

БИБЛИОГРАФИЯ

535.530.182(049.3)

СОВРЕМЕННАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА

Shen Y. R. *The Principles of Nonlinear Optics*.— N. Y.: J. Wiley and Sons, 1984.— 564 p.

И. Рецензируемая книга подводит определенный итог почти 25-летнему развитию лазерной нелинейной оптики. Речь идет о монографическом изложении идей и методов этого весьма разветвленного и динамичного раздела современной физики.

Старт нелинейной оптики был бурным; первые опыты по удвоению частоты света и двухфотонному поглощению были выполнены в 1961 г., а уже в 1964, 1965 гг. появились две монографии, в которых были подведены первые итоги и дан набросок новых направлений. Последующее двадцатилетие в огромной мере расширило сферу нелинейной оптики, область ее приложений.

Можно указать по крайней мере четыре крупных раздела нелинейной оптики, четырех направления, в которых получены важные фундаментальные и прикладные результаты, интенсивно развивающиеся и по сей день. Это:

— Физика оптической нелинейности и нелинейная спектроскопия (спектроскопические методы, основанные на изучении нелинейного отклика вещества, оказались поистине универсальными, позволили решать задачи, прежде недоступные оптической технике).

— Волновая нелинейная оптика.

— Физика воздействия сильного светового поля на вещество (нелинейный отклик среды, нелинейные оптические явления играют важную, и, зачастую, решающую роль в механизмах лазерного возбуждения, релаксации сильно-неравновесных состояний в атомах, молекулах и конденсированных средах).

— Прикладная нелинейная оптика.

Речь идет, таким образом, о весьма широком спектре проблем, многие из которых далеко выходят за рамки физической и прикладной оптики в их традиционном понимании. Поэтому современная литература по нелинейной оптике трудно обозрима; это можно с полным основанием сказать не только об оригинальных статьях, но и об обобщающих трудах.

Быстрое экстенсивное развитие нелинейной оптики привело к тому, что подавляющее большинство обобщающих трудов, опубликованных в этой области, носит характер коллективных монографий. Достоинства и недостатки подобных изданий навряд ли стоит здесь подробно обсуждать; ясно вместе с тем, что они все-таки прежде всего удовлетворяют потребности специалистов и не могут заменить руководства, предназначенные для лиц, приступающих к работе в этой области, физиков (а теперь и химиков, технологов), занимающихся применением методов нелинейной оптики в смежных областях.

Тем больший интерес представляет рецензируемая книга, автор которой профессор Калифорнийского университета в Беркли И. Р. Шен, поставил своей задачей изложить в одномомном труде более или менее стандартного объема принципы нелинейной оптики.

Двадцать восемь глав книги посвящены рассмотрению физических основ перечисленных выше направлений, начиная от теории нелинейных восприимчивостей и кончая нелинейной оптикой волоконных световодов и плазмы.

Надо признать, что мы имеем дело с весьма успешной попыткой решения на первый взгляд вообще невыполнимой задачи; в книге дано (за небольшими исключениями) систематическое монографическое изложение основ современной нелинейной оптики. Несомненно, большую роль здесь сыграло то обстоятельство, что И. Р. Шен — один из наиболее активных и плодовитых ученых, работающих в области нелинейной оптики и квантовой электроники. Ему принадлежат существенные, а в ряде случаев — пионерские результаты во многих разделах нелинейной оптики, начиная от нелинейной спектроскопии и кончая разработкой преобразователей частоты. Поэтому в книге почти нет компилятивных глав; читатель, как правило, получает тщательно отобранныю (число литературных ссылок невелико) информацию из первых рук.

Разумеется, такой подход таит в себе и опасности субъективных оценок, неполного цитирования. Некоторые претензии подобного рода можно предъявить и к книге И. Р. Шена. Вместе с тем можно констатировать, что в большинстве случаев автора не покидает чувство меры; приятно отметить, в частности, что в весьма краткие списки литературы к главам включено подавляющее большинство обзоров по нелинейной оптике, опубликованных на страницах УФН.

II. Чтобы дать теперь более конкретное представление о книге (а заодно и о перечне проблем, которыми занимается современная нелинейная оптика), мы приведем оглавление книги с краткими комментариями.

1. Введение.

2. Нелинейные восприимчивости.

