

8-61



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

17-82-576

Во Хонг Ань

**ТЕОРИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ
НА КРИСТАЛЛЫ**

**Специальность 01.04.02 –
теоретическая и математическая физика**

**Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук**

Дубна 1982

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

Н.Н. БОГОЛЮБОВ (мл.)

доктор физико-математических наук
профессор

В.П. СИЛИН

доктор физико-математических наук
профессор

Н.А. ЧЕРНИКОВ

Ведущая организация:

Ленинградский государственный университет им. А.А. Диданова,

Автореферат разослан " 2 " XI 1982 года.
Защита диссертации состоится " 2 " XII 1982 г. *в 16 00*
на заседании Специализированного совета Д.047.01.01 Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

Р.А. АСАНОВ

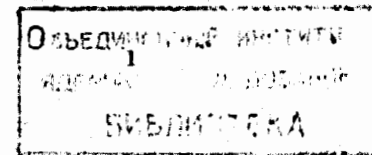
Настоящая диссертация посвящена одному из направлений исследования нелинейных явлений в материальных системах: теории параметрического воздействия электромагнитного излучения большой мощности на кристаллические системы.

Как известно, появление мощных источников электромагнитного излучения в широком интервале частот от ближнего ультрафиолетового до видимого и инфракрасного диапазонов, особенно появление лазеров с перестраиваемой частотой, обусловило за последние два десятилетия бурное развитие как теоретических, так и экспериментальных исследований большого круга нелинейных явлений в разных средах, которые представляют собой проявление отклика материальных систем на воздействие электромагнитных волновых полей большой интенсивности. В этих нелинейных, в том числе параметрических, явлениях находят отражение новые свойства, присущие неравновесным состояниям рассматриваемых систем. В случае кристаллических твердых тел это — свойства, обусловленные симметрией зонной структуры носителей и фононов, взаимодействием между носителями и многочисленными коллективными возбуждениями — квазичастицами в системе.

Сказанное достаточно убедительно обосновывает актуальность поставленной проблемы, которая, кроме самостоятельного теоретического интереса с точки зрения развития методов исследования нелинейных явлений, заключается еще в возможности применения параметрических процессов в экспериментальном изучении многих физических свойств кристаллов в неравновесных состояниях, а также в перспективе приложений в твердотельной электронике. В пользу последнего утверждения особенно говорит пороговый характер изучаемого явления.

Цель работы — построить последовательную теорию параметрических взаимодействий, распространения и возбуждения волн разных типов в кристаллических системах, находящихся под воздействием сильных полей электромагнитного излучения, основанную, главным образом, на квантовом подходе с использованием квантовых кинетических уравнений и позволяющую охватить широкий круг вопросов, связанных как с внешними условиями, в которых находится рассматриваемая система, так и с влиянием внутренних факторов, обусловленных особенностями решеточной и электронной зонной энергетической структур.

Научная новизна работы определяется прежде всего тем, что в диссертации впервые на основе единого квантового подхода дано описа-



ние общей картины распространения, дисперсии, параметрического взаимодействия и возбуждения собственных волн разных типов как в идеальных бесконечных однородных изотропных электрон-фононных системах, так и при учете ряда эффектов, присущих реальным кристаллическим системам: эффектов анизотропии кристаллической решетки, эффектов непараболичности закона дисперсии энергии носителей, конечности ширины зоны проводимости, резонансных межзонных переходов с перестройкой энергетического спектра носителей, и т.д.

Проведенное в диссертации рассмотрение в рамках гидродинамического подхода непараболического псевдорелятивистского механизма параметрического взаимодействия и возбуждения поверхностных и объемных волн в полуграничных системах представляет собой первое исчерпывающее исследование вопроса, включающее полученные ранее результаты как частные случаи.

Предложенной новой схемой рассмотрения внесен также вклад в кинетическую теорию распространения и параметрического возбуждения акустических и связанных экситон-фононных волн в пьезокристаллах при наличии электронных потоков.

В квантовом подходе вычислены корреляционные функции коллективных флуктуаций в поляритонной области спектра для электрон-фононной системы, взаимодействующей с сильным полем излучения, при помощи которых впервые получены формулы для сечений неупругого рассеяния нейтронов на плазмон-фононных и поляритонных модах системы, обнаруживающие аномальное возрастание по мере приближения к области параметрической неустойчивости указанных мод.

На основе метода Н.Н.Боголюбова и Н.Н.Боголюбова (мл.) исключения бозонных операторов впервые исследована проблема последовательного учета электрон-фононного взаимодействия в системах, взаимодействующих с сильным полем излучения, в связи с проблемой выхода за рамки приближения случайных фаз.

Научная и практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Проведенное в диссертации исследование параметрических процессов в электрон-фононных системах обладает научной ценностью как вклад в построение самостоятельного раздела теории нелинейных явлений в материальных средах, позволяющего выявить ряд новых особенностей коллективного поведения определенного класса систем под параметрическим воздействием электромагнитного излучения большой интенсивности.

2. Ряд полученных в работе уравнений обладает большой общностью и может быть использован при исследовании многих электродинамиче-

ских свойств электрон-фононных систем, взаимодействующих с сильным электромагнитным излучением. Это в особенности относится к обобщенным кинетическим уравнениям для квазичастиц, полученным в двухзонной модели при одновременном воздействии двух полей и наличии резонансных межзонных переходов с перестройкой энергетической структуры носителей, и обобщенным кинетическим уравнениям для систем при последовательном учете электрон-фононного взаимодействия.

