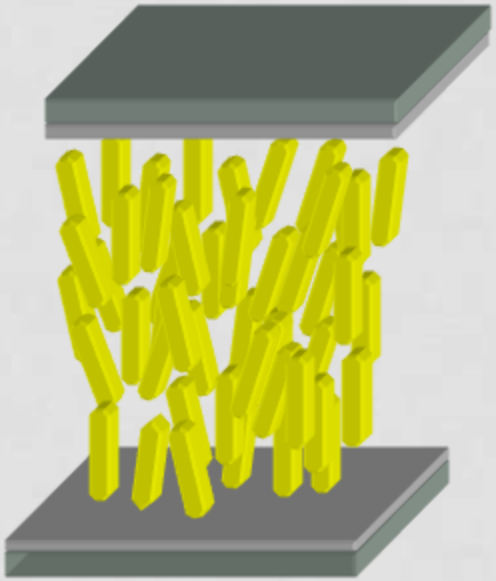
Два фактора определяют поведение распределения директора:

- условия на ограничивающих слой ЖК поверхностях
- воздействие внешнего поля.

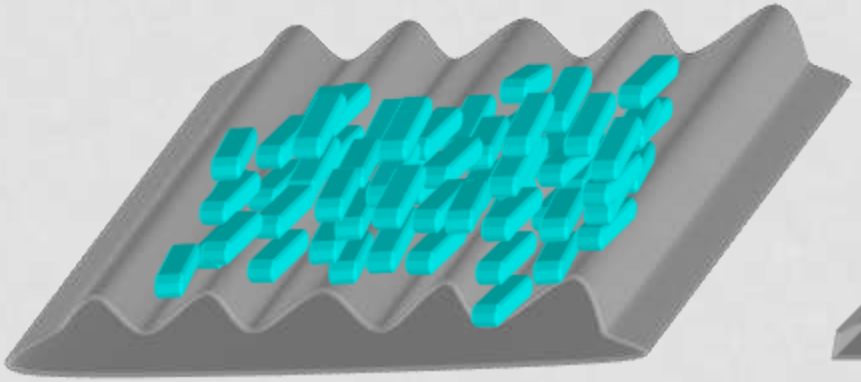
Методы создания ориентации директора ЖК слоя



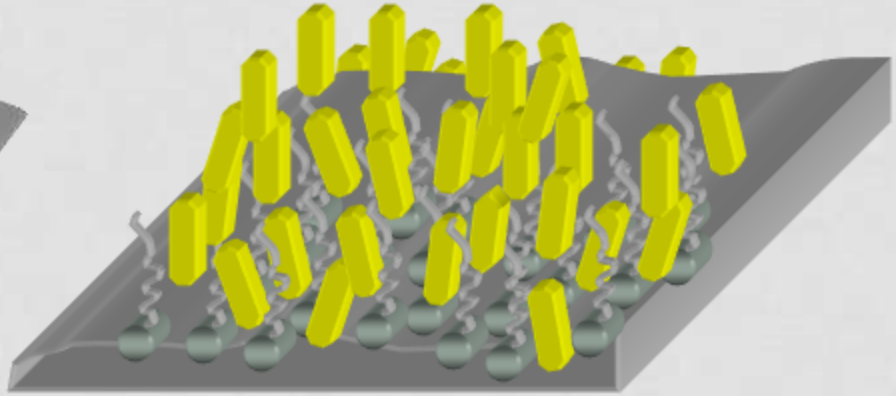
ПЛАНАРНАЯ



ГОМЕОТРОПНАЯ

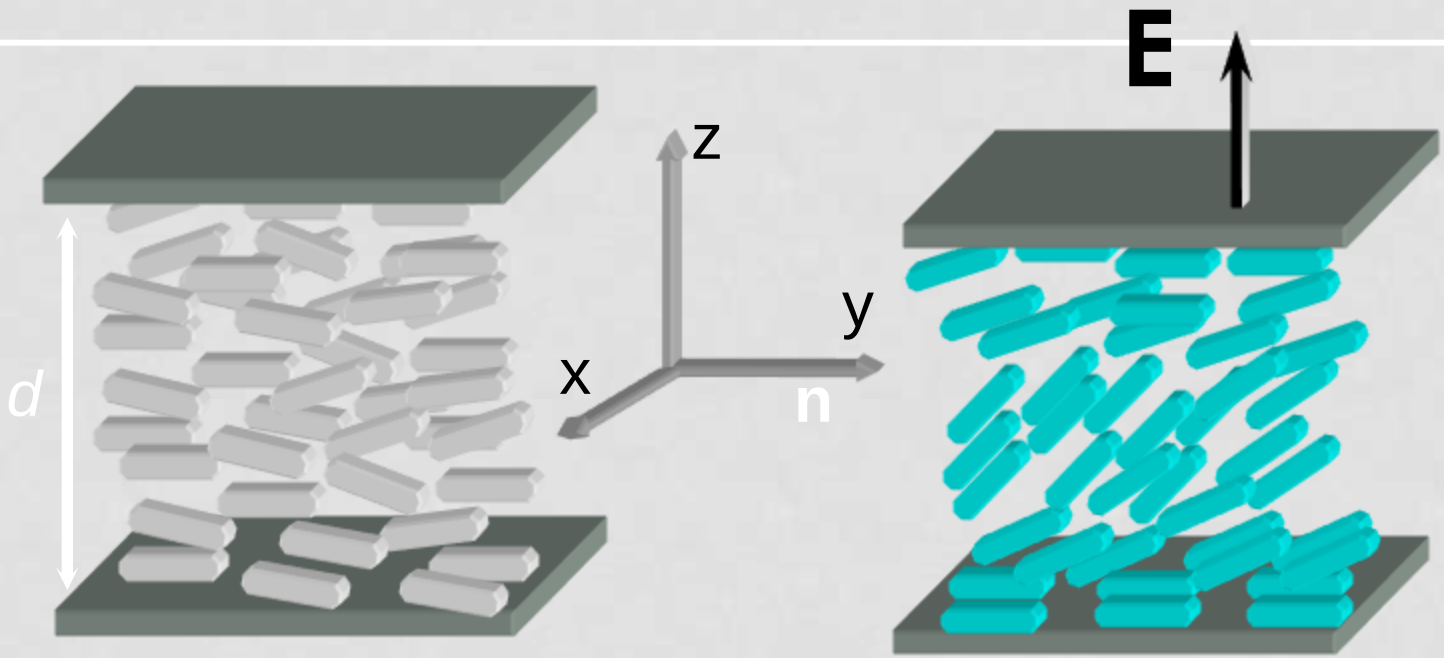


Натирание

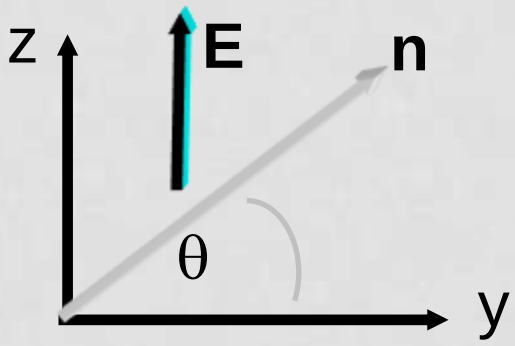


Поверхностно активные вещества

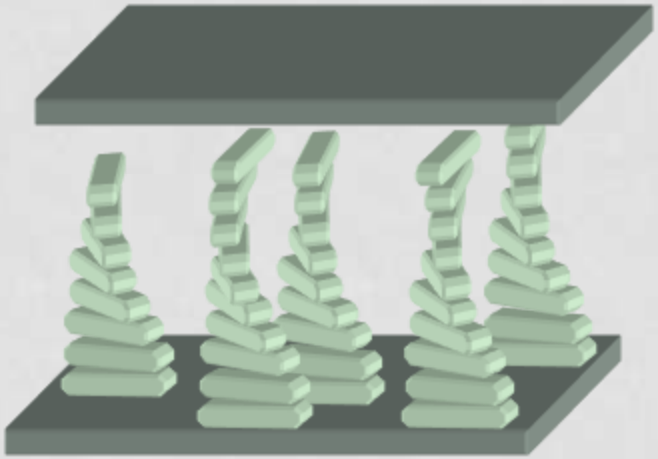
ПЕРЕХОД ФРЕДЕРИКСА

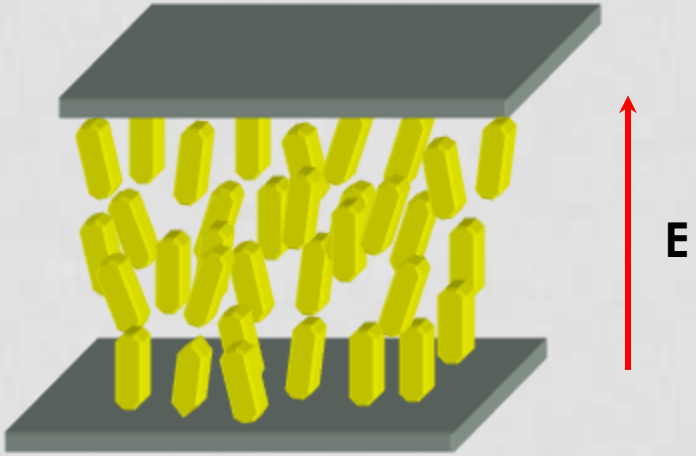


Термодинамически равновесное распределение директора в поле следует из условия минимума функционала свободной энергии, соответствующему равенству момента вращения директора, определяемого полем, и упругого момента, стремящего вернуть директор к исходному состоянию.

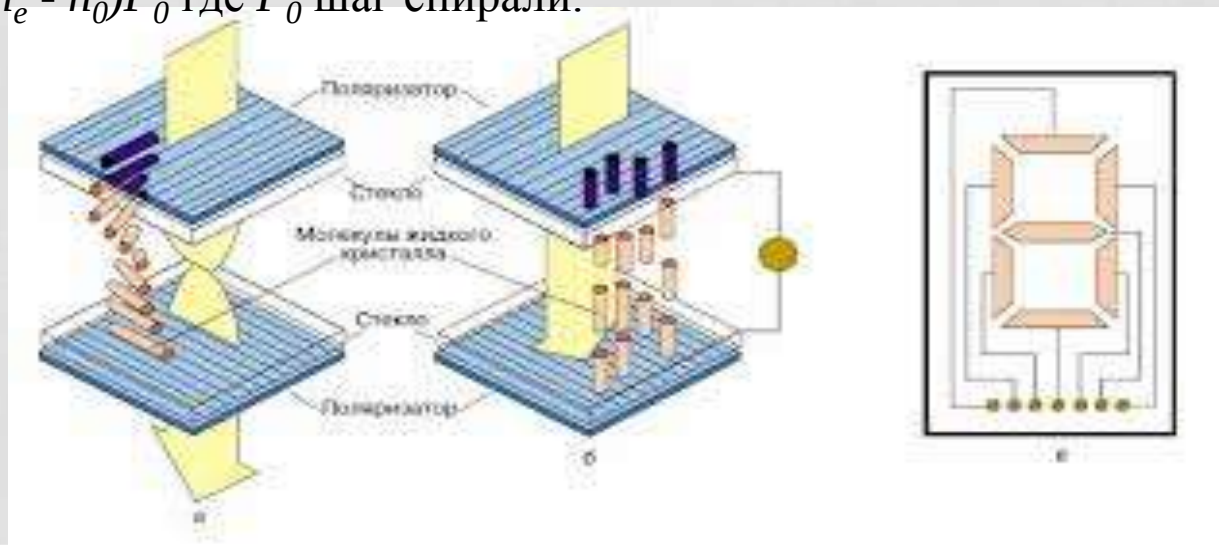


Твист ячейка

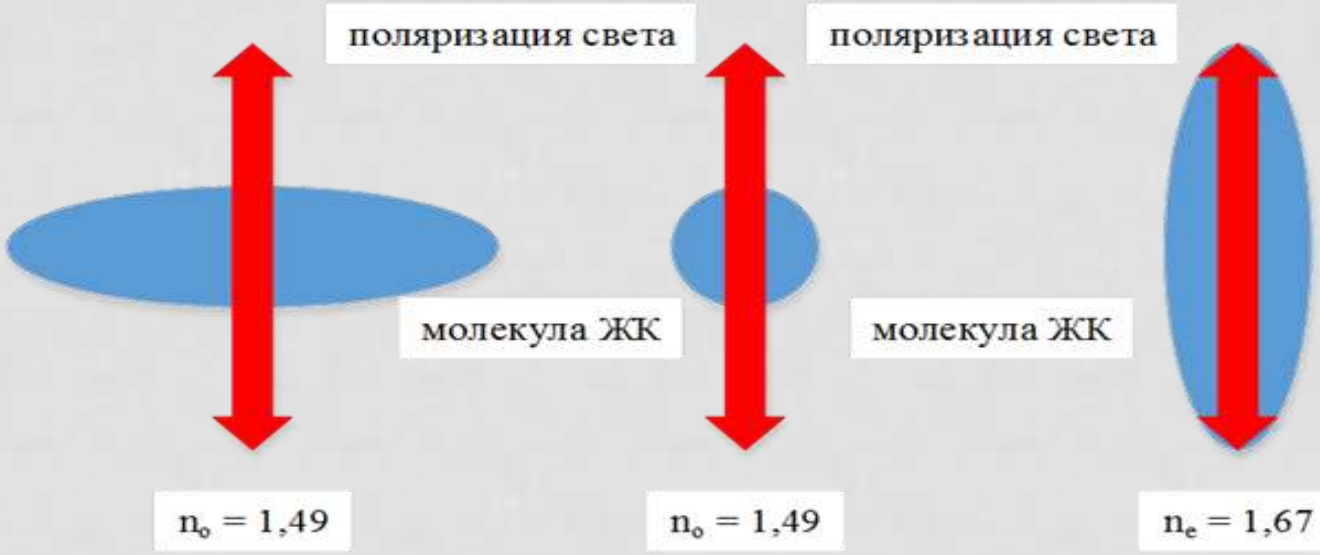




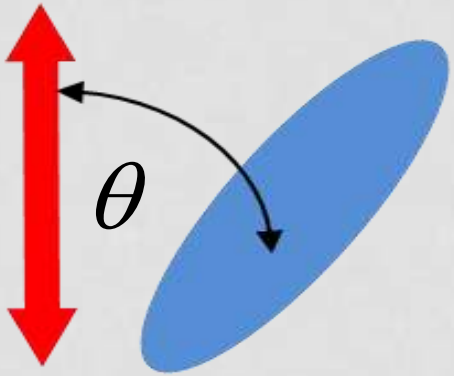
Такая закрученная структура поворачивает плоскость поляризации вошедшего в нее вдоль оси z линейно поляризованного луча на угол π/2. Получается так, будто оптическая ось НЖК, поворачивается по мере продвижения вдоль координаты z, «ведет за собой» вектор поляризации света. Это выполняется для длин волн, удовлетворяющих условию Могена, $\lambda << (n_e - n_0)P_0$ где P_0 шаг спирали.