Здесь наряду с традиционным рассмотрением отклика классического ангармонического осциллятора и двухуровневой системы (принципиально нелинейного объекта) изложена феноменологическая теория нелинейных свойств кристаллов, базирующаяся на моделях связанных зарядов (bond-charge model) и переноса заряда (charge-transfer model). Приведены свежие данные о квадратичных нелинейностях ряда полупроводников. В упрек автору здесь можно поставить полное отсутствие данных о высших нелинейностях. Напомним, что сейчас в атомах измерены нелинейные восприимчивости вплоть до $\chi^{(8)}$ (нелинейная поляризация $P^{(9)} \sim \chi^{(9)}E^9$), а с проявлением эффектов, обусловленных нелинейностями $\chi^{(4)}$, $\chi^{(5)}$, приходится сталкиваться во многих экспериментах с атомами, молекулами, полупроводниковыми кристаллами.

3. Общая теория распространения волн в нелинейной среде.

4. Электрооптические и магнитооптические эффекты.

5. Оптическое выпрямление и обратный эффект Фарадея.

6. Генерация суммарных частот.

7. Генерация оптических гармоник.

8. Генерация разностных частот.

9. Параметрическое усиление и генерация.

Гл. 4—9 — это «традиционная, нерезонансная» (используется нерезонансный квадратичный по полю $P^{(2)} = \hat{\chi}^{(2)} E E$ нелинейный отклик среды) нелинейная оптика. Надо сказать, что изложение материала здесь весьма обстоятельно, много численных примеров.

В гл. 6, 7, пожалуй, не хватает лишь имеющих принципиальное значение последних данных по получению предельных к. п. д. преобразования в оптических умножителях частоты; напомним, что сейчас в мощных лазерных системах, предназначенных для УТС, получены к. п. д. до 85% в оптических удвоителях и ~ 70% в утроителях частоты неодимового лазера. В гл. 9 большее внимание следовало бы уделить параметрическим генераторам сверхкоротких световых импульсов; с их помощью сейчас получают импульсы длительностью ~ 10^{-12} с, перестраиваемые в диапазоне от 0,5 до 8—10 мкм.

Последующие гл. 10—17 посвящены нелинейным эффектам, связанным с нелинейной поляризацией, кубичной по полю ($\Gamma^{(3)} = \hat{\chi}^{(3)} E E E$).

10. Вынужденное комбинационное рассеяние.

11. Вынужденное рассеяние света.

Здесь речь идет о рассеянии Мандельштама — Бриллюэна и рассеянии в крыле релеевской линии.

12. Двухфотонное поглощение.

13. Нелинейная спектроскопия высокого разрешения.

Здесь рассмотрены все основные методы нелинейной спектроскопии высокого разрешения: квантовые биения, спектроскопия насыщения (включая поляризационную), двухфотонная спектроскопия, спектроскопия в разнесенных полях. Компактное и вместе с тем весьма физичное изложение с хорошо подобранными примерами, оценками.

14. Четырехволновое смешение.

15. Спектроскопия четырехволнового смешения.

Это — области, в которых в самое последнее время было получено много важных физических и прикладных результатов. Вырожденные по частоте четырехволновые процессы (на кубической нелинейности взаимодействуют четыре волны с одинаковыми частотами, но различающимися волновыми векторами) представляют особый интерес для обработки сигналов. Наиболее яркий пример — возникающее при таком взаимодействии обращение волнового фронта, подробно рассматриваемое в гл. 14. Невырожденные четырехволновые процессы лежат в основе многих схем перестраиваемых преобразователей ИК и УФ диапазонов; особый интерес они представляют для спектроскопии.

Обзору современного состояния спектроскопии четырехволнового смешения, в особенности одному из ее широко распространенных вариантов — когерентной антистоксовой спектроскопии комбинационного рассеяния — КАРС (или активной спектроскопии) посвящена гл. 15. С точки зрения феноменологической теории четырехволновая спектроскопия, КАРС, как, впрочем, и большинство других методов нелинейной спектроскопии (двухфотонная спектроскопия, ряд вариантов спектроскопии насыщения) — это различные методы исследования свойств резонансов в кубической восприимчивости $\chi^{(3)}$. С полным основанием можно утверждать, что восприимчивость $\chi^{(3)}$ стала одной из важнейших оптических характеристик газов жидкостей и твердых тел.

