

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**К ВОПРОСУ О СОСТОЯНИИ ТЕОРИИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ *)***А. И. Ансельм*

В своём сообщении я пытаюсь ответить на следующие вопросы, которые представляют, с моей точки зрения, интерес для экспериментаторов: 1) почему исследование полупроводников играет такую большую роль в изучении твёрдого тела, 2) какие положения и результаты теории полупроводников можно считать достаточно обоснованными и 3) какие задачи ставит теория полупроводников перед экспериментом.

Электронная теория кристаллов начала развиваться с применения её к металлам. Теория полупроводников возникла в начале 30-х годов уже после установления законов квантовой механики и квантовой статистики. В довоенный период теория полупроводников получила фундаментальное развитие в работах: А. Вильсона, Я. И. Френкеля, Л. Д. Ландау, Г. Фрёлиха, Н. Мотта, Б. И. Давыдова, В. Шоттки и др. В этих работах были рассмотрены вопросы химического потенциала в полупроводниках, движения электрона (дырки) в атомном и ионном кристаллах, выпрямления тока на контакте полупроводников и металлов, экситонного (безтокового) возбуждения кристалла, эффекта сильного электрического поля и др. В послевоенное время следует отметить интересные работы С. И. Пекара по теории поляронов с сильной связью и важные работы В. Шокли и его сотрудников по теории электронно-дырочных переходов.

**ПОЧЕМУ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ИГРАЕТ
ТАКУЮ БОЛЬШУЮ РОЛЬ В ИЗУЧЕНИИ ТВЁРДОГО ТЕЛА**

Я не собираюсь останавливаться на вопросе, почему современная физика уделяет такое большое внимание изучению полупроводников. Ответ на этот вопрос очевиден — он связан с большой и всё возрастающей ролью полупроводников в современной технике и,

*) Доклад на пленарном заседании Всесоюзной конференции по полупроводникам в Ленинграде 14 ноября — 20 ноября 1955 г.

в частности, радиотехнике. Я хочу остановиться только на вопросе, поставленном в заголовке этого раздела.

Во-первых, отметим, что особенности зонной структуры энергетического спектра электрона в кристалле проявляются гораздо конкретнее и разнообразнее в полупроводниках, чем, например, в металлах. Только в полупроводниках мы с полной отчётливостью различаем два рода носителей тока (электроны и дырки), анизотропию эффективной массы (циклотронный резонанс), локализованные уровни энергии (доноры, акцепторы и поверхностные уровни), наложение вырожденных энергетических зон (теллур и др.).

Во-вторых, колебания кристаллической решётки играют в полупроводниках особо активную роль. Так, электроны взаимодействуют в ионных кристаллах не только с акустической ветвью, но, главным образом, с оптической. При учёте такого взаимодействия мы получаем совсем иную зависимость длины свободного пробега электрона от его энергии и от температуры. В некоторых случаях взаимодействие между электроном и колебаниями решётки нельзя считать малым. Развитие этих представлений для ионных кристаллов привело к теории полиронов с сильной связью (С. И. Пекар) и к теории безизлучательных переходов (Э. И. Адирович, С. И. Пекар, М. А. Кривоглаз, К. Хуанг и А. Рис). Наконец, в полупроводниках интенсивность колебаний решётки (температура) определяет такую важную величину, как концентрация носителей тока.

В-третьих, при изменении температуры полупроводника сильно меняются концентрация носителей тока и отношение числа электронов к числу дырок. Варьируя температуру в германии от гелиевой до нескольких сот градусов Цельсия, можно при соответствующих обстоятельствах изменить концентрацию носителей тока более чем на десять порядков. Такое широкое изменение концентрации и наличие двух родов носителей тока позволяют гораздо разнообразнее и глубже исследовать различные кинетические процессы: электропроводность, теплопроводность, термо- и гальваномагнитные явления и т. д. Так, например, изучение закона Видемана — Франца при разных концентрациях электронов позволяет проследить изменение коэффициента, стоящего в формуле, от 2 (невыврожденный газ) до $\frac{\pi^2}{3}$ (вырожденный газ).

