

БИБЛИОГРАФИЯ

539.953(049.3)

**НЕРАВНОВЕСНЫЕ ФОНОНЫ В ДИЭЛЕКТРИКАХ  
И ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

Nonequilibrium Phonons in Nonmetallic Crystals/Eds W. Eisenmenger, A. A. Kaplyanskii. — Amsterdam; Oxford; New York; Tokyo: North-Holland, 1986.—721 p.— (Modern Problems in Condensed Matter Sciences. V. 16/Gen. Eds V. M. Agranovich, A. A. Maradudin).

Традиционные ультразвуковые методы, развитые на сегодняшний день, имеют своим пределом частоты упругих колебаний  $\sim 10^{10}$  Гц. Однако бурно развивающаяся последние двадцать лет техника тепловых импульсов позволила поднять «планку» вплоть до частот на границе зоны Бриллюэна, т. е. до  $\leq 10^{12}$  Гц. Такие же частоты достигаются и при генерации неравновесных фононов при оптическом возбуждении. Методы детектирования таких фононов развивались одновременно с методами их генерации; сейчас в основном можно говорить о создании новой области физики конденсированного состояния — спектроскопии неравновесных фононов (акустических). В рецензируемом томе представлены монографические обзорные статьи, посвященные этой проблематике. Они дают современное представление о развивающемся разделе физики твердого тела, относящейся к физике фононов терагерцевого и субтерагерцевого диапазонов.

В гл. 10 Вайс рассматривает проблему переноса тела через границу раздела твердое тело/твердое тело, что чрезвычайно важно для оперирования характеристиками «фононных генераторов», которыми часто служат в простейших случаях металлические пленки, напыляемые на полупроводник или изолятор и нагреваемые либо током, либо лазерным лучом. Прохождение, отражение фононов от границы раздела рассматривается с точки зрения континуальной теории упругости.

В гл. 2 (Х. Марис) представлены основы красивейшего явления в физике неравновесных фононов — фокусировки фононов; фокусировка фононов, а точнее концентрирование потока фононов в избранных направлениях, возникает вследствие анизотропии упругих свойств материалов, поскольку направление распространения фононов отличается от направления их волнового вектора. Приведены крайне важные для экспериментаторов численные данные о фокусировке для кубических, гексагональных и тригональных кристаллов. Фокусировку фононов неизбежно нужно учитывать при распространении баллистических фононов; однако и при изучении классической теплопроводности (когда длина свободного пробега много меньше размера образца), особенно в случаях, когда данные о длинах пробега фононов отсутствуют, знание анизотропии распространения фононов позволит реально определить оптимальный теплоотвод.

В гл. 3 И. Б. Левинсон описывает введенные им совместно с Д. В. Казаковцевым режимы распространения фононов — квазибаллистический и квазидиффузионный. В отличие от классических режимов распространения, например баллистического (бесстолкновительного) и диффузионного, эти режимы характеризуются одновременным изменением спектрального состава фононов. И в США, и в СССР эти представления нашли экспериментальные подтверждения. Развита теория нелокальной теплопроводности, разрешающая проблему, поставленную еще Пайерлсом, — формальную расходимость потока энергии при доминирующем рэлеевском рассеянии фононов на примесях.

В гл. 4 (Л. Чэллис) описан широкий круг явлений, названный автором эффектом «кроссинга». Суть его заключается в следующем. Известно, что наличие в материале ионов или дефектов с частотами возбуждения, лежащими в пределах спектра пропускаемых фононов, приведет к рассеянию фононов соответствующих частот на этих центрах, т. е. к увеличению теплового сопротивления образца. Если перестраивать уровни какого-либо центра (например, магнитным полем), то при совпадении частот двух различных возбуждений будет наблюдаться дополнительное изменение теплового сопротивления образца, вызванное эффектом взаимодействия этих возбуждений («кроссингом»). Измерение сигналов «кроссинга» позволяет получать информацию о собственных значениях центров. Высокая чувствительность описанных экспериментальных методик основана на применении дифференциальных методов измерения потока тепла с помощью модуляционной методики. Предельное разрешение данной методики  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ , что составляет несколько МГц по частоте и дает возможность разрешить сверхтонкую структуру уровней.

В гл. 5 В. Брон привлекает особое внимание к информативности техники «вибранных боковых полос» (стоксового и антистоксового повторения бесфононной линии люминесценции). С помощью этой техники получены, например, пространственные профили распределения фононов для частот от 0,5 до 4 ТГц. Представляет безусловный интерес наблюдение стимулированной фононной эмиссии и непосредственное измерение времен жизни когерентных продольных оптических фононов с помощью техники КАРС (когерентного антистоксова рассеяния света).