16. *Двулучепреломление, наведенное сильным световым полем.*

В этой главе, наряду с изложением традиционных вопросов, кратко обсуждаются новые данные о «гигантских» нелинейностях полупроводниковых кристаллов, сильных резонансных кубических восприимчивостях атомов.

17. *Самофокусировка.*

Весьма детальное и современное изложение физики стационарной и нестационарной (здесь много оригинальных данных) самофокусировки световых пучков; рассмотрена и самомодуляция световых пакетов в средах с кубической нелинейностью.

18. *Многофотонная спектроскопия.*

Речь идет о нелинейно-оптической технике исследования возбужденных состояний, переходов между возбужденными состояниями. Приведена сводка данных по многофотонной спектроскопии ридберговских атомов; это, несомненно, одна из ярких демонстраций применения методов нелинейной оптики в атомной физике.

19. *Детектирование отдельных атомов и молекул.*

Это совсем новая область, во многом обязанныя своим прогрессом успехам многофотонной лазерной спектроскопии. Методами лазерно-индуцированной флуоресценции, фотонизации из возбужденных состояний удается детектировать ~ 10 атомов/ см^3 . Одно из последних достижений в этой области — регистрация ${}^{13}\text{S}_1 - {}^{23}\text{S}_1$ -двуфотонного перехода в позитронии.

20. *Лазерное управление движением частиц.*

Пондеромоторные силы, возникающие в сильном лазерном поле, открывают широкие возможности оптического ускорения, замедления, охлаждения, коллимации, локализации частиц, в особенности атомов и ионов. Этот круг вопросов, строго говоря, не входит в нелинейную оптику — перечисленные эффекты проявляются и при линейном отклике частиц. Тем не менее включение этой небольшой главы в рецензируемый курс можно признать удачным; многие проблемы, обсуждаемые здесь, теснейшим образом связаны с нелинейной лазерной спектроскопией, физикой нелинейного лазерного воздействия на атомы, молекулы и ионы.

21. *Нестационарные когерентные оптические эффекты.*

Рассматривая оптические пульсации, затухание свободной поляризации, фотонное эхо, самоиндуцированную прозрачность, автор не ограничивается традиционным анализом моделей, основанных на уравнениях Блоха; когерентные явления обсуждаются и на основе более общей картины нестационарных четырехфотонных взаимодействий. Такой подход позволяет акцентировать нелинейно-оптическую сущность когерентных явлений, распространить и обобщить представления о затухании свободной индукции, фотонном эcho на многоуровневые системы, нелинейные решетки и т. п.

Физика когерентных оптических взаимодействий, техника когерентной нелинейной спектроскопии переживают в последние годы новый подъем. Это связано прежде всего с прогрессом техники генерации и детектирования световых импульсов предельно короткой (до 10^{-14} с) длительности, что открывает уникальные возможности когерентной спектроскопии сложных многоатомных молекул и полупроводников. Вместе с тем в этой области возникли и принципиальные проблемы, связанные с исследованием нелинейной релаксации (время релаксации, а следовательно, механизмы взаимодействий в среде сильно зависят от напряженности светового поля) и немарковской релаксации (в эксперименте все чаще реализуются ситуации, когда длительность светового импульса меньше характерного времени корреляции термостата $\tau_{\text{и}} < \tau_{\text{т}}$). К сожалению, в рецензируемой книге эти новые направления лишь упомянуты.

22. *Сильные взаимодействия света с атомами.*

Современная нелинейная оптика дает все больше примеров ситуаций, когда нелинейный отклик атома или молекулы на световое поле не может быть описан методами теории возмущений. Воздействие во многих случаях оказывается сильным, происходит перестройка спектра и волновых функций. Материал гл. 22 может служить хорошим введением в этот круг задач; здесь рассмотрены широко используемые теоретические модели «одетых» и «раздетых» атомов, экспериментальные данные по проявлению оптического штарк-эффекта в КАРС-спектрах двухатомных молекул, в спектрах многофотонной ионизации атомов.

23. *Многофотонное возбуждение и диссоциация молекул в инфракрасном лазерном поле.*24. *Лазерное разделение изотопов.*

Эти главы посвящены, пожалуй, наиболее интересному разделу нелинейной оптики молекул — нелинейным колебаниям молекул в резонансном ИК-поле и приложениям возникающих здесь эффектов; эти вопросы уже неоднократно обсуждались на страницах «Успехов».