ЖК- 807 (НИОПИК Москва)

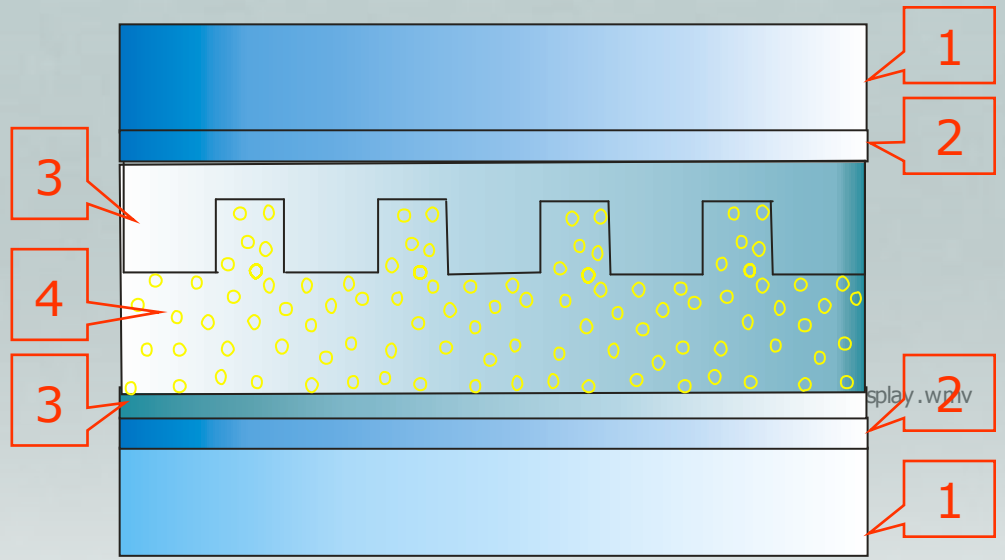


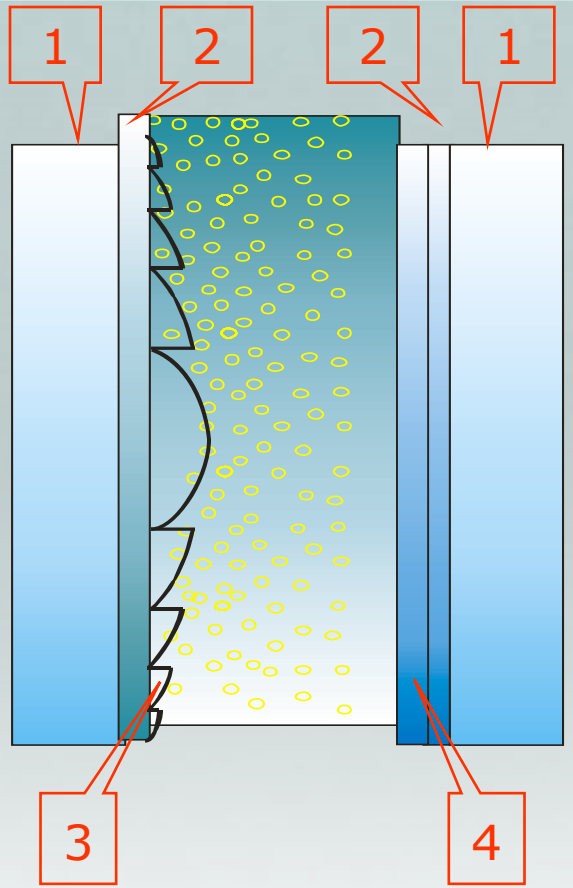
$$n_{ef} = \frac{n_o^2 n_e^2}{\sqrt{n_o^2 \cos^2\theta + n_e^2 \sin^2\theta}}$$



Application

Diffraction LC elements





Electrically-controlled diffraction element LC – diffraction grating:

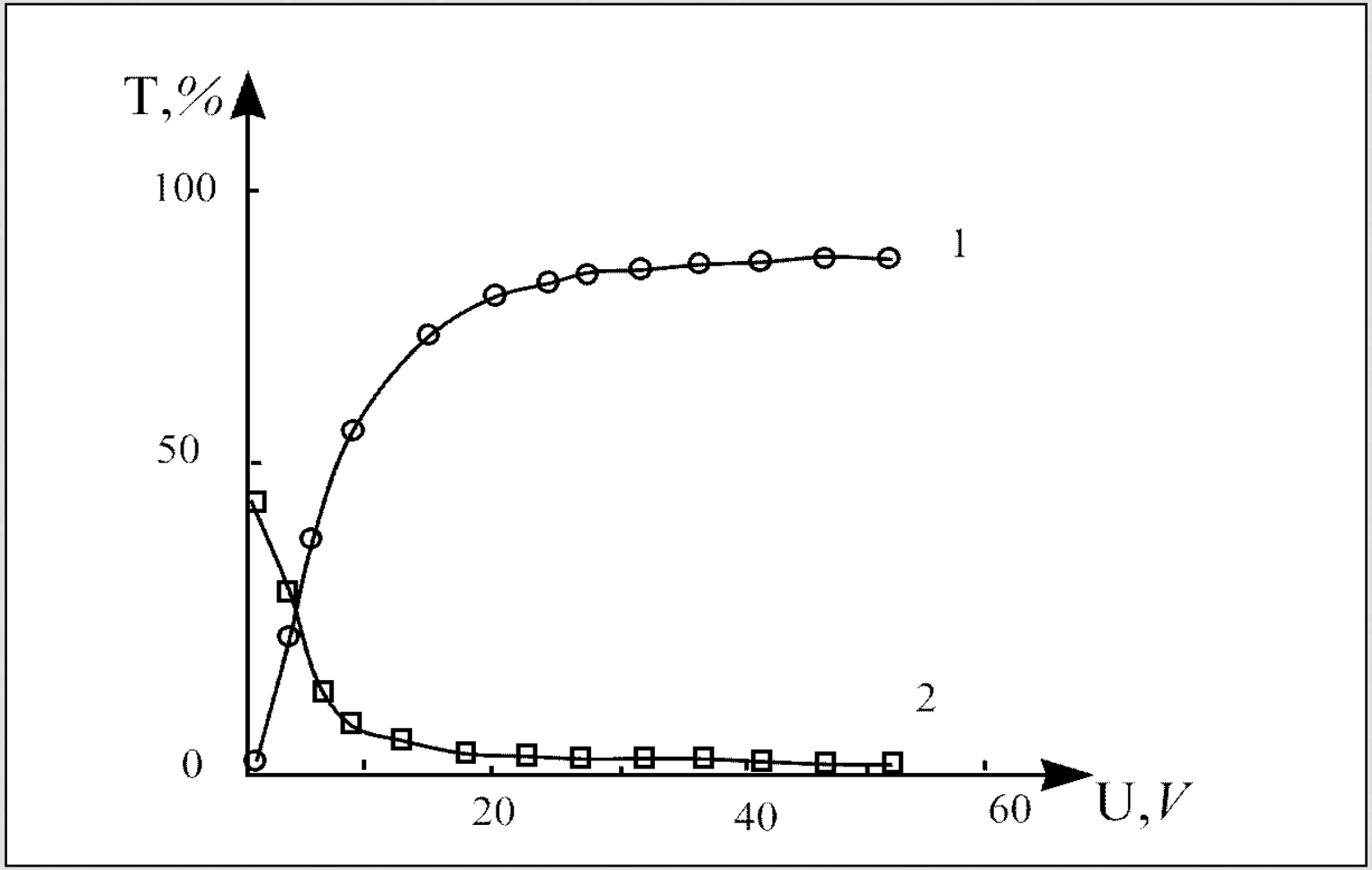
1-glass substrates,
2-transparent electrodes,
3-relief grating (PVA),
4-orienting layer (PVA),

Electrically-controlled focusing unit:

1-glass substrates,
2-transparent electrodes,
3-Fresnel lens (PVA),
4-orienting layer (PVA),

Application

Diffraction LC elements

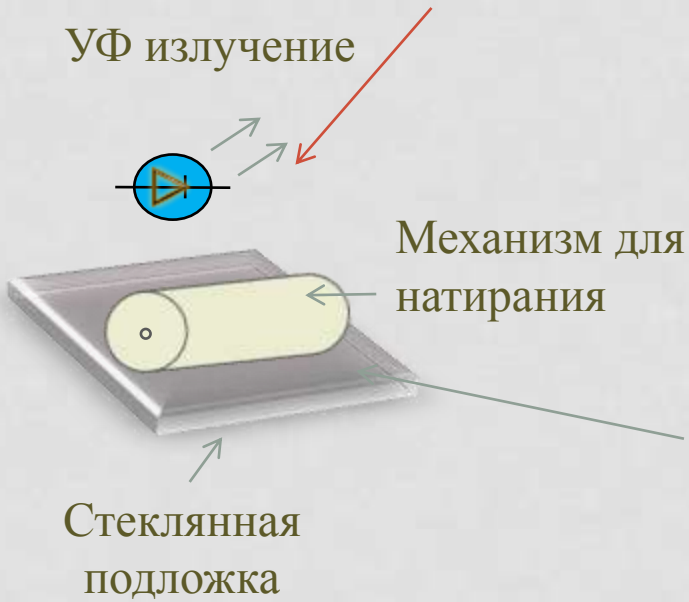


The first- (1) and zero-order (2) diffraction efficiency as a function of the applied voltage

Технологии создания ЖК элементов

Ориентирующий слой

(*фотополимеры, азокрасители*)

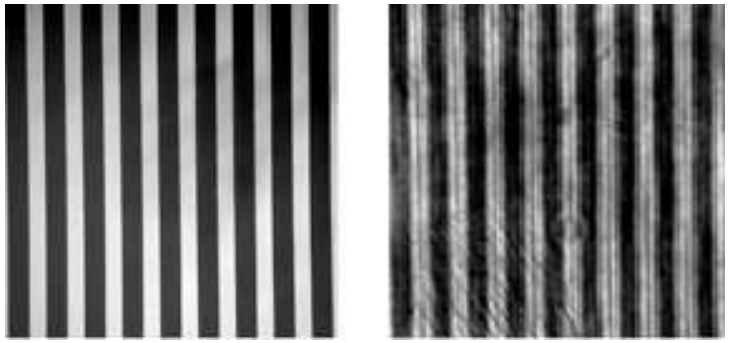


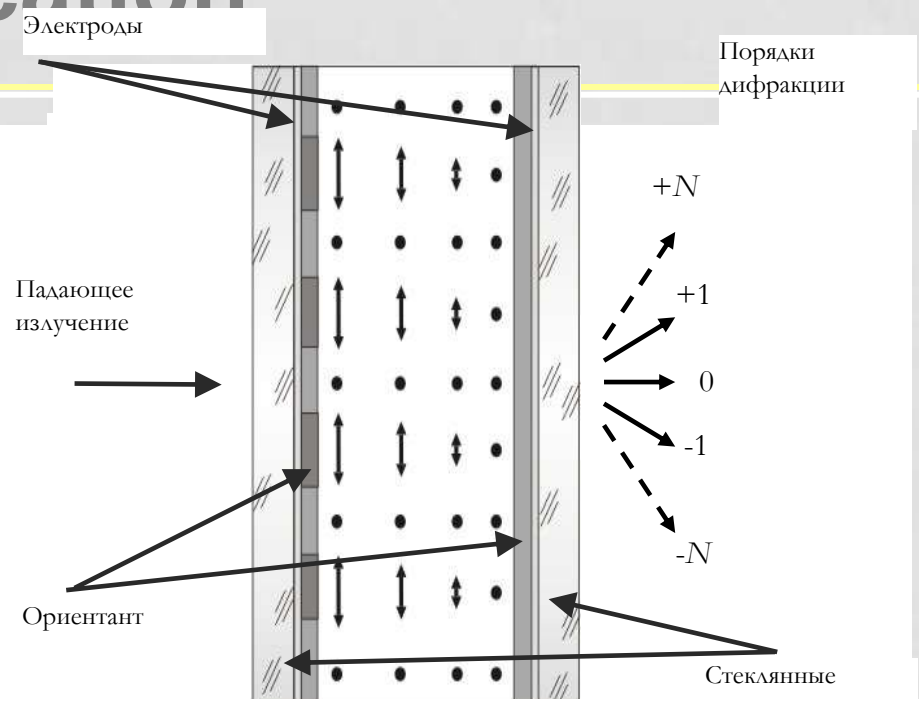
Ориентирующий слой

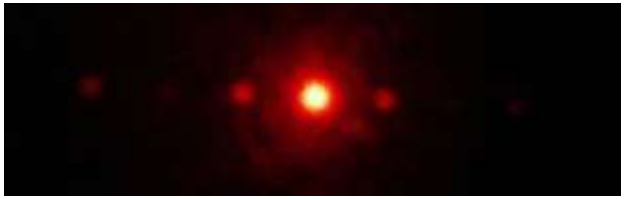
Механическая ориентация директора НЖК молекул

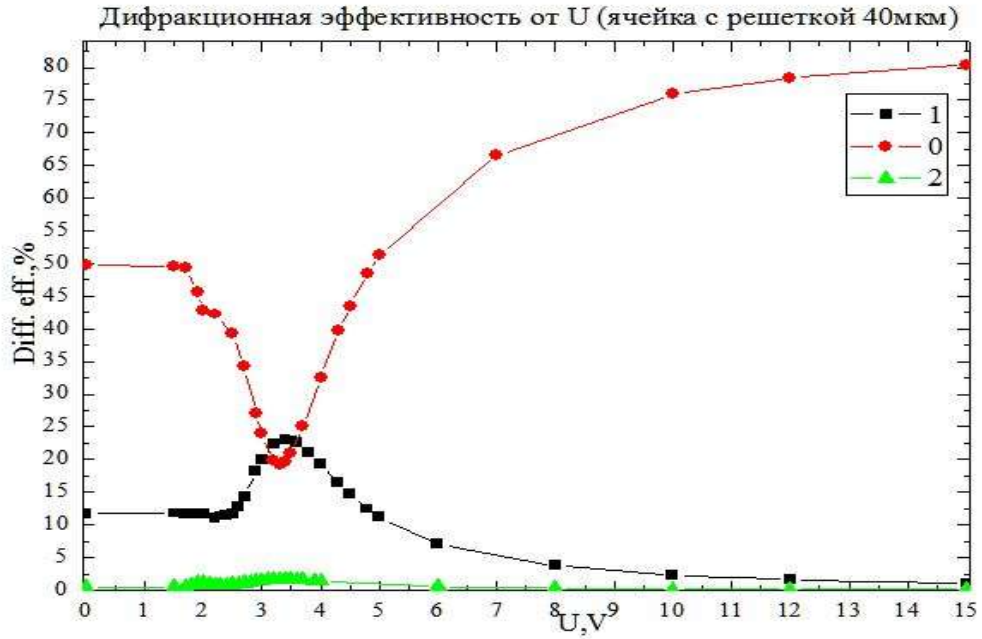
Фотоиндуцированная ориентация директора НЖК молекул

Application

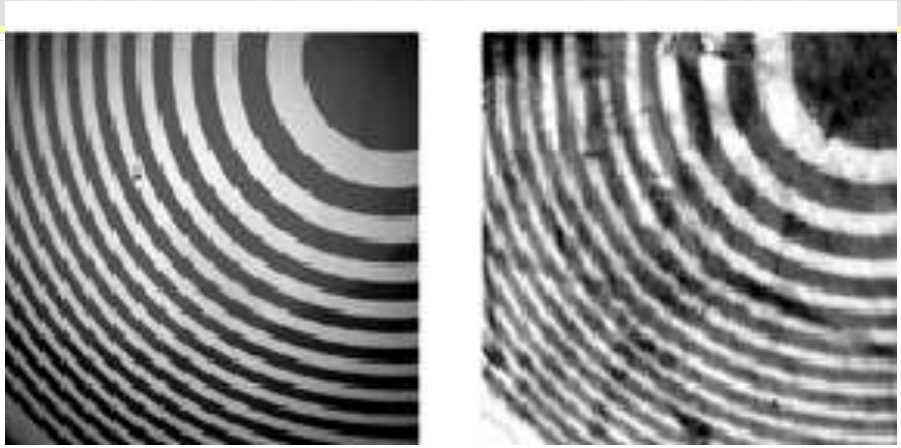


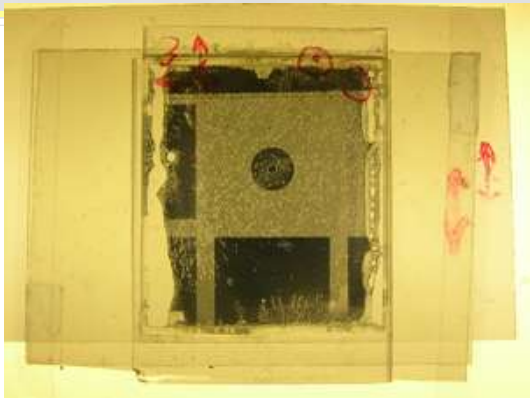


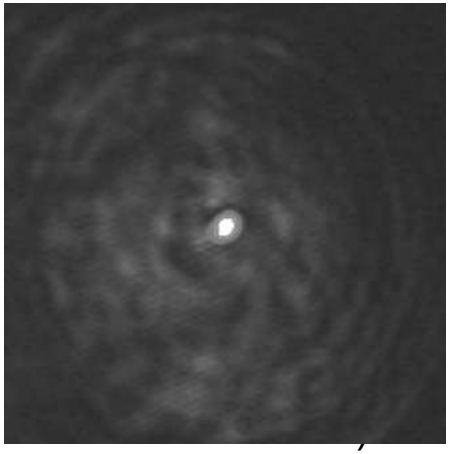
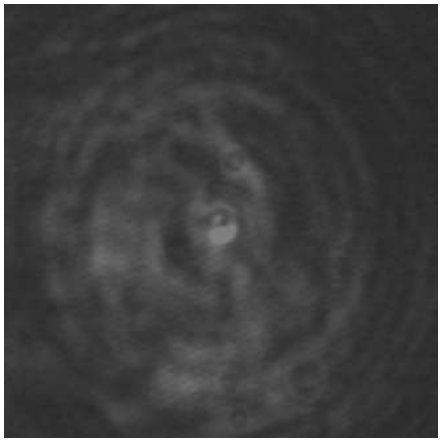




Application





а)   а)

