



ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

ПАХАЛОВ Валерий Борисович

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ЛАЗЕРНОГО И РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ
ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКИХ ТОЧЕК**

Специальность 01.04.03-

радиофизика, включая квантовую радиофизику

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА · 1977

Работа выполнена на кафедре общей физики для мехмата
физического факультета МГУ

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор С.А.Ахманов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
А.Н.Малахов
кандидат физико-математических наук
В.Н.Руденко

Ведущее предприятие: Институт физики АН УССР.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1977г.
на заседании специализированного Совета № I /К-13/49/ отде-
ления радиофизики в Московском государственном университете.
/ Адрес - П7234, Москва В-234, физический факультет МГУ,
Учёному секретарю специализированного Совета № I отделения
радиофизики /.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического
факультета МГУ.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1977 г.

Учёный секретарь специализированного
Совета № I отделения радиофизики в МГУ
кандидат физико-математических наук,
доцент -

/ Е.Р.Мустель /



Актуальность работы.

В настоящее время большой интерес представляет исследова-
ние фазовых переходов в равновесных и особенно в неравновес-
ных физических системах. Последние могут образоваться, в част-
ности, под действием лазерного излучения. Однако и само воз-
никновение лазерной генерации является примером фазового пере-
хода в неравновесной системе.

Самовозбуждение лазера в терминах фазовых переходов теоре-
тически изучалось, например, в работах / I-4 /, где рассмотре-
на временная эволюция излучения. В этом смысле поведение лазе-
ра аналогично поведению автоколебательной системы с сосредото-
ченными постоянными. Поэтому принципиальным является вопрос о
формировании пространственной когерентности лазерного излуче-
ния при прохождении через порог генерации. Этот вопрос прак-
тически исследован не был.

Помимо принципиального интереса формирование пространст-
венной когерентности представляет значительный интерес для
идентификации лазерного действия. Аналогией самовозбуждения с
фазовым переходом в равновесных системах можно воспользо-
ваться для классификации режимов работы лазера, а аппарат, разви-
тый в теории фазовых переходов, применить для анализа лазер-
ной генерации вблизи порога самовозбуждения.

Рассеяние когерентного лазерного излучения физическими
системами позволяет исследовать их свойства и в том числе фа-
зовые переходы. Интересным объектом является жидкий кристалл.
Изучение поведения этих кристаллов вблизи точек фазовых пере-
ходов позволяет расширить представление о физике происходящих
в них явлений.

1-1767

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование процесса формирования пространственной когерентности излучения He-Ne лазера при прохождении через порог самовозбуждения и исследование временной когерентности света, рассеянного в жидких кристаллах в режиме электрогидродинамического рассеяния и вблизи критических точек фазового перехода.

В частности, в работе:

1. Измерены критические индексы для радиуса корреляции излучения и интенсивности при переходе лазера через порог генерации.
2. Экспериментально исследовано поведение некогерентной составляющей светового поля и степени пространственной когерентности излучения при прохождении через порог генерации в He-Ne лазере с нелинейно поглощающей ячейкой и без ячейки, представляющих собой соответственно аналог фазового перехода первого и второго рода.
3. Теоретически получены выражения для радиуса корреляции и интенсивности лазерного излучения ниже и выше порога генерации с привлечением феноменологической теории фазовых переходов.
4. Создана установка для корреляционной спектроскопии / включающая измерения временной корреляционной функции интенсивности/ и измерены времена корреляции флуктуаций интенсивности лазерного излучения, рассеянного в жидком кристалле МБА в режиме электрогидродинамического рассеяния.

Научное и практическое значение результатов.

Полученные в работе результаты дополняют существующие представления о статистических свойствах лазерного излучения при проходе через порог самовозбуждения. Особое внимание уделено

пространственной когерентности, которая не была исследована в области порога.

Выполненные измерения позволили впервые количественно установить аналогию между процессом формирования когерентности лазерного излучения и фазовым переходом. Эта аналогия имеет большое значение как для изучения физики лазеров, так и в общезначимом аспекте. В частности, она позволяет идентифицировать лазерное действие по динамике пространственной когерентности.

Созданная установка для корреляционной спектроскопии позволила исследовать временную когерентность излучения рассеянного жидким кристаллом вблизи точек фазовых переходов в режиме электрогидродинамического рассеяния. Это представляет интерес в физике жидких кристаллов и в их практических применениях, например, в оптоэлектронике.

x x x

В диссертации подытожены результаты исследований, выполненных в течение 1973 - 1976 гг.

