1965 г. Март *Том 85, вып. 3*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

БИБЛИОГРАФИЯ

019.941 535

С. А. Ахманов, Р. В. Хохлов. Проблемы нелинейной оптики (Электромагнитные волны в нелинейных диспергирующих средах). М., Изд. ВИНИТИ, серия «Итоги науки», 1964, 292 стр., тираж 1500 экз.

Рецензируемая книга является первой в мировой литературе монографией по нелинейной оптике — новому разделу оптики и радиофизики, интенсивно развивающемуся в последние годы. Интерес к нелинейным эффектам при распространении электромагнитных волн проявлялся радиофизиками и оптиками еще и в довоенные годы (здесь следует напомнить, в частности, о работах Л. И. Мандельштама и его сотрудников и исследованиях С. И. Вавилова), однако интенсивное развитие экспериментальной нелинейной оптики началось после создания волноводных систем с нелинейными ε или μ в диапазоне микрорадиоволн, в особенности после разработки мощных лазеров. Плотность излучения, генерируемого современным лазером, может быть настолько большой (напряженность поля в фокусе $\sim 10^6$— 10^7 *в/см* и даже в некоторых случаях 10^8 *в/см*), что при его распространении через материальную среду становится существенной нелинейная зависимость ее поляризации от напряженности поля световой волны (напомним, что атомная единица напряженности электрического поля равна $e/a^2 = 5 \cdot 10^9$ *в/см*). При этом возникают новые для оптики физические явления, существенно расширяющие возможности исследования вещества и открывающие новые перспективы в приложениях. Достаточно назвать, например, такие эффекты, как когерентное генерирование гармоник и субгармоник в нелинейной диспергирующей среде и параметрическое усиление световых волн. Возникает возможность существенно расширить диапазон частот когерентного оптического излучения, не используя инвертированную заселенность квантовых уровней активной среды. Уже сейчас, например, возможна генерация мощного когерентного ультрафиолетового излучения $\lambda = 0{,}35$ *мк* путем эффективного удвоения частоты излучения рубинового лазера, генерация большого набора интенсивных спектральных линий в видимом и инфракрасном диапазонах с помощью явления вынужденного комбинационного рассеяния в жидкостях, газах и твердых телах, эффективное преобразование энергии оптического лазерного излучения в энергию интенсивных гиперзвуковых колебаний и т. д.

Интерес к указанной проблеме вызвал серию оригинальных научных статей, посвященных нелинейной оптике. Сейчас уже опубликовано около сотни таких работ *). Немалая часть из них принадлежит авторам рецензируемой монографии. Заметим, что некоторые из их работ этого цикла являются пионерскими (генерация гармоник при распространении волн в нелинейных диспергирующих средах, теория параметрического усилителя и генератора света и др.), а сами авторы — ведущими специалистами в области нелинейной оптики. Оба автора и руководимые ими научные коллективы и в настоящее время интенсивно работают в этой области (как теоретически, так и экспериментально), и изложенный в монографии материал соответствует прогрессу, достигнутому в данной области физики.

Рецензируемая монография является в первую очередь монографией по теоретической нелинейной оптике; экспериментальная нелинейная оптика занимает в ней подчиненное место и соответствующие эксперименты излагаются в ней прежде всего в той мере, в какой они необходимы для сопоставления с теорией. Излагаемая в монографии теория базируется на уравнениях классической нелинейной электродинамики диспергирующей среды. Авторы показывают, что для приближенного решения этих уравнений можно использовать метод медленно меняющихся амплитуд, являющийся обобщением известного метода теории нелинейных колебаний на волновые системы. На этой методической основе, развитой в значительной мере в работах авторов, и стро-

*) Первый критический обзор этой литературы на русском языке был сделан Э. В. Шпольским (УФН, т. 77, вып. 3 июль 1962)

ится в основном изложение материала. Обратимся теперь к рассмотрению отдельных глав книги.