3. Результаты исследования распространения, дисперсии, взаимодействия и возбуждения волн свидетельствуют о значительной чувствительности электронной и решеточной структур кристаллов к параметрическому воздействию электромагнитного излучения большой мощности и, следовательно, стимулируют применение параметрических процессов в экспериментальном исследовании ряда физических свойств реальных систем в неравновесных условиях. В связи с этим важное значение имеет впервые сделанный в диссертации вывод о возможности использования явления параметрического резонанса в качестве эффективного метода решения проблемы малой концентрации в нейтронной спектроскопии неравновесных квазичастиц в кристаллах.

4. Теоретические результаты и численные оценки для инкрементов усиления волн в ряде веществ показывают пороговый характер явления, а также достижимость величин пороговых полей при помощи современных лазеров, что позволяет говорить о перспективе приложений исследуемого параметрического явления в твердотельной электронике.

Апробация работы. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены:

- на Международной школе по новейшим достижениям статистической механики (Брашов, Румыния, 1979 г.);

- на IV Международной конференции по поверхности твердых тел и III Европейской конференции по физике поверхности (Канны, Франция, 1980 г.);

- на II Международном симпозиуме по избранным проблемам статистической механики (Дубна, СССР, 1981 г.);

- на семинарах Лаборатории теоретической физики Института физики при Национальном центре по научным исследованиям СРВ (Ханой, СРВ, 1975-1978 г.г.);

- на семинаре Отдела теории ядра и ядерных реакций Института теоретической физики АН УССР (Киев, 1978 г.);

- на семинарах Отдела теории плазменных явлений Физического института АН СССР им. П.Н.Лебедева (Москва, 1977-1978 гг.);

- на семинаре Центра теоретической физики при Высшей технической школе в Париже (1980 г.);

- на семинарах по теории конденсированного состояния Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований (Дубна, 1979-1981 г.г.).

Основные результаты диссертации опубликованы в 17 работах (см. список в конце настоящего автореферата).

Диссертация состоит из введения (включающего сводку основных выводов) и семи глав, содержит 270 страниц машинописного текста, включая 5 рисунков и список цитируемой литературы из 283 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено краткому историческому обзору исследований по теории нелинейных явлений в средах, подвергнутых воздействию электромагнитного излучения. В частности, дана общая картина связи физических дисциплин, тесно связанных с проблемой параметрического воздействия электромагнитного излучения большой мощности на кристаллы, а именно: нелинейной оптики, физики плазмы и физики твердого тела. Приведены мотивы исследований и общая постановка проблемы, обоснована структура диссертации и приведены основные, обобщающие результаты диссертации, сформулированы положения, которые выносятся на защиту.

В главе I^{1,9/} на основе гамильтониана в представлении вторичного квантования, явно зависящего от времени, в приближении случайных фаз (ПФ) выведена система основных уравнений квантового формализма для описания динамических свойств электрон-фононных систем, находящихся под воздействием электромагнитного излучения большой мощности. На основе этих уравнений получено линеаризованное кинетическое уравнение для определения возмущения функции распределения электронов проводимости при взаимодействии последних с оптическими фонами, которое вместе с полной системой уравнений Максвелла составляет самосогласованную систему, позволяющую исследовать процессы распространения, дисперсии и параметрического возбуждения волн различной природы в кристаллах, обладающих различными свойствами электронной зонной структуры и решеточной симметрии (§1).

Для идеальных бесконечных однородных изотропных электрон-фононных систем в простейшем случае игнорирования фононной подсистемы (§2) получены дисперсионные уравнения для собственных волн в присутствии внешнего поля электромагнитного излучения в двух предельных геометриях, когда внешнее поле поляризовано параллельно

направлению \vec{k} распространения внутренней волны и когда оно поляризовано перпендикулярно этому направлению. На основе этих уравнений проведен анализ поведения продольных плазменных и поперечных электромагнитных волн в электронной системе. Для геометрии $\vec{k} \perp \vec{E}_0$ (\vec{E}_0 - вектор амплитуды электрического поля внешней волны) выполнен подробный анализ дисперсионного уравнения в двухмодовом приближении, найдены аналитические выражения для инкрементов распадной параметрической неустойчивости для классической длинноволновой и квантовых областей значений волнового вектора \vec{k} . Получена формула для порогового поля накачки при возбуждении пары из длинноволновой плазменной и электромагнитной мод и выполнены численные оценки величины этого поля в условиях реального плазменного эксперимента. Известные результаты анализа параметрического возбуждения волн в электронной плазме вновь получены как частные случаи.

При учете электрон-фононного взаимодействия в рамках ПФ (§3), что соответствует введению функции диэлектрической проницаемости решетки (в длинноволновой инфракрасной области спектра) в виде

$$\hat{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_{\infty})\omega_t^2}{\omega_t^2 - \omega^2} \quad (I)$$

(ω_t - частота поперечных оптических фононов без дисперсии; ϵ_{∞} и ϵ_0 - высокочастотная и статическая диэлектрические постоянные решетки соответственно), получена бесконечная система зацепляющихся уравнений для определения амплитуд гармоник потенциалов самосогласованного электромагнитного поля, которая при отсутствии поля накачки приводит к картине продольных плазмон-фононных и поперечных поляритонных ветвей волн в электрон-фононной системе с учетом эффекта запаздывания в кулоновском взаимодействии. Проведен анализ параметрического взаимодействия волн в двухмодовом приближении для случаев $\vec{k} \parallel \vec{E}_0$ и $\vec{k} \perp \vec{E}_0$ (§4). Получены дисперсионные уравнения для взаимодействующих продольных и поперечных мод и соответствующие выражения для инкрементов параметрической неустойчивости в случае $\vec{k} \parallel \vec{E}_0$. В случае $\vec{k} \perp \vec{E}_0$ показано, что воздействию внешнего поля подвергаются только взаимодействующие друг с другом продольные и поперечные волны, поляризованные в плоскости (\vec{k}, \vec{E}_0) ; получены дисперсионное уравнение и инкремент параметрического возбуждения для этих волн в длинноволновой области спектра.