Как указывалось выше, к началу работы над диссертацией имелось лишь несколько теоретических работ, в которых обсуждалась аналогия между самовозбуждением лазера и фазовым переходом. В литературе по жидким кристаллам не было сведений о временах корреляции в режиме электрогидродинамического рассеяния при изменении температуры.

Подробное сравнение полученных нами результатов с данными других работ изложено в основном тексте диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Во введении дан обзор теоретических и экспериментальных

работ по рассмотренным в диссертации вопросам и кратко изложено содержание работы.

В первой главе изложена теория пространственных флуктуаций в неравновесных системах / в лазерах /, базирующаяся на термодинамическом и волновом подходах.

При термодинамическом рассмотрении использовано следующее обстоятельство. Хорошо известно, что процесс лазерной генерации можно описывать уравнением Ван дер Поля, из которого следует уравнение первого порядка для медленно меняющейся комплексной амплитуды A лазера. С другой стороны, величина A как параметр порядка согласно неравновесной термодинамике удовлетворяет уравнению

$$\frac{dA}{dt} = -\frac{dg}{dA^*} \quad /1/$$

Сопоставление указанных уравнений позволяет найти плотность квазисвободной энергии: $g = g(|A|^2)$. Добавление в квазисвободную энергию g поперечного градиента $|\nabla_{\perp} A|^2$ позволяет учесть пространственные флуктуации в лазерах. В зависимости от знака коэффициента при $|A|^4$ в разложении g по степеням $|A|^2$, имеет место фазовый переход первого или второго рода. Показано, что фазовый переход второго рода соответствует переходу через порог генерации в обычных лазерах, а первого рода - в лазерах с нелинейно поглощающей ячейкой.

Получены выражения для радиуса корреляции $\zeta_{кор}$ и интенсивности излучения I в случае фазовых переходов первого и второго рода. В случае фазового перехода второго рода ниже порога генерации

$$\zeta_{кор} \sim \varepsilon^{-\alpha}; \quad I \sim \varepsilon^{-\beta} \quad /2/$$

где параметр $\varepsilon = (\gamma - \gamma_{пор}) / \gamma_{пор}$ характеризует близость к порогу

генерации, $\gamma_{пор}$ - пороговый коэффициент усиления, а α и β критические показатели: $\alpha = 0,5$ и $\beta = 1,0$.

Эти данные сравниваются с результатами волновой теории - анализом усиления плоских волн в резонаторе с активной средой при многократном их отражении от зеркал. Обе теории дают одинаковую зависимость радиуса корреляции и интенсивности лазерного излучения от параметра усиления при приближении к порогу генерации.

Вторая глава посвящена методам исследования когерентных свойств оптического излучения примененным в работе.

Значительное внимание в этой главе уделено поляризационному интерферометру / ПИ /, используемому для исследования пространственной когерентности. Развита теория ПИ; показана возможность измерения с его помощью радиуса кривизны волнового фронта световых пучков. Найдена ограниченная дифракционными эффектами предельная разрешающая способность ПИ при измерении радиуса корреляции

$$\zeta_{кор}^{прег} = \sqrt{\frac{2}{\xi}} \frac{L}{\kappa a} \quad /3/$$

где L - расстояние от источника излучения до плоскости измерения, a - радиус исходного пучка, κ - волновое число, ξ - коэффициент уширения начального радиуса корреляции, задаваемый требуемой точностью измерений.

Проверка теории осуществлена с помощью измерения пространственной когерентности эталонного светового пучка, радиус корреляции которого варьировался с помощью вращающегося матового диска. В условиях геометрии нашего эксперимента предельный радиус корреляции $\zeta_{кор}^{прег} = 10 + 20$ мкм. С помощью ПИ выполнены также измерения радиуса кривизны волнового фронта лазерных пучков.
2-1767

Особое внимание было обращено на возможность измерения слабых световых потоков. Для этой цели нами была создана установка, в которой используется система регистрации с высокой чувствительностью / ФЭУ с охлаждением в режиме счёта квантов, темновое число фотоэлектронов 3 имп/сек /, ПИ с высоким разрешением и автоматизирован процесс измерений.

В этой же главе излагается метод измерения временной корреляционной функции интенсивности с применением 1024-канального анализатора импульсов, работающего в мультишкалярном режиме / метод корреляционной спектроскопии /.

Сущность метода заключается в преобразовании флуктуирующего светового потока в последовательность фотоэлектронных импульсов и в их обработке в блоке привязки и многоканальном анализаторе. Плотность распределения вероятностей регистрации импульсов по каналам пропорциональна временной корреляционной функции интенсивности. Время корреляции определяется по уровню e^{-1} .

