

**УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК****СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ****VIII ВСЕСОЮЗНОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ФИЗИКЕ НИЗКИХ  
ТЕМПЕРАТУР****(Киев, 13—20 октября 1961 г.)**

Совещания по физике низких температур стали своеобразной традицией. Ежегодно физики (как экспериментаторы, так и теоретики), работающие в области физики низких температур, собираются в одном из центров развития этой области знания и обсуждают работы, выполненные за истекший год.

Обращает на себя внимание тот факт, что с каждым годом увеличивается число участников, возрастает количество присланных докладов; возникла необходимость разделения совещания на секции. Постепенно криогенные совещания превращаются в очень широкие конференции по физике конденсированного состояния.

VIII Совещание, состоявшееся в октябре 1961 г. в Киеве, привлекло более 500 участников. Было подано около 200 докладов. Делегаты прибыли из 15 городов Советского Союза. Физика низких температур развивается теперь не только в «классических» центрах — в Москве и в Харькове, но и в Киеве, Тбилиси, Ленинграде, Свердловске, Сухуми. Число криогенных лабораторий с каждым годом возрастает. Но расширяется не только география криогенной физики. Существенно расширяется тематика. Оптика и ядро, полупроводники и изотопия — эти сравнительно новые области физики низких температур — на последнем совещании были представлены весьма широко.

Совещание было открыто 13 октября Председателем Научного совета по физике низких температур акад. П. Л. Капицей, произнесшим на первом пленарном заседании вступительную речь.

Всего было проведено два пленарных заседания и работали восемь секций, посвященных следующим вопросам:

1. Оптика кристаллов.
2. Свойства гелия.
3. Сверхпроводимость.
4. Электронные спектры кристаллов (металлов и полупроводников).
5. Магнитные свойства конденсированных систем.
6. Низкотемпературная термодинамика. Механические свойства твердых тел.
7. Ядерные исследования.
8. Низкотемпературная техника.

**1. Оптика кристаллов**

Проведение совещания в Киеве, естественно, наложило отпечаток на его тематику. Это особенно заметно по тому вниманию, которое было уделено низкотемпературной спектроскопии — важной области физики твердого тела, которую на протяжении ряда лет успешно развивают киевские экспериментаторы и теоретики. Обсуждению этого круга вопросов было посвящено пленарное заседание\*), которым открылось совещание, и одно секционное заседание.

Как показали исследования последних лет, наиболее интересные, а часто и совершенно неожиданные явления в неметаллических кристаллах наблюдаются вблизи области экситонного поглощения. Поэтому именно изучению специфических явлений, разыгрывающихся в этой области спектра, и разработке методов анализа структуры экситонных зон было посвящено большинство докладов.

\*) Второе пленарное заседание было заключительным. На нем А. С. Боровик-Романов, А. Г. Зельдович, Б. Г. Лазарев, И. М. Лифшиц и С. С. Шалыт рассказали о результатах работы секций.

С. И. Пекаром было показано, что в области сильной экситонной дисперсии определяющую роль играет пространственная дисперсия диэлектрической постоянной  $\epsilon$ , т. е. ее зависимость от импульса электромагнитной волны  $k$ . Вблизи экситонных полос пространственная дисперсия приводит уже не к появлению малых поправок, как это обычно имеет место, а к качественно новому для кристаллооптики эффекту — возникновению добавочных световых волн. Изучение добавочных волн, в частности, открывает возможность исследовать закон дисперсии экситонов  $E(k)$  при малых  $k$  (знак и величина эффективной массы и т. д.)\*).

В обсуждении П. Л. Капца подчеркнул значение техники низких температур, без применения которой экспериментальное исследование новых интересных явлений, описанных в докладе, было бы невозможным.

Для изучения особенностей, возникающих вблизи экситонных полос, была принята широкая программа количественных экспериментальных исследований целого ряда кристаллов (М. С. Бродин, А. Ф. Прихотько, М. С. Сооскин). В соответствии с предсказанием теории добавочных волн в моноклинном кристалле антрацена, а также в кубических кристаллах  $\text{CuCl}$  и натрийуриилацетата обнаружены осцилляции коэффициента прохождения света через кристалл в зависимости от его толщины; они сопровождаются осцилляциями отражения и фазы прошедшего света. Поскольку эксперимент проводился в условиях, когда многократным прохождением света через пластинку можно было пренебречь, эти результаты являются непосредственным доказательством существования добавочных волн. На большую роль пространственной дисперсии указывает также резкое нарушение соотношений Крамерса — Кропфига, особенно усиливающееся при понижении температуры (антрацен, бензантрацен). Необходимо отметить также исследование формы полос экситонного поглощения в нафталине, позволившее сделать ряд заключений о силе экситон-фононного взаимодействия и природе возбужденных состояний.

Выступивший в дискуссии В. М. Агранович сообщил, что в соответствии с результатами его вычислений одна из волн в антрацене должна поглощаться столь сильно, что интерференционный эффект, обуславливающий осцилляции коэффициента прохождения, не должен иметь места. Напротив, по мнению И. В. Обреимова, детально знакомившегося с постановкой этих ответственных и очень сложных экспериментов, они были выполнены весьма тщательно и, хотя их надежность не является пока еще стопроцентной, с высокой степенью достоверности можно полагать, что наблюдавшиеся осцилляции не связаны с побочными явлениями; естественно, необходимо дальнейшее совершенствование методики и накопление новых экспериментальных данных.