В гл. 6, написанной К. Ренком, излагаются исследования процессов ангармонического распада с помощью индуцированной фононами флюоресценции. В этих экспериментах широко использована техника перестраиваемых магнитным полем или одноосным сжатием дублетных уровней оптически возбуждаемых примесей. Таким способом к настоящему времени осуществлено детектирование фононов в таких материалах, как  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SrF}_2$  и  $\text{LaF}_3$ .

В этой главе приведены единственные имеющиеся в литературе экспериментальные данные об отклонениях распределения фононов от планковского и прямые измерения времен ангармонического распада в функции частоты фононов, а также обсуждаются возможные причины отклонения результатов эксперимента от большого количества теоретических предположений. Наиболее примечательными являются спектры неравновесных фононов, изменяющиеся со временем, что наглядно демонстрирует характер термализации фононов в зависимости от частоты и роль различных режимов распространения фононов (в том числе и влияние поверхности кристаллов).

В следующей гл. 7 К. Ренк излагает основы оптического детектирования  $29 \text{ см}^{-1}$ -фононов в рубине с помощью генерации фононов как металлическими нагревателями, так и оптическим возбуждением (используя и экзотическое» дальнейе ИК-излучение для прямой генерации фононов). Генерация фононов происходит на переходе  $2\bar{A} \rightarrow \bar{E}$  (уровня возбужденного иона  $\text{Cr}^{+3}$  в рубине, расщепленного кристаллическим полем), а детектирование основано на наблюдении обратного перехода  $\bar{E} \rightarrow 2\bar{A}$  с помощью флюоресценции. С помощью этой техники получены пространственные про-

фили  $29 \text{ см}^{-1}$  фононов и определены времена ангармонического распада. Обсуждено влияние процессов упругого и неупругого рассеяния фононов как для низкочастотного предела, так и для высокочастотного.

Резонансные явления при рассеянии  $29 \text{ см}^{-1}$  фононов на электронных состояниях ионов  $\text{Cr}^{+3}$  в рубине, возбужденном различными способами, рассмотрены в гл. 8, написанной А. А. Каплянским и С. А. Басуном. Многократное резонансное рассеяние фононов (так называемое радиационное «пленение») происходит тогда, когда объем, в котором они рассеиваются, много больше длины свободного пробега резонансного кванта. Пространственная диффузия резонансной фононной флюоресценции позволяет рассматривать многократное резонансное рассеяние фононов как новое явление, причем кинетические свойства фононов анализируются как в классическом, так и в квантовом приближении. Показано, каким образом изучение резонансного пленения фононов в рубине позволяет получить богатую информацию о различных механизмах рассеяния фононов на локальных электронных состояниях в кристаллах. Явление пленения фононов представляет большой интерес не только для проблемы транспорта акустических фононов в кристаллах, но и для общей физической проблемы резонансного взаимодействия излучения с веществом.

В гл. 9 (Л. В. Келдыш и Н. Н. Сибельдин) излагается материал, посвященный явлениям, связанным со взаимодействием электронно-дырочных капель (ЭДК) и экситонов с потоком неравновесных акустических фононов. Неравновесные фононы определяют при мощной накачке поведение ЭДК — пространственно-временную эволюцию облака ЭДК при импульсном возбуждении, кинетику конденсации и рекомбинации, размеры и концентрацию ЭДК. С другой стороны, приобретается информация и о спектре, распространении и релаксации фононов.

К сожалению, в книге отсутствует материал о методах генерации и детектирования неравновесных фононов с помощью сверхпроводниковых детекторов, который можно, однако, почерпнуть в другой книге, вышедшей в 1985 г. в издательстве «Плениум пресс» (США): «Динамика неравновесных фононов» под редакцией проф. В. Брона.

Рецензируемая книга, безусловно, будет интересна научным сотрудникам, работающим в области оптоэлектроники, микроэлектроники и криоэлектроники.

В целом коллективная монография «Неравновесные фононы в кристаллах» дает достаточно полное представление о современном состоянии исследований в такой важной и актуальной области физики твердого тела, какой является физика фононов терагерцевого и субтерагерцевого диапазона. Можно было бы только приветствовать издание этой книги на русском языке в издательстве «Наука», что сделает книгу более доступной советскому читателю.