Выполненные численные оценки величины порогового поля для разных случаев возбуждения волн в типичном образце кристалла антими-

да индия (InSb) показывают, что наиболее возбудимыми и, следовательно, реальными для экспериментального наблюдения являются продольные плазмон-фононные волны в геометрии $\vec{k} \parallel \vec{E}_0$ (значение порогового поля в этом случае $E_{0th} \approx 7 \times 10^3$ В.см⁻¹).

Проанализировано условие применения дипольного приближения при рассмотрении воздействия полей электромагнитного излучения на электронные и электрон-фононные системы. Показано, что в случае возбуждения пары из продольной и поперечной волн (распространяющихся, как правило, в противоположных направлениях), благодаря аномальной дисперсии, внесенной фононной подсистемой, всегда существуют моды с волновым вектором, удовлетворяющим условию дипольного приближения при фиксированной длине волны накачки.

Глава II посвящена рассмотрению на основе выведенных уравнений ряда примеров проявления в процессах распространения, взаимодействия и параметрического возбуждения волн свойств решеточной симметрии и электронной зонной структуры, присущих реальным кристаллам^{/2-5/}.

Исследовано влияние анизотропии кристаллической решетки на распространение и параметрическое возбуждение волн в одноосных кристаллах, для которых тензор диэлектрической проницаемости кристаллической решетки может быть выражен в виде

$$\epsilon_{ij}(\omega) = \begin{pmatrix} \epsilon_{\perp}(\omega) & 0 \\ 0 & \epsilon_{\parallel}(\omega) \end{pmatrix}, \quad (2.a)$$

$$\epsilon_{\perp, \parallel}(\omega) = \epsilon_{\infty \perp, \parallel} + \frac{(\epsilon_{0 \perp, \parallel} - \epsilon_{\infty \perp, \parallel}) \omega_{T \perp, \parallel}}{\omega_{T \perp, \parallel}^2 - \omega^2} \quad (2.б)$$

(индексы \perp, \parallel показывают направления, перпендикулярные и параллельные оси симметрии \vec{c} , соответственно, а индексы T, L показывают поляризацию поперечных и продольных волн). Рассмотрены случаи падения электромагнитной волны накачки параллельно и перпендикулярно оси симметрии кристалла \vec{c} (§§ 5.6). В каждом случае для направлений распространения $\vec{k} \parallel \vec{c}$ и $\vec{k} \perp \vec{c}$ получены системы уравнений для определения амплитуд гармоник потенциалов самосогласованного поля, на основе которых получены дисперсионные уравнения, исследованы возможные случаи взаимодействия и усиления волн и определены соответствующие инкременты. Показано, что благодаря существованию аномальных мод колебаний процессы параметрического возбуждения волн в анизотропных кристаллах характеризуются большим многообразием типов взаимодействующих волн по сравнению с изотропными

системами и, следовательно, большим количеством мод, которые могут быть усилены с разными инкрементами в данном направлении распространения.

Выполнены численные оценки порогового поля для возбуждения продольных плазмон-фононных мод в геометрии $\vec{k} \parallel \vec{E}_0$, распространяющихся в направлениях $\vec{k} \perp \vec{c}$ и $\vec{k} \parallel \vec{c}$ в образце кристалла CdS со структурой вурцита. Сравнение с оценками для других случаев возбуждения волн в CdS показывает, что названные моды наиболее чувствительны к параметрическому возбуждению, что согласуется с выводами общей теории.

Исследованы эффекты непараболичности закона дисперсии энергии электронов при распространении, дисперсии и параметрическом возбуждении волн в полупроводниках с узкой запрещенной зоной, обладающих псевдорелятивистской зависимостью энергии носителей от квазиимпульса типа (кейновская модель) (§§ 7,8)

$$\mathcal{E}(\vec{p}) = [(mc^*)^2 - (pc^*)^2]^{1/2}. \quad (3)$$

Здесь $c^* = (E_g/2m)^{1/2}$, где E_g - ширина запрещенной зоны; m и \vec{p} - эффективная масса и канонический импульс электрона. Получены дисперсионные уравнения и определены сдвиги частот всех линейных электростатических и электромагнитных мод электрон-фононной системы, обусловленные непараболичностью. Показано, что благодаря возникновению дополнительного псевдорелятивистского механизма возбуждения в процесс усиления вовлекаются моды, стабильные при рассмотрении в параболическом приближении. Проведен анализ дисперсионных уравнений для параметрически взаимодействующих волн, получены соответствующие коэффициенты усиления пар волн электрон-фононной системы в геометриях $\vec{k} \parallel \vec{E}_0$ и $\vec{k} \perp \vec{E}_0$, в которых ясно выражен вклад непараболичности энергии носителей.

Численные оценки порогового поля для возбуждения плазмон-фононных и плазмон-поляритонных мод показывают, что эффект непараболичности, обуславливая дополнительный механизм параметрического возбуждения, приводит к заметному снижению величин пороговых полей.