Оптимальные условия для изучения спектров сложных молекул создаются при их помещении в соответствующие кристаллические растворители, так как при этом полосы в их низкотемпературных спектрах предельно узки. Прекрасными растворителями (матрицами) для широкого класса органических веществ являются нормальные парафины, которые обеспечивают получение узкополосных примесных спектров, когда длины молекул активатора и парафина-растворителя близки между собой (Э. В. Шпольский). Наблюдающаяся экспериментально мультиплетная структура эмиссионных спектров может быть связана с свечением пространственно разделенных дискретных центров, отличающихся друг от друга распределением поворотных изомеров в окрестности молекулы активатора. Таким образом, «обращение» этих экспериментов позволяет делать определенные заключения о молекулах матрицы.

В дискуссии Н. Е. Алексеевский и М. Т. Шпак отметили, что исследование изменений спектров в зависимости от давления, температуры и концентрации должно способствовать выяснению природы мультиплетов; при этом М. Т. Шпак сослался на свои результаты по взаимодействию примесей в растворах ароматических соединений. В. Н. Ватулев сообщил, что по изменению спектра антрацена, растворенного в дигидроантрацене, удобно наблюдать фазовый переход в растворителе. Резюмируя дискуссию, П. Л. Капца подчеркнул необходимость расширения этих важных исследований и разработки их последовательной интерпретации; он отметил, что достоверность гипотезы о роли поворотных изомеров пока остается проблематичной.

Новый подход к изучению генезиса и структуры экситонных зон в молекулярных кристаллах открывает исследование спектра веществ, отличающихся изотопным составом (В. Л. Броуде, Э. И. Рашба, Е. Ф. Шек а). В этих условиях удастся непосредственно, по мере возрастания концентрации примеси, проследить превращение полос примесного поглощения в кристаллический (давыдовский) дублет. В концентрированных растворах обнаружены спектры «примесных экситонов». Поляризация и интенсивность полос примесного поглощения в разведенных растворах, как это следует из теории, должны резко зависеть от расстояния примесного уровня от края экситонной зоны, а также от структуры экситонной зоны. Этот эффект должен проявляться во всех случаях, когда расстояние между областями примесного и экситон-

\* ) Текст докладов Э. В. Шпольского и С. И. Пекара, сделанных на пленарном заседании, публикуется в этом же выпуске «Успехов физических наук», стр. 309 и 321.

ного поглощения меньше или порядка ширины экситонной зоны. Исследуя смеси компонент с различным изотопным составом, можно перемещать примесную полосу по отношению к экситонной зоне и определить положение краев зоны, а в перспективе и структуру зоны вблизи краев. При исследовании растворов дейтеронафталинов обнаружено изменение поляризационного отношения в примесной полосе на три порядка, ее интенсивности на два порядка и показано, что  $A$ -полоса нафталина соответствует дну экситонной зоны.

Интерпретация экситонных спектров  $\text{CdS}$ , предложенная Томасом и Гопфилдом, находит подтверждение в последних исследованиях спектров поглощения, в которых обнаружены новые полосы (Б. С. Разбрин). Она согласуется также с данными по спектрам люминесценции, в которых обнаружено свечение, резонансно совпадающее с полосами экситонного поглощения; из анализа этих результатов сделан вывод о резком нарушении квазиравновесия между различными экситонными состояниями (В. В. Соболев).

Конечная скорость движения экситонов, возбуждаемых светом, приводит к интересным следствиям в магнитооптике экситонов, позволяющим, в частности, определить их эффективную массу. Отсутствие центра инверсии в  $\text{CdS}$  приводит к дополнительным особенностям, в частности к изменению спектра при инверсии магнитного поля (Е. Ф. Гросс, Б. П. Захарченя). Этот интересный подход, разрабатываемый Томасом и Гопфилдом и докладчиками, вызвал возражения В. М. Аграновича, по мнению которого из данного круга явлений эффективная масса в принципе не может быть определена.

Анализ низкотемпературных инфракрасных спектров кристаллических растворов позволяет исследовать способность примесных молекул к вращению (М. О. Булатов). В частности, показано, что, в то время как в матрицах из  $\text{Xe}$  вращение молекул аммиака вокруг оси  $\text{C}_2$  почти не заторможено, в матрицах из  $\text{N}_2$  оно заторможено полностью.

В работе О. Н. Трапезниковой, Е. И. Феофановой и Л. Б. Шигаевой путем анализа температурной зависимости дуплетного ряда ориентированных полимеров были исследованы их возможные конфигурации и тепловое движение радикалов.

В сообщении В. В. Еременко была описана методика измерения эффекта Зеемана в импульсных полях.

Д. Т. Свиридов выступил с краткой информацией о работах кристаллооптической лаборатории Института кристаллографии АН СССР, проводимых под руководством С. В. Грум-Гржимайло и Н. А. Бриллиантова.