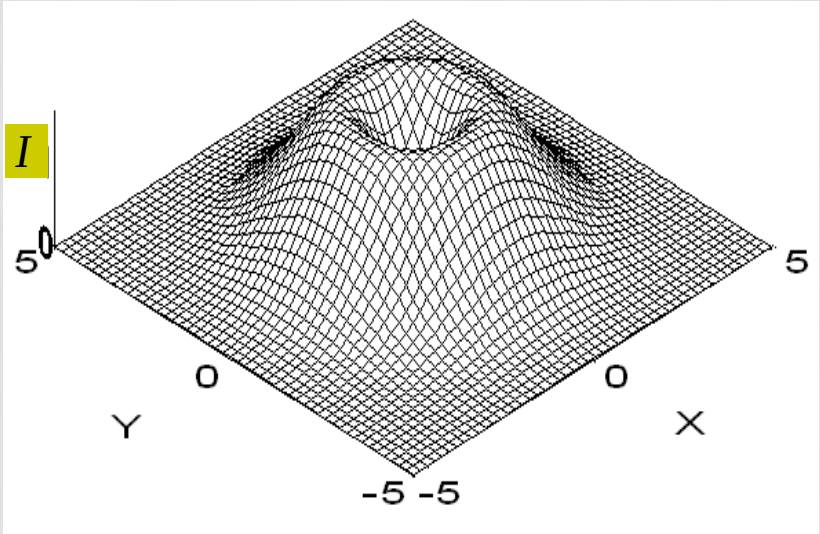
Фотографии зависимости сечения пучка в главном фокусе дифракционного элемента от напряжения: а) 0В, б) 1,7В

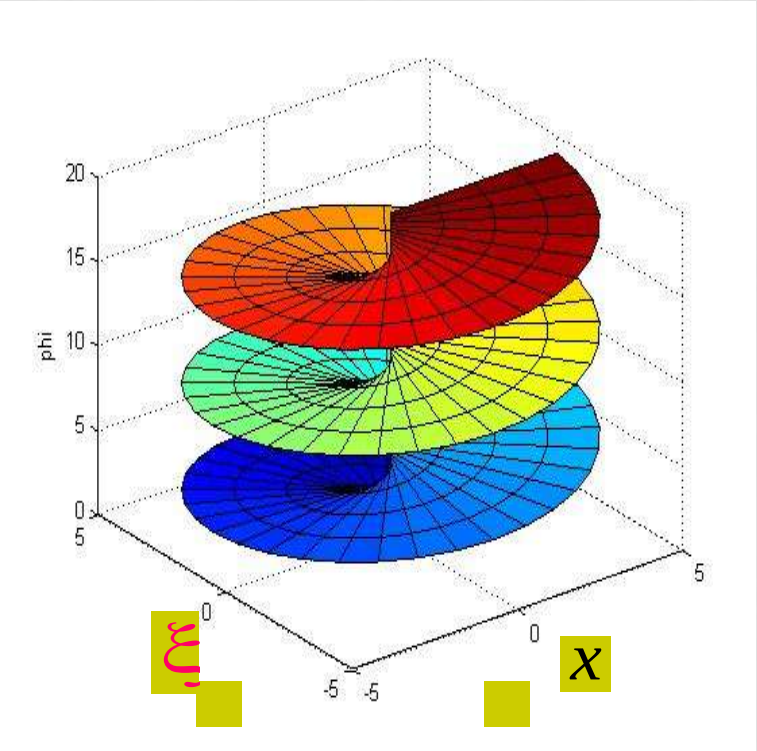
Kazak, A.A., Melnikova, E.A., Tolstik, A.L., Mahilny, U.V., Stankevich, A.I. Controlled diffraction liquid-crystal structures with a photoalignment polymer //Technical Physics Letters. – 2008 – V. 34, №10. –P. –861-863

ВИНТОВЫЕ ФАЗОВЫЕ ДИСЛОКАЦИИ ВОРТЕКСЫ

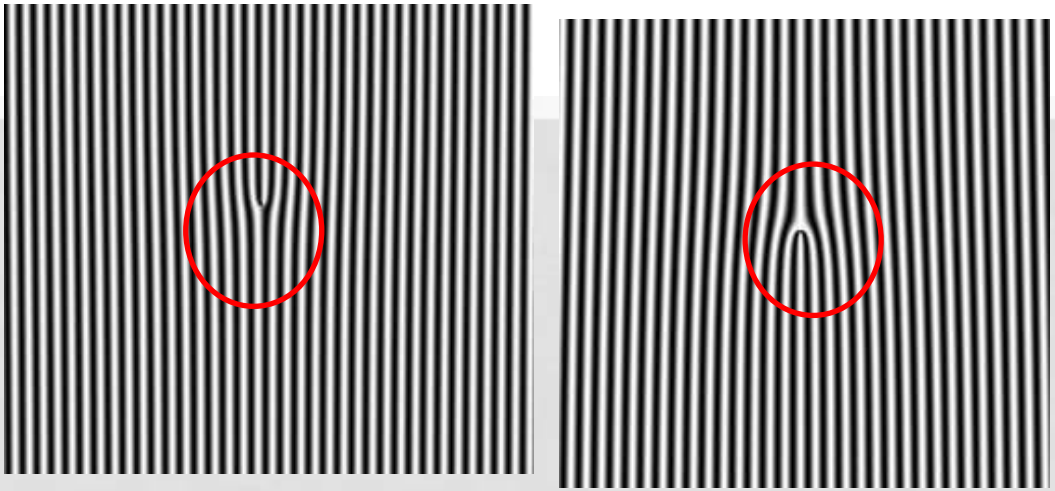
Фазовый фронт

Профиль интенсивности



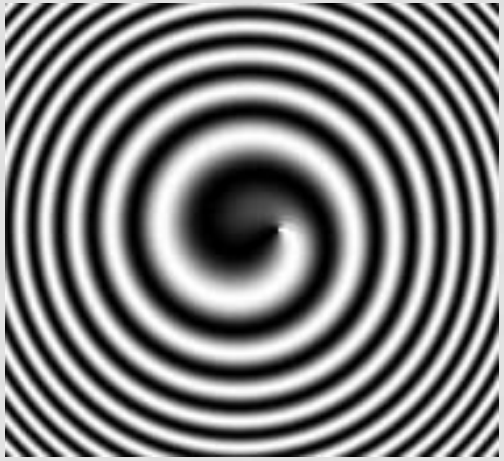


Рассчитанные картины интерференции плоской волны и оптического вихря с топологическим зарядом l = +1 (а), -2 (б)

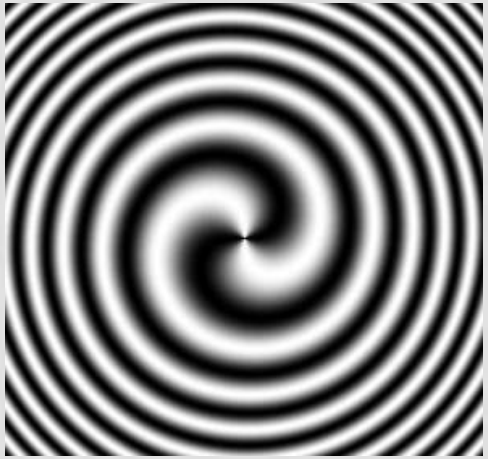


а б

а

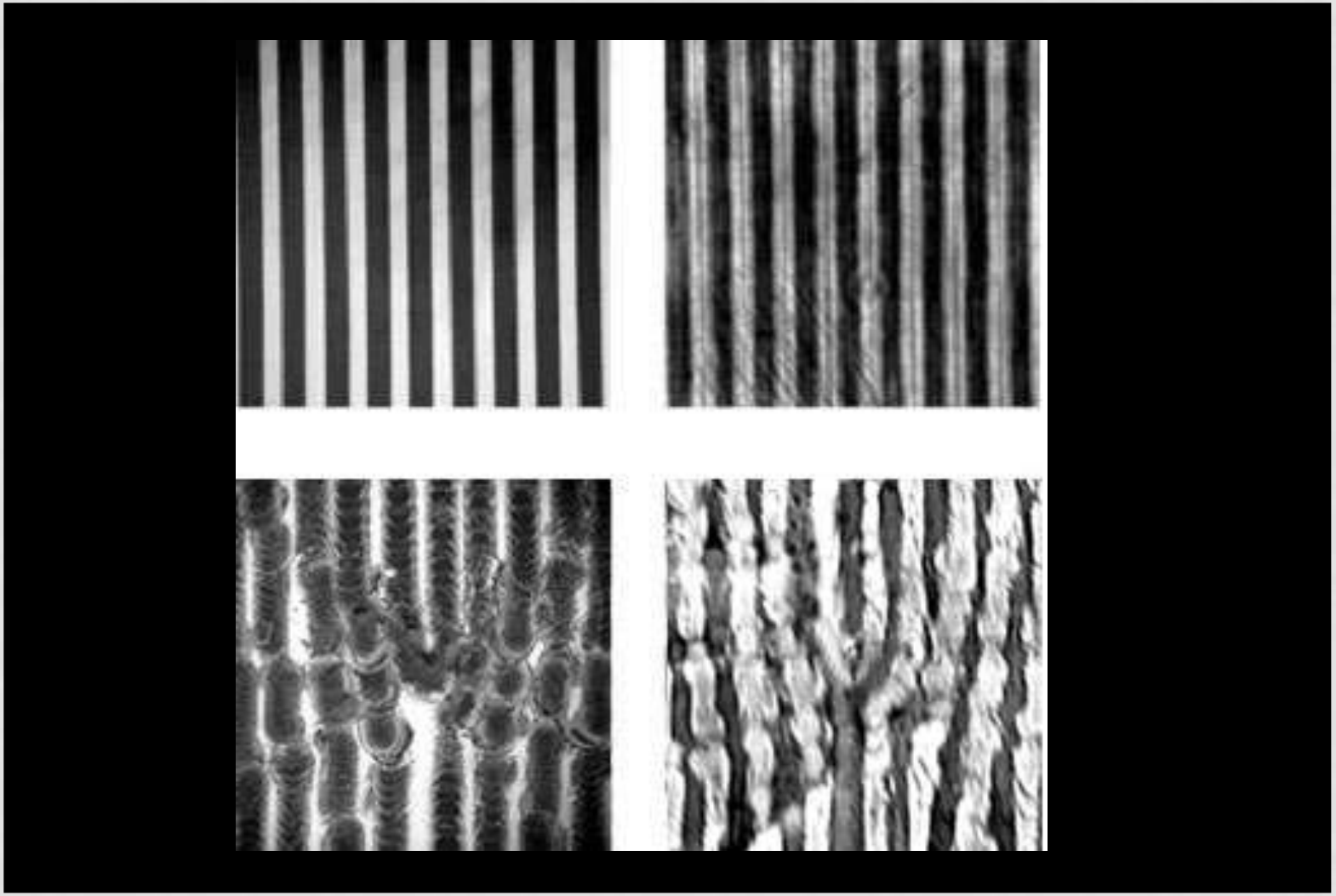


б

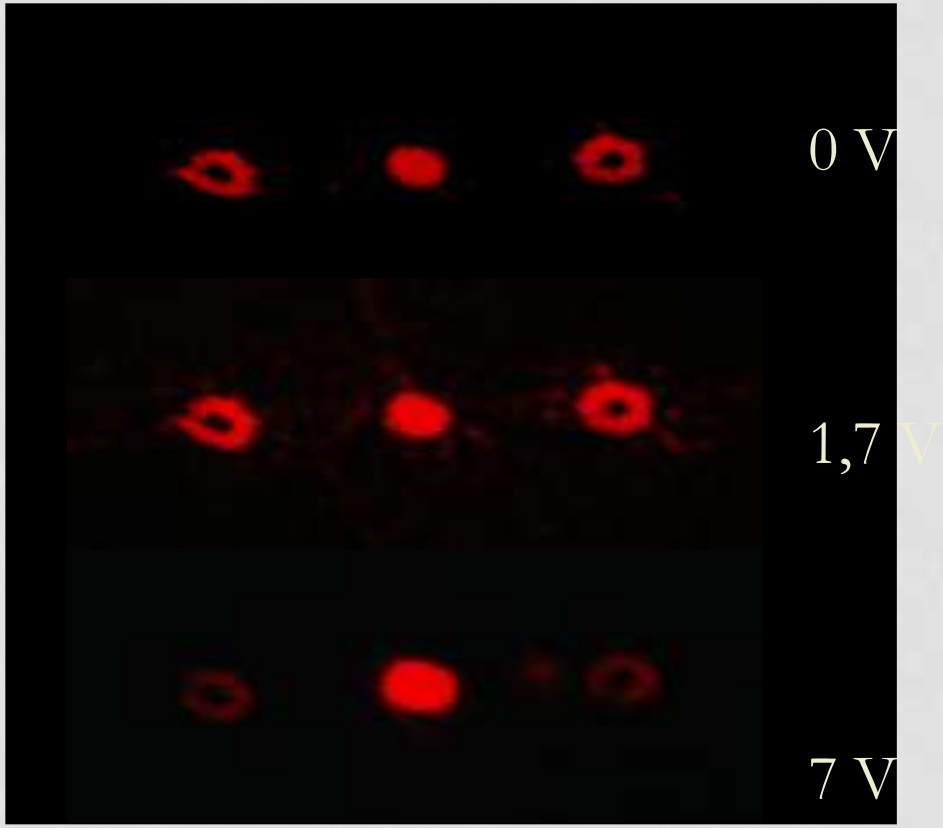


Рассчитанные картины интерференции сферической волны и оптического вихря с топологическим зарядом l = +1 (а), -2 (б)

Фотографии амплитудных масок и сформированных структур

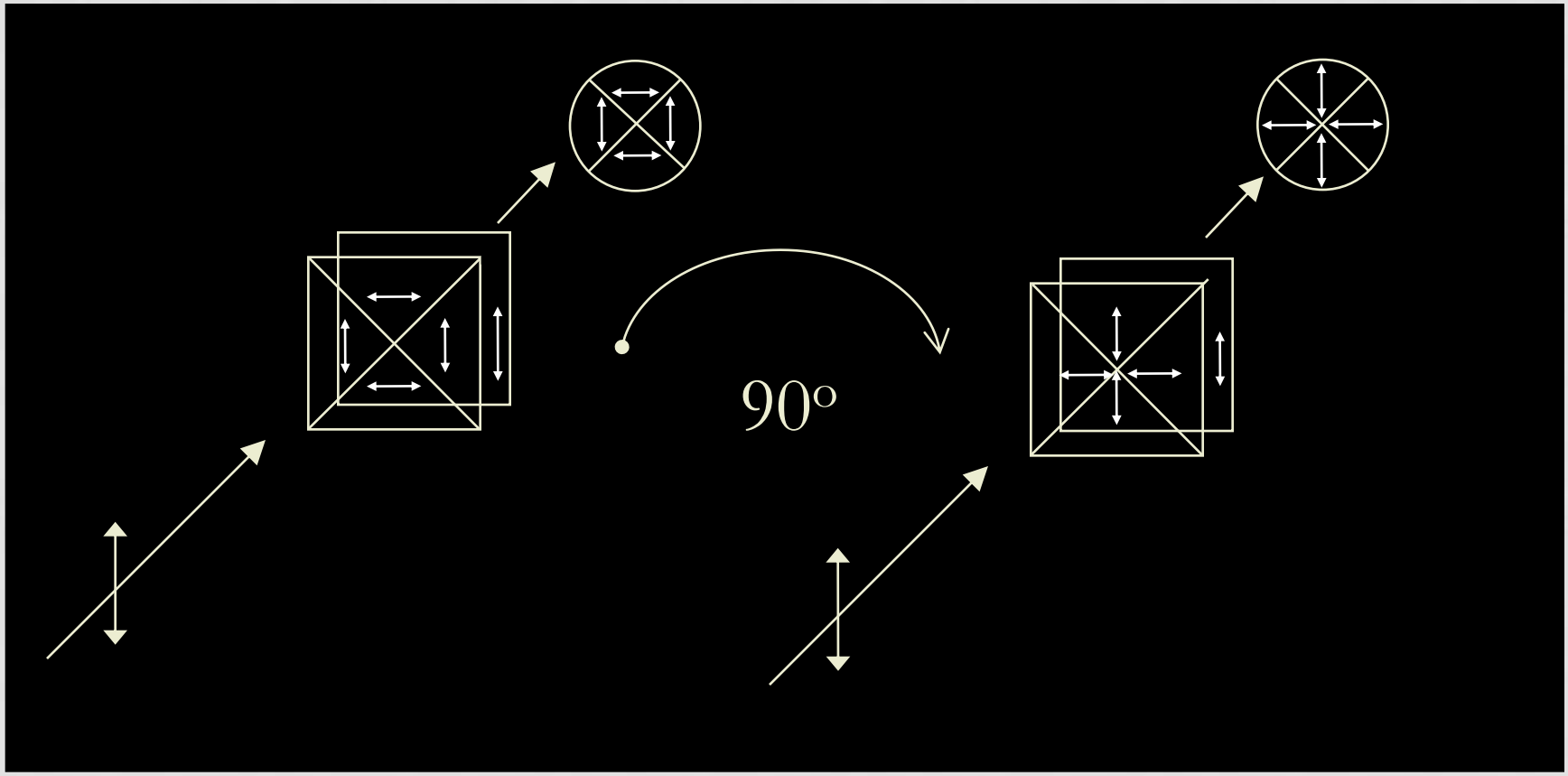


Экспериментальные фотографии зависимости дифракционной эффективности для ЖК вортекс-элемента.