Получены также аналитические формулы для инкрементов неустойчивости различных волн и выполнены численные оценки величин пороговых полей для электронной плазмы кейновского полупроводника без учета взаимодействия с фононами, которые совпадают с результатами гидродинамического рассмотрения при пренебрежении членами, связанными с тепловым движением частиц. Усиление волн в рассмотренных

случаях обусловлено исключительно непараболическим псевдорелятивистским механизмом возбуждения. Это — пример однокомпонентной системы, в которой согласно общей теории параметрического резонанса в плазме собственные волны не могут быть возбуждены при параболическом законе дисперсии энергии частиц.

Исследовано проявление в параметрических процессах эффекта непараболичности закона дисперсии энергии носителей в полупроводниках со сверхрешеткой (СР) (§§ 9,10). Построен гамильтониан полупроводника с одномерной СР без учета фононной подсистемы, в присутствии электромагнитного поля накачки. Выведены уравнения движения для поля возмущений и проведен анализ этих уравнений на волновые неустойчивости в высокочастотном длинноволновом пределе для случаев, когда поле накачки поляризовано перпендикулярно или параллельно оси СР. Определен сдвиг плазменной частоты, вызванный присутствием СР. В каждой из названных геометрий проанализирована возможность усиления волн, получены аналитические формулы для соответствующих инкрементов и пороговых полей возбуждения. Выполнены численные оценки величин пороговых полей для наиболее чувствительных к возбуждению мод в образце вырожденного кристалла $n\text{-InSb}$ со СР.

Обсуждена возможность осуществления нового механизма параметрического возбуждения волн под воздействием внешнего постоянного однородного электрического поля в полупроводниках при сочетании эффектов конечности ширины зоны проводимости и непараболичности закона дисперсии энергии электронов на примере кейновской модели зонной структуры (§ II). Определены условия, связывающие напряженность внешнего поля и параметры системы, при выполнении которых возможно усиление волн. Приведена формула для инкремента возбуждения продольных плазмонов, распространяющихся в направлении внешнего постоянного электрического поля.

В главе III исследуется двухзонная модель кристалла при наличии резонансного межзонного взаимодействия с перестройкой энергетической структуры носителей^{/6-9/}.

Построен модельный гамильтониан полупроводника, рассматриваемого в двухзонной модели и находящегося под одновременным воздействием сильной параметрически резонансной электромагнитной волны и другой сильной электромагнитной волны, вызывающей резонансные межзонные переходы с перестройкой энергетического спектра носителей (§ I2). Выполнены унитарное преобразование, исключающее зависимость от времени основной (не содержащей члены взаимодействия) части полученного гамильтониана, и каноническое диагонализующее преобразование Боголюбова, в результате которых получен гамильтониан системы квазичастиц

с новым спектром квазиэнергии, служащей основой для исследования коллективных свойств системы в присутствии двух полей электромагнитного излучения.

Введены обобщенные квантовые функции распределения квазичастиц и получены для них обобщенные кинетические уравнения (§ I3). Определено состояние насыщения системы, в котором числа заполнения квазичастиц равны нулю; выяснены реальные распределения электронов и дырок в этом состоянии. С использованием адиабатической гипотезы решены системы обобщенных кинетических уравнений, получены явные выражения, определяющие пространственно-временные фурье-компоненты возмущенных частей функций распределения квазичастиц, позволяющие исследовать электродинамические свойства в общем и волновые дисперсионные свойства в частности систем многих взаимодействующих частиц разных сортов с возможным взаимным превращением, в присутствии сильных полей излучения.

Полученные выражения для обобщенных квантовых функций распределения применены к задаче о поведении продольных потенциальных волн в двухзонном полупроводнике, находящемся в состоянии насыщения под одновременным воздействием двух резонансных электромагнитных полей излучения (§ I4). Получено выражение для диэлектрической функции, перенормированной за счет воздействия межзонно-резонансного электромагнитного поля, определены ее асимптотические формы в высокочастотном и низкочастотном пределах, которые дают в результате решения дисперсионного уравнения частоты собственных мод плазмонного типа и типа продольного оптического фонона. Получено дисперсионное уравнение для этих мод в присутствии внешних полей при выполнении определенного условия резонанса, связывающего рассматриваемые частоты:

$$\omega_1 + \omega_2 = \Omega_0 + \Omega_1 . \quad (4)$$

Здесь Ω_0 , Ω_1 — частоты межзонно-резонансного поля и поля параметрической накачки соответственно; ω_1 , ω_2 — частоты усиливаемых мод электрон-дырочно-фононной системы.

Определен инкремент усиления данной пары волн, показывающий явную зависимость от напряженности и частоты параметрической накачки и от частоты межзонно-резонансного поля. Показана возможность варьирования частоты накачки в некотором интервале значений, зависящем от возможных значений частоты межзонно-резонансного поля, допустимых зонной структурой кристалла.

Выполнены численные оценки пороговых значений поля параметри-

ческой накачки для усиления рассмотренных продольных мод в типичном образце арсенида галлия ($GaAs$) для некоторого согласованного интервала частот двух полей.

Получено аналитическое выражение для оператора флуктуаций электрического тока через обобщенные квантовые функции распределения квазичастиц в присутствии двух резонансных полей электромагнитного излучения, необходимое для решения задачи о параметрическом возбуждении непотенциальных волн в двухзонных полупроводниках. Показаны требующиеся при этом изменения в основных уравнениях и общая схема решения (§ 15).