Для проверки работы созданной установки измерены времена корреляции / ширины линий / излучения, рассеянного вращающимся матовым диском и результаты сопоставлены с теорией. Метод корреляционной спектроскопии использован в гл.У для изучения жидких кристаллов.

Здесь же описан метод пространственной интерферометрии динамических систем, заключающийся в изучении изменения пространственной корреляционной функции поля при прохождении излучения через флуктуирующую среду. Показано, что имеет место зависимость когерентности рассеянного света от соотношения между временем измерения $t_{изм}$ и периодом флуктуаций T . Величина T определяется из полученной кривой изменения минимума интер-

ференционной картины, измеренной за различные промежутки времени с общим началом отсчёта. Этот метод обладает высокой чувствительностью. С его помощью можно измерять ширины линий до 0,1 герц.

В третьей главе приведены результаты исследования изменения когерентных свойств излучения He-Ne лазера / $\lambda = 0,63$ мкм / при прохождении через порог генерации.

Как и при исследовании явлений в других физических системах вблизи точки фазового перехода, одной из главных проблем здесь является возможность стабилизации системы при значениях параметров весьма близких к порогу. Нами использовано два варианта прохождения через порог генерации лазера: 1. сканирование выходного зеркала лазера без поглощающей ячейки; 2. изменение добротности резонатора, приводящее к смещению области гистерезиса в лазере с поглощающей ячейкой.

В §1 описан эксперимент с применением первого варианта прохождения через порог генерации. Лазер работал в режиме генерации одной продольной моды. Выходное зеркало, укрепленное на пьезокерамическом столбике, сканировалось пилообразным напряжением. При этом частота излучения сдвигалась относительно центра доплеровского контура усиления активной среды, что приводило к изменению интенсивности излучения. Нами была измерена интенсивность излучения при переходе через порог самовозбуждения.

Ниже порога рост интенсивности подчиняется закону /2/, где экспериментально полученное значение критического показателя $\beta = 1,1$. В надпороговом режиме средняя интенсивность линейно зависит от параметра $\varepsilon / \beta = -1$. Такое поведение средней интенсивности хорошо согласуется с теорией фазовых переходов второго рода.

В §2 приведены результаты измерений некогерентной составляющей интенсивности в лазерном пучке и степени пространственной когерентности при переходе через порог генерации / рис.1 /. От эксперимента описанного в §1 отличие здесь в том, что дополнительно используется ПИ, с помощью которого производится оптическое вычитание когерентной составляющей лазерного излучения и задаётся расстояние S_0 между исследуемыми точками сечения пучка.

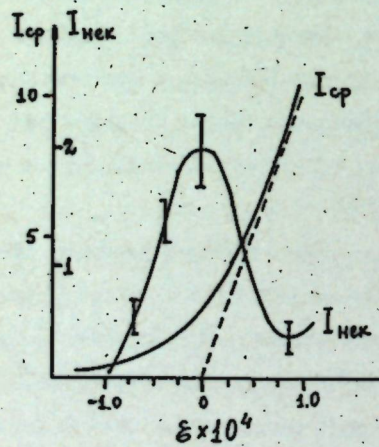


Рис.1

На приведённом рис.1 показана типичная зависимость некогерентной составляющей интенсивности $I_{нек}$ и средней интенсивности $I_{ср}$ при прохождении через порог самовозбуждения. Такое поведение некогерентной составляющей, означающее рост пространственных флуктуаций в окрестности порога, характерно для фазовых переходов.

Знание поведения средней интенсивности $I_{ср}$ и некогерентной составляющей $I_{нек}$ при переходе через порог генерации

позволило восстановить по формуле

$$|\chi(s_0, \epsilon)| = 1 - I_{нек}(s_0, \epsilon) / I_{ср}(s_0, \epsilon) \quad /4/$$

ход степени пространственной когерентности $\chi(s_0, \epsilon)$ в функции параметра ϵ .

В последнем параграфе этой главы полученные результаты обсуждаются с точки зрения аналогии с фазовыми переходами.

Четвёртая глава посвящена измерению поперечного радиуса корреляции He-Ne лазера с поглощающей Ne ячейкой. Главное внимание в ней уделено изучению формирования пространственной когерентности при приближении к порогу генерации снизу.

Здесь описаны эксперименты по измерению нормированной поперечной корреляционной функции $|\chi(s)|$, в режиме ниже порога при разных значениях параметра $\eta = (I_{раб} - I_{пор}) / I_{раб}$, где $I_{раб}$ - рабочий ток ячейки, поддерживаемый постоянным, $I_{пор}$ - пороговый ток, при котором возникает генерация / меняется при изменении добротности резонатора /.

