

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2025-22-19-30>

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ПОЗИЦИИ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ. ОПТИЧЕСКАЯ БИСТАБИЛЬНОСТЬ

Цегельский В.Г.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия*

Ключевые слова: оптическая бистабильность, гистерезис, неравновесная термодинамика, жидкий кристалл, производство энтропии.

Аннотация. Проанализированы с позиции неравновесной термодинамики процессы, протекающие при оптической бистабильности, мультистабильности и гистерезисные явления, возникающие при воздействии лазерным излучением на поверхность термотропного жидкого кристалла. Показано, что протекание этих процессов подчиняется одним и тем же общим закономерностям эволюции неравновесных термодинамических систем, применимым как для живой, так и не живой природы. Сопоставляются процессы, протекающие в биологическом жидком кристалле (мембране клетки) и термотропном жидком кристалле. Отмечается их идентичность с позиции неравновесной термодинамики. Объясняется возможность образования промежуточных структур в термотропных жидких кристаллах из-за неоднородности их прогрева лазерным излучением.

HYSTERESIS PHENOMENA IN OPTICAL SYSTEMS FROM THE POSITION OF NON-EQUILIBRIUM THERMODYNAMICS. OPTICAL BISTABILITY

Tsegelskiy V.G.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: optical bistability, hysteresis, nonequilibrium thermodynamics, liquid crystal, entropy production.

Abstract. The processes of optical bistability, multistability and hysteresis phenomena arising from continuous laser radiation exposure on the surface of a thermotropic liquid crystal are analyzed from the standpoint of nonequilibrium thermodynamics. It is shown that the processes occurring in liquid crystals, changing their optical properties, are subject to the same general laws of evolution of nonequilibrium thermodynamic systems applicable to both "living" and inanimate nature. The processes occurring in a biological liquid crystal (cell membrane) and a thermotropic liquid crystal are compared. The identity of these processes from the standpoint of nonequilibrium thermodynamics is noted. The possibility of formation of intermediate structures in thermotropic liquid crystals due to the inhomogeneity of their heating by laser radiation is explained.

Хорошо известны гистерезисные явления в оптических системах (см., например, [1-3]). Оптическая система включает источник входного излучения (например, лазер) и облучаемую среду, из которой выходит излучение (рис. 1). В состав оптической системы могут входить и другие элементы, например, зеркала, линзы, резонатор Фабри-Перо, поляризатор. Среда, в которую входит и выходит излучение, далее будем рассматривать как открытую термодинамическую систему.

Согласно [1-3] для реализации оптической бистабильности, а значит и гистерезиса, необходимо чтобы среды, на которые падает излучение, обладали нелинейным показателем преломления (нелинейным коэффициентом поглощения). Это значит, что в распространяющемся в среде излучении будут нелинейно изменяться оптические характеристики.

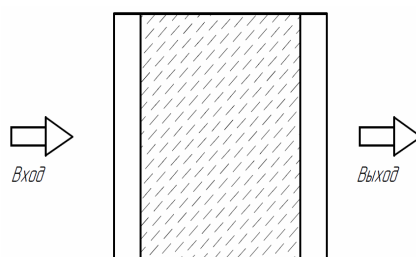


Рис. 1. Оптическая система (слой нелинейной среды заштрихован)

В этом случае при воздействии на такую нелинейную среду непрерывным излучением (с фиксированными характеристиками) выбранная термодинамическая система может находиться в одном из двух возможных установившихся состояний с различающимися характеристиками выходного (прошедшего через систему) излучения. Такую оптическую систему считают бистабильной, а при наличии возможности реализации большего количества стационарных состояний – мультистабильной. При этом реализация конкретного состояния определяется предысторией. При неизменных характеристиках падающего на систему излучения выходные состояния могут быть не только стационарными, но при определенных условиях и периодическими по времени или хаотическими.