Изложение начато с Введения, цель которого заключается в том, чтобы ознакомить читателя с существенными особенностями, отличающими нелинейную электродинамику от линейной. Рассмотрен общий вид материальных уравнений нелинейной среды, выяснена существенная роль дисперсии среды при нелинейном взаимодействии волн различных частот, введено понятие длины когерентного взаимодействия. Здесь же дан краткий литературный обзор. Значительное место во Введении занимает обоснование применимости метода медленно меняющихся амплитуд к задачам нелинейной оптики; в конечном счете дело сводится к обоснованию относящегося ко всем главам книги предположения о слабой нелинейности среды и малости потерь в ней. Эти предположения представляются вполне адекватными рассматриваемым задачам в тех случаях, когда напряженность поля световой волны еще не настолько велика, чтобы вызывать электрический пробой в среде. Вместе с тем следует указать, что в настоящее время значительный интерес вызывают и явления пробоя и разрушения материалов в поле световой волны. Заметим, наконец, что некоторые места во Введении представляются не вполне удачными; авторы вынуждены иногда апеллировать к основному содержанию монографии, что затрудняет чтение.

Глава I посвящена изложению теории нелинейной поляризации диэлектриков. При этом рассмотрены как динамическая (классическая), так и статистическая (классическая и квантовая) теории нелинейной поляризации. Основное внимание уделено исследованию нелинейной поляризации кристаллов, как обладающих, так и не обладающих центром инверсии. Кристаллы последнего типа имеют квадратичную (по полю E) нелинейность и представляют наибольший практический интерес («квадратичная среда»).

В § 7 гл. I рассматриваются ограничения на компоненты тензора нелинейной поляризуемости χ квадратичной среды, налагаемые условиями симметрии кристалла. Перечислены все 20 кристаллических классов, допускающих квадратичную нелинейность, и для каждого из них указаны отличные от нуля значения компонент со свойствами их симметрии по индексам i, j, k. Материал этого параграфа представляется весьма ценным для приложений; следует лишь высказать сожаление, что в монографии отсутствуют аналогичные данные, касающиеся тензора нелинейной поляризуемости среды, обладающей центром инверсии («кубичной» среды). Теория нелинейной поляризации в настоящее время еще далека от завершения; на ее слабые стороны авторы многократно указывают по ходу изложения. Ряд новых проблем в этой области рассмотрен в написанных Ю. Л. Климонтовичем § 5—6, посвященных статистической теории нелинейной поляризации; интересен и проведенный Ю. Л. Климонтовичем анализ квадратичных эффектов в средах, обладающих центром инверсии (§ 8 гл. I).

В главе II излагаются основы теории распространения волн в нелинейных средах. При теоретическом рассмотрении возникающих при этом задач существенным является то обстоятельство, что точное решение получающихся здесь нелинейных уравнений не представляется возможным. Авторы подробно излагают метод приближенного решения этих уравнений, при использовании которого исходные нелинейные уравнения второго порядка удается свести к уравнениям первого порядка, так называемым «укороченным» уравнениям. Метод «укороченных уравнений» оказывается возможным благодаря тому, что потери в среде и ее нелинейность можно считать малыми. В гл. II детально изложен этот метод, а также возможные вытекающие из него общие выводы (например, общие энергетические соотношения для недиссипативной среды). В этой же главе дано обобщение формул Френеля на случай отражения и преломления волн на границе нелинейной среды. К сожалению, этот материал изложен излишне лаконично (§ 5). Здесь уместно указать еще на один недостаток гл. II. Методика вывода укороченных уравнений в ней изложена в приложении к анизотропной среде (при этом укороченные уравнения являются скалярными); вместе с тем в гл. IV—V авторы пользуются и укороченными уравнениями изотропной среды (векторными). Для читателя было бы удобнее, если бы весь этот материал был собран в одной главе.

При дальнейшей работе над книгой весьма желательным было бы и включение раздела, касающегося нелинейных эффектов в гиротропных средах; в теперешнем варианте авторы ограничиваются на этот счет замечаниями в заключении к книге.

Глава III посвящена одной из наиболее интересных задач нелинейной оптики — задаче о когерентной генерации гармоник в пассивной, слабо поглощающей нелинейной среде. Даны решения систем укороченных уравнений, соответствующих различным постановкам задач о генерации второй и третьей гармоник. Рассмотрены способы увеличения длины когерентного взаимодействия волн в неоднородных средах, а также одномерная теория удвоения частоты в нелинейном резонаторе типа Фабри — Перо. Материал гл. III, в рамках модели плоских монохроматических волн, в значительной мере исчерпывает круг теоретических вопросов, возникающих в этой важной области нелинейной оптики. Вместе с тем вопросы, связанные с генерацией гармоник в поле

пучков конечной апертуры, еще требуют разрешения. Авторы указывают, правда, что во многих случаях развитая теория может быть использована и при интерпретации опытов с пучками конечной апертуры, однако количественные критерии сформулированы здесь не всегда достаточно четко.