По экспериментальным значениям $|\chi(s)|$ находился радиус корреляции $r_{кор}$ / рис.2 /. Обработка результатов дала следующие значения критических показателей:

$$\mathcal{L} = 0,49 \pm 0,05 ; \quad \beta = 0,9 \pm 0,2 .$$

Условия лазерной генерации в этих измерениях менялись изменением добротности резонатора, приводящим к сдвигу области гистерезиса, причём с увеличением потерь область гистерезиса сужается и пропадают скачки интенсивности. Это аналогично критической точке фазового перехода, в которой происходит переход от второго рода к первому.

В конце главы исследовано поведение некогерентной составляющей интенсивности при частотном гистерезисе. Эксперимент

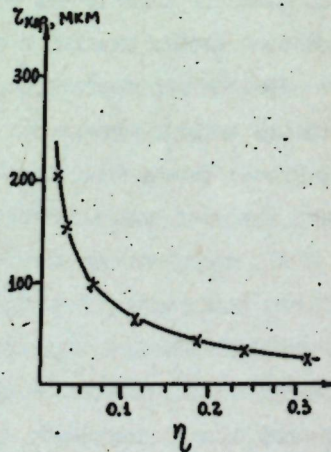


Рис.2

аналогичен описанному в §2 гл. III. Измерения показали, что величина некогерентной составляющей растёт при приближении к точке срыва генерации, выше точки зажигания лазера она в некоторых случаях остаётся постоянной при изменении генерируемой частоты.

Пятая глава посвящена корреляционной спектроскопии и динамической интерферометрии рассеянного лазерного излучения.

В §1 техника корреляционной спектроскопии, описанная в гл. II, применена для измерений времени корреляции лазерного излучения, рассеянного в жидком кристалле.

При комнатной температуре получена зависимость времени корреляции от напряжения приложенного к ячейке / режим электрогидродинамического рассеяния /, при разных толщинах ячейки. Время корреляции хорошо описывается формулой

$$\tau_{\text{кор}} = K / (V^2 - V_{\text{пор}}^2) \quad /5/$$

где V - величина приложенного напряжения, $V_{\text{пор}}$ - пороговое напряжение, величина которого не зависит от толщины ячейки, K - коэффициент, зависящий от толщины ячейки. Для определения зависимости K от толщины сделаны измерения в клиновидной ячейке.

В режиме выше порога электрогидродинамического рассеяния / $V = 15,7$ в. / измерена зависимость времени корреляции от температуры с применением созданной системы термостабилизации. Измерения сделаны в областях перехода нематическая фаза - твёрдая фаза / Н - Т / и нематическая фаза - изотропная фаза / Н-И /, а также во всей промежуточной области. Время корреляции в точках перехода растёт, причём при переходе Н - И при изменении температуры на $0,15^\circ\text{C}$ время корреляции растёт от 25 до 50 мсек, а при переходе Н - Т рост значительно медленней - при измене -

нии температуры на 4°C изменение времени от 20 до 48 мсек.

Описанная техника позволяет измерять времена корреляции до сотен миллисекунд, возможность измерения больших времён ограничивается максимальным временем развёртки анализатора и сильным ростом общего времени измерения. Эти трудности можно обойти, применяя так называемую методику динамической интерферометрии / §3 гл. II /.

В §2 приводятся результаты эксперимента по применению этого метода к измерению времён корреляции / турбулизации / в жидком кристалле МББА, помещённом во внешнее электрическое поле. Эти измерения проводились при комнатной температуре. Регистрация интерференционной картины производилась за времена от 1 мсек до 100 сек. Определена зависимость времён корреляции от напряжения приложенного к ячейке. Эти измерения в области порога электрогидродинамического рассеяния / большие времена корреляции / дополняют измерения, описанные в §1.

Как было изложено в гл. III и IV, некогерентная составляющая лазерного излучения определялась по средней интенсивности в минимуме интерференционной картины при определённом времени усреднения. При наличии рассеивающей среды на пути луча значение некогерентной составляющей будет зависеть от коэффициента рассеяния среды. В §3 описан эксперимент по коллинеарному релеевскому рассеянию в нитробензоле при временах усреднения больше времени корреляции. Измеренная величина коэффициента рассеяния под нулевым углом, согласуется с измерением под углом 90° и с литературными данными по рассеянию в нитробензоле, также под углом 90° .