В главе IV исследуются параметрические взаимодействия и возбуждение поверхностных и объемных волн в полуограниченных полупроводниках с узкой запрещенной зоной, описываемых в рамках кейновской модели, на основе гидродинамического подхода^{10-12/}. Последний в данном случае оказывается достаточно приемлемым, особенно в области длинных волн и при пренебрежении хаотическим тепловым движением частиц, в то время как наличие границ в присутствии сильного поля лазера при непараболическом законе дисперсии энергии носителей делает применение квантового формализма довольно затруднительным.

На основе уравнений гидродинамики холодной плазмы и системы уравнений Максвелла выведены системы линеаризованных уравнений, описывающие волновые возмущения, распространяющиеся вдоль плоской поверхности раздела двух кейновских полупроводников при произвольном падении на нее сильного поля электромагнитного излучения (§ 16).

Исходя из полученных уравнений проведено исследование параметрически взаимодействующих поверхностных волн при нормальном падении поля накачки в двух "традиционных" геометриях: $\vec{k} \parallel \vec{E}_0$ (§ 17) и $\vec{k} \perp \vec{E}_0$ (§ 18). Выяснено дополнительное граничное условие, выражающее характерное явление возникновения объемной продольной плазменной волны, распространяющейся вдоль поверхности раздела, взаимодействие которой с продольной компонентой непотенциального поля поверхностной волны в геометрии $\vec{k} \parallel \vec{E}_0$ обуславливает дополнительное затухание поверхностных параметрических волн. Анализированы дисперсионные уравнения и определены инкременты усиления поверхностных поляритонов и соответствующих потенциальных волн (поверхностных плазмонов).

Рассмотрены некоторые случаи параметрического усиления объемных плазмонов и TE -поляритонов, распространяющихся вдоль поверхности раздела и "запертых" внутри каждой среды, не изученных ранее (§ 19). Получены инкременты усиления потенциальных, непотенциаль-

ных и смешанных (потенциальной и непотенциальной, составляющих пару) волн.

В ходе анализа показано решающее значение непараболического "кейновского" механизма для возбуждения как поверхностных, так и объемных волн в полупроводниках с узкой запрещенной зоной при достаточно слабом электрон-фононном взаимодействии в системе, причем вследствие эффекта взаимодействия поверхностной и объемной волн для возбуждения поверхностных поляритонов (или продольных поверхностных плазменных волн при пренебрежении эффектом запаздывания кулоновского взаимодействия) $\vec{k} \perp \vec{E}_0$ - геометрия оказывается выгоднее по сравнению с $\vec{k} \parallel \vec{E}_0$ - геометрией.

В главе V по причине, аналогичной приведенной в связи с используемым в главе IV методом, применен классический кинетический подход в сочетании с макроскопическими уравнениями движения в приближении континуума для фононной и экситонной подсистем для исследования некоторых случаев распространения и возбуждения акустических волн в пьезокристаллах при наличии электронных потоков^{13,14/}.

Предложена новая схема решения задачи о влиянии электронных потоков на параметрическое возбуждение акустических и связанных (акустических и других типов) волн в пьезокристаллах, позволяющая учитывать вихревые поля, возникающие при распространении звуковой волны в системе, все виды электрон-фононного взаимодействия (взаимодействия через самосогласованное электромагнитное поле, через механизмы деформационного потенциала, пьезоэлектрической и электрострикционной связей) и наличие дрейфа части носителей (обусловленной участком поверхности Ферми, обеспечивающим их большую подвижность) (§ 20).

По предложенной схеме, на основе кинетического уравнения для электронов при учете зависимости энергии последних от деформации решетки, уравнения упругих колебаний решетки и уравнений Максвелла выведены уравнения, определяющие компоненты самосогласованного электрического поля в системе. Получен вид комплексного тензора модулей упругости, определяющего перенормированные упругие константы и коэффициент затухания звука в присутствии неполного дрейфа электронов проводимости и с учетом электрон-фононного взаимодействия. Показана возможность уменьшения поглощения звука и перехода к усилению при определенной скорости электронного потока.

Полученные формулы для комплексного тензора модулей упругости использованы при решении задачи об усилении акустических волн в кристаллах под воздействием сильного поля электромагнитного излучения при наличии дрейфа части электронов проводимости и с учетом электрон-фононного взаимодействия через деформационный потенциал,

пьезоэффекта и эффекта электрострикции (§ 21). Найдено выражение для продольной диэлектрической проницаемости кристалла при наличии дрейфа, определены дисперсия и затухание продольной акустической волны, распространяющейся вдоль пьезоэлектрической оси, найдено выражение для комплексной частоты этой волны в геометрии $\vec{k} \parallel \vec{E}_0$, показывающее эффект понижения величины порогового поля возбуждения при увеличении скорости и относительного числа дрейфующих электронов или, что то же самое, эффект понижения порога дрейфовой неустойчивости при увеличении интенсивности волны накачки.

Рассмотрен механизм возбуждения акустических волн в пьезокристаллах при взаимодействии акустических мод с экситонными, возможный при более высоких частотах накачки, на основе феноменологического уравнения движения для макроскопического вектора поляризации, уравнения упругого движения решетки, уравнения непрерывности и системы уравнений Максвелла (§ 22). Проведен анализ дисперсионных уравнений для экситон-фононной системы, определены спектры волн и инкременты усиления экситонной и акустической мод под воздействием сильной электромагнитной волны. Показано, что в принятом подходе дрейф электронов влияет на поведение акустической моды через перенормированный комплексный тензор модулей упругости, аддитивно уменьшая порог ее параметрического возбуждения.