В-четвёртых, возможность варьирования концентрации, наличие двух родов носителей тока и двух типов полупроводника привели к созданию новой области физики и техники полупроводников: выпрямлению и усилению на электронно-дырочных переходах. Развитие этих областей электроники твёрдого тела сыграло выдающуюся роль не только в радиотехнике, но и в исследовании физических процессов в полупроводниках (определение дрейфовой подвижности и времени жизни носителей тока и др.).

В-пятых, целый ряд физических явлений вообще смог быть обнаружен только в полупроводниках или диэлектриках; к их числу принадлежат: внутренний фотоэффект, циклотронный резонанс, явления, связанные с F - и F' -центрами, эффект сильного электрического поля и т. д.

Наконец, в-шестых, я хотел бы отметить глубокую связь, которая существует в полупроводниках между электронными процессами и всевозможными дефектами кристалла. Не говоря уже о том, что само существование примесных полупроводников обусловлено наличием посторонних атомов или дефектов решётки, роль последних велика и в кинетике электронных процессов. Рассеяние электронов на ионах примеси сказывается в некоторых случаях при температурах, близких к комнатной. Особенно большую роль играет рассеяние носителей тока на компенсированных ионах примеси (большая концентрация компенсирующих друг друга доноров и акцепторов). Повидимому, значительную роль могут играть в рассеянии электронов дефекты решётки. Это позволяет думать о более глубокой связи, которая существует между электронными и механическими свойствами кристаллов.

Можно было бы указать ещё ряд особенностей полупроводников, делающих их изучение столь плодотворным для проблемы исследования свойств твёрдого тела, однако мы ограничимся сказанным выше. Перейдём к рассмотрению второго вопроса.

КАКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ВЫВОДЫ ТЕОРИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ МОЖНО СЧИТАТЬ ДОСТАТОЧНО ОБОСНОВАННЫМИ

Рассмотрим вначале весьма важный вопрос о применимости одноэлектронного приближения в кристаллах.

Этот вопрос представляется мне очень важным, так как отказ от одноэлектронного приближения (зонной теории) лишает нас не только привычной схемы энергетических зон, но и возможности использования статистики Ферми и кинетического уравнения. Можно встретить высказывания, что одноэлектронное приближение в кристаллах не обосновано и исчерпало свои возможности, так что дальнейшее развитие его нецелесообразно. Так, например, С. В. Вонсовский пишет¹: «В данное время квантовая теория кристаллов испытывает известный кризис в связи с тем, что наиболее распространённая одноэлектронная (так называемая «зонная») модель уже исчерпала свои возможности и дальнейшее её применение к объяснению реальных свойств кристаллов приводит к трудностям принципиального характера. Причина этих трудностей лежит в основном упрощающем предположении этой модели — пренебрежении взаимодействием между электронами в кристалле». Ещё категоричнее пишет В. Л. Бонч-Бруевич² (примечание на стр. 65): «Из сказанного ясно, сколь бесплодны попытки количественного уточнения и улучшения методов «одноэлектронной» теории, до сих пор ещё пред-

принимающиеся в некоторых работах. Эти попытки, правда, вполне «безвредны», ибо не искажают «фермиевского» характера спектра, но и в такой же степени бесполезны». Рассмотрим вопрос подробнее. В первую очередь отметим, что встречающееся утверждение, что в методе самосогласованного поля (одноэлектронном приближении) пренебрегают взаимодействием между электронами, неправильно. В методе самосогласованного поля мы заменяем действие всех остальных электронов на данный полем их усреднённого положения, так что пренебрегаем только корреляцией в движении электронов. Успехи применения метода самосогласованного поля к многоэлектронным атомам общеизвестны. Расчёты электронной плотности и энергетических термов для многоэлектронных атомов дают не только хорошие качественные, но и количественные результаты. Наконец, следует иметь в виду, что сама схема заполнения электронных оболочек атомов периодической системы элементов основана на одноэлектронном приближении. Нет оснований думать, что одноэлектронное приближение неприменимо к молекулам. Метод Мулликена — Гунда тоже использует одноэлектронные волновые функции. Всё это позволяет думать, что одноэлектронное приближение в большой мере применимо и к электронам в кристалле, так как средняя концентрация их в твёрдом теле того же порядка, что в атомах и молекулах. Особенно благоприятны условия для применения одноэлектронного приближения в случае электронных полупроводников.

При концентрациях электронов проводимости порядка $10^{12} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ среднее расстояние между ними порядка $10^{-4} - 10^{-6} \text{ см}$, т. е. достаточно велико для того, чтобы имело место экранирование.

