

5241

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи

УДК

535.33:621.373.8.

БАРАНОВА Надежда Борисовна

**Эффекты асимметрии во взаимодействии
излучения с веществом**

Специальность 01.04.21-Лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва 1994

Работа выполнена в Вузовско-академической лаборатории нелинейной оптики Института электрофизики Уральского отделения Российской Академии Наук и Челябинского Государственного Технического Университета.

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
профессор В. П. Крайнов
доктор физико-математических наук,
профессор М. В. Федоров
Член-корреспондент РАН
А. М. Шалагин

Ведущая организация: Институт Проблем механики РАН, Москва.

Защита состоится "31" м а р т а 1994 г. в 15⁰⁰ час. на заседании специализированного Совета N 3 Института Общей физики РАН по адресу: 117942, г. Москва, В-333, ул. Вавилова 38, Институт Общей Физики РАН.

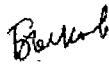
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Общей Физики РАН.

Автореферат разослан "16" февраля 1994 г.

Ученый секретарь

специализированного Совета N 3

доктор физико-математических наук



В. П. Быков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Лазерное излучение, частично преобразованное во вторую гармонику, представляет собой пример световой волны, как ежедневно используемой в лабораторной практике и обладающей полярной асимметрией. Органические молекулы биологического происхождения, состоящие из сферически-симметричных атомов, как правило, обладают право-лево-несимметричной структурой взаимного расположения составных частей. При зондировании молекул светом эта несимметрия проявляется в виде оптической активности и других эффектах пространственной дисперсии. Из сказанного становится ясным, что исследование эффектов асимметрии во взаимодействии света с веществом является актуальной задачей.

В связи с этим целью настоящей диссертации является теоретическое исследование эффектов взаимодействия света с веществом, возникающих при нарушении той или другой симметрии. Это может быть либо асимметрия среды (в частности, право-левая асимметрия молекул изотропной жидкости или газа, или полярная асимметрия кристалла), либо асимметрия светового поля.

Научная новизна исследований, проведенных в диссертационной работе.

1. Показано, что в полярно-асимметричном световом поле на свободный электрон действует сила, которая может быть представлена в виде градиента эффективного потенциала, кубичного по полям.
2. Показано, что двукратное рассеяние электромагнитных волн на неоднородностях скалярной и тензорной компонент диэлектрической проницаемости (распределенно-дипольный подход к учету пространственной дисперсии) приводит к качественно новым эффектам: двупреломлению и гиротронии в рентгеновском диапазоне за счет почти Брэгговских процессов; к зависимости фазовой скорости σ -волны в нематике от направления распространения.
3. Предсказана и обнаружена полярная асимметрия вылета электронов при ионизации полярно-асимметричным световым полем.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Ламерное излучение, распространяющееся совместно с его второй гармоникой, обладает полярной асимметрией: при $\langle E(t) \rangle = 0$ средний куб поля отличен от нуля, $\langle E^3(t) \rangle \neq 0$. Предсказана и в инициированных автором экспериментах обнаружена полярная асимметрия вылетевших при фотоионизации электронов, пропорциональ-

ная (E^3) и обусловленная новым видом интерференции в оптике — между одно- и двухфотонными процессами ионизации.

2. Фундаментальное явление электродинамики движущихся сред, а именно, вращательный эффект Физо, т. е. увлечение поляризации света локально изотропной вращающейся средой, качественно отличается от поступательного эффекта Физо тем, что в первом случае меняются свойства самой среды из-за действия силы Кориолиса.
3. Предсказан ряд эффектов воздействия внешних полей на оптические свойства среды и дана их классификация с точки зрения пространственной и временной симметрии. Один из них — электрический (токовый) аналог Фарадея — обнаружен впоследствии экспериментально в работе других авторов¹.

Практическая ценность работы.

1. Сформулированы представления о моделях механизмов многочастотной записи голограмм квадратичной поляризуемости. Исследование этих голограмм перспективно с точки зрения создания дешевых и эффективных удвоителей частоты лазерного излучения.

¹Л. Е. Воробьев, Е. Л. Изченко, Г. Е. Пикус, И. И. Фарбштейн, В. А. Шамгузи, А. В. Штурбия, "Оптическая активность в тессуре, индуцированная током" *Письма в ЖЭТФ*, 20, 485-489 (1979).