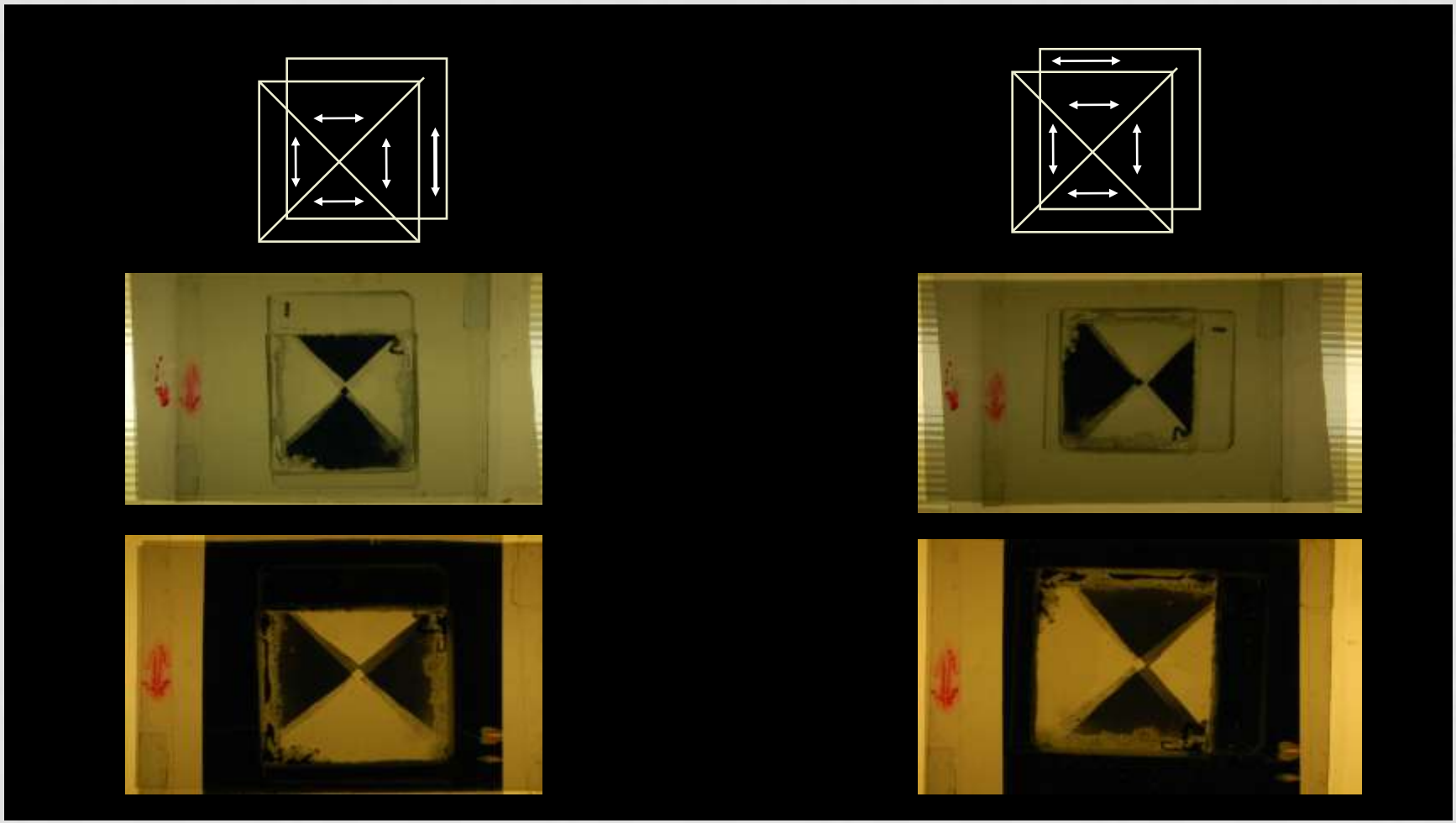


A.A.Kazak, E.A.Melnikova, O.G.Romanov, and A.L.Tolstik. Formation of singular and Bessel light beams using electrically controlled liquid crystal diffractive elements // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2015. – V.18, №2. – P.170–174.

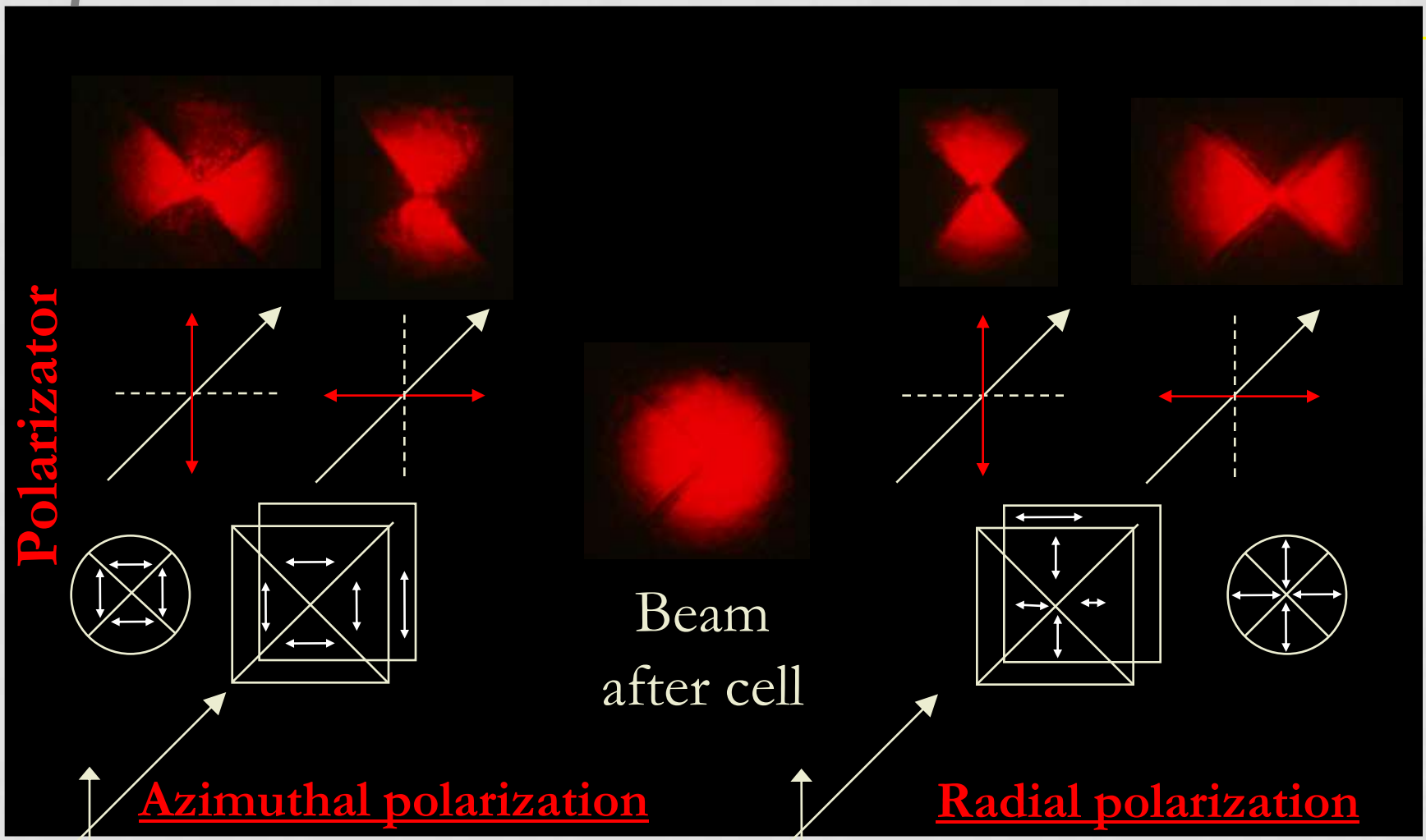
Изменение поляризации в поперечном сечении лазерного пучка.



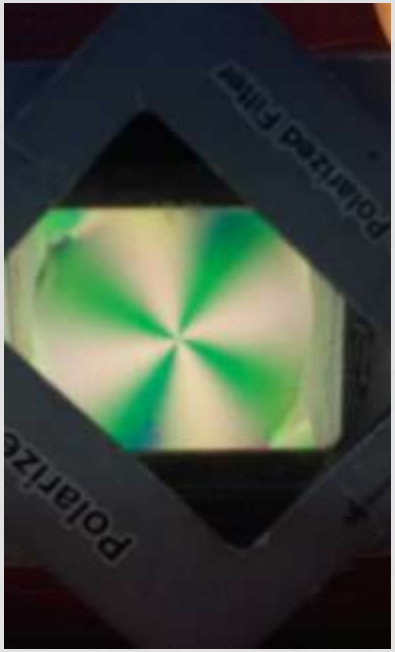
Поляризационные ЖК ячейки в скрещенных поляризаторах.

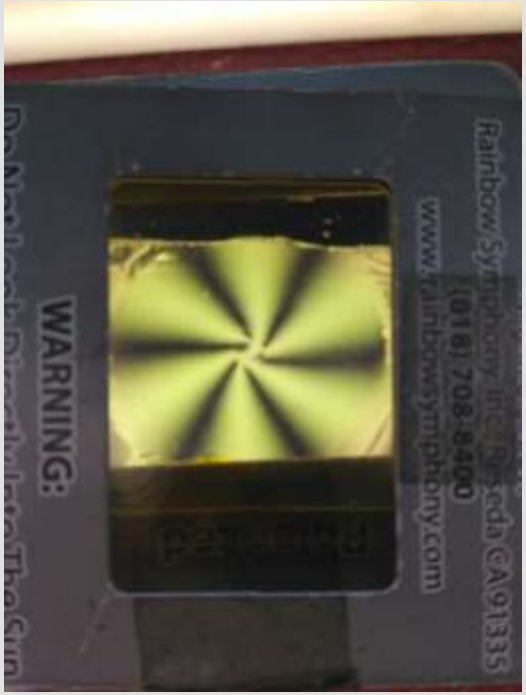


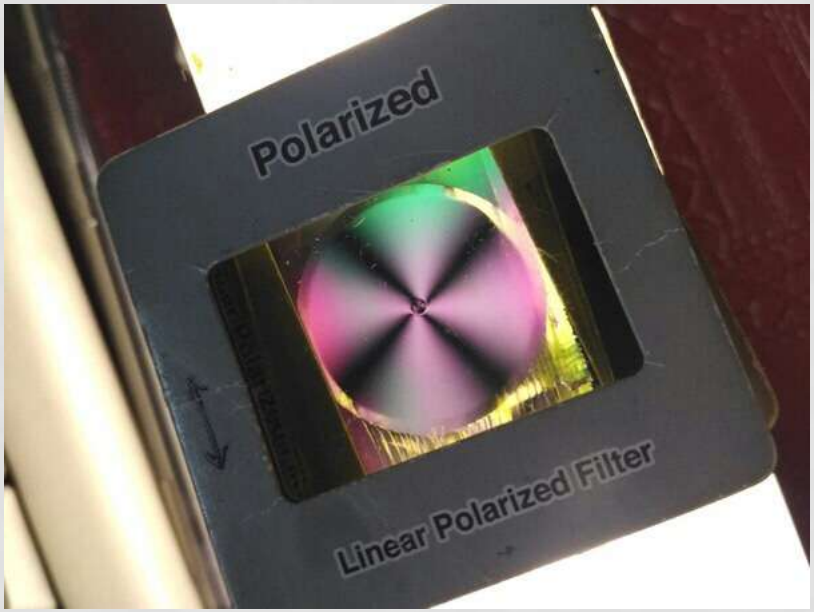
Структура светового пучка, прошедшего через ЖК - элемент.



A.A.Kazak, A.L.Tolstik, E.A.Melnikova, A.A.Komar. Operation with laser radiation by using of liquid crystal elements // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2013. – V.16, №3. – P.302–308.


Polarized Filter
Polarized

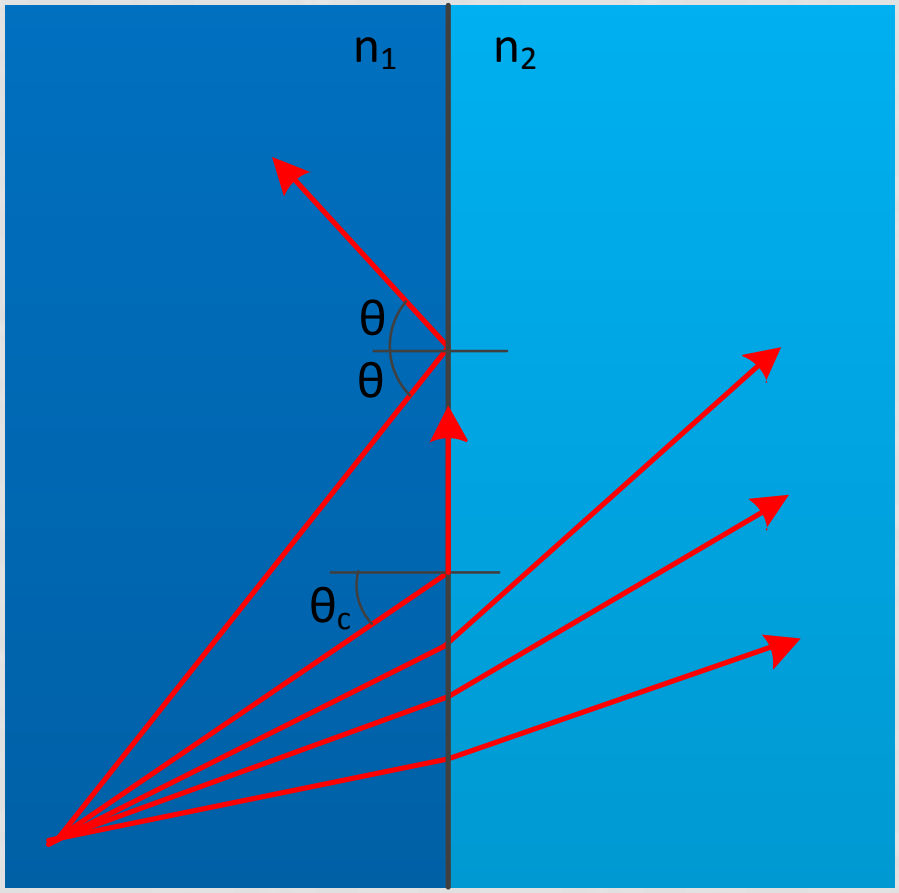

Rainbow Symphony, Inc. Pasadena CA 91335
(818) 708-8400
www.rainbowsymphony.com
WARNING:
Do Not Look Directly Into The Sun
Polarized