## 2. Свойства гелия

Изучение свойств жидкого гелия является классической областью исследования в физике низких температур.

В последние годы появились новые направления в исследовании жидкого гелия. Во-первых, в связи с появлением сравнительно больших количеств  $\text{He}^3$  началось и очень успешно продолжается изучение как самого гелия  $\text{He}^3$ , так и смесей  $\text{He}^3$ — $\text{He}^4$ . Во-вторых, осуществлено непосредственное определение фоновно-ротонного спектра  $\text{He}^4$  по неупругому рассеянию нейтронов. И наконец, открытие вихревого движения сверхтекучей компоненты оживило исследования механизма срыва сверхтекучести. Последней проблеме были посвящены доклады В. П. Пешкова и В. К. Ткаченко, В. П. Пешкова и В. Б. Стрюкова, а также Ю. Г. Мамаладзе. В первой работе (В. П. Пешков, В. К. Ткаченко) изучается процесс образования и распространения фронтов турбулентности в капилляре со сверхтекучим гелием при слегка надкритичном тепловом потоке. Авторами обнаружена сложная система фронтов, двигающаяся от концов капилляра. Зарождения вихрей в середине капилляра не наблюдалось до скоростей, в 1,7 раза превышающих критическую. Во второй работе (В. П. Пешков, В. Б. Стрюков) с помощью второго звука фиксировался срыв сверхтекучести при течении через капилляр либо только сверхтекучей компоненты, либо при встречном течении сверхтекучей и нормальной частей. Авторы показали, что причиной нарушения сверхтекучести в капилляре является движение сверхтекучей компоненты относительно стенок.

Теоретическая работа Ю. Г. Мамаладзе посвящена вычислению зависимости критической скорости в сверхтекучем  $\text{He}$  от расстояния между граничными поверхностями, а также от характеристики шероховатости этих поверхностей (шероховатость особенно существенна для узких щелей). По теме близка к предыдущим работам также работа Э. Л. Андроникашвили, Г. А. Гамцелидзе и Ш. А. Джапаридзе «Измерение глубины проникновения при движении крупного маятника в  $\text{HeII}$  с закритическими скоростями», в которой изучалось распределение скоростей над диском, совершающим вынужденные колебания. Авторами определена глубина проникновения вязкой волны и построена зависимость кинематической вязкости от амплитуды колебания.

В дискуссии по этим докладам выступили Б. Г. Лазарев, Б. Н. Есельсон, Н. Е. Алексеевский и др.

Термодинамике растворов  $\text{He}^3$ — $\text{He}^4$  были посвящены две работы: Б. Н. Есельсона, В. Г. Иванцова и А. Д. Швеца «К вопросу о сверхтекучести расслоившихся растворов  $\text{He}^3$ — $\text{He}^4$ » и Д. Г. Саникидзе «Об особенностях диаграмм равновесия раствора  $\text{He}^3$ — $\text{He}^4$  в  $\lambda$ -точке». В первой из этих работ экспериментальным путем (по излому на кривой отогрева) определялась  $\lambda$ -точка растворов вблизи температуры расслоения. Авторы пришли к выводу, что кривая  $\lambda$ -точек пересекает кривую расслоения в максимуме, что свидетельствует о том, что более легкая фаза (в расслоившемся растворе) находится в несверхтекучем состоянии.

Выступивший в дискуссии В. П. Пешков обратил внимание на то, что экспериментальные данные, полученные в его лаборатории, противоречат доложенным результатам. Он высказал сомнение в правильности результатов, считая, что причиной ошибки может быть неадиабатичность прибора. Б. Н. Есельсон, отвечая, заметил, что доложенные данные хорошо согласуются с большинством опубликованных результатов. Кроме того, как отметил Н. Е. Алексеевский, для регистрации  $\lambda$ -точки адиабатичность устройства не обязательна.

Д. Г. Саникидзе теоретически исследовал диаграмму состояния раствора  $\text{He}^3$ — $\text{He}^4$  вблизи точки встречи линии  $\lambda$ -перехода с линией фазового перехода первого рода. Им было показано, что характер особенности в этой точке определяется особенностью термодинамического потенциала при переходе  $\text{HeI}$ — $\text{HeII}$ . Так, если теплоемкость слева и справа от  $\lambda$ -точки имеет логарифмическую особенность (на что указывают экспериментальные данные), то точка встречи есть точка касания двух кривых — на линии фазового перехода первого рода не должен наблюдаться излом.

В. П. Пешков отметил, что в настоящее время не хватает точности для того, чтобы выяснить характер особенности в точке встречи.

Исследованию чистого  $\text{He}^3$  был посвящен доклад А. А. Абрикосова и И. М. Халатникова «Рассеяние  $\gamma$ -лучей в жидком  $\text{He}^3$ ». В работе вычислено частотное и угловое распределение рассеянного излучения в жидком  $\text{He}^3$ . Численные оценки указывают на заметную величину эффекта, что (если использовать мессбауэровские  $\gamma$ -кванты) дает возможность измерить скорость «нулевого звука».