Автор рецензируемой книги в этих главах отходит от монографического стиля изложения; материал гл. 23—24 — это прежде всего обзор экспериментальных данных, качественное обсуждение роли нелинейных эффектов в возбуждении молекул, механизмах внутримолекулярной релаксации. Несомненный интерес и для специалистов представит сформулированный в конце гл. 23 список нерешенных проблем физики многофотонной диссоциации молекул; напомним, что И. Р. Шену и сотрудникам принадлежат важнейшие для этой области эксперименты по многофотонной диссоциации в молекулярных пучках.

25. Нелинейная оптика поверхности.

Это — новый раздел нелинейной оптики; фактически материал гл. 25 является одной из первых сводок результатов, полученных в этой бурно развивающейся области. В нелинейной оптике поверхности можно выделить два направления: нелинейная оптика поверхностных волн и нелинейно-оптическое зондирование поверхности. В книге дано ясное и современное изложение физических основ обоих направлений. Несомненно, в самое последнее время главный акцент делается на нелинейно-оптическую диагностику поверхности; оказалось, что она обладает серьезными преимуществами перед традиционными методами (рентгеновской спектроскопией, дифракцией медленных электронов и т. д.). В гл. 25 приведены данные (многие из них принадлежат автору и его сотрудникам) о регистрации поверхностных монослоев с помощью техники КАРС и генерации 2-й оптической гармоники. Сейчас можно указать и другие яркие примеры, не обсуждаемые в книге; прежде всего это нелинейно-оптическая диагностика фазовых переходов на поверхности (лазерного отжига; фазовых переходов «идеальной» поверхности в сверхвысоком вакуме и т. п.).

26. Нелинейная оптика волоконных световодов стала в последние годы одним из наиболее важных разделов прикладной нелинейной оптики. Достаточно сказать, что фазовая самодуляция светового пакета в одномодовом волокне была использована для получения путем компрессии («фокусировки во времени») светового импульса практически предельно короткой длительности $\sim 1,2 \cdot 10^{-14}$ с (всего 8 периодов световых колебаний). Гл. 26 содержит конкретное изложение проблемы, приведены оценки, результаты экспериментов.

27. Оптический пробой.

В многочисленных явлениях в газах, жидкостях и твердых телах, объединенных этим названием, главную роль играют нелинейные эффекты. В гл. 27 дано ясное изложение физики оптического пробоя в газе; к сожалению, очень кратко и неполно рассмотрена физика оптического разрушения твердых тел.

28. Нелинейные оптические явления в плазме.

Сейчас это большая и быстро развивающаяся область; плазма является примером сильно-нелинейной среды. В относительно короткой гл. 28 изложены основные теоретические представления, дана сводка тщательно отобранных экспериментальных данных. Несомненно, сейчас настало время реальной нелинейной лазерной спектроскопии плазмы; некоторые данные на этот счет также содержатся в гл. 28.

Подводя итог, можно сказать, что рецензируемая книга дает достаточно полную картину современной нелинейной оптики.

Фактически за ее пределами остались лишь три раздела, где главные результаты получены совсем недавно. Это:

- сильные нелинейности в волновой оптике (оптическая бистабильность и мультистабильность, стохастичность в оптических динамических системах);
- физика оптических возбужденных неравновесных состояний в конденсированных средах, светоиндуцированных фазовых переходов в полупроводниках (лазерный отжиг и аморфизация, оптическая генерация твердотельной плазмы высокой плотности и т. п.);
- квантовая нелинейная оптика. Здесь особый интерес привлекают сейчас нелинейно-оптические методы генерации световых полей, не имеющих классических аналогов (сжатые состояния, субпуассоновские распределения).

Как уже указывалось выше, есть некоторые неровности и недочеты и в изложении материала, включенного в книгу. Тем не менее следует еще раз подчеркнуть, что книга И. Р. Шена занимает особое место в литературе по нелинейной оптике. Она, несомненно, будет встречена с большим интересом лицами, вступающими в эту увлекательную область современной физики. Много полезного найдут в ней и специалисты.

С. А. Ахманов