В работе Пекара³, посвящённой обсуждаемому нами вопросу, показано, что блоховские одноэлектронные функции могут быть обоснованы как решения уравнений самосогласованного поля Хартри — Фока в случае электрона проводимости, слабо возмущающего электронные оболочки атомов кристалла. В других случаях, как подчёркивает сам автор, «не исключено, однако, обоснование блоховских одноэлектронных функций в каком-либо другом смысле». Так, например, как показал Пекар в другой работе⁴, если поляризация электронов оболочек атомов кристалла адиабатически следует за движением «лишнего» электрона, то задача также сводится к рассмотрению движения одного электрона во внешнем периодическом поле. Таким образом, зонная теория во всяком случае применима к электронным полупроводникам. Однако я считаю по соображениям, изложенным выше, что пределы её применимости гораздо шире. Хотя металлы не являются непосредственной темой моего сообщения, можно привести некоторые аргументы в пользу законности применения одноэлектронного приближения и для металлов. Как было отмечено Гуревичем⁵, эффективное сечение столкновения, рассчитанное на все электроны проводимости металла, должно быть уменьшено

в отношении $\left(\frac{kT}{\epsilon_0}\right)^2$, где ϵ_0 — максимальная энергия Ферми. Это обстоятельство связано с тем, что сталкивающиеся электроны могут менять своё квантовое состояние только в том случае, если их энергии лежат в зоне размытости распределения Ферми. Против этого было выдвинуто возражение, что само распределение Ферми основано на одноэлектронном приближении и поэтому не может служить для его обоснования. Однако мы не можем признать это возражение основательным, так как в теоретической физике мы почти всегда обосновываем исходные предположения не *a priori*, а *a posteriori* (например, в теории возмущений).

Может быть, стоит отметить, что однонуклонное приближение в теории атомного ядра, так называемая оболочечная теория, обосновывается Ферми⁶ теми же соображениями, связанными с применением принципа Паули к нуклонам в ядре. Следует подчеркнуть, что по понятным соображениям, отмеченным Бором⁷, однонуклонное приближение в атомном ядре обосновано значительно хуже, чем одноэлектронное приближение для атомных систем.

Первый значительный успех многоэлектронной модели кристаллов связан с квантовой теорией ферромагнетизма Френкеля — Гейзенберга. Для количественного развития теории Гейзенберг воспользовался моделью Гайтлера — Лондона, согласно которой в нулевом приближении вблизи каждого узла решётки движется один электрон в *s*-состоянии, не возмущаемый действием остальных узлов решётки. Рассмотрение возбуждённых состояний атомов кристалла позволило Френкелю ввести бестоковые возбуждения диэлектрика — так называемые экситоны. Следует отметить, что явление ферромагнетизма и бестоковые возбуждения кристалла не укладываются в рамки одноэлектронного приближения. Полярная модель Шубина — Вонсовского, в которой учитывается возможность перехода электрона с одного узла решётки на другой с образованием дырки и двойки, придала модели Гейтлера — Лондона — Гейзенберга свойство токовой проводимости — электронной и дырочной.

Всякая многоэлектронная теория кристалла имеет то преимущество перед одноэлектронной, что в ней более точно учитывается взаимодействие электронов (корреляция в движении электронов). Однако следует подчеркнуть, что конкретные результаты в многоэлектронной теории получаются только при определённых упрощающих предположениях.

В первую очередь следует отметить, что взаимодействие электронов проводимости металла с электронами замкнутых оболочек ионов и в многоэлектронной модели рассматривается в одноэлектронном приближении. В то же время состояние электронов в замкнутых оболочках ионов не может существенно отличаться от состояния электронов проводимости с энергией ϵ , если $(\epsilon_0 - \epsilon) \gg kT$, где ϵ_0 — граничная энергия Ферми.

Во-вторых, полярная модель (как отмечает сам автор¹) в силу сделанных в ней приближений применима только к полупроводникам, а не к металлам, т. е. тогда, когда достаточно оправдано одноэлектронное приближение.

В-третьих, конкретные выводы многоэлектронной теории получены в результате использования для разложения волновой функции неполной системы атомных функций. Оценить вносимую при этом ошибку весьма затруднительно.