Глава VI посвящена проблеме нейтронной спектроскопии параметрически неравновесных квазичастиц в кристаллах и некоторым связанным с ней аспектам теории коллективных флуктуаций в электрон-фононных системах, взаимодействующих с сильным полем электромагнитного излучения /15,16/.

На основе подходящего квантового формализма вычислены корреляционные функции флуктуаций плотности электронов и флуктуаций фононов в поляритонной области спектра для системы с явно зависящим от времени (через члены взаимодействия с сильным полем электромагнитного излучения) гамильтонианом. Показано, что спектральное распределение флуктуаций имеет максимумы при частотах параметрически взаимодействующих мод, удовлетворяющих условию резонанса, причем уровень коллективных флуктуаций аномально возрастает при приближении к порогу параметрической неустойчивости указанных мод.

С использованием полученных фононных корреляционных функций вычислены сечения неупругого рассеяния нейтронов на поляритонных модах электрон-фононной системы, удовлетворяющих условию параметрического резонанса, которые обнаруживают сильное возрастание по мере приближения интенсивности поля лазерной накачки к порогу возбуждения рассматриваемых мод. Этим показано, что явление параметри-

ческого резонанса может быть использовано в качестве эффективного метода решения проблемы малой концентрации в нейтронной спектроскопии квазиравновесных и неравновесных квазичастиц в твердых телах.

Рассмотрено неупругое рассеяние нейтронов на связанных плазмон-фононных модах в антимониде индия в условиях параметрического резонанса. Вычислены сечения когерентного рассеяния σ нейтронов на выбранных высокочастотной плазмоноподобной и низкочастотной оптически-фононоподобной модах в образце $n\text{-InSb}$ при выполнении частотного условия параметрического резонанса, которые оказались зависящими от интенсивности поля накачки, как

$$\sigma \sim \left[1 - \left(\frac{E_0}{E_{0th}} \right)^4 \right]^{-1} \quad (5)$$

(E_{0th} — напряженность порогового поля возбуждения). Численными оценками показано, что, увеличивая интенсивность поля лазера до величин, близких к порогу параметрического возбуждения определенных мод собственных колебаний в кристалле, можно добиться увеличения сечений рассеяния нейтронов на этих модах на несколько порядков по сравнению с их значениями при отсутствии внешнего поля.

Глава VII является заключительной. В ней обсуждены основные направления дальнейшего развития исследований параметрических явлений в кристаллах, в особенности проблема последовательного учета электрон-фононного взаимодействия в условиях параметрического резонанса /17/. На основе метода Н.Н.Боголюбова и Н.Н.Боголюбова (мл.) исключения бозонных операторов выведено обобщенное кинетическое уравнение для электрон-фононной системы, взаимодействующей с сильным полем электромагнитного излучения. Эти уравнения вместе с системой уравнений Максвелла для фононного поля позволяют получить новые дисперсионные уравнения с учетом влияния эффектов электрон-фононных столкновений и исследовать поведение как волновых, так и аперриодических возмущений в системе. Полученные уравнения также могут служить основой для исследования процессов нелинейной проводимости и других кинетических явлений в присутствии сильных полей электромагнитных волн. Показано, что в приближении медленных осцилляций электронов во внешнем поле интеграл столкновений приводит в случаях взаимодействия как с оптическими, так и с акустическими фононами к выражению для времени релаксации электронов, зависящего от частоты и интенсивности поля накачки — результату, полученному ранее с помощью другой процедуры. Приведено линеаризованное уравнение для возмущения функции распределения электронов в фурье-представлении,

удобное для анализа дисперсионных свойств системы в присутствии сильной электромагнитной волны при последовательном учете электрон-фононного взаимодействия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты диссертации могут быть кратко сформулированы в виде следующих положений:

1. На основе модельного гамильтониана в представлении вторичного квантования, явно зависящего от времени, в приближении случайных фаз выведена основная система уравнений квантового формализма для описания динамических, в том числе волновых свойств электрон-фононных систем, находящихся под воздействием электромагнитного излучения большой мощности. Эффективность развитого формализма показана при описании картины распространения, дисперсии, параметрического взаимодействия и возбуждения собственных волн как в идеальных системах, так и при учете эффектов, присущих реальным кристаллам.

2. Для идеальных бесконечных однородных изотропных электронных и электрон-фононных систем проведен всесторонний анализ поведения собственных волн, выяснены возможные случаи параметрического взаимодействия и усиления в двухмодовом приближении и определены соответствующие инкременты неустойчивости. Некоторые известные результаты анализа параметрического возбуждения волн в электронной плазме вновь получены как частные случаи.

3. На примере идеальных систем проанализировано условие справедливости дипольного приближения при исследовании воздействия полей электромагнитного излучения на электронные и электрон-фононные системы. Показано, что в случае возбуждения пары из продольной и поперечной волн, благодаря наличию аномальной дисперсии, внесенной фононной подсистемой, всегда существуют моды с волновым вектором, удовлетворяющим условию дипольного приближения при фиксированной длине волны накачки.

4. На основе разработанного квантового формализма проведено детальное рассмотрение ряда примеров проявления эффектов электронной зонной структуры и решеточной симметрии кристаллов в процессах распространения, взаимодействия и возбуждения волн, показывающее значительную чувствительность свойств реальных систем к параметрическому воздействию электромагнитного излучения большой мощности.