На рисунке 2 представлены характерные примеры зависимости выходного параметра $I_{\text{пр}}$ от входного $I_{\text{пад}}$ для бистабильных (рис. 2, а) и мультистабильных (рис. 2, б) оптических систем [1]. Наиболее часто управляющим (входным) параметром является интенсивность (мощность) падающего излучения, а выходным параметром – интенсивность прошедшего через систему излучения. При увеличении интенсивности падающего на оптическую систему излучения $I_{\text{пад}}$ процесс эволюции протекает по нижней ветви кривой (см. рис. 2, а). При этом наблюдается плавное увеличение выходящей из системы интенсивности $I_{\text{пр}}$ излучения. При достижении $I_{\text{пад}} = I_{\text{max}}$ происходит скачкообразный переход (штриховая линия) на верхнюю ветвь кривой, соответствующей второму стационарному состоянию системы. Этому переходу соответствуют неустойчивые (хаотические) состояния. При дальнейшем уменьшении интенсивности излучения обратный скачкообразный переход на нижнюю ветвь осуществляется при меньшем значении интенсивности $I_{\text{пад}} = I_{\text{min}}$, чем при прямом переходе. В области между значениями I_{min} и I_{max} система может находиться в одном из двух устойчивых (стационарных) состояний в зависимости от предыстории.

Описываемый гистерезис называют гистерезисом по интенсивности. В этой же системе в качестве управляющих могут выступать и другие параметры падающего излучения, например, частота, поляризационные характеристики, угол падения излучения [1]. Соответственно, будет наблюдаться гистерезис частотный, поляризационный или угловой. Все это указывает на то, что реализуемые при переходах структуры стационарных состояний термодинамической системы существенно различаются.

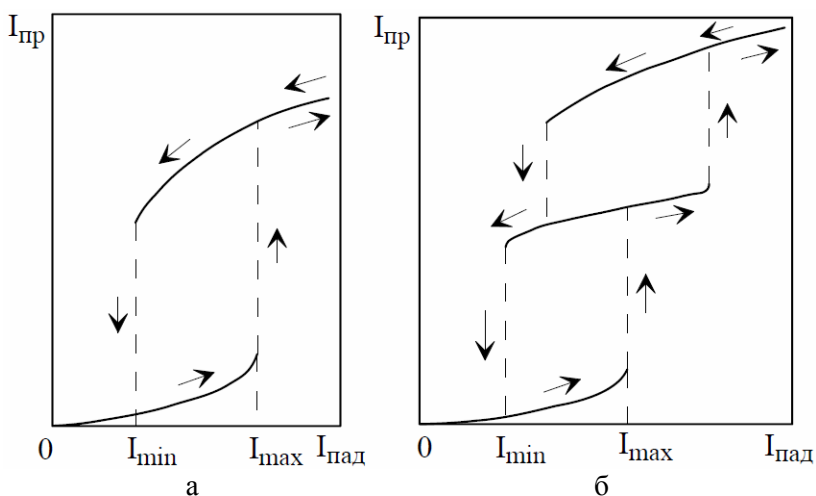


Рис. 2. Зависимости выходного параметра от входного в бистабильной (а) и мультистабильной (б) оптических системах

Какие же физические процессы протекают в рассматриваемой оптической системе, которые могут объяснить такое ее поведение?

Проходящее через нелинейную среду излучение теряет свою интенсивность в каждом последующем сечении по направлению излучения из-за поглощения его средой. В нелинейной среде величина поглощаемого излучения зависит от интенсивности излучения в каждом конкретном сечении, которая уменьшается по направлению излучения из-за поглощения, а значит уменьшается и температура нагрева среды. При росте интенсивности падающего излучения температура в сечениях среды повышается. Изменение температуры среды также влияет на коэффициент поглощения излучения в данном сечении. Все это создает неравномерное поле температур в среде. При этом температура среды изменяется не только в объеме, в котором происходит поглощение излучения, но из-за теплопроводности и в соседних областях. Температурная неоднородность вызывает соответствующие тепловые потоки в нелинейной оптической среде. Тепловые потоки усиливаются, если в оптических средах при определенной температуре протекают еще и фазовые переходы.