Polarized
Linear Polarized Filter

WARNING:
Do Not Look Directly Into The Sun

Полное внутренне отражение на границе раздела двух ориентаций директора ЖК

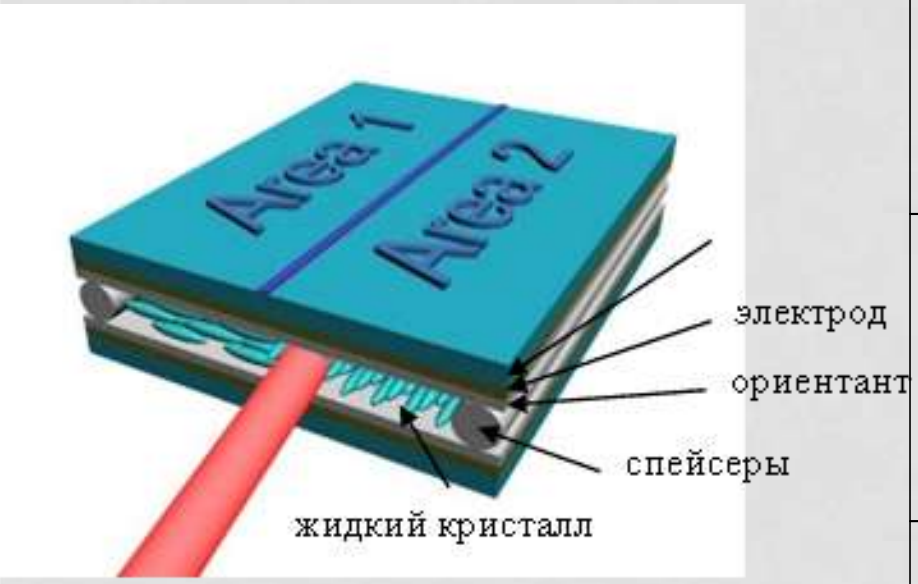
$$n_e = 1,67 \qquad n_o = 1,49$$

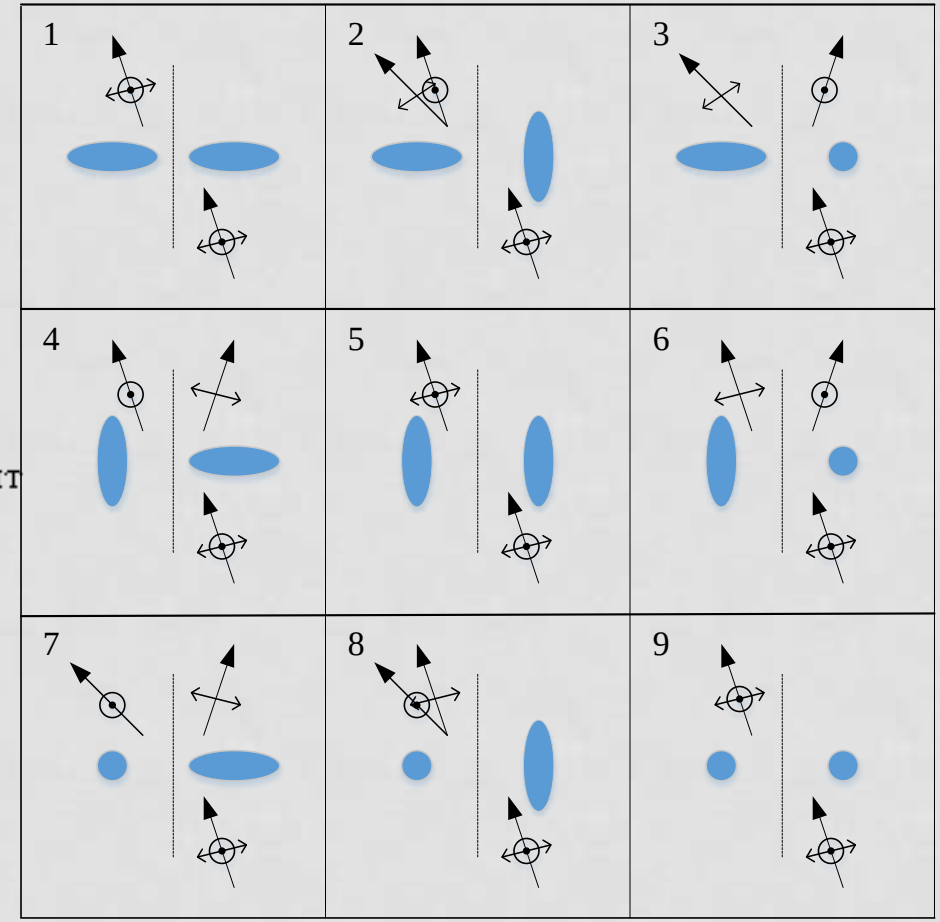


$$\theta_c = \sin^{-1}\frac{n_2}{n_1}$$

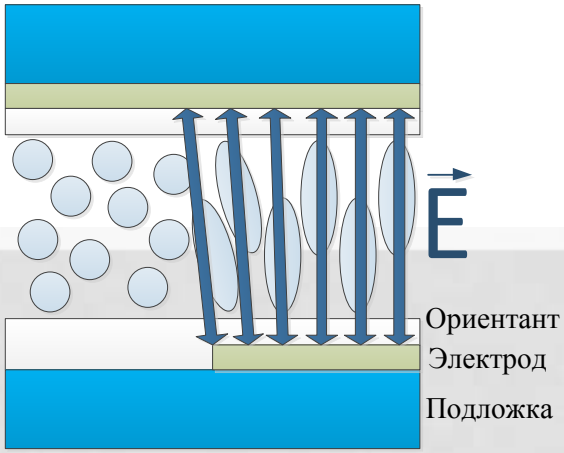
$$\theta_c \approx 63°$$

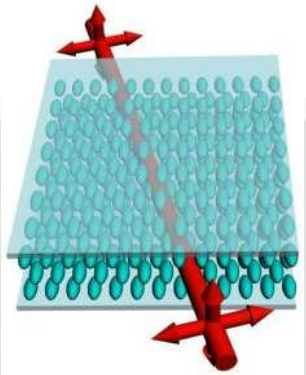
Оптические переключатели на основе управляемой жидко-кристаллической границы показателя преломления

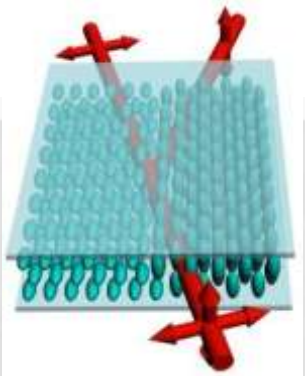




ТОПОЛОГИИ ОРИЕНТАЦИИ ДИРЕКТОРА ЖК В ЯЧЕЙКЕ



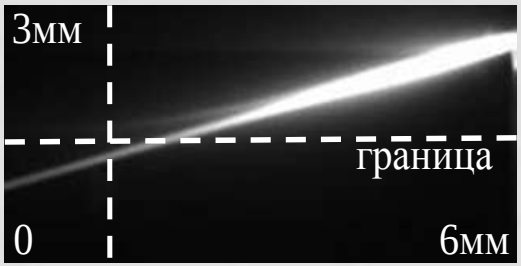
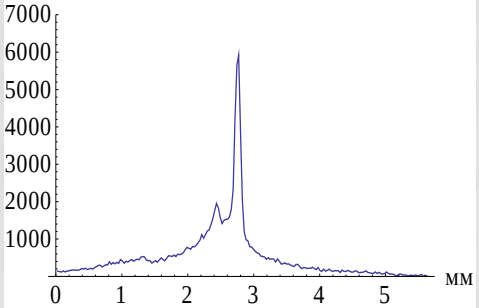
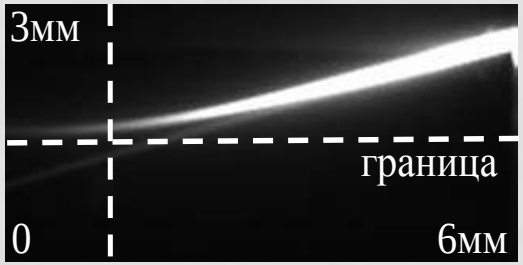
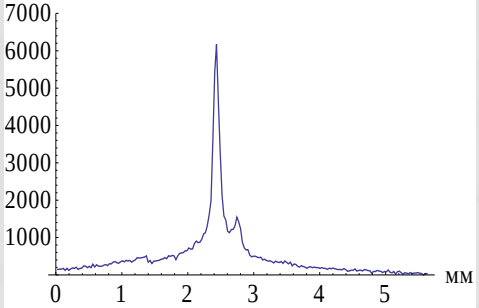


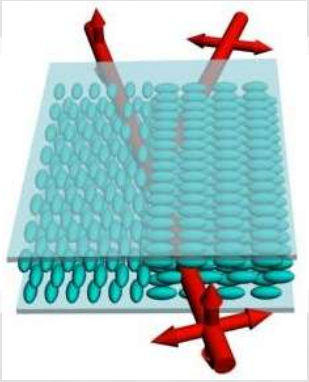


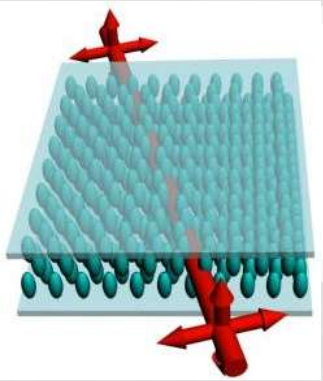
Ячейка с частично стравленным электродом

а – напряжение выключено; б – напряжение включено

Принцип отражения света от ЖК границы на основе текстурированного электрода

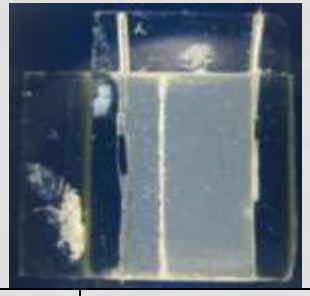
гор		
верт		



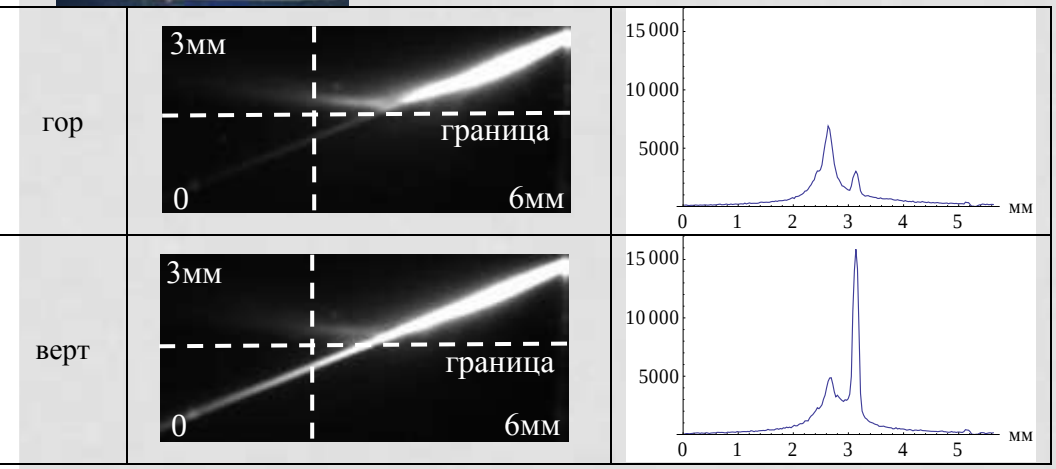


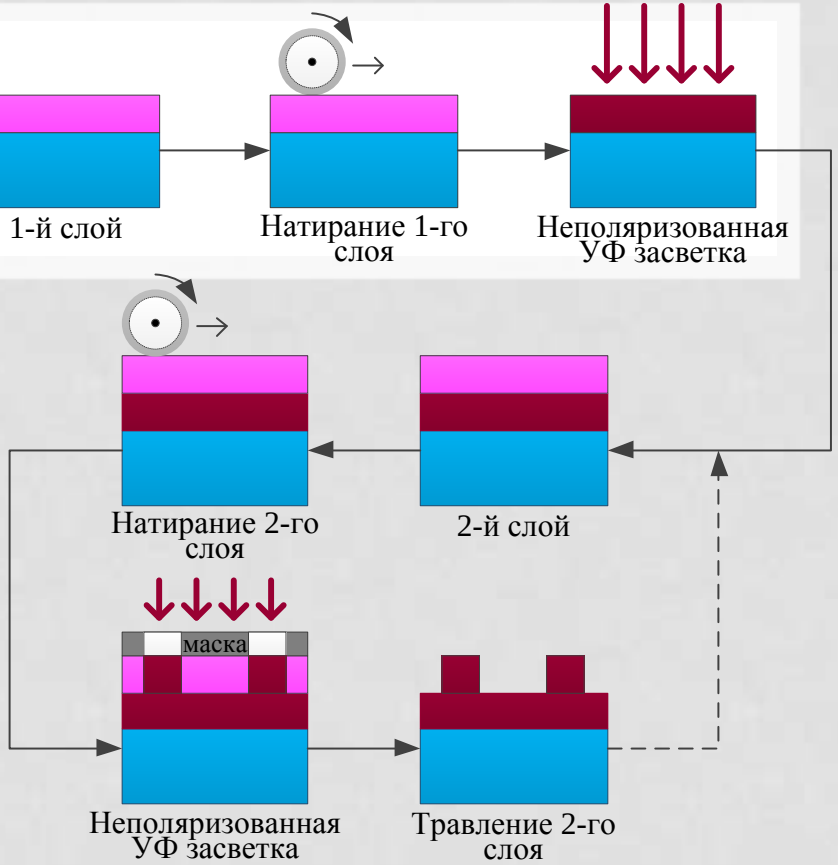
а – напряжение выключено; б – напряжение включено

Принцип отражения света в ЖК ячейке на основе текстурированной планарной ориентации ЖК



Фотография ячейки с границей на основе натирания в скрещенных поляризаторах



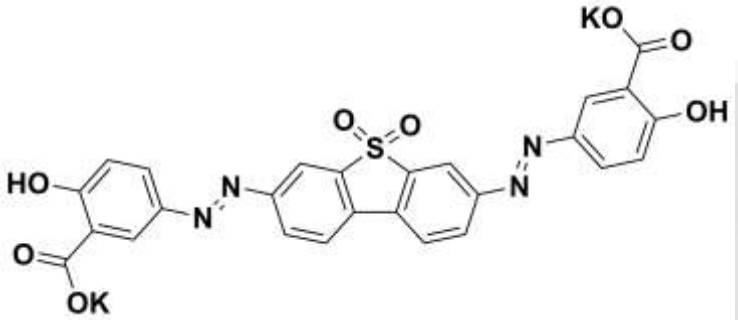


Технология создания текстурированной планарной ориентации ЖК

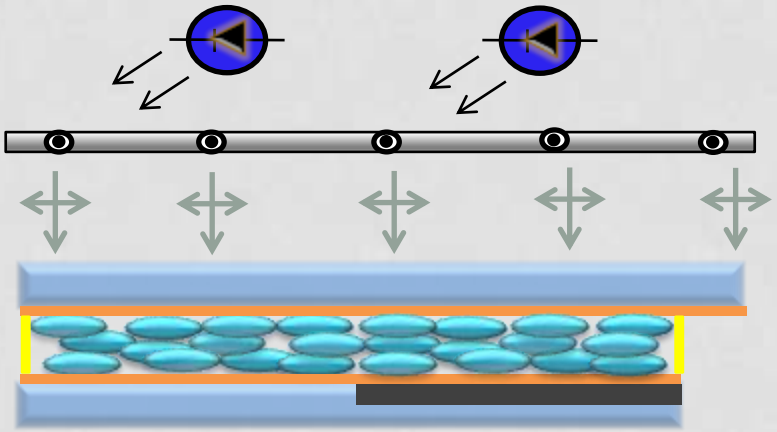
A.A.Komar, A.L.Tolstik, E.A.Melnikova, and A.A.Muravsky. Optical switch based on the electrically controlled liquid crystal interface // Applied Optics. – 2015. – V. 54, № 16. – P.5130–5135.

Фотоориентация НЖК слоя при помощи азокрасителей

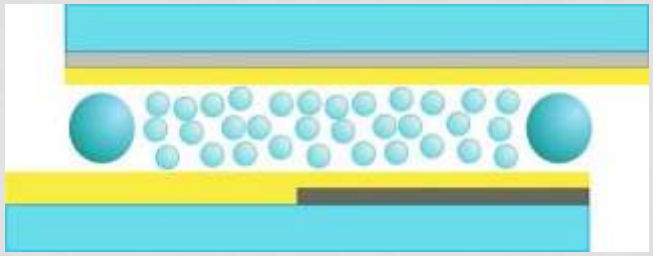
- Высокая энергия сцепления
- Термостабильность
- Фотостабильность



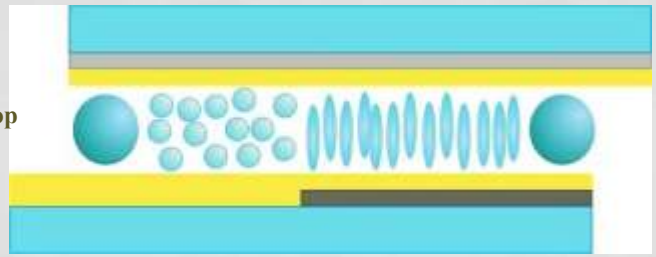
Структурная схема азокрасителя для фотоориентации



U=0 В



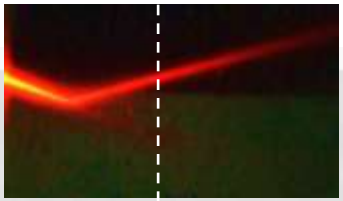
U >> $U_{пор}$

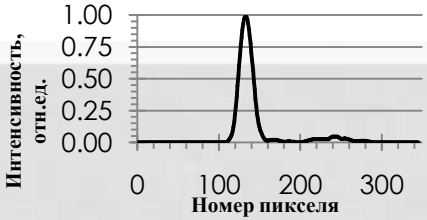


Анализ пространственно-поляризационного разделения светового поля линейно поляризованного лазерного излучения на границе гомеотропной и планарной ориентаций ЖК молекул