Для случая анизотропных систем на примере одноосных кристаллов показано, что, благодаря существованию аномальных мод колебаний, процессы параметрического возбуждения волн характеризуются большим

многообразием типов взаимодействующих волн по сравнению с изотропными системами и, следовательно, большим количеством мод, которые могут быть усилены с разными инкрементами в данном направлении распространения.

Эффекты непараболичности закона дисперсии энергии электронов исследованы на примере полупроводников с узкой запрещенной зоной, описываемых в рамках кейновской модели, и полупроводников со сверхрешеткой. Проведен анализ дисперсионных уравнений и определены сдвиги частот, вызванные эффектом непараболичности, проанализированы возможные случаи усиления волн. В случае кейновских кристаллов показано, что благодаря возникновению дополнительного псевдорелятивистского механизма возбуждения в процесс усиления вовлекаются моды, стабильные при рассмотрении в параболическом приближении, причем указанный механизм приводит к заметному снижению величин пороговых полей возбуждения.

Возможность осуществления нового механизма параметрического возбуждения волн под воздействием внешнего постоянного однородного электрического поля при сочетании эффектов конечности ширины зоны проводимости и непараболичности закона дисперсии энергии электронов показана на примере кейновской модели зонной структуры полупроводника. Определены условия, связывающие напряженность внешнего поля и параметры системы, при выполнении которых возможно усиление волн.

5. Проведено детальное исследование случая одновременного воздействия на электрон-дырочно-фононную систему поля параметрической накачки и межзонно-резонансного поля электромагнитных волн, представляющего большой интерес с точки зрения изучения как общих динамических свойств, так и протекания волновых процессов при наличии резонансного межзонного взаимодействия с перестройкой энергетического спектра частиц.

Подробно рассмотрен процесс смешивания носителей с образованием системы новых квазичастиц, введены обобщенные квантовые функции распределения для последних и выведены обобщенные кинетические уравнения, позволяющие исследовать поведение динамической системы в присутствии двух внешних резонансных полей с разными частотами.

Полученная система кинетических уравнений применена для детального рассмотрения задачи о параметрическом взаимодействии и возбуждении потенциальных волн и построения схемы решения данной задачи для непотенциальных волн в двухзонных кристаллах, находящихся в состоянии насыщения. Получены аналитические выражения для диэлектрической функции системы, перенормированной за счет воздействия

межзонно-резонансного электромагнитного поля, а также для оператора флуктуации электрического тока, позволяющие исследовать волновые дисперсионные и другие электродинамические свойства системы в присутствии двух сильных резонансных полей электромагнитных волн.

6. Анализ параметрической неустойчивости во всех рассмотренных системах доведен до численных оценок величин пороговых полей усиления, которые показывают закономерность параметрических процессов, заключающуюся в степени чувствительности к возбуждению разных типов волн и геометрии процесса. Так, наиболее легко возбудимыми являются продольные волны, распространяющиеся параллельно электрическому вектору волны накачки ($\vec{k} \parallel \vec{E}_0$). Напряженность порогового поля для этих волн, как правило, лежит в интервале $10^3 + 10^4$ В·см⁻¹, что легко достижимо при помощи современных лазеров. Менее чувствительными к возбуждению являются смешанные пары из продольных и поперечных волн в геометрии $\vec{k} \perp \vec{E}_0$, а "чистые" пары из поперечных электромагнитных волн в большинстве случаев практически стабильны.

7. В рамках гидродинамического подхода проведено исчерпывающее исследование непараболического псевдорелятивистского механизма параметрического взаимодействия и возбуждения поверхности и объемных волн в полуграниченных системах. Выяснено дополнительное граничное условие, выражающее характерное явление возникновения объемной плазменной волны, взаимодействие которой с продольной компонентой поля поверхностной волны в геометрии $\vec{k} \parallel \vec{E}_0$ обуславливает дополнительное затухание поверхностных параметрических волн. Показано решающее значение "кейнковского" механизма для возбуждения как поверхностных, так и объемных волн в полупроводниках с узкой запрещенной зоной при достаточно слабом электрон-фононном взаимодействии, причем вследствие взаимодействия поверхностных и объемных волн для возбуждения поверхностных поляритонов $\vec{k} \perp \vec{E}_0$ -геометрия оказывается выгоднее по сравнению с $\vec{k} \parallel \vec{E}_0$ -геометрией.

8. Предложена новая схема решения задачи о влиянии электронных потоков на параметрическое возбуждение акустических и связанных экситон-фононных волн в пьезокристаллах, позволяющая учитывать вихревые поля, возникающие при распространении звуковой волны в системе, все виды электрон-фононного взаимодействия и наличие дрейфа части носителей. Получен новый вид комплексного тензора модулей упругости, определяющего перенормированные упругие константы и коэффициент затухания акустических фононов в условиях неполного дрейфа электронов проводимости. Показан эффект понижения величины порогового поля возбуждения при увеличении скорости и относительно-

го числа дрейфующих электронов или, что то же самое, эффект понижения порога дрейфовой неустойчивости при увеличении интенсивности параметрической накачки.

9. В рамках квантового формализма вычислены корреляционные функции коллективных флуктуаций в поляритонной области спектра для электрон-фононной системы, взаимодействующей с сильным полем электромагнитного излучения, с помощью которых получены формулы для сечений неупругого рассеяния нейтронов на плазмон-фононных и поляритонных модах системы, обнаруживающие аномальное возрастание по мере приближения к области параметрической неустойчивости указанных мод. Этот эффект продемонстрирован численными расчетами сечений когерентного неупругого рассеяния нейтронов на выбранных модах кристалла антимонида индия. Таким образом показана возможность использования явления параметрического резонанса в качестве эффективного метода решения проблемы малой концентрации в нейтронной спектроскопии квазиравновесных и неравновесных квазичастиц в кристаллах.