Дискуссии, в которой принял участие Ю. М. Каган, была посвящена выяснению роли многочастичного рассеяния  $\gamma$ -квантов в изучаемом явлении.

Закрывая заседание, председательствовавший В. П. Пешков отметил, что, по его мнению, наиболее интересные проблемы в изучении жидкого гелия — это образование вихрей и механизм срыва сверхтекучести, изучение свойств  $\text{He}^3$  при сверхнизких температурах (в частности, выяснение, переходит ли  $\text{He}^3$  вблизи абсолютного нуля в сверхтекучее состояние, как предсказывает теория Л. П. Питаевского), дальнейшее исследование свойств растворов  $\text{He}^3$ — $\text{He}^4$ , уточнение их диаграммы состояния и, наконец, исследование (как экспериментальное, так и теоретическое) времен магнитной релаксации  $\text{He}^3$  в чистом состоянии и в растворе  $\text{He}^4$ — $\text{He}^3$ .

### 3. Сверхпроводимость

Основные положения микроскопической теории сверхпроводимости были, как известно, сформулированы еще в 1957 г. Однако до настоящего времени продолжается настойчивое изучение (как экспериментальное, так и теоретическое) этого интересного явления. Исходя из новых представлений рассматриваются различные явления в сверхпроводниках: поглощение электромагнитных волн, ультразвук, теплопроводность и др.

Одним из наиболее эффектных экспериментальных результатов в этой области, несомненно, следует считать измерение энергетической щели по вольт-амперной характеристике туннельного диода, состоящего из двух сверхпроводников, разделенных тонкой диэлектрической прослойкой. Почти одновременно этот результат был получен рядом американских авторов. В Советском Союзе впервые туннельный эффект у сверхпроводников (Al, In, Sn, Pb) был исследован Н. В. Заваричкиным, причем измерения охватили интервал температур до  $0,1^\circ \text{K}$ . Это привело к обострению методики и позволило определить ряд важных характеристик сверхпроводников (плотность нормальных электронов, ширину щели, зависимость щели от температуры).

В дискуссии, во-первых, уточнялись подробности эксперимента и результаты (Л. П. Горьков), а во-вторых, было обращено внимание на падающий участок вольт-амперной характеристики, что должно привести к отрицательному сопротивлению при высоких частотах.

Б. К. Севастьянов и Г. Ф. Жарков сообщили результаты экспериментов по измерению поперечной компоненты магнитного момента тонких сверхпроводящих пленок. Измерения хорошо согласуются с теоретическим расчетом, выполненным авторами на основании феноменологической теории сверхпроводимости Гинзбурга — Ландау, справедливой вблизи температуры перехода.

В докладе Н. Б. Брандта и Н. И. Гинзбург были изложены результаты экспериментального исследования сверхпроводящих модификаций Вi. Авторами открыта сверхпроводимость неустойчивой при гелиевой температуре модификации висмута (ВiII). Тщательно исследовано влияние примесей Sb и Pb на сверхпроводящие свойства Вi под давлением.

Б. Т. Гейликлман и В. З. Кресси выступили с двумя сообщениями, посвященными развитию микроскопической теории сверхпроводимости. В первом сообщении делается попытка обобщить теорию на случай анизотропного сверхпроводника. Правда, авторы используют весьма специальные предположения о виде поверхности Ферми (эллипсоид, цилиндр). Во втором сообщении излагались результаты построения теории теплопроводности сверхпроводников. В дополнение к ранее опубликованным результатам авторами учтено рассеяние электронов на фононах. Результаты теории хорошо согласуются с экспериментами по In и Sn.

В дискуссии (Л. П. Горьков, И. М. Халатников) выяснилось соотношение между доложенными работами и работами предшественников, в частности Покровского, который построил феноменологическую теорию анизотропных сверхпроводников. Авторы отметили, что их результаты не противоречат результатам Покровского.

Измерение найтовского сдвига частоты ядерного резонанса — весьма тонкий инструмент определения состояния электронов проводимости. Эксперименты последних лет показали, что в сверхпроводящем состоянии сдвиг приблизительно на 30% меньше, чем в нормальном состоянии. Теория этого явления построена А. А. Абрикосовым и Л. П. Горьковым. Оказалось, что причина сдвига — спин-орбитальное рассеяние электронов на дефектах решетки. Теория объясняет не только величину эффекта, но и его температурный ход. В дискуссии по докладу выступил Б. Т. Гейликлман.

#### 4. Электронные спектры кристаллов

а) Металлы. В последние годы большое количество исследований было посвящено выяснению структуры энергетического спектра электронов проводимости. Теоретические работы в этой области (восходящие к работе И. М. Лифшица и А. В. Погорелова, в которой впервые была поставлена и решена задача о восстановлении формы поверхности Ферми по зависимости периода осцилляций магнитного момента от направления магнитного поля) обнаружили большое количество структурно-чувствительных эффектов (гальваномагнитные характеристики, циклотронный резонанс, поглощение ультразвука, аномальный скин-эффект и др.). Большинство из этих эффектов не только обнаружено в настоящее время, но и служит надежным методом определения энергетического спектра.