В гл. IV изучаются вопросы, связанные с параметрическими эффектами в оптике. Показано, в частности, что явление вынужденного комбинационного рассеяния удается интерпретировать как параметрическое взаимодействие. Точно так же можно интерпретировать и вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна. Важное значение параметрических эффектов в оптике заключается в том, что они позволяют получать волны когерентного излучения с частотой, не кратной частоте накачки (в частности, субгармоники). Рассмотрение проведено не только в приближении заданного поля накачки, но и с учетом насыщения, т. е. обратной реакции нарастающих волн на волну накачки. Подробно изложена теория параметрического усилителя и генератора света.

К числу недостатков этой главы следует отнести отсутствие сравнительного анализа результатов квантовой теории вынужденного комбинационного рассеяния, развитой в работах Хелворса, и классической теории, развиваемой авторами. Вообще, хотя возможность использования классического электродинамического подхода к большинству задач нелинейной оптики пассивной слабо поглощающей среды не вызывает сомнений, в некоторых случаях, во всяком случае с методической точки зрения, соответствующее квантовое рассмотрение было бы весьма полезным.

В связи с этим следует высказать и еще одно замечание более общего порядка. Авторы книги часто прибегают к специфической радиофизической терминологии, а для пояснения тех или иных нелинейных оптических явлений используют аналогии из теории колебаний систем с сосредоточенными постоянными (например, так называемая «пространственно-временна́я» аналогия, рассмотренная в гл. II, и т. п.). Вместе с тем во многих случаях было бы желательно более широкое привлечение понятий и терминов линейной оптики (в частности, в гл. IV, в теории вынужденного рассеяния).

Теоретическое содержание монографии заканчивается сравнительно небольшой гл. V, посвященной модулированным волнам в нелинейных средах. Общее рассмотрение проблемы распространения модулированных волн в нелинейной среде (даже поставленное в рамках укороченных уравнений) чрезвычайно сложно в вычислительном отношении. В монографии рассмотрены только две простейшие постановки такой проблемы.

1. Модуляция световой волны при прохождении ее через электрооптическую среду, находящуюся в низкочастотном электромагнитном поле.

2. Прохождение модулированной волны через параметрический усилитель. Обе эти задачи анализируются в параметрическом приближении, т. е. в приближении, когда поле одной из волн может считаться заданным.

Последняя, VI глава посвящена обзору экспериментальных (в том числе и принадлежащих самим авторам) работ по нелинейной оптике. Особое внимание уделено работам по генерации оптических гармоник. Заслуживает внимания обсуждение вопроса о статистических эффектах в нелинейной оптике, попутно проведенное в этой главе. Результаты экспериментальных работ по оптическим гармоникам сопоставлены с теоретическими выводами, полученными в гл. I—III монографии. Вместе с тем следует отметить, что современный уровень экспериментальных достижений в изучении вынужденного рассеяния значительно превосходит уровень работ 1963 г., на которых базируется соответствующий раздел гл. VI. В связи со сказанным представляется уместным заметить, что для книг в таких новых бурно развивающихся областях, как нелинейная оптика, годовой срок между сдачей рукописи в печать и выходом в свет (предисловие к рецензируемой монографии датировано ноябрем 1963 г., а выход в свет — октябрем 1964 г.) является чрезмерно большим.

В целом рецензируемая книга, несомненно, будет полезной специалистам и лицам, приступающим к изучению рассмотренного круга вопросов.

Весьма ценным свойством книги, придающим ей монографический характер, является единый, свойственный авторам подход к изложению всех вопросов нелинейной оптики. Уровень этого изложения вполне соответствует уровню современной физической литературы. Вызывает лишь удивление чрезвычайно малый тираж монографии (1500 экз.), ни в коей мере не соответствующий современному спросу на книги подобного содержания. Поэтому практически сразу же после выхода в свет книга стала библиографической редкостью. Следует пожелать в связи с этим скорейшего переиздания рецензируемой монографии. Нам представляется, что при переиздании авторам следует значительно расширить раздел экспериментальной нелинейной оптики, а в теоретической части монографии увеличить удельный вес количественных оценок, стимулирующих постановку новых экспериментальных работ.

И. А. Яковлев