На основании вышеизложенного следует, что рассматриваемая термодинамическая система является неравновесной и к ней применимы все общие закономерности эволюции таких систем, представленные в [4, 5]. Согласно этим закономерностям переход неравновесной термодинамической системы из стандартного состояния с меньшим производством энтропии в стационарное состояние с большим производством реализуется, если он допускается физически обоснованными условиями. Таким условием может являться для некоторых систем наличие обратной связи [1]. Прямой и обратный переходы между двумя стационарными состояниями неравновесной термодинамической системы, согласно общим закономерностям эволюции,

демонстрируют гистерезис, а сам процесс перехода происходит посредством нестационарных, хаотически изменяющихся состояний.

Следует отметить, что представленный на рисунке 2, б процесс эволюции неравновесной термодинамической системы, имеющей более двух стационарных состояний (мультистабильной системы), также протекает в соответствии с общими закономерностями эволюции неравновесных термодинамических систем (см. подразд. 1.3.4 работы [5]).

Из всех возможных оптических нелинейных сред далее рассмотрим жидкие кристаллы (ЖК), так как для них удалось провести практически полный комплекс исследований оптической бистабильности, мультистабильности и неустойчивости (хаос) [2, 3]. При этом будем рассматривать проявление оптической бистабильности только для случая, когда сама нелинейная среда изменяет свое состояние под действием лазерного излучения, обладающего достаточной мощностью. При пороговом входном излучении происходит переориентация молекул в ЖК, что вызывает большое нелинейное изменение оптических характеристик. Такую бистабильность, связанную с пороговой переориентацией молекул в ЖК, часто называют истинной внутренней оптической бистабильностью [2].

На одном и том же образце ЖК, варьируя с помощью интенсивности излучения его температурой, наблюдались гистерезисы и были исследованы как стационарные, так и не стационарные (переходные) его режимы (см., например, [2, 3, 6]). Здесь мы не рассматриваем первый тип гистерезиса [2], реализуемый при изменении только состояния светового поля.

Рассмотрим кратко, что из себя представляют ЖК. Жидким кристаллом называют вещество, находящееся в четвертом жидкокристаллическом состоянии отличным от трех давно известных состояний: газообразное, жидкое и твердое. В жидкокристаллическом состоянии веществу одновременно присущи некоторые свойства жидкости и кристалла. Как жидкость оно обладает молекулярной подвижностью (способностью течь и образовывать капли), а как кристалл – структурной упорядоченностью (порядком пространственной ориентации молекул).

Жидкие кристаллы обладают некоторыми характерными только для них свойствами, отсутствующими как у жидкостей, так и твердых тел (см., например, [7, 8]). По условиям перехода вещества в жидкокристаллическое состояние их подразделяют на две группы – термотропные и лиотропные. Термотропные ЖК образуются при нагревании некоторых твердых веществ, а лиотропные – путем смешения двух или более компонентов. Представители обеих групп обладают полиморфизмом, т.е. образующиеся ЖК могут существовать в нескольких жидкокристаллических фазах (мезофазах).

Далее будем рассматривать только термотропные ЖК с стержнеобразной формой молекул. Данные ЖК получают при нагревании твердых кристаллов или при охлаждении соответствующих изотропных жидкостей. В зависимости от порядка ориентации молекул в ЖК, который изменяется с изменением температуры, их подразделяют на три основных

мезофазы: смектическую, нематическую и холестерическую. Смектические мезофазы (смектики) обычно образуются при более низких температурах, чем нематические (нематики).

Отличительной особенностью нематических ЖК является в первую очередь параллельное расположение в них длинных осей молекул. Молекулы могут двигаться в трех направлениях и вращаться вокруг себя, но при этом их оси остаются параллельными во всем объеме ЖК и ориентированными согласно вектора-директора n (см. рис. 3).



Рис. 3. Схематическое изображения молекул в изотропной жидкости (А), в нематическом жидком кристалле (Б), в смектике А (В), в смектике С (Г), в холестерическом жидком кристалле (Д), в твердом теле (Е) (молекулы обозначены точками)

У большинства смектических структур, а их известно более 8, молекулы упакованы в слои. Слои эквидистантны, а длинные оси молекул в слое параллельны. При этом направление этих осей, например, в смектике – А отличается от смектика – С.