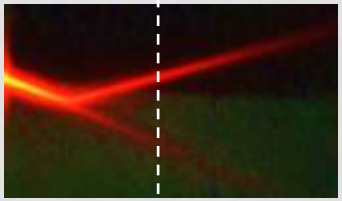
Угол отсчитывается от вертикали

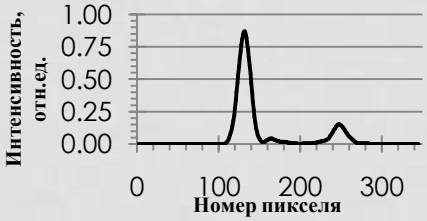
β=0°



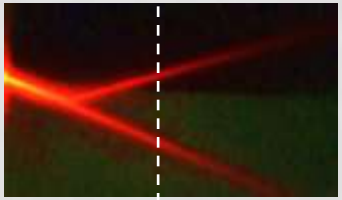


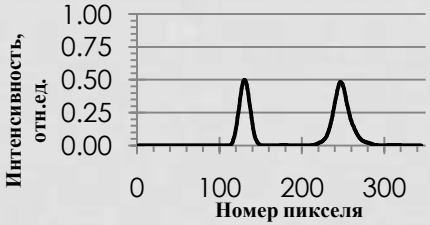
β =22,5°



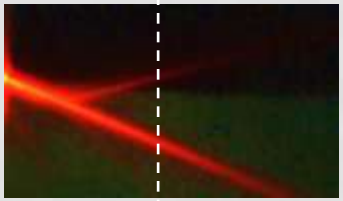


β =45°

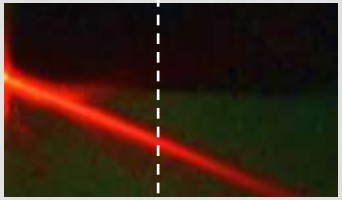


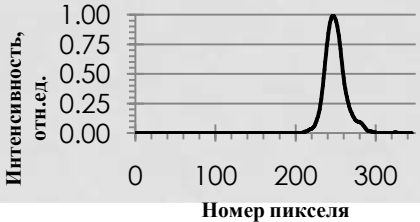


β =67,5°

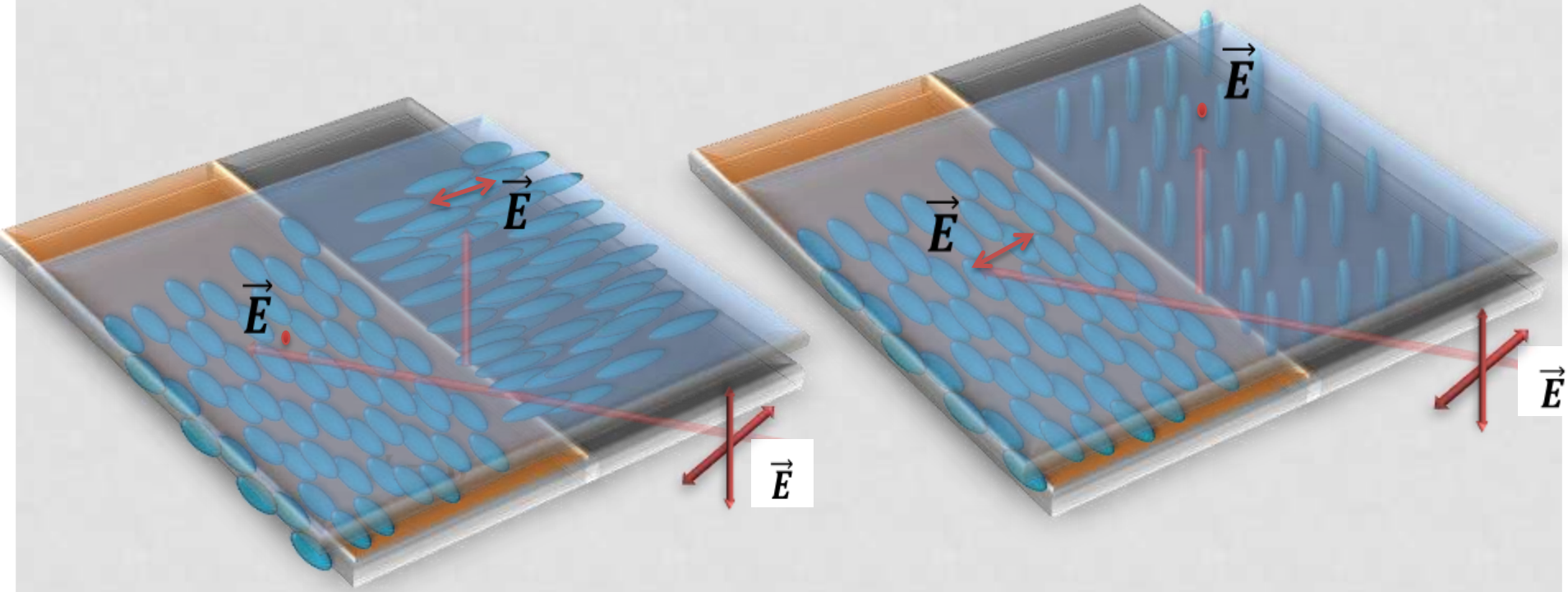


β =90°





Распространение излучения в ЖК ячейке с самосовмещенной границей



$U \gg U_{\text{пор}}$

Фотоориентация НЖК слоя при помощи азокрасителей

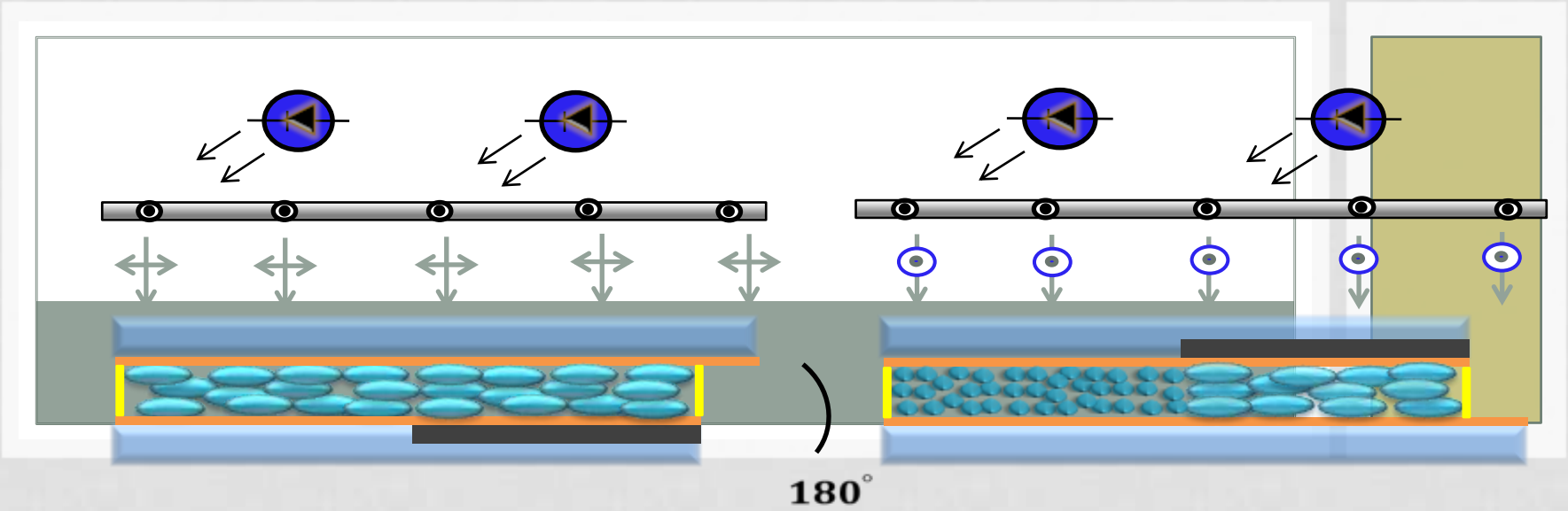
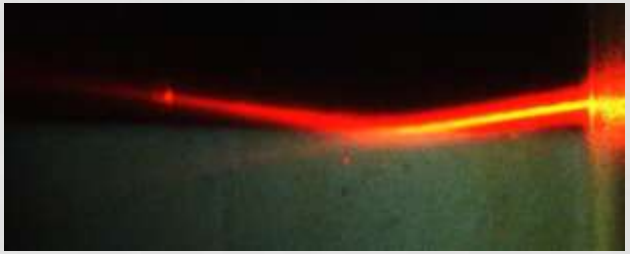


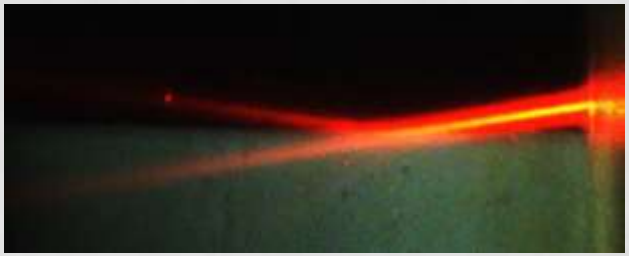
Схема создания границы показателя преломления на основе фотоориентации азо красителя

Распространение излучения через рефрактивную границу

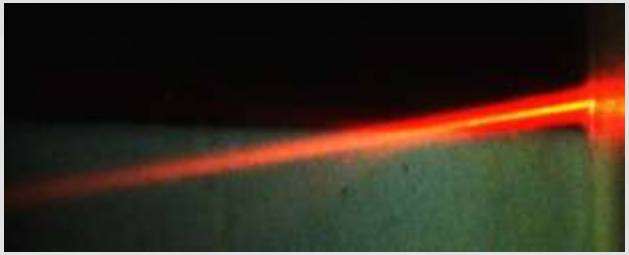
Фотография ЖК ячей



Горизонтальная мода



Горизонтальная и вертикальная мода

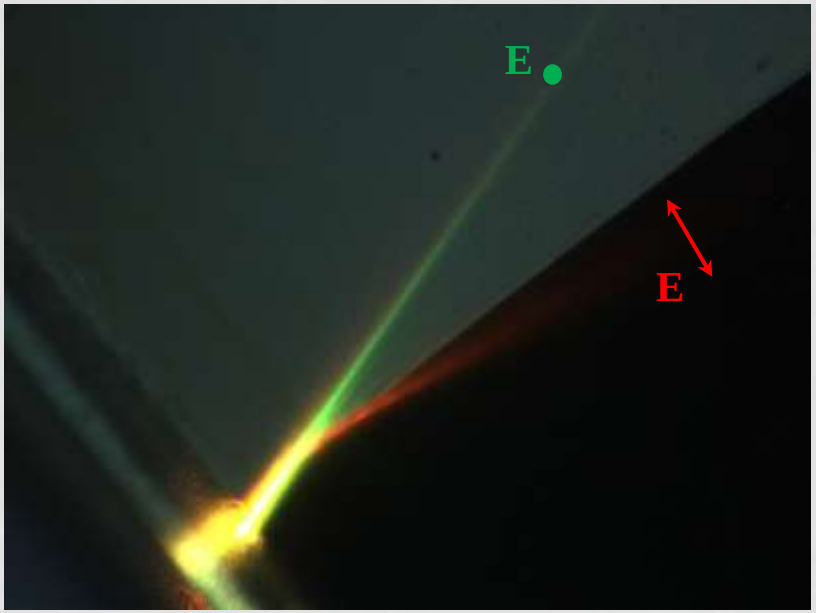


Вертикальная мода

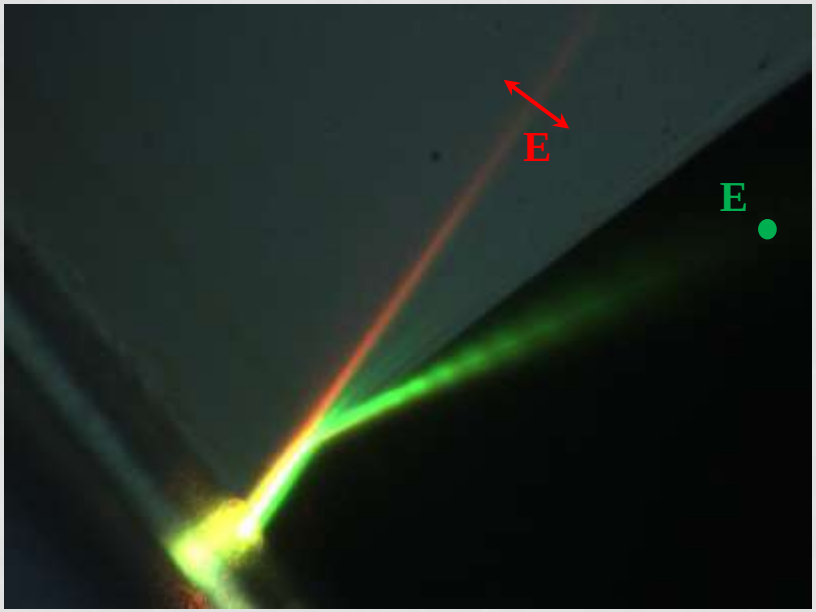
U=0 В

$U >> U_{пор}$

Пространственное разделение и переключение ортогональных мод



$U = 0\,V$



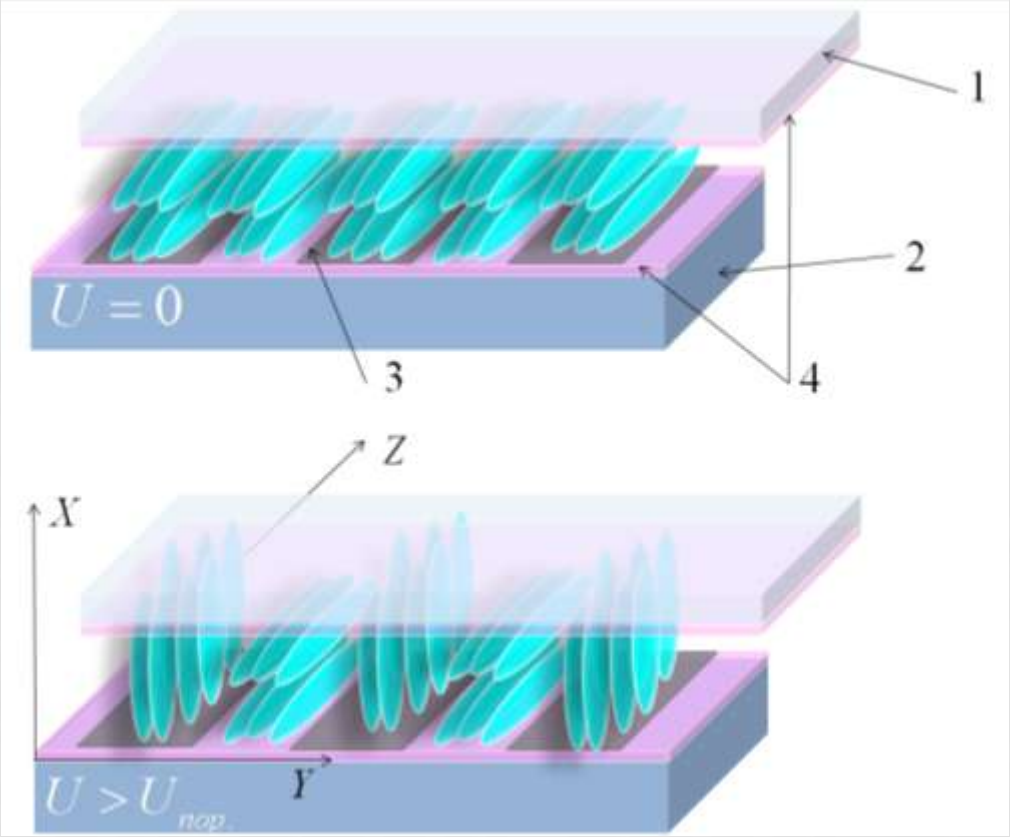
$U >> U_{пор}$

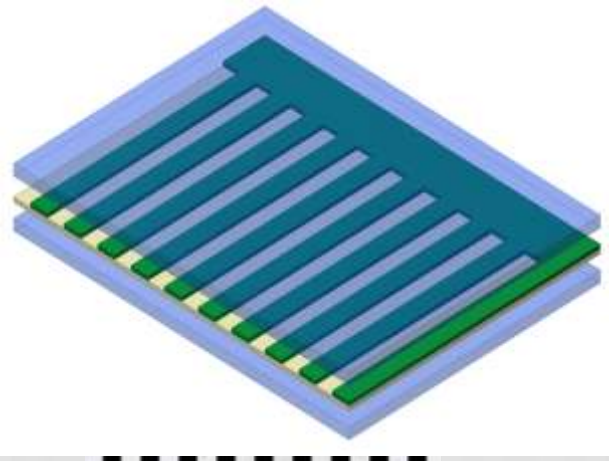
Melnikova, E.A., Tolstik, A.L., Rushnova, I.I., Kabanova, O.S., Muravsky, A.A.Applied Electrically controlled spatial-polarization switch based on patterned photoalignment of nematic liquid crystals// Applied Optics. – 2016 – V. 55,№23, -P6491-6495