Большинство работ, заслушанных на секции «Электронные спектры кристаллов», было посвящено этому кругу вопросов.

Обычные методы исследования формы ферми-поверхностей позволяют определить их топологию (гальваномагнитные свойства), экстремальные сечения (эффект де-Гааза — вап-Альфена и родственные явления) и экстремальные массы (циклотронный резонанс). В докладе И. М. Лифшица, М. Я. Азбеля и А. А. Слуцкого были указаны новые, более тонкие эксперименты, открывающие возможность полного восстановления ферми-поверхностей и в особенности обнаружения и исследования особых сечений. Квантование площадей  $S$  в магнитном поле приводит к «квантованию масс»  $m$  и появлению тонкой структуры кривой циклотронного резонанса — квантовому циклотронному резонансу; разрешение структуры легче всего может быть достигнуто для малых зон и особых сечений больших зон с  $\frac{\partial S}{\partial m} = 0$ . При одновре-

менном наложении на кристалл постоянного и слабопеременного магнитных полей квантовое резонансное поглощение в высокочастотной области будет обусловлено электронами, частота которых стационарна во времени. Меняя взаимное расположение постоянного и слабопеременного полей, можно выделять различные сечения ферми-поверхности и получить полную информацию о ее форме.

Новые сведения о ферми-поверхности позволяют получить также другой новый резонансный эффект — гигантские осцилляции поглощения ультразвука (В. Л. Гуревич, В. Г. Скобов, Ю. А. Фиров). Амплитуда этих осцилляций в сильно вырожденном электронном газе при достаточно большой длине пробега электронов очень велика, так что величины поглощения в максимуме и минимуме могут отличаться во много раз. Физическая природа осцилляций связана с тем, что при распространении ультразвука вдоль  $\mathbf{H}$ , вследствие законов сохранения, его могут поглощать только электроны с составляющей импульса вдоль  $\mathbf{H}$ , равной  $p_0 = m\omega$ , где  $\omega$  — скорость ультразвука. Поэтому пик поглощения будет наблюдаться при выходе электронов с импульсом  $p_0$  на поверхность Ферми. Осцилляции периодичны по  $H^{-1}$ , высота пиков  $\sim T^{-1}$ ; они должны наблюдаться, когда угол между  $\mathbf{H}$  и направлением распространения

звука отличен от прямого. При неквадратичном законе дисперсии их наблюдение позволяет определить эффективную массу в сечении, смещенном относительно центрального на  $p_0$ , что может быть важно для изучения малых зон.

Предсказанные теоретически гигантские осцилляции в настоящее время наблюдаются экспериментально в цинке на группе электронов с концентрацией  $\sim 10^{-4}$  электрон/атом на частоте ультразвука 220 Мгц (А. П. Королук, Т. А. Прущак).

В дискуссии эти работы получили высокую оценку, как очень изящные и перспективные.

В скрещенном электрическом  $E$  и магнитном  $H$  полях вследствие дрейфа электронов в направлении  $[EH]$  поглощение ультразвука периодически изменяется в зависимости от  $E$ , причем амплитуда осциллиций быстро падает с ростом  $E$ . Из периода осцилляций можно определить экстремальные эффективные массы и экстремальные периоды движения по открытым периодическим траекториям (В. Г. Песчанский, И. А. Привороцкий, Ю. А. Фрейман).

Мощным методом исследования топологии ферми-поверхностей является изучение гальваномагнитных свойств металлов. Н. Е. Алексеевским и Ю. П. Гайдукowym путем исследования угловых диаграмм и сопоставления экспериментальных данных с теорией И. М. Лифшица и В. Г. Песчанского показано, что ферми-поверхность свинца имеет открытые траектории и представляет собой пространственную сетку гофрированных цилиндров, ориентированных в направлениях пространственных диагоналей куба. В то же время дырочная поверхность Ферми является замкнутой. Эта форма ферми-поверхностей согласуется также с экспериментальными данными Голда по осцилляциям магнитной восприимчивости.

Е. С. Боровик и В. Г. Володка на предельно чистом Al наблюдали значительную анизотропию сопротивления в магнитном поле.

В дискуссии В. Г. Песчанский, И. М. Лифшиц и Н. Е. Алексеевский высказали предположение, что изложенные данные могут быть объяснены, если ферми-поверхность Al представляет собой «подушки», соединенные узкими перемычками, ориентированными вдоль (111). Небольшой перекося кристалла может привести к кажущемуся нарушению симметрии, наблюдавшемуся на опыте. Для проверки этого предположения необходимо тщательное исследование диаграмм вращения.

В. Н. Качинский наблюдал на Sn предсказанные И. М. Лифшицем и В. Г. Песчанским узкие минимумы у «константы» Холла. Эти особенности связаны с наличием у Sn открытых траекторий. Наблюдение поперечных по отношению к току эффектов (как четных, так и нечетных) дает большое количество сведений о топологии поверхности Ферми. В дискуссии по докладу приняли участие И. К. Кикоин, Е. С. Боровик, В. Г. Песчанский.