В холестериках упаковка молекул в виде слоев, а в слое упаковка молекул напоминает упаковку в нематике. При этом слои закручены друг относительно друга.

В [7, 8] приведено схематическое изображение и детальное описание структурных особенностей более 15 термотропных жидкокристаллических фаз, состоящих из палочкообразных молекул. На рисунке 3 [8] приведено схематическое изображение расположения молекул в мезофазах ЖК. Каждая мезофаза ЖК отличается не только структурой, но и физическими, в том числе оптическими свойствами.

Холестерики часто рассматривают как подкласс нематических жидких кристаллов (НЖК). Локально структуры нематика и холестерика очень похожи, однако на расстояниях структурная ориентация вектора-директора n в холестериках оказывается винтовой (рис. 3, Д). Шаг винтовой молекулярной упаковки в таком закрученном жидком кристалле чувствителен к температуре. Изменение шага сильно изменяет оптические свойства ЖК. В термотропных ЖК холестерики самые высокотемпературные.

От нематической структуры даже простым механическим закручиванием можно перейти к холестерической структуре. При нагревании

образца нематика из-за граничных условий и изменений плотности в образце возникают механические напряжения способные изменить как структуру НЖК, так и ее поверхностную текстуру. Жидкие кристаллы реагируют на разнообразные внешние воздействия – свет, механическое давление, изменения температуры, электрические и магнитные поля.

В зависимости от используемого вещества, при его нагревании от твердого состояния до изотропной жидкости, образующиеся жидкие кристаллы проходят через несколько мезофаз. Количество образующихся мезофаз зависит от выбранного вещества. Порядок появления различных мезофаз, из возможных для данного вещества, зависит от их молекулярной упорядоченности. При повышении температуры последовательно уменьшается степень молекулярной упорядоченности реализуемых мезофаз [8].

На рисунке 4 [7] представлен пример диаграммы дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) для некоторого твердого кристалла, образующего при нагревании мезофазы ЖК. Такие экспериментально полученные диаграммы позволяют определить теплоту перехода между мезофазами, их реализуемое количество и тип. Из рисунка 4 видно, что при увеличении температуры кристалл переходит в смектик – В (См – В) и при этом поглощается значительное количество теплоты практически при одной и той же температуре. Это соответствует переходу первого рода. Другие переходы: смектика – В в смектик – А и смектика – А в изотропную жидкость (ИЖ) также относятся к слабым переходам первого рода. Некоторые переходы между мезофазами, согласно [7], относятся к переходам второго рода, так как они протекают с изменением температуры и имеют очень маленькую теплоту перехода. Из изложенного следует, что структуры ЖК, а значит их физические, в том числе и оптические свойства, изменяются с температурой, а при некоторых ее значениях очень резко.