В-четвёртых, обычная многоэлектронная модель, в которой возле каждого узла решётки имеется один электрон, не удовлетворяет условию спинового насыщения, характерного для замкнутых оболочек атомов полупроводника. В силу этого квазичастицы такой модели подчиняются статистике Бозе, в противоположность электронам и дыркам зонной теории. Нельзя также считать оправданным, как это делалось, применение подсобной модели к объяснению магнитных свойств полупроводника типа германия. Конечно, в принципе можно рассмотреть модель с двумя валентными электронами в каждом узле, неясно, однако, какие можно будет при этом получить результаты, сравнимые с опытом.

Следует ли отсюда, что мы вообще должны отказаться от разработки многоэлектронной теории кристаллов? Конечно, нет. Во-первых, такая теория всегда может привести к результатам принципиального характера как в смысле открытия новых эффектов, так и в смысле интерпретации известных фактов.

Во-вторых, существуют явления, как, например, ферромагнетизм, экситонное возбуждение, электрические свойства элементов переходной группы, может быть сверхпроводимость, которые вообще не могут быть объяснены на основе одноэлектронного приближения.

В-третьих, схематизм и грубые приближения, присущие многоэлектронной теории сегодня, могут быть преодолены завтра.

Наконец, в-четвёртых, многоэлектронная теория должна нам дать точные критерии применимости одноэлектронного приближения.

Однако мы не считаем, что зонная теория исчерпала свои возможности, что её дальнейшая разработка бесполезна и что все затруднения, которые она встречает при сравнении с опытом, связаны с неточным учётом взаимодействия между электронами в методе самосогласованного поля. Более того, мы считаем, что зонная теория вполне обоснована при применении её к полупроводникам. Если же учесть успехи применения метода Хартри — Фока к атомным системам, особенности взаимодействия электронов, связанные с принципом Паули, результаты одноэлектронной теории металлов и в значительной мере совпадающие с ними выводы многоэлектронной теории, то следует думать, что зонная теория остаётся применимой, до некоторой степени, и к металлам. К сожалению, мы не можем дать количественного критерия применимости одноэлектронного приближе-

ния, так как последний должен вытекать из точной многоэлектронной теории.

Употребляемая иногда оценка применимости одноэлектронного метода, основанная на сравнении полной энергии электрона с потенциальной энергией его взаимодействия с другим электроном, находящимся на среднем расстоянии от него, не может быть признана убедительной, так как в методе самосогласованного поля мы не игнорируем взаимодействия между электронами. Как пишет А. Вильсон⁸: «Однако мы при этом не отбрасываем остальные электроны совершенно. Мы просто заменяем их действие действием размазанного поля, представляющего собой их поле, усреднённое так, что корреляцией между положениями электронов пренебрегается».

Мы не считаем необходимым подробно останавливаться на общеизвестных успехах зонной теории. То обстоятельство, что некоторые результаты зонной теории могут быть получены в многоэлектронном приближении, свидетельствует, как нам кажется, о достаточной обоснованности одноэлектронного приближения. Из числа наиболее замечательных успехов зонной теории кристаллов, полученных в последнее время, мы хотели бы отметить количественную теорию циклотронного резонанса⁹, основанную на глубоком конкретном анализе структуры энергетических зон электронов и дырок в германии и кремнии.

Следует, однако, подчеркнуть, что, несмотря на ряд успехов зонной теории, имеется довольно большое количество наблюдений, не находящихся в согласии с ней. Так, например, эффективная масса носителей тока, определённая из разных явлений, наблюдаемых в полупроводнике, оказывается различной, температурная зависимость подвижности не удовлетворяет законам, полученным ни для атомных, ни для ионных кристаллов, не удовлетворяет теории температурная зависимость термоэлектродвижущей силы в полупроводниках и т. п.

Однако мы не думаем, что это несоответствие объясняется неточным учётом взаимодействия между электронами в зонной теории. Мы хотели бы указать на ряд обстоятельств, которые в разных случаях являются, вероятно, ответственными за то, что одноэлектронная теория не находится в согласии с опытом.

Во-первых, свойства образцов полупроводника, исследуемых экспериментатором, иногда весьма далеки от тех идеальных кристаллов, которые фигурируют в теории. Мы имеем здесь в виду существование плохо проводящих прослоек, различные случаи зависимости числа и рода дефектов кристалла от температуры, наличие трещин, дислокаций и т. п. Учёт этих обстоятельств в теории затруднителен из-за большого произвола в выборе определяющих параметров.