Большой интерес вызвало сообщение М. С. Хайкина о наблюдении и исследовании циклотронного резонанса на Sn и Pb. Повышение чувствительности применявшейся аппаратуры, использование уникально чистых образцов, а также наблюдение явления на плоскополяризованной волне дали возможность весьма полно исследовать энергетический спектр Sn. Автором, кроме того, предложен весьма оригинальный способ непосредственного определения диаметра сечения, соответствующего экстремальной массе, — по исчезновению резонансных пиков высокого порядка, наблюдаемых на монокристаллических пластинах металла, когда размер орбиты становится больше толщины пластины.

В дискуссии по этому докладу выступающие обращали внимание на необходимость детального сравнения результатов по структуре спектра, полученных в различных экспериментах (И. М. Лифшиц, Н. Е. Алексеевский, М. И. Каганов). М. Я. Азбель отметил, что тщательное выполнение автором всех условий, диктуемых теорией, позволило (по-видимому, впервые) от наблюдения циклотронного резонанса перейти к использованию его как весьма важного и надежного метода исследования электронного спектра.

Наблюдению циклотронного резонанса был посвящен также доклад А. А. Гайкина и В. П. Набережных, которые наблюдали это явление на монокристалле Al. Полученные ими результаты качественно согласуются с найденными ультразвуковыми методами.

Дальнейшее развитие теории циклотронного резонанса содержалось в докладе М. Я. Азбеля и Г. А. Бегинашвили, посвященном учету ферми-жидкостного взаимодействия.

Одним из методов, позволяющих влиять на электронный спектр металла, является добавление к металлу (с небольшим количеством электронов) примесей. Н. Б. Брандт и В. В. Щекочиных исследовали влияние примесей Sb на эффект де-Гааза — ван-Альфена в Bi. Ими было показано, что тензор эффективных масс не меняется, а поверхность Ферми стягивается, оставаясь подобной самой себе.

Б. Е. Веркин, И. В. Свечкарёв, С. Н. Кабакова исследовали температурную зависимость магнитной восприимчивости  $\chi$  слабомагнитных металлов (Tl, Mg, Ca, Zn). У Tl наблюдалась открытая ранее на других металлах (Sb, Cd,

Сг, Zn) и характерная для металлов, имеющих малые зоны, температурная анизотропия: магнитная восприимчивость при изменении температуры от гелиевой до комнатной вдоль бинарной оси падает, вдоль главной оси постоянна. Восприимчивость Са и Mg от температуры зависит слабо.

Кроме того, было изучено влияние примесей на магнитную восприимчивость In.

В дискуссии была подчеркнута новизна выводов о значительной анизотропии малых групп. В то же время было отмечено, что интерпретация температурной зависимости  $\chi$  через температурную зависимость параметра решетки должна быть проверена прямыми экспериментами по влиянию давлений.

Исследование зависимости сопротивления тонких проволок от их диаметра  $d$  в условиях, когда длина свободного пробега  $l$  сравнима или даже больше диаметра, позволило определить длину пробега в ряде металлов (In, Pb, Al, Sn, Zn, Cd, Bi), очищенных зонной плавкой. Длина свободного пробега у этих металлов оказалась в пределах 0,1—0,2 мкм (Б. Н. Александров, И. Г. Дьяков). Наблюдение температурной зависимости сопротивления при  $d \ll l$  трактуется авторами как изменение характера рассеяния электронов на границе металла с изменением температуры.

Анизотропия сопротивления тонких проволок, выращенных в разных кристаллографических направлениях, связывается с анизотропией поверхности Ферми (Б. Н. Александров, М. И. Каганов).

В дискуссии по обоим докладам М. Я. Азбель отметил, что температурная зависимость сопротивления тонких проволок, по-видимому, объясняется не рассеянием электронов на границе металла, а специфической ролью электронов, движущихся вдоль оси проволоки, в частности ролью их столкновений с фононами.

В. В. Андреевым и А. М. Косевичем построена теория нормального скин-эффекта в сильном магнитном поле, когда толщина скин-слоя значительно больше радиуса ларморовской орбиты; вычислены квантовые осцилляции тензора комплексной электропроводности. Рассмотрен как случай произвольного закона дисперсии при слабом взаимодействии электронов с примесями, так и случай квадратичного изотропного закона дисперсии при произвольном взаимодействии с точечными примесями.

б) Полупроводники. К числу наиболее эффективных методов исследования параметров зонных носителей тока в полупроводниках относятся в первую очередь циклотронный и парамагнитный резонансы. Спин-орбитальная связь, приводящая к «запутыванию» движения в конфигурационном и спиновом пространстве, делает возможным новый — комбинированный — резонанс, возбуждаемый электрическим вектором высокочастотного поля и сопровождающийся изменением эффективного спинового момента (Э. И. Рашба, И. И. Бойко, В. И. Шека). Комбинированный резонанс может значительно превышать по интенсивности парамагнитный резонанс и особенно силен в кристаллах без центра инверсии; его частоты равны линейным комбинациям частот парамагнитного и циклотронного резонансов. Комбинированный резонанс обладает сильной угловой зависимостью, а также характерной зависимостью от температуры, магнитного поля и концентрации электронов. Спин-орбитальная связь приводит также к возникновению особой зонной структуры, при которой экстремум энергии достигается на окружности — петле экстремумов, а изоэнергетические поверхности при малых значениях энергии являются торами. Электронные свойства таких полупроводников весьма специфичны, в частности, до 50% носителей имеют отрицательную массу.