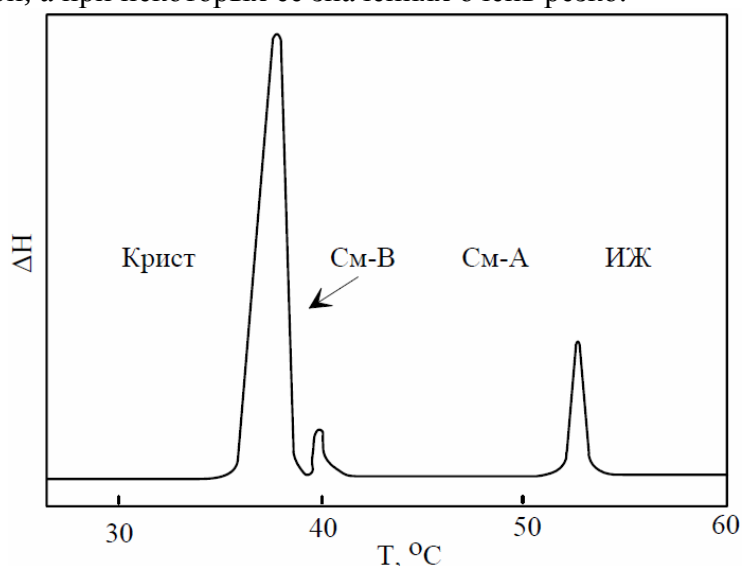


Рис. 4. Изменение энтальпии ΔH от температуры T

На изменение структуры, физических и оптических свойств образца ЖК влияют многие факторы, в частности: граничные условия способные изменить равномерность прогрева образца, пространственная неоднородность среды, ее упругие и другие свойства; неравномерность распределения по поверхности входного излучения; форма, геометрические размеры, текстура образца, всевозможные подложки, в том числе с нанесенными на них пленками [9] и установленными поглотителями [10]; отраженное излучение и некоторые другие факторы [11]. Поэтому динамика развития ориентационных процессов в ЖК может иметь достаточно сложный вид.

Это связано, в том числе и с тем, что интенсивность входного излучения по мере прохождения образца уменьшается в результате поглощения излучения средой. Поэтому первый по направлению распространения излучения слой (домен) в образце будет иметь более высокую температуру и в нем в первую очередь произойдет переориентация длинных осей молекул. В этом случае образуется в ЖК некоторая промежуточная стационарная структура между основными структурами, описанными выше. По мере увеличения интенсивности входного излучения могут быть достигнуты условия переориентации молекул для следующего слоя (домена) и т.д. Все реализующиеся промежуточные структуры ЖК имеют свои физические и оптические свойства и им присущи бистабильность и гистерезис. Некоторые из реализующихся промежуточных структур могут иметь плохо различимый в эксперименте гистерезис.

Переориентировать длинные оси молекул, особенно в поверхностных слоях ЖК, можно и с помощью внешних воздействий, например, электрическим или магнитным полем [12], другим световым излучением, в том числе перенаправлением выходящего из образца ЖК излучения на его вход (обратная связь). При этом может увеличиваться интенсивность суммарного входного излучения в нелинейную среду.

Обоснуем с позиций неравномерной термодинамики процессы, протекающие в ЖК под действием лазерного излучения с образованием бистабильной и мультистабильной оптических систем. Сначала рассмотрим идеальный случай, когда структура рассматриваемого ЖК и соответствующая ей температура, плотность и другие физические параметры изменяются одновременно во всем объеме (однородность по объему). Такая система в [1] называется точечной.

В живой природе многие липиды, белки, нуклеиновые кислоты образуют в воде жидкокристаллические структуры. Например, в работах [5, 13] с позиций неравновесной термодинамики анализируется процесс изменения структуры биологической мембраны клетки, являющейся жидким кристаллом, образованным из липида, белка и воды. Дифференциальной сканирующей калориметрией и другими физическими методами было установлено, что при переходе структуры мембраны клетки из жидкокристаллического состояния в гель-состояние и обратно, достаточно резко изменяется не только структура и энтальпия, но и объем, энтропия и

другие параметры рассматриваемой термодинамической системы. Из полученной методами ДСК зависимости, представленной в [13], видно, что переходы из гель-состояния в промежуточное и далее в жидкокристаллическое состояние являются фазовыми переходами первого рода, которые характеризуются скачкообразным изменением ряда термодинамических параметров и сопровождаются поглощением или выделением теплоты.

Из диаграммы на рисунке 4, полученной также методом ДСК для термотропного ЖК, видно, что переходы из смектика – В в смектик – А и далее смектика – А в изотропную жидкость, также являются фазовыми переходами первого рода, а диаграмма этих переходов, представленная на рис. 4, аналогична такой же диаграмме, представленной в работе [13] для мембраны клетки. Поэтому и зависимости изменения энтропии и производства энтропии от температуры для гель, промежуточного и жидкокристаллического состояний мембраны клетки, представленные в [13], будут аналогичны таким же зависимостям для последовательности переходов смектик – В в смектик – А и далее в изотропную жидкость в термотропном ЖК.