В заключение формулируем основные результаты, полученные в работе.

1. Создана высокочувствительная установка для исследования когерентных свойств лазерного и рассеянного излучений при прохождении через критическую точку.

2. С помощью созданной установки впервые экспериментально измерены критические индексы для радиуса корреляции и интенсивности. Показано, что для He-Ne лазера эти критические индексы аналогичны критическим индексам для фазовых переходов второго рода.

3. Создана система, позволяющая измерять некогерентную составляющую излучения в обычном He-Ne лазере и с нелинейно поглощающей ячейкой при прохождении через порог генерации. По значениям интенсивности и некогерентной составляющей определена степень пространственной когерентности.

4. На основе термодинамического и волнового подходов исследованы пространственные флуктуации в лазерах. Получены выражения для радиуса корреляции и интенсивности в зависимости от параметра, определяющего степень приближения к порогу самовозбуждения лазера.

5. Создана установка с многоканальным анализатором импульсов для корреляционной спектроскопии рассеянного излучения.

6. Реализован способ измерения времени корреляции рассеянного излучения по флуктуациям минимума интерференционной картины, образованной на выходе поляризационного интерферометра, при определенном времени усреднения.

7. С помощью метода динамической интерферометрии и корреляционной техники измерены времена корреляции в жидком кристалле МББА в зависимости от приближения к порогу электрогидродинами-

ческого рассеяния.

8. В жидком кристалле МББА с помощью техники корреляционной спектроскопии впервые наблюдалась зависимость времени корреляции от температуры в режиме электрогидродинамического рассеяния в области точек фазового перехода нематической фазы в изотропную и нематической в твердую.

Основные материалы работы докладывались на II Всесоюзном симпозиуме по физике газовых лазеров / г.Новосибирск, 1975г./, на VIII Всесоюзной конференции по когерентной и нелинейной оптике / г. Тбилиси, 1976 г./, на пленарном заседании IV Всесоюзной конференции по физическим основам передачи информации лазерным излучением / г. Киев, 1976 г./, на Ломоносовских чтениях / г. Москва, МГУ, 1976г./ и изложены в следующих статьях и тезисах докладов:

1. С.М.Аракелян, В.Б.Пахалов, А.С.Чиркин. Квантовая электроника, 2, 1205, 1975.

2. С.М.Аракелян, В.Б.Пахалов, А.С.Чиркин. Оптика и спектроскопия, 40, 1055, 1976.

3. В.Б.Пахалов. Приборы и техника эксперимента, 4, 264, 1976.

4. С.А.Ахманов, В.Б.Пахалов, А.С.Чиркин. Письма в ЖЭТФ, 23, 391, 1976.

5. С.М.Аракелян, С.А.Ахманов, В.Б.Пахалов, А.С.Чиркин. Предельная пространственная когерентность газовых лазеров и её использование в физических экспериментах. Сборник тезисов II Всесоюзного симпозиума по физике газовых лазеров, г.Новосибирск, 1975, стр.76.

6. В.Б.Пахалов, А.С.Чиркин. Формирование пространственной когерентности лазерного излучения при прохождении порога генерации. Тезисы докладов VIII Всесоюзной конференции по когерент-

ной и нелинейной оптике, г. Тбилиси, 2, 1976, стр.162.

7. В.Б.Пахалов. Поляризационный интерферометр: измерение кривизны фазового фронта и предельное разрешение при измерении радиуса корреляции. Тезисы докладов IУ Всесоюзной конференции по физическим основам передачи информации лазерным излучением, г. Киев, 1976, стр.168.

8. В.Б.Пахалов, В.Г.Тункин, А.С.Чиркин, Ф.М.Асубов. Деполяризация излучения лазера с бростеровскими окнами. Там же, стр.167.

Л и т е р а т у р а

1. В.Н.Лисицын, В.П.Чеботаев. Письма в ЖЭТФ, 7, 3, 1968.
2. А.П.Казанцев, С.Г.Раутиан, Г.И.Сурдутович. ЖЭТФ, 54, 1409, 1968.
3. R. Graham, H. Haken. Z. Physik, 237, 31, 1970.
4. V. Degiorgio, M. Scully. Phys. Rev., A2, 1170, 1970.

Подл. и печати 21/IV-77г. Л-46139 Ф.
 Физ. п. л. 1,0 Уч.-изд. л. 0,6 Заказ 1767
 Тираж 100

Изд-во Московского университета, Москва, К-9,
 ул. Герцена, 5/7.

Типография Изд-ва МГУ. Москва, Ленгоры