По мнению С. И. Пекера, предсказанный в работе новый резонанс интересен с теоретической точки зрения, а со временем может приобрести и практическое значение.

В дискуссии М. Я. Азбель сообщил о результатах своей работы, в которой показано, что в металлах, вследствие малости глубины скин-слоя по сравнению с радиусом циклотронной орбиты, переходы с одновременным изменением орбитального и спинового квантовых чисел возможны и в отсутствие спин-орбитального взаимодействия, однако, в отличие от полупроводников, они возбуждаются магнитным вектором высокочастотного поля и обладают меньшей интенсивностью.

Интересные возможности исследования резонансных свойств полупроводников открывает наложение направленных деформаций, понижающих степень вырождения и упрощающих спектр (Г. Е. Пикус, Г. Л. Бири). В недеформированных Ge и Si  $g$ -фактор дырок зависит от квазиимпульса  $k$ , и поэтому имеется широкая полоса частот «спинового» резонанса, который возбуждается как магнитным, так и электрическим вектором высокочастотного поля. В то же время в деформированных кристаллах, когда расщепление зон превышает характеристическую энергию электронов,  $g$ -фактор определяется только направлением деформации и не зависит от  $k$ . Частота спинового резонанса дырок, связанных на акцепторах, очень чувствительна к величине деформации. Их  $g$ -фактор определяется из уравнения, имеющего такую же структуру, как и для зонных дырок, но с другими значениями постоянных. Предельное значение  $g$ -фактора, совпадающее со значением  $g$ -фактора дырок в верхней зоне, достигается, только когда деформационное расщепление зон становится больше потенциала ионизации акцептора.

Важным методом изучения структуры зон и основным методом анализа механизмов рассеяния носителей тока является исследование явлений переноса.

Наряду с обычными осцилляциями электропроводности Шубникова — де-Гааза оказывается возможным новый тип осцилляций, связанный с особенностями неупругого рассеяния электронов на оптических фононах и реализующийся даже в случае болдмановской статистики (В. Л. Гуревич, Ю. А. Фирсов, А. Л. Эфрос). Положение осцилляционных пиков определяется резонансным условием  $\omega = n\Omega$ , где  $\omega$  — предельная частота фононов,  $\Omega$  — ларморова частота,  $n$  — целое число. Поскольку условием возникновения осцилляций является  $\hbar\omega \gg kT$ , а высота осцилляционных максимумов  $\sim \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{kT}\right)$ , осцилляции должны наблюдаться в области промежуточных температур ( $\sim 100$ — $150^\circ\text{K}$ ).

В дискуссии И. К. Кикониным был поднят вопрос о том, почему предсказанные осцилляции до сих пор не удалось наблюдать экспериментально. В ответе Ю. А. Фирсов отметил, что пики электропроводности являются логарифмическими и легко «замываются». Важно, чтобы отступления от квадратичности в законе дисперсии были малы, связь с оптическими фононами достаточно сильна и эксперименты велись в оптимальном диапазоне температур; по-видимому, удачным объектом исследований может быть  $\text{InAs}$ .

В последние годы определилась большая роль, которую играет эффект Л. Гуревича (электрон-фононное увлечение) в термогальваномагнитных явлениях в полупроводниках, особенно при низких температурах. Поперечная электропроводность  $\sigma_{\perp}$  в сильном магнитном поле ( $\Omega\tau \gg 1$ ) лимитируется темном релаксацией на структурных дефектах составляющей импульса электрон-фононной системы, перпендикулярной обоим полям. Поэтому в условиях, когда импульс теряется, главным образом при столкновениях фононов с дефектами, причем характеристическое время этого процесса превышает время электрон-фононной релаксации, процессы увлечения оказывают определяющее влияние на поперечную электропроводность. В предложенной теории этого явления (Л. Э. Гуревич, А. Л. Эфрос) найдена зависимость  $\sigma_{\perp}$  от температуры и магнитного поля для полупроводников и полуметаллов.

Эффект увлечения оказывает определяющее влияние на термо-э. д. с.  $\alpha$  в чистых образцах теллура ниже  $70^\circ\text{K}$  (И. Н. Тимченко, С. С. Шалыт). Фононная часть  $\alpha$  почти изотропна; это согласуется как с предположением о слабой анизотропии дырочной зоны, так и с выводом теории В. Л. Гуревича и Ю. А. Фирсова о том, что сильная анизотропия времени релаксации фононов не сопровождается значительной анизотропией  $\alpha$ . Вывод о слабой анизотропии дырочной зоны в теллуре подтверждается исследованием гальваномагнитных свойств (Р. В. Парфентьев, А. М. Погоарский, И. И. Фабриштейн, С. С. Шалыт). Значительная анизотропия гальваномагнитных коэффициентов, наблюдающаяся на неотожженных образцах, связана с анизотропным рассеянием на структурных дефектах и исчезает при отжиге, когда сохраняется только рассеяние на акустических фононах и ионизованных примесях.