Из этого следует, что общие закономерности изменения состояний неравновесных термодинамических систем, приведенные в [5, 13], применимы не только к биологическим жидкокристаллическим структурам, что показано в [13], но и к термотропным ЖК. В частности, при переходе с увеличением температуры от одного стационарного состояния термодинамической системы в другое стационарное состояние (от одной мезофазы к другой мезофазе) система сначала переходит в состояние (мезофазу), имеющее наименьшее значение производства энтропии из всех возможных состояний, если позволят физически обоснованные условия. Если условия не позволят, то в следующее состояние (мезофазу) имеющее минимальное производство энтропии из всех оставшихся состояний, в которое она может перейти. Согласно этим общим закономерностям при переходах резко, скачкообразно изменяются как структуры, соответствующие состояниям, так термодинамические и другие параметры, в том числе и оптические. Процесс перехода из одного состояния в другое происходит посредством нестационарных, хаотически изменяющихся состояний.

На рисунке 2 представлена зависимость изменения выходной интенсивности излучения $I_{\text{пр}}$ от входной $I_{\text{пад}}$ для идеального случая, когда часть входного излучения по мере прохождения образца поглощается и равномерно нагревает всю среду до одной и той же температуры T_{max} , соответствующей интенсивности излучения I_{max} . При достижении температуры среды критического значения T_{max} происходит скачкообразный переход в ЖК от одной мезофазы к другой. В процессе этого перехода происходит полная переориентация молекул в ЖК, что приводит к резкому изменению его оптических свойств, а соответственно и интенсивности выходного излучения $I_{\text{пр}}$. Так как процесс перехода протекает посредством

нестандартных состояний, то интенсивность выходного излучения в процессе перехода будет резко изменяться, демонстрируя колебания и хаос как и в любой другой неравновесной термодинамической системе. Если после перехода продолжить увеличение интенсивности входного излучения, то интенсивность выходного излучения продолжит монотонно увеличиваться, но уже по другой кривой, что отражено на рисунке 2. При дальнейшем уменьшении интенсивности входного излучения процесс протекает в обратном направлении, при этом переход между состояниями (мезофазами) происходит при более низкой температуре (при интенсивности излучения $I_{\min}$ на рис. 2), при этом прямой и обратный переходы демонстрируют гистерезис, что соответствует общим закономерностям эволюции неравновесных термодинамических систем.

Если в термодинамической системе может реализоваться более двух выходных стационарных состояний, при изменении интенсивности входного излучения (управляющего параметра), то говорят о мультистабильности системы (см. рис. 2, б). Порядок мультистабильности определяется количеством гистерезисов, которые реализуются между прямым и обратным переходами.

Отличие термодинамических процессов, протекающих в биологической мембране клетки и термотропном ЖК, состоит в том, что мембрана является частью клетки и ее температура изменяется одновременно по всему объему.

Температура термотропного ЖК в рассматриваемом случае изменяется по объему неравномерно из-за уменьшения интенсивности проходящего через него излучения в силу поглощения части этого излучения предыдущими слоями (доменами). Рассмотренный выше идеальный случай применим для сверхтонких образцов ЖК, обогреваемых равномерно тепловыми потоками по всей поверхности.

В реальных условиях в термотропном ЖК, по мере увеличения интенсивного входного излучения, температуру фазового перехода достигает вначале первый слой (домен) по направлению излучения и в нем происходит переориентация молекул (вектора-директора), соответствующая новой мезофазе с более высокой температурой. Образуется первая промежуточная стационарная структура со своими оптическими свойствами. При дальнейшем увеличении интенсивности излучения второй слой (домен) достигает температуры фазового перехода. Образуется вторая промежуточная стационарная структура. Количество промежуточных структур зависит от всех факторов, влияющих на неодновременную переориентацию осей молекул в объеме ЖК, и в первую очередь от неоднородности температурного поля. Увеличение количества квазистационарных структур должно приводить к увеличению порядка мультистабильности.

Так, например, в работе [3] описан эксперимент [6], в котором в интерферометре Фабри-Перо, заполненном нематическим жидким кристаллом толщиной 83 мкм, наблюдали 5 и более порядков мультистабильности и регенеративных пульсаций (см. рис. 5). Из рисунка

видно, что в этом случае переходы между стационарными состояниями более растянуты по сравнению с рисунком 2, б, так как они реализуются между промежуточными состояниями.