2. В связи с теми же задачами выдвинута идея эффективной адиабатической трансформации лазерной накачки во вторую гармонику.
3. Схемы формирования острофокусированных лазерных пакетов, предложенные в диссертации, могут служить для ускорения заряженных частиц и для преобразования энергии в рентгеновское излучение.
4. Явление "искаженного пропускания" обыкновенной волны через немагнитический жидкий кристалл может быть использовано для передачи изображения сквозь толстые слои мутного нematica.

Объем работы. Диссертация изложена на 199 стр., включая 30 рисунков, 3 таблицы и 9 страниц библиографии, содержащей 160 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Глава 1 посвящена эффектам право-левой асимметрии. Источником этих эффектов может стать право-левая асимметрия самих молекул для случая изотропной жидкости, либо право-левая асимметрия

кристаллической решетки, наложение внешних полей, либо макроскопическое вращение вещества. В §1.1 дана общая классификация возможных электро- и магнито-оптических эффектов в изотропной жидкости по двум параметрам: право-левой симметрии среды и симметрии по отношению к обращению времени. Предсказан ряд неизвестных ранее оптических эффектов — электрический аналог эффекта Фарадея, линейный магнито-оптический эффект и ряд других. Даны оценки констант новых эффектов и дана интерпретация механизмов их появления. Электрический аналог эффекта Фарадея был впоследствии обнаружен экспериментально в твердом теле в работе других авторов. В §1.3 проведено сравнение двух подходов к учету пространственной дисперсии в молекулярном рассеянии света. Именно эффекты пространственной дисперсии несут отпечаток симметрии строения молекул. Один из подходов — локально-мультипольный — состоит в учете высших мультиполей, наведенных в молекуле и высших мультиполей поля падающей волны. Второй подход — распределенно-дипольный — состоит в учете пространственной корреляции рассеивающих частиц, в том числе движения излучающей частицы (например, в газе). Дано уточнение формулы для интенсивности излучения заряженной частицы с точностью до $(a/\lambda)^2$ включительно. В рамках локально-мультипольного подхода предсказаны новые линии в комбинационном рассеянии в метане и на молекулах HD. В §1.4 рассматриваются эффекты “увлечения

эфира" вращающейся средой. Даны поправки к величине коэффициента увлечения за счет учета силы Кориолиса. В §1.5 рассматривается задача о вращательном эффекте Физо для газа. В §1.6 распределенно-дипольный подход использован для описания двупреломления и гиротропии в кристаллах при многоволновой дифракции. В §1.7 в рамках распределенно-дипольного подхода получены поправки к показателю преломления нематика из-за флуктуаций.

В Главе 2 введено и рассмотрено понятие полярной асимметрии светового поля. В §2.1 показано, что количественной характеристикой полярной асимметрии светового поля может служить средний по времени куб поля. В связи с такими полями, обладающими полярной асимметрией, в §2.2 рассмотрены возможности расширения понятия голограммы на случаи, когда при записи и считывании использованы поля разных частот, а сама голограмма реализована в виде модуляции не только диэлектрической проницаемости, но и высших полярностей. В §2.3 получено выражение для пондеромоторной силы, действующей на заряженную частицу в поле с отличным от нуля средним кубом. В §2.5 рассмотрены возможности ускорения заряженных частиц в вакууме квадратичной и кубической пондеромоторной силой. В связи с проблемой ускорения частиц предложены специального вида пакеты, сопровождающие ускоряемую частицу. В этих пакетах световая энергия фокусируется под некоторым углом на ось, вдоль которой световой

зайчик бежит с любой требуемой скоростью: большей, меньшей или равной скорости света.

Глава 3 посвящена теоретическому рассмотрению полярной асимметрии процесса ионизации под действием светового поля с отличным от нуля средним кубом. Дана модель появления полярной асимметрии углового распределения ионизованных электронов. Эта модель была впоследствии подтверждена в специально поставленных экспериментах. (Экспериментальная часть этих работ не включается в состав настоящей диссертации). Рассмотрены режимы туннельной и многофотонной ионизации. Найдена связь фазы интерференционного слагаемого в угловом распределении вылетевших при ионизации электронов с величиной квантового дефекта и найдена зависимость этой фазы от превышения энергии фотонов над порогом ионизации.