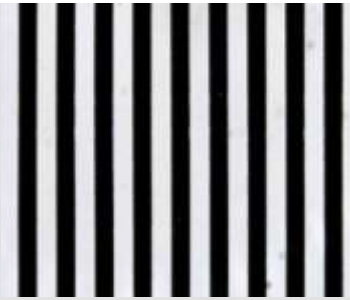
Rushnova, I.I., Melnikova, E.A., Tolstik, A.L., Muravsky, A.A Electrically switchable photonic liquid crystal devices for routing of a polarized light wave //Optic Communication. -2018. -V.413, №1.-P.179-183

ЖК-волноводы на базе текстурированного электрода

Формирование волноводных каналов в планарной НЖК-ячейке с текстурированным электродом



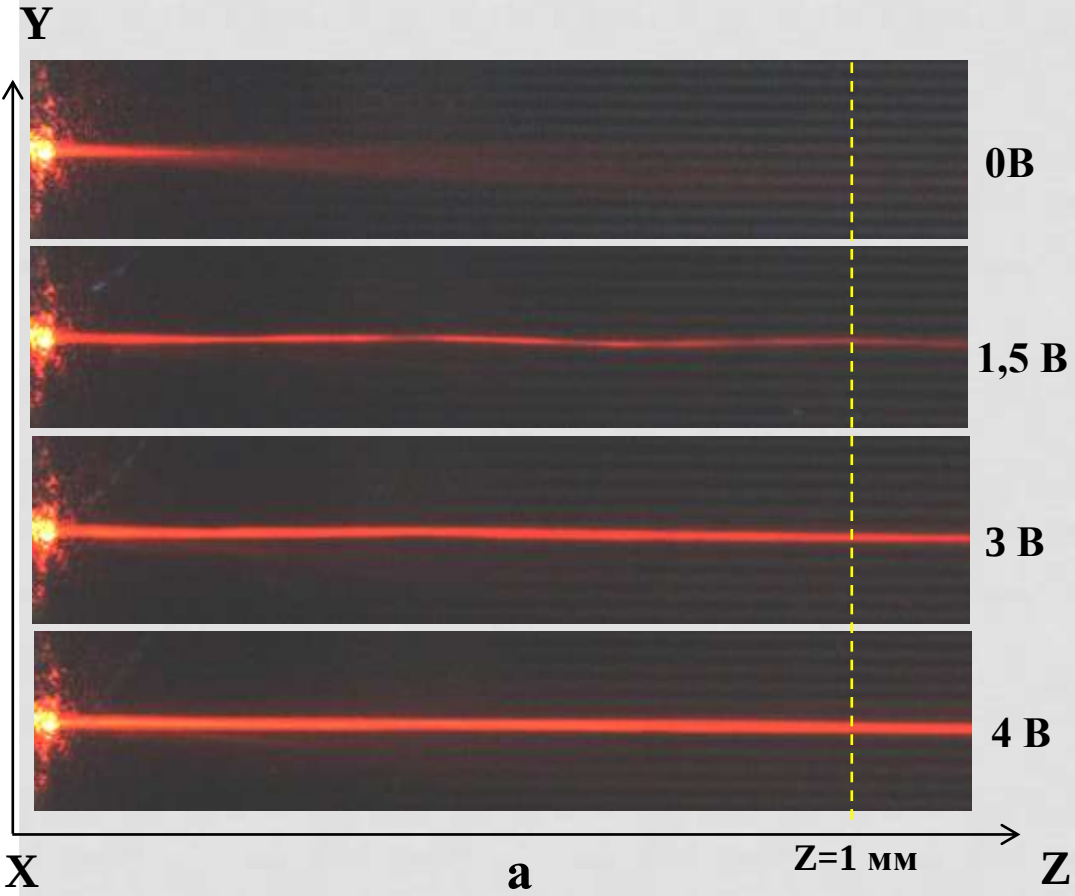


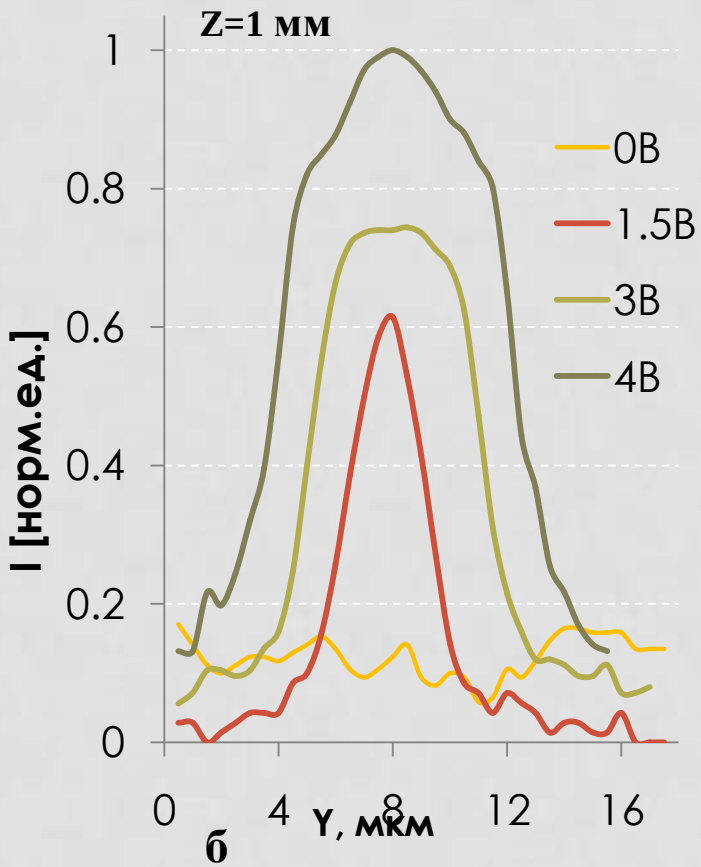


Микрофотография стеклянной подложки с текстурированным электродом

1 – стеклянная подложка, покрытая слоем ITO; 2 – нижняя стеклянная подложка; 3 – текстурированный электрод; 4 – ориентирующий фотополимер

ЖК-волновод (метод текстурированного электрода)

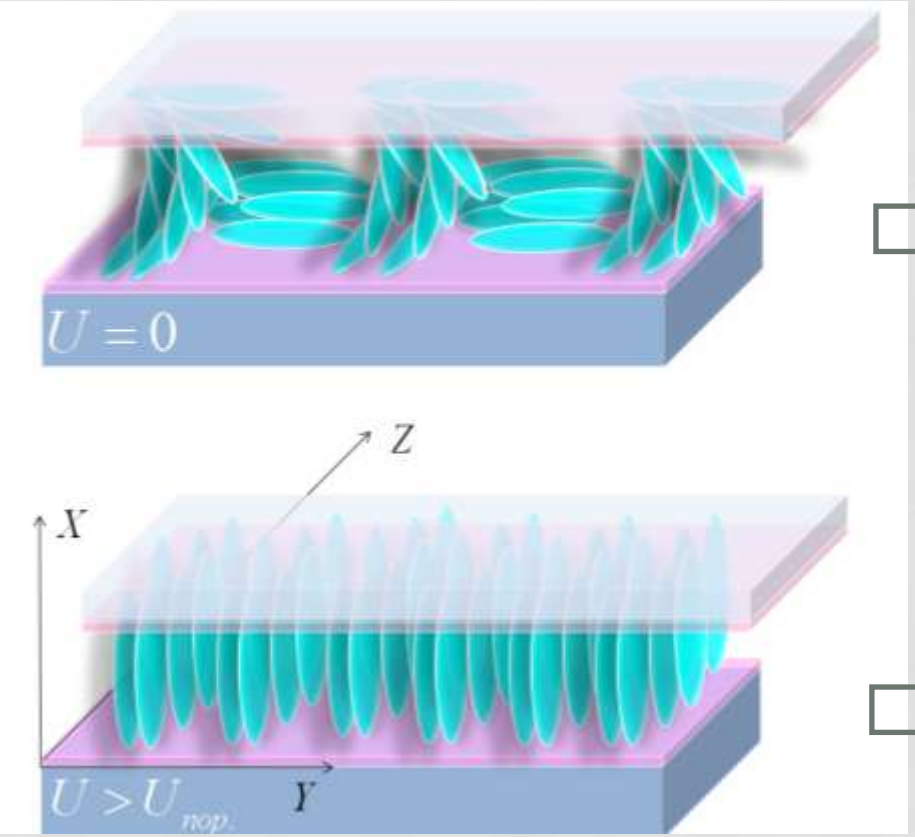




Картины распространения линейно поляризованного вдоль оси *X* лазерного излучения с длиной волны 633 нм и мощностью 0,5 мВт в ячейке с электрически индуцируемой решеткой канальных НЖК-волноводов при разных управляющих напряжениях (а).

Зависимость профиля распределения интенсивности светового пучка в плоскости *YZ* после длины распространения 1 мм в решетке канальных НЖК-волноводов от величины внешнего напряжения (б).

Ортогональная планарная начальная ориентация директора ЖК



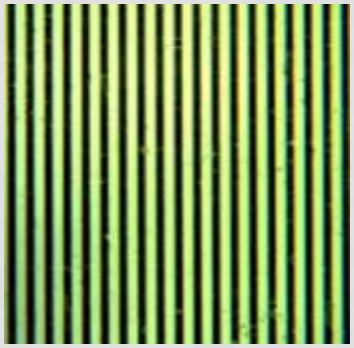
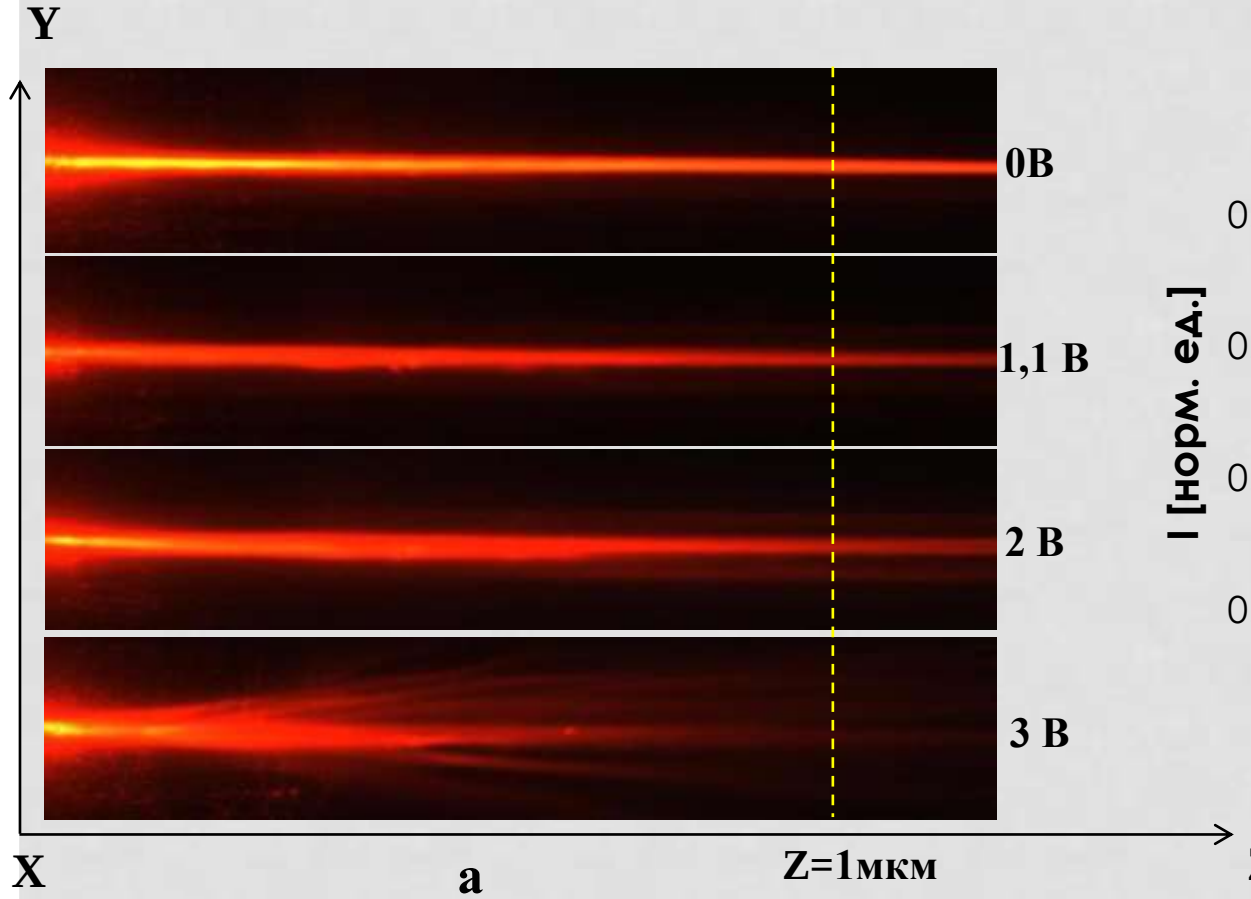
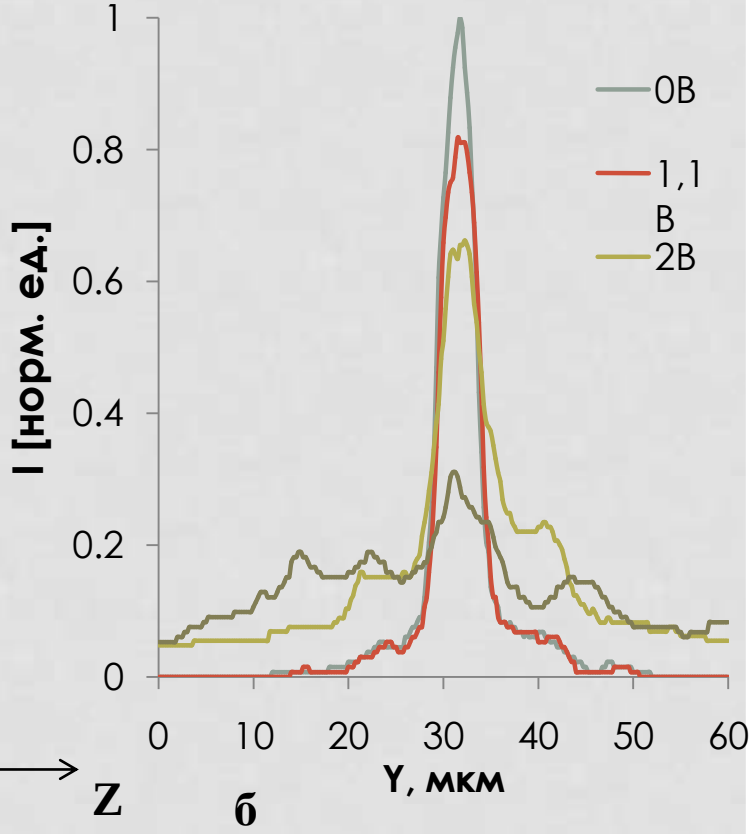


Схема и микрофотография в поляризованном свете НЖК-ячейки с многодоменной ориентацией директора

ЖК-волновод (метод фотоориентации)





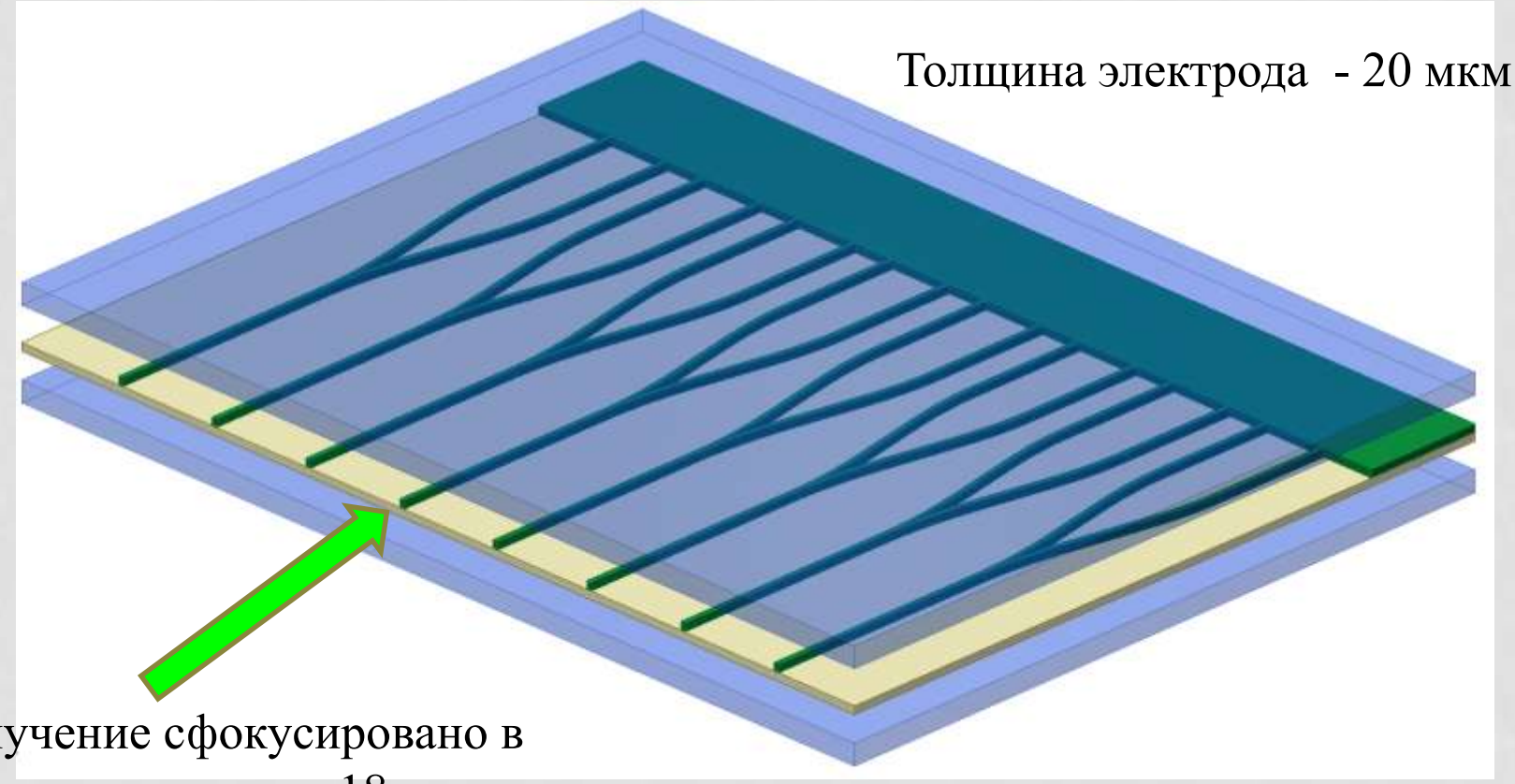
Картины распространения линейно поляризованного вдоль оси *Y* лазерного излучения с длиной волны 633 нм и мощностью 0,5 мВт в ячейке с оптически волноводными каналами ($\Lambda = 20$ *мкм*) при разных управляющих напряжениях (а).