Нематический ЖК имеет только одну структуру с расположением молекул, представленным на рисунке 3, Б, а эксперимент (рис. 5) указывает на то, что их должно быть значительно больше. В процессе увеличения интенсивности излучения происходит неравномерный прогрев облучаемой среды и в ней возникают термические напряжения. Можно предположить, что при достижении в процессе нагрева НЖК некоторого фиксированного значения тензора напряжений в нем происходит переориентация осей молекул (директора), уравнивающая силы упругости. Устанавливается новое стационарное состояние термодинамической системы со своими оптическими свойствами. Если после перехода в новое состояние уменьшать интенсивность излучения, то обратный переход реализуется через гистерезис. Если продолжить увеличивать интенсивность излучения, тогда при достижении в НЖК другого критического значения тензора напряжения реализуется новое стационарное состояние с другой ориентацией осей молекул в НЖК. И так далее, пока оси молекул НЖК не примут последнее для них положение или не переориентируются в положение, например, соответствующее холестерически-нематическому ЖК (см. рис. 3, Д).

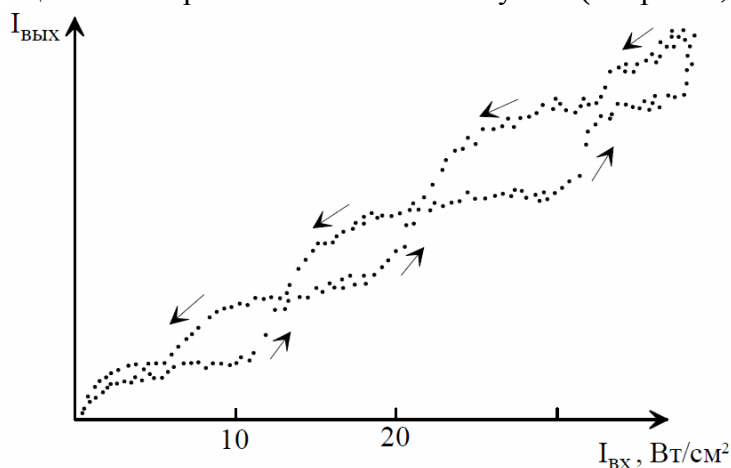


Рис. 5. Зависимость выходной интенсивности изменения от входной в условиях эксперимента [6]

Это аналогично представленному в работе [12] процессу перестроения ориентации осей молекул нематика в изменяющихся магнитных и электрических полях с достижением минимума свободной энергии. В этой же работе представлены схемы некоторых аномальных ориентаций осей молекул в НЖК. В результате переориентации молекул в поле интенсивного излучения нелинейно изменяются оптические характеристики.

На основании изложенного следует, что реализация оптической бистабильности, мультистабильности и пульсаций при переходах из одного стационарного состояния к другому в ЖК объясняются основными

положениями эволюции неравновесных термодинамических систем, представленными в [4, 5].