В главе 4 рассмотрены эффекты, для которых существенную роль играет наличие пространственной модуляции ориентации полярной оси нецентросимметричной среды. В §4.1 речь идет о возможности получения фазово-сопряженной (обращенной) волны в среде со знакопеременной величиной $\chi^{(2)}$. В §4.2 терминах модовых решений в средах, допускающих генерацию второй гармоники, рассмотрен эффект адиабатического изменения параметров моды при изменении расстройки волновых векторов. Предложено использовать среду с переменным периодом доменной структуры для полной перекачки энергии накачки во

вторую гармонику. Преимущество такого способа по сравнению с точным синхронизмом состоит в том, что поле второй гармоники оказывается параметрически устойчивым относительно обратного преобразования в накачку. В §4.3 рассмотрен предсказанный автором теоретически и впоследствии обнаруженный экспериментально эффект нескраженного распространения обыкновенной волны через мутную среду неоднородного нематического жидкого кристалла. Эффект основан на идее адиабатического следования собственных поляризации за локальным направлением директора, а также на том простом обстоятельстве, что показатель преломления обыкновенной волны не зависит от ориентации директора.

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации:

1. Предсказан электрический аналог эффекта Фарадея, т. е. вращение плоскости поляризации света, обусловленное током, протекающим под действием приложенного электрического поля. Такого рода эффект был впоследствии обнаружен экспериментально в работе других авторов (со ссылкой на нашу работу).
2. Дана последовательная теория одного из фундаментальных эффектов классической оптики: эффекта Ферми-Джонса, заключающегося в увлечении поляризации света вращающимися телами. Законченная формулировка теории данного эффекта для твердых тел,

жидкостей и газов связана с учетом качественного отличия от известного постулативного эффекта Физо, а именно, с присутствием силы Кориолиса в системе координат, связанной с телом.

3. В рамках распределенно-дипольного подхода к учету пространственной дисперсии рассчитаны эффекты двупреломления и гиротропии в рентгеновском диапазоне за счет почти брэгговских процессов рассеяния, а также зависимость фазовой скорости σ -волны в нематике от направления распространения.
4. Развитие локально-мультипольного подхода привело к уточнению известного электродинамического разложения интенсивности излучения системой зарядов размером $\sim a$ по степеням $(a/\lambda) \ll 1$.
5. Введено понятие полярной асимметрии светового поля, характеризуемой, в частности, средним по времени значением куба поля $\langle E^3 \rangle \neq 0$ при $\langle E \rangle = 0$. Дана интерпретация наведенной генерации второй гармоники в исходно аморфном кварцевом волокне (эффект Остерберга-Маргулиса) в терминах голографической записи интерференционной картины $\chi^{(2)} \propto \langle E^3 \rangle$.
3. Предсказана и рассчитана пондеромоторная сила, пропорциональная градиенту среднего куба поля, действующая на свободную заряженную частицу. Предложено ускорение элементарных частиц за счет такой силы; отличительная особенность схемы состоит в

использовании квазимонохроматических импульсов света, фокусируемых в вакууме.

7. Построена теоретическая модель полярной асимметрии углового распределения вылета фотоэлектронов при ионизации атомов и молекул под действием бихроматического светового поля, представляющего собой когерентную суперпозицию поля основной частоты и ее второй гармоники.
8. Полярная асимметрия углового распределения электронов исследована теоретически при различных режимах фотоионизации: когда потенциал ионизации I удовлетворяет условию $\hbar\omega < I < 2\hbar\omega$; для случая, когда $I \gg \hbar\omega$, сформулирован единый подход, из которого следуют два предельных случая — туннельной ионизации (согласно классификации Келдыша отвечающий условию $2mI\omega^2/e^2E^2 \ll 1$) и многофотонной ионизации (когда $2mI\omega^2/e^2E^2 \gg 1$). Для режима туннельной ионизации предсказана полярная асимметрия остаточной скорости электрона.
9. В рамках теоретической модели найдена фаза слагаемого, интерференционного между одно- и двухфотонными процессами ионизации в зависимости от превышения частоты поля над порогом ионизации, поляризации волн и от квантовомеханической фазы рассеяния. При небольшом превышении частоты света над порогом

ионизации фаза рассеяния может быть выражена через величину квантового дефекта, получаемую из спектроскопических данных о ридберговских уровнях. Предсказания о полярной асимметрии вылета электронов подтверждены в экспериментах по наблюдению фотомонизации с поверхности фотокаатода и в парах Na. Подтверждено также различие фаз интерференционных составляемых для разных поляризацій бихроматического излучения в соответствии с представлением о роли квантовомеханических фаз рассеяния.