Во-вторых, не всегда должным образом учитывается возможность вырождения носителей тока. Малые эффективные массы носителей тока способствуют наступлению вырождения при непривычно малых концентрациях. Это обстоятельство сравнительно просто может быть учтено в теории.

В-третьих, только в самое последнее время было обращено должное внимание на учёт анизотропии эффективной массы электронов в кристалле. В недавно опубликованной работе Херинга¹⁰ показано, что при некоторых упрощающих предположениях общий вид формул для различных кинетических явлений остаётся прежним и при учёте анизотропии эффективной массы носителей тока. Однако компоненты тензора обратной эффективной массы по-разному входят в различные эффекты, что может в принципе объяснить непостоянство значений «средней» эффективной массы, измеряемых экспериментаторами.

В-четвёртых, мы должны учитывать возможность существования весьма различных механизмов рассеяния носителей тока. Помимо обычного рассеяния на акустических и оптических колебаниях и на ионах примеси, в некоторых случаях необходимо учитывать рассеяние на оптических ветвях атомного кристалла, на нейтральных атомах примеси, на пьезоэлектрических колебаниях, на поперечных волнах колебаний, а также рассеяние, обусловленное взаимодействием с двумя фононами, и т. п. Конечно, не все эти механизмы будут действовать одновременно, но в определённых условиях каждый из них может оказаться существенным.

В-пятых, мы должны считаться с возможностью существования в ионных кристаллах поляронов с сильной связью. В этом случае формулы для кинетических эффектов претерпевают значительное изменение.

В-шестых, мы должны считаться не только с анизотропией эффективной массы носителей тока в кристалле, но и с возможностью сложной структуры энергетической зоны. Существование таких зон со сложной структурой теоретически и экспериментально доказано в случаях германия и кремния. Есть много оснований предполагать сложную структуру зон в теллуре и т. п. Расчёты кинетических эффектов становятся при этом весьма затруднительными, так как мы вынуждены при этом отказаться от метода эффективной массы.

В-седьмых, мы ещё очень мало изучали влияние формы спектра колебаний кристалла на рассеяние носителей тока. Между тем истинная форма колебательного спектра, даже в простейшем случае кристалла NaCl, существенно отличается от схематических предположений Дебая.

Наконец, в-восьмых, мы должны помнить о границах применимости теории возмущений при вычислении вероятности перехода электрона при столкновении его с фононами и применимости кинетической теории.

тического уравнения. Оба критерия применимости совпадают и сводятся к требованию $\lambda/l \ll 1$, где λ — дебройлевская длина волны электрона, а l — длина его свободного пробега. К сожалению, достаточно часто, в особенности для ионных кристаллов, это неравенство не выполняется, и в этом случае мы не имеем основания требовать совпадения теории с опытом. Это ограничение существующей теории представляется нам наиболее тяжёлым и наиболее трудно преодолимым.

Отмеченные выше вопросы ни в какой мере не претендуют быть программой дальнейшего развития теории полупроводников. В них только отмечаются те особенности зонной теории, которые в рамках одноэлектронного приближения могут не соответствовать реальным свойствам полупроводников. Нам представляется целесообразным обратить внимание экспериментаторов на эту сторону вопроса, существенную для сравнения теории с опытом.

КАКИЕ ЗАДАЧИ СТАВИТ ТЕОРИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПЕРЕД ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Я должен вновь сговориться, что ни в какой мере не претендую на выдвижение общей программы экспериментальных исследований по физике полупроводников. Не говоря уже о том, что такая задача мне не под силу, очевидно, что такая программа определяется в основном потребностями технического использования полупроводников, а не требованиями теории.

Я хотел бы обратить внимание только на те направления и задачи экспериментального изучения полупроводников, которые будучи особенно существенными для дальнейшего развития теории, не получили у нас в стране должного развития. Поскольку я не являюсь экспериментатором, я ограничусь только самыми общими соображениями, не входя в детали.

Я думаю, что в ряде случаев несовпадение теории с опытом обусловлено тем, что экспериментатор не может точно установить, с каким веществом он работал. Поэтому, с точки зрения теории, представляется весьма важным широкое развитие работ по получению сверхчистых веществ с точно контролируемыми примесями.