Зависимость профиля распределения интенсивности светового пучка в плоскости *YZ* после длины распространения 1 мм в решетке канальных НЖК волноводов от величины внешнего напряжения (б).

Волноводный ЖК-разветвитель

Толщина НЖК-слоя: d=20 мкм

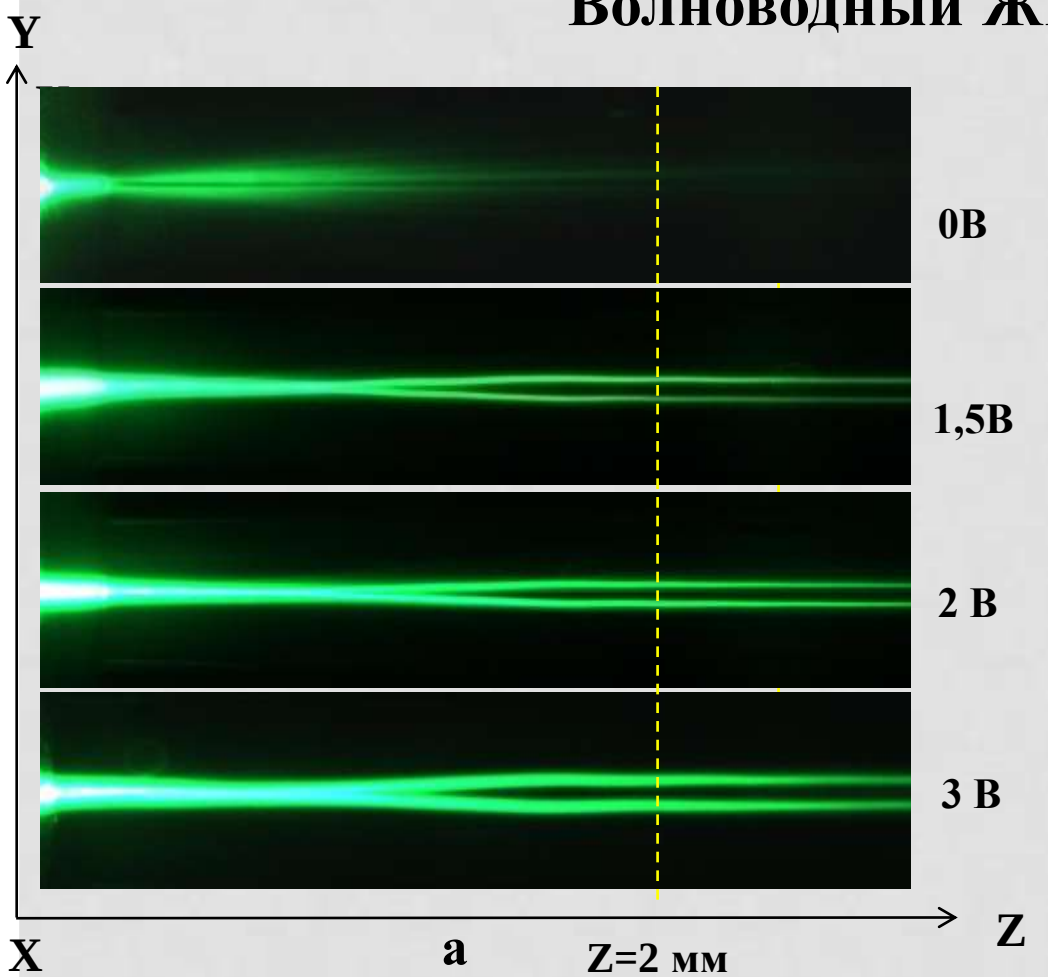
Толщина электрода - 20 мкм



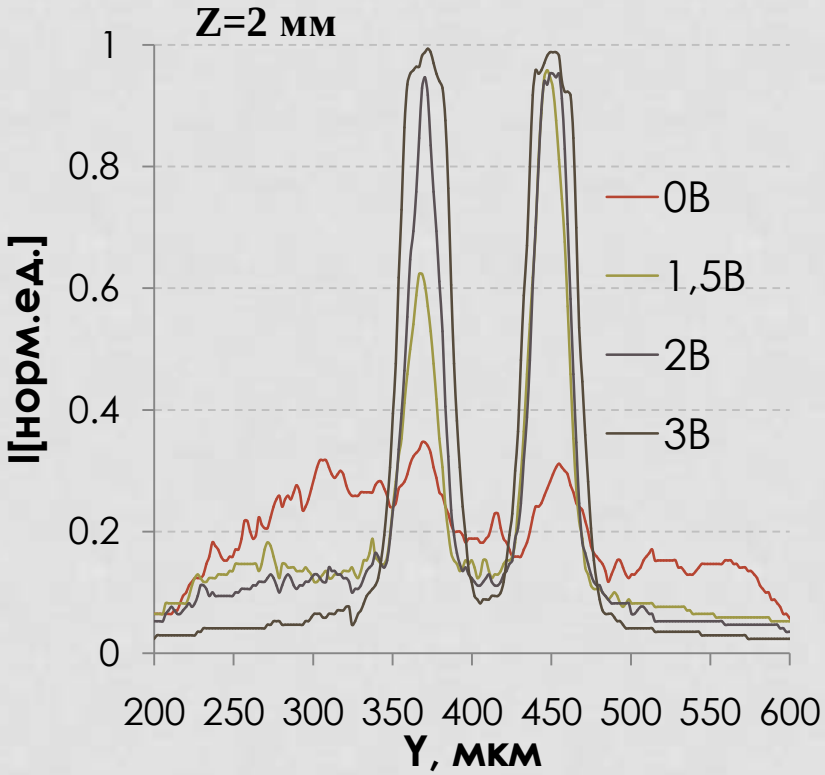
Излучение сфокусировано в пятно диаметром 18 мкм

Ввод лазерного излучения, поляризованного как необыкновенная волна в волноводный ЖК-делитель

Волноводный ЖК-делитель



а

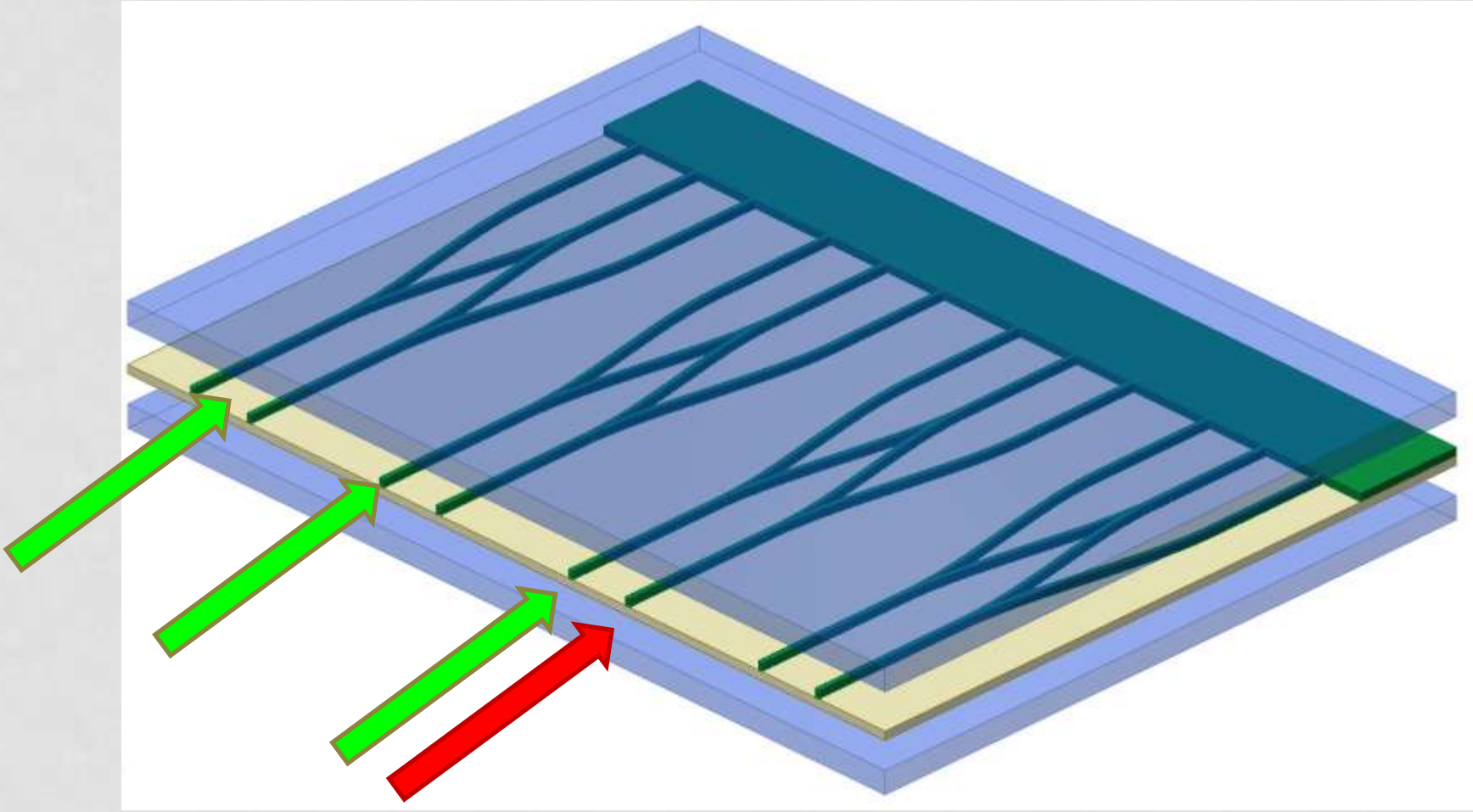


б

Картины распространения линейно поляризованного вдоль оси *X* лазерного излучения с длиной волны 532 нм и мощностью 0,5 мВт в ячейке с электрически индуцируемой решеткой НЖК-волноводных делителей при разных управляющих напряжениях (а).

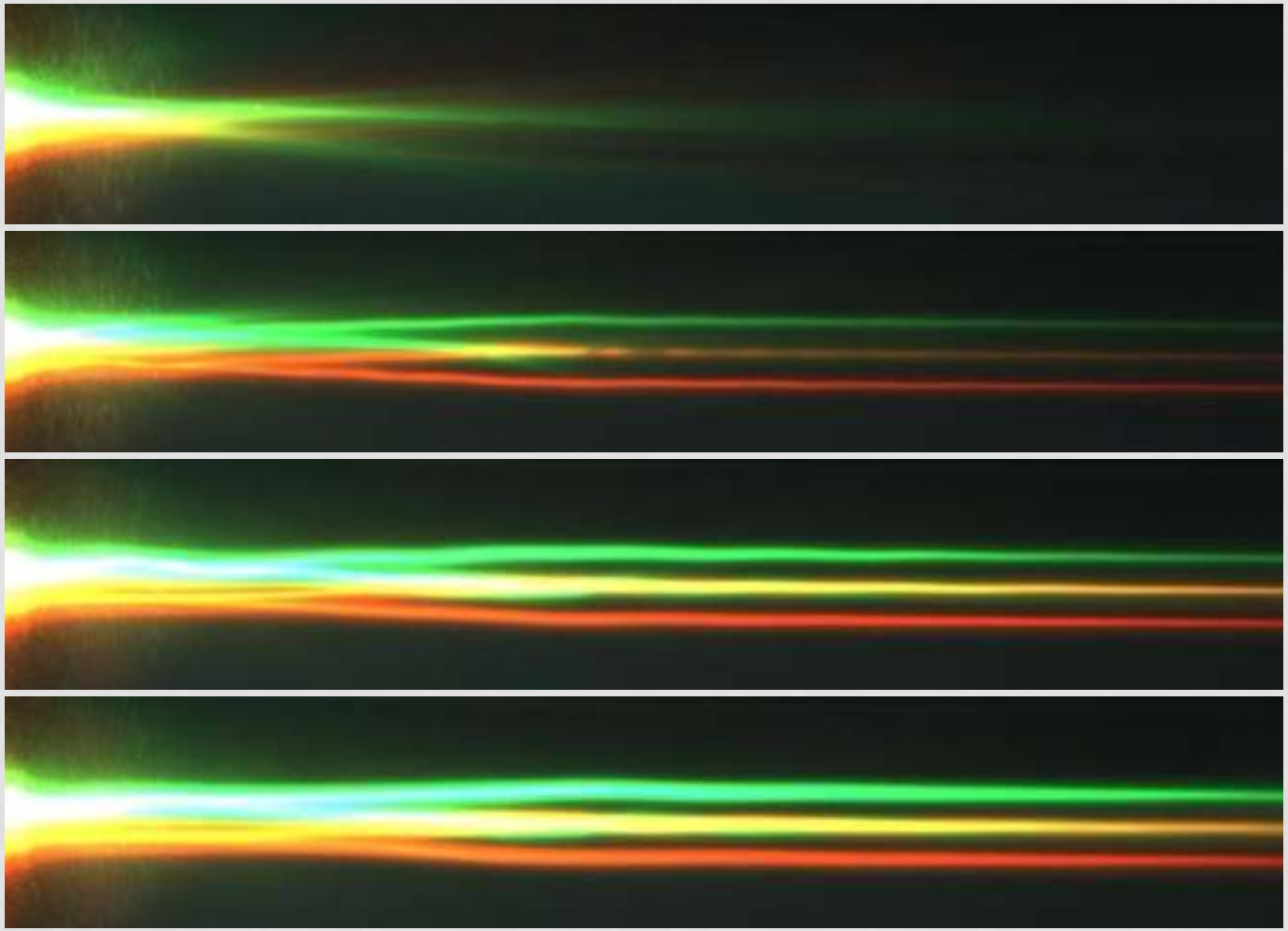
Зависимость профиля распределения интенсивности светового пучка в плоскости *YZ* после длины распространения 2 мм в решетке НЖК-волноводных делителей от величины внешнего напряжения (б).

Волноводный ЖК-сумматор



Ввод лазерного излучения, поляризованного как необыкновенная волна в волноводный ЖК-сумматор

Мультиплексирование световых пучков



U=0В

U=1,5В

U=2В

U=3В

Kabanova, O.S., Melnikova, E.A., Olenskaya, I.I., Tolstik, A.L. Electrically controlled waveguide liquid-crystal elements //Technical Physics Letters. – 2014. – Т.40, №14. – С.30–35.
Kabanova O. S., E. A. Melnikova, O. G. Romanov, and A. L. Tolstik Linear and Nonlinear Light Beam Propagation in Liquid-Crystal Waveguide Arrays/ /Nonlinear Phenomena in Complex Systems Nonlinear Phenomena in Complex Systems. –2017.–vol. 20, – №4 , –P. 319 - 326

Спасибо за внимание!