10. Исследована проблема последовательного учета электрон-фононного взаимодействия в системах, взаимодействующих с сильным полем электромагнитного излучения, в связи с проблемой выхода за рамки приближения случайных фаз. На основе метода Н.Н.Боголюбова и Н.Н.Боголюбова (мл.) исключения бозонных операторов выведено обобщенное кинетическое уравнение для электрон-фононной системы в указанных неравновесных условиях, позволяющее исследовать волновые свойства, процессы нелинейной проводимости и другие кинетические явления в системе при учете влияния эффектов электрон-фононных столкновений в присутствии сильных полей электромагнитных волн.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Vo Hong Anh and Nguyen Van Trong. On the theory of parametric excitation in quantum electron-phonon systems. - Phys. Stat. Sol. (b), 1977, v. 83, N 2, p. 395-404.
2. Vo Hong Anh, Nguyen Nhu Dat. Parametric action of a strong radiation field on anisotropic semiconductors. - Phys. Stat. Sol. (b), 1977, v. 84, N 1, p. 115-123.
3. Vo Hong Anh, Nguyen Nhu Dat. Parametric excitation in Kane's semiconductors. - Phys. Stat. Sol. (b), 1978, v. 86, N 2, p. 585-591.
4. Nguyen Nhu Dat, Nguyen Ngoc Thuan, Vo Hong Anh. Parametric excitation in semiconductors with superlattices. - Commun. Joint Inst. Nucl. Res. E17-12412, Dubna, 1979, 14 p.

5. Во Хонг Ань, Нгуен Нгок Тхуан. О возможности параметрического возбуждения волн в электронной плазме полупроводников с конечной шириной зоны проводимости. - Укр. физ. журн., 1979, т. 24, в. I, с. 74-78.
6. Vo Hong Anh, Nguyen Ngoc Thuan. Theory of parametric interactions in semiconductors under a simultaneous action of two high-power electromagnetic radiation fields. I. Generalized quantum distribution functions. - Phys. Scripta, 1980, v.22, N 4, p. 406-410.
7. Vo Hong Anh, Nguyen Ngoc Thuan. Theory of parametric interactions in semiconductors under a simultaneous action of two high-power electromagnetic radiation fields. II. Instability analysis. - Phys. Scripta, 1980, v. 22, N 4, p. 411-414.
8. Vo Hong Anh, Nguyen Ngoc Thuan. On the quantum theory of parametric excitation in solids with resonant interband interaction. - In: Recent advances in statistical mechanics. Proceedings of the Brasov International school, August-September 1979, Central Institute of Physics, Bucharest-Romania, 1980, p. 631-645.
9. Vo Hong Anh. A quantum approach to the parametric excitation problem in solids. - Phys. Reports, 1980, v. 64, N 1, p. 1-45.
10. Во Хонг Ань, Нгуен Нгок Тхуан, Нгуен Ван Чонг. Параметрическое возбуждение поверхностных волн в кейновских полупроводниках. - Физ. и техн. полупров., 1978, т. 12, в. 7, с. 1261-1266.
11. Vo Hong Anh. Theory of parametric excitation of surface waves by laser radiation in narrow-gap semiconductors. - In: Proceedings of the fourth international conference on solid surfaces and the third European conference on surface science. September 22-26, 1980, Cannes, France. - Supplement à la Revue "Le vide, les couches minces" n°201, v. II, p. 899-902.
12. Во Хонг Ань. Возбуждение поверхностных поляритонов лазерным излучением в полупроводниках с узкой запрещенной зоной. - Физ. и техн. полупров., 1982, т. 16, в. I, с. 82-88; Возбуждение поверхностных поляритонов лазерным излучением в полупроводниках с узкой запрещенной зоной. Ч. I: Случай параллельной поляризации падающей волны. - Препринт Объед. ин-та ядерн. иссл., PI7-80-4II, Дубна, 1980, 10 с.; Ч. II: Случай перпендикулярной поляризации падающей волны. - Препринт Объед. ин-та ядерн. иссл., PI7-80-426, Дубна, 1980, 8 с.
13. Во Хонг Ань. О параметрическом возбуждении акустических волн при наличии электронных потоков. - Физ. металлов и металловед., 1980, т. 49, в. 4, с. 686-693.

14. Vo Hong Anh. On the theory of parametric wave interaction in exciton-phonon systems of piezoelectric crystals. - Comm. Joint. Inst. Nucl. Res., E17-12413, Dubna, 1979, 12 p.
15. Vo Hong Anh. On the problem of neutron spectroscopy of parametrically nonequilibrium quasiparticles in solids. I. Neutron inelastic scattering on polaritons in the parametric resonance conditions. - Comm. Joint Inst. Nucl. Research, E17-81-60, Dubna, 1981, 14 p.
16. Vo Hong Anh. On the problem of neutron spectroscopy of parametrically nonequilibrium quasiparticles in solids. II. Numerical calculations of inelastic scattering cross sections in InSb. - Comm. Joint Inst. Nucl. Research, E17-81-61, Dubna, 1981, 8 p.
17. Во Хонг Ань. Обобщенное кинетическое уравнение для электрон-фононной системы, взаимодействующей с сильным полем электромагнитного излучения. - В кн.: II международный симпозиум по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 25-29 августа 1981 года. ОИИИ ДП7-81-758, Дубна, 1981. с. 54-63.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 июля 1982 года.