Необходимы также более широкое применение старых и развитие новых методов структурного анализа для изучения дефектов кристалла. Главным здесь является повышение чувствительности методов, которые должны позволить обнаруживать дефекты в кристаллах (примеси, прослойки, трещины и т. д.) при концентрациях порядка 10^{18} см^{-3} и ниже.

Недостаточное внимание уделяется у нас исследованию влияния анизотропии кристаллов на различные кинетические явления. Такие исследования существенны, так как теория развивается в основном для монокристаллов.

До последнего времени экспериментаторы в основном измеряли три величины, относящиеся к полупроводникам: электропроводность σ , постоянную Холла R и термоэлектродвижущую силу α . В определённых условиях этого достаточно для определения трёх величин: концентрации носителей тока n , их подвижности u и их эффективной массы m^* . Однако для проверки теории желательно изучение большого числа кинетических эффектов (теплопроводности, изменения сопротивления в магнитном поле, эффекта Нернста и др.), так как только в этом случае можно убедиться во внутренней согласованности или несогласованности теоретических представлений.

Последний случай особенно важен, так как он побуждает нас глубже разобраться в явлениях, протекающих в полупроводнике. Для проверки теории существенно также изучение кинетических эффектов в более широком диапазоне температур и напряжённостей магнитного и электрического полей. Особенно интересны исследования полупроводников при гелиевых температурах и больших магнитных полях $uH/c \gg 1$.

Весьма интересным было бы исследование тонких плёнок при низких температурах, которое, повидимому, могло бы дать прямой метод измерения эффективной массы.

Недостаточно проводится исследований по спектроскопии твёрдого тела, в частности инфракрасной спектроскопии, связанной с электронными переходами, и рентгеноспектроскопии в области мягких рентгеновских лучей.

Недопустимо мало ведётся экспериментальных исследований по парамагнитному резонансу в твёрдых телах, открытому у нас Е. К. Завойским¹¹, и совсем не ведётся работ по циклотронному резонансу, открытому Я. Г. Дорфманом¹² у нас, Динглем¹³ за рубежом.

Необходимо, вообще, широко поставить работы по радиоспектроскопии твёрдого тела, являющейся мощным источником изучения энергетических уровней и свойств кристаллов.

Недостаточно ведётся исследований по магнитной восприимчивости полупроводников. Между тем, как подчёркивает проф. А. Г. Самойлович, изучение равновесных состояний полупроводника имеет ряд преимуществ по сравнению с исследованием кинетических процессов.

Наконец, совсем недостаточно ведётся работ по изучению процессов диффузии атомов в полупроводниках и по влиянию внешних механических воздействий (давления, одностороннего растяжения по разным кристаллографическим осям и т. д.) на электрические свойства полупроводников.

Я хотел бы ограничиться рассмотрением упомянутых выше направлений экспериментального изучения полупроводников, существующих, как мне кажется, для дальнейшего развития теории.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Вонсовский, УФН **48**, 289 (1952).
 2. В. Л. Бонч-Бруевич, УФН **56**, 55 (1955).
 3. С. И. Пекар, ЖЭТФ **18**, 525 (1948).
 4. С. И. Пекар, Исследования по электронной теории кристаллов, Гос-техиздат, 1951, стр. 21.
 5. Л. Э. Гуревич, ДАН СССР **20**, 355 (1938).
 6. Э. Ферми, Лекции по атомной физике, ИЛ, 1952, стр. 72.
 7. N. Bohr, Nature **137**, 344 (1936).
 8. А. Вильсон, Квантовая теория металлов, Гостехиздат, 1941, стр. 25.
 9. G. Dresselhaus, A. F. Kip and C. Kittel, Phys. Rev. **98**, 368 (1955).
 10. C. Hering, Bell. Syst. Techn. Journ. **34**, 237 (1955).
 11. Е. К. Завойский, ЖЭТФ **15**, 253, 344 (1945).
 12. Я. Г. Дорфман, ДАН СССР **81**, 765 (1951).
 13. R. B. Dingle, Proc. of the Internat. Conf. on Very Low Temperat., edit. by R. Bowes (Oxford, England, Aug. 1951), стр. 165.
-