Список литературы

1. Розанов Н.Н. Оптическая бистабильность и гистерезис в распределенных нелинейных системах. – М.: Наука, 1997. – 333 с.
2. Аракелян С.М. Оптическая бистабильность, мультистабильность и неустойчивости в жидких кристаллах // Успехи физических наук. – 1987. – Т. 153, №4. – С. 479-618.
3. Гиббс Х. Оптическая бистабильность. Управление светом с помощью света: пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 520 с.
4. Tsegelskiy V.G. Thermodynamic analysis of the impact of world energy and other aspects of human activity on the approach of the ice age on Earth // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2018. – №9-1. – С. 5-20.
5. Цегельский В.Г. Эволюция далёких от равновесия термодинамических систем в примерах. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 164 с.
6. Cheung Mi-Mee, Durbin S.D., Shen Y.R, Optical bistability and self-oscillation of a nonlinear Fabry–Perot interferometer filled with a nematic-liquid-crystal film // Optics Letter. 1983. vol. 8, iss. 1, pp. 39-41. DOI: 10.1364/ol.8.000039.
7. Блинов Л.М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. – М.: Книжный дом «Либроком», 2013. – 480 с.
8. Браун Г., Уолкен Дж. Жидкие кристаллы и биологические структуры: пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 198 с.
9. Алавердян Р.Б., Аракелян С.М., Казарян Р.А., Казарян В.Р., Кечиянц А.М., Чилингарян Ю.С. Светоиндуцированные ориентационные эффекты в системе фотополупроводник–нематический жидкий кристалл // Журнал технической физики. – 1986. – Т 56, №8. – С. 1617-1621.
10. Зельдович Б.Я., Табиров Н.В. Оптическая бистабильность на ориентационной нелинейности жидких кристаллов // Квантовая электроника. 1984. – Т. 11, №12. – С. 2419-2426.
11. Зельдович Б.Я., Табиров Н.В. Ориентационная оптическая нелинейность жидких кристаллов // Успехи физических наук. – 1985. – Т. 147, №4. – С. 633-674.
12. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. – М.: Наука, 1978. – 384 с.
13. Tsegelskiy V.G. Hysteresis way of biological systems evolution from the perspective of non-equilibrium thermodynamics // Journal of Advanced Research in Natural Science. – 2020. – №10. – С. 40-58. – DOI: 10.26160/2572-4347-2020-10-40-58.

References

1. Rozanov N.N. Optical bistability and hysteresis in distributed nonlinear systems. – M.: Science, 1997. – 333 p.
2. Arakelian S.M. Optical bistability, multistability, and instabilities in liquid crystals // Achievements of physical sciences. 1987, vol. 153, no. 4, pp. 479-618.
3. Gibbs H. Optical bistability. Controlling light with light: trans. from English. – M.: World, 1988. – 520 p.
4. Tsegelskiy V.G. Thermodynamic analysis of the impact of world energy and other aspects of human activity on the approach of the ice age on Earth // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2018, iss, 9-1, pp. 5-20.

5. Tsegelskiy V.G. Evolution of far-from-equilibrium thermodynamic systems with examples. – M.: Bauman Moscow State Technical University, 2021. –164 p.
6. Cheung Mi-Mee, Durbin S.D., Shen Y.R, Optical bistability and self-oscillation of a nonlinear Fabry–Perot interferometer filled with a nematic-liquid-crystal film // Optics Letter. 1983. vol. 8, iss. 1, pp. 39-41. DOI: 10.1364/ol.8.000039.
7. Blinov L. M. Liquid crystals: Structure and properties. – M.: Librocom Book House, 2013. – 480 p.
8. Brown G., Walken J. Liquid crystals and biological structures: trans. from English. – M.: World, 1982. – 198 p.
9. Alaverdyan R.B., Arakelyan S.M., Kazaryan R.A., Kazaryan V.R., Kechiyants A.M., Chilingaryan Yu.S., Light-induced orientational effects in the photo-semiconductor–nematic liquid crystal system // Journal of Technical Physics. 1986, vol. 56, no. 8, pp. 1617-1621.
10. Zeldovich B.Ya., Tabiryan N.V. Optical bistability on orientational nonlinearity of liquid crystals // Quantum Electronics. 1984, vol. 11, no. 12, pp. 2419-2426.
11. Zeldovich B.Ya., Tabiryan N.V. Orientational optical nonlinearity of liquid crystals // Achievements of physical sciences. 1985, vol. 147, no. 4, pp. 633-674.
12. Blinov L.M. Electro– and magnetooptics of liquid crystals. – M.: Science, 1978. – 384 p.
13. Tsegelskiy V.G. Hysteresis way of biological systems evolution from the perspective of non-equilibrium thermodynamics // Journal of Advanced Research in Natural Science. 2020, iss. 10, pp. 40-58. DOI: 10.26160/2572-4347-2020-10-40-58.

Цегельский Валерий Григорьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник	Tsegelskiy Valery Grigorievich – doctor of technical sciences, chief scientist
user46@ro.ru	

Received 03.03.2025