10. Предсказан теоретически и подтвержден в инициированных автором экспериментах эффект неискаженного прохождения *o*-волны через толстую кювету с нематическим жидким кристаллом, непрозрачную в обычном смысле из-за неоднородностей ориентации директора в объеме. Экспериментально было реализовано пропускание изображения через жидкокристаллическую кювету толщиной $\sim 0,5$ см и неискаженной плоской волны через кювету с рекордной толщиной 3 см.

(Экспериментальная часть работ, упоминающихся в пунктах 9 и 10, не выносится на защиту в настоящей диссертации)

11. Предложено использовать нелинейную среду с короткопериодической ($\sim \lambda/2$) пространственной модуляцией тензора нелинейной поляризуемости для обращения волнового фронта при трехволновом смешении. Это дает возможность получения обращенной

волны в направлении назад при высоком качестве обращения.

12. Предложен новый метод эффективного (до 100%) адиабатического преобразования накачки во вторую гармонику за счет плавного изменения волновой расстройки от больших отрицательных до больших положительных значений. Это позволяет избежать параметрической неустойчивости второй гармоники, присущей точному синхронизму.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертации докладывались на VIII, IX Всесоюзных конференциях по когерентной и нелинейной оптике, на V и X Вавиловских конференциях по нелинейной оптике, на Конференциях по лазерам и электрооптике CLEO'90, CLEO'91, на IV Европейской конференции по атомной и молекулярной физике ECAMP'92, на VI Международной конференции по многофотонным процессам ICMP'93 и др.

- [1] Н. Б. Баранова, Ю. В. Богданов, Б. Я. Зельдович, "Новые электрооптические и магнитооптические эффекты в жидкости", *Успехи Физических Наук* 123, 349-360 (1977); *Препринт ФИАН* N 36 (1978).
- [2] N. B. Baranova, B. Ya. Zel'dovich, "Electrical analog of the Faraday effect and other new optical effects in liquids" *Optics Comm.* 22, 243 (1977).
- [3] N. B. Baranova, B. Ya. Zel'dovich, "Theory of a new linear magnetorefractive effect in liquids", *Molecular Physics* 38, 1085-1098 (1979). Н. Б. Баранова, Б. Я. Зельдович, "Теория нового линейного магнитооптического эффекта в жидкости", *Препринт ФИАН* N 65 (1978).
- [4] N. B. Baranova, B. Ya. Zel'dovich, "Antisymmetric Light Scattering of Molecules with Non-degenerate Electronic State", *Journ. of Raman Spectroscopy* 7, 118-124 (1978). Н. Б. Баранова, Б. Я. Зельдович, "Рассеяние света антисимметричного типа на молекулах с невырожденным электронным состоянием", *Препринт ФИАН* N 197 (1977).
- [5] Н. Б. Баранова, Б. Я. Зельдович, "Два подхода к учету пространственной дисперсии в молекулярном рассеянии света", *Успехи Физи-*

- чешск. *Наука*, 127, 422-450 (1979); Препринт ФИАН N 36 (1978).
- [6] N. B. Baranova, B. Ya. Zel'dovich, "Resonant optical activity induced in gases by collisions with right-left-nonsymmetrical molecules" *Opt. Lett.* **3** 1-3 (1978). Н. Б. Баранова, Б. Я. Зельдович, "Резонансная естественная оптическая активность газов, индуцированная столкновениями с право-лево-несимметричными молекулами" *Препринт ФИАН N 11* (1978).
- [7] N. B. Baranova, B. Ya. Zel'dovich, "On the expansion of radiation intensity into (a/λ) power series in electrodynamics", *Opt. Comm.* **22**, 53 (1977).
- [8] Н. Б. Баранова, Б. Я. Зельдович, В. С. Либерман, "Поправки к показателю преломления из-за флуктуаций. Нематики", *ЖЭТФ* **99**, 1504 (1991).
- [9] N. B. Baranova, B. Ya. Zel'dovich, "Coriolis contribution to the rotary ether drag", *Proc. Roy. Soc. London*, **A-368**, 591 (1979);
- [10] Н. Б. Баранова, Б. Я. Зельдович "К теоретической интерпретации опыта Джонса по измерению увлечения плоскости поляризации света вращающейся средой", *Препринт ФИАН N 213* (1978).
- [11] Н. Б. Баранова, Д. П. Воердман, Б. Я. Зельдович, "К вопросу о том, можно ли "заставить атом вращаться?", *ЖЭТФ*, **104**, 2969-2974

(1993).

- [12] Н. В. Баранова, Б. Я. Зельдович, "Дифракционное и гиротронное в рентгеновской области за счет почти брэгговских процессов", *ЖЭТФ* **79**, 1779 (1980).
- [13] Н. В. Баранова, Б. Я. Зельдович, "Расширение голографин на многочастотные поля", *Письма в ЖЭТФ* **45**, стр.562-565 (1987).
- [14] N. V. Baranova, B. Ya. Zel'dovich, "Physical effects in optical fields with nonzero average cube, $\langle E^3 \rangle \neq 0$ ", *JOSA B* **8**, 27 (1991).
- [15] Н. В. Баранова, М. О. Скалкин, Б. Я. Зельдович, "Ускорение заряженных частиц лазерными пучками", *ЖЭТФ*, **106** (1994)
- [16] N. V. Baranova, A. N. Chudinov, B. Ya. Zel'dovich, "Polar asymmetry of photoionization by a field with $\langle E^3 \rangle \neq 0$ ", *Opt. Comm.* **79**, 116 (1990).
- [17] N. V. Baranova, A. N. Chudinov, A. A. Shulginov, B. Ya. Zel'dovich, "Polarization dependence of the phase of interference between single and two-photon ionization", *Opt. Lett.* **16**, 1346 (1990).
- [18] Д. Э. Андерсон, Н. В. Баранова, К. Грин, Б. Я. Зельдович, "Интерференция одно- и двухфотонного процессов при ионизации атомов в молекул", *ЖЭТФ* **102**, 397 (1992).
- [19] N. V. Baranova, B. Ya. Zel'dovich, "Velocity distribution of electrons for tunnel ionization by a light field with polar asymmetry", *Frontiers*

- in nonlinear optics — The S. A. Akhmanov Memorial Volume*, Edited by H. Walther, N. Koroteev, M. O. Scully, IOP, Bristol-Philadelphia, p.79-83 (1993).
- [20] N. B. Baranova, H. R. Reiss, B. Ya. Zel'dovich, "Multiphoton and tunnel ionization by an optical field with polar asymmetry", *Phys. Rev.* **48**, 1497 (1993).
- [21] Н. Б. Баранова, И. М. Бегеров, Б. Я. Зельдович, И. И. Рябцев, А. Н. Чудинов, А. А. Шульгинов, "Обнаружение интерференции одних и двухфотонных процессов ионизации 4s-состояния натрия", *Письма в ЖЭТФ* **55**, 431 (1992).
- [22] Н. Б. Баранова, Б. Я. Зельдович, А. Н. Чудинов, А. А. Шульгинов, "Полярная асимметрия фотоионизации в поле с $\langle E^3 \rangle \neq 0$ (Теория и эксперимент)", *ЖЭТФ* **98**, 1857-1869 (1990).
- [23] Н. Б. Баранова, Б. Я. Зельдович, "Брэгговское трехволновое смешение при обращении волнового фронта", *Докл. АН СССР* **27**: 222 (1982).
- [24] Н. Б. Баранова, Б. Я. Зельдович, "Повышенная прозрачность нематика для обыкновенной волны", *Письма в ЖЭТФ* **32**, 636 (1980).
- [25] Н. Б. Баранова, И. В. Гусев, Б. Я. Зельдович, В. А. Кривошеков, "Высокая прозрачность нематика для о-волны — эксперимент",

Письма в ЖЭТФ 52, 745 (1990).

- [26] Н. В. Баранова, Б. Я. Зельдович, И. В. Гусев, В. А. Кривовязков, Б. Я. Метелца, "Неискажающее действие неоднородной среды нематического жидкого кристалла на обыкновенную волну", *ЖЭТФ* 101, 1541 (1992).
- [27] N. V. Baranova, I. V. Goosev, V. A. Krivoschekov, B. Ya. Zel'dovich, "Distortionless Propagation of Ordinary Wave through Inhomogeneous Nematic (Theory and Experiment)", *Mol. Cryst. & Liq. Cryst.* 210, 155 (1992).
- [28] N. V. Baranova, "Adiabatic transition of the pump into second optical harmonic", *Письма в ЖЭТФ* 57, 777 (1993).

Н. В. Баранова

Подписано в печать 14 февраля 1994 года
Заказ № 31. Тираж 100 экз. Объем 1,25 п.л.

Отпечатано на ротапринте в РИИС ФИАН.
Москва, В-333, Ленинский проспект, 53.