Влияние увлечения на эффект Нернста — Эттингсгаузена в условиях, когда картина явлений значительно усложнена наличием двух сортов дырок, наблюдалось на  $p\text{-InSb}$  и  $p\text{-GaAs}$  (Х. И. Амирханов, Д. Х. Амирханова, Р. И. Баширов).

Переход в область больших магнитных полей открывает возможность наблюдения квантовых эффектов. В  $n\text{-InSb}$  и  $n\text{-InAs}$  влияние квантовых явлений на эффекты Нернста — Эттингсгаузена обнаруживается при  $H \gtrsim 10\text{ кэ}$  и сопровождается резким ростом величины эффектов, причем продольный эффект меняет знак (Х. И. Амирханов, Р. И. Баширов, М. М. Гаджалиев).

Однако в этой области полей, как показали Э. А. Завадский и И. Г. Факидов при исследованиях на  $n$ - и  $p\text{-Ge}$  в полях до  $200\text{ кэ}$ , возникает ряд побочных явлений, затрудняющих интерпретацию экспериментов. Прежде всего с ростом  $H$  возрастает потенциал ионизации примесей и падает концентрация носителей в зоне, что при постоянном токе приводит к росту электрического поля и ионизации, начиная с  $E \sim 25\text{ в/см}$ . Еще раньше, при  $E \sim 3\text{ в/см}$ , от  $E$  начинает зависеть подвижность. Путем анализа экспериментальных данных получена зависимость подвижности и концентрации носителей от  $E$  и  $H$ . При  $H < 100\text{ кэ}$  имеется согласие с классической теорией, в больших полях наблюдаются квантовые явления.

При наблюдениях в импульсных полях до  $450\text{ кэ}$  в  $n\text{-InSb}$  были обнаружены осцилляции продольного и поперечного магнитосопротивлений (Х. И. Амирханов, Р. И. Баширов, Ю. З. Закрев). Однако, по мнению Э. А. Завадского и др., методика исследований была несовершенной и результаты нуждаются в дальнейшей проверке.

На основе схемы, в которой структура описывается шестидолинной моделью Дреббла — Вольфа, а тензор релаксации принимается в виде  $\tau_{ij} = \varphi(\varepsilon)a_{ij}$ , построена теория гальваномагнитных явлений в  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . По шести из девяти измеренных гальваномагнитных коэффициентов найдены два набора параметров теории; при этом



и остальные три коэффициента оказались в хорошем согласии с экспериментом. Для проведения выбора между двумя наборами необходимы дополнительные экспериментальные данные (Б. А. Ефимова, И. Я. Коренблит, В. И. Новикова, А. Г. Остроумов).

### 5. Магнитные свойства конденсированных систем

а) Ферро- и антиферромагнетизм. Хотя ферромагнетизм и антиферромагнетизм у ряда веществ наблюдаются при комнатных температурах, что связано с большой величиной обменной энергии, исследование магнитных свойств при низких температурах позволяет глубже разобраться в физической природе магнитного упорядочения.

Общие соображения симметрии, примененные к различным магнитным структурам, как известно, позволили несколько лет назад И. Дзялошинским объяснить природу слабого ферромагнетизма и предсказать пьезомагнитный эффект для ряда кристаллов.

Три доклада на этом совещании были посвящены этому кругу вопросов.

А. С. Боровик-Романов, Ж. Г. Александян и Е. Г. Рудашевский подробно исследовали открытый А. С. Боровиком-Романовым пьезомагнитный эффект. Объектами исследования были: тетрагональные ( $\text{MnFe}_2$ ,  $\text{CoF}_2$ ) и ромбоэдрический ( $\text{FeCO}_3$ ) антиферромагнетики. Наибольший эффект наблюдался у  $\text{CoF}_2$  (при наложении упругих напряжений  $\sim 500$  кГ/см возникал пьезомагнитный момент  $\sim 0,1\%$  от номинальной намагниченности). В случае тетрагональных магнетиков эффект обнаруживался как вдоль, так и перпендикулярно к намагниченности подрешеток. В случае  $\text{FeCO}_3$  пьезомагнитный момент наблюдался вдоль бинарной оси  $z$  при наложении упругих напряжений  $\sigma_{yz}$  ( $z$  — тригональная ось). Наблюдения согласуются с предсказаниями теории.

В дискуссии по докладу отмечалась важность полученных результатов (К. П. Белов, К. Б. Власов).

А. С. Боровик-Романов доложил о наблюдении антиферромагнитного резонанса в карбонатах переходных элементов ( $\text{MnCO}_3$ ,  $\text{CoCO}_3$ ), обладающих слабым ферромагнетизмом. Использование весьма чистых образцов позволило наблюдать весьма острый резонанс и непосредственно измерить «поле Дзялошинского»  $H_D$ , характеризующее релятивистские силы, приводящие к слабому ферромагнетизму. Интересно отметить, что найденное значение  $H_D$  не согласуется со статическими измерениями.

В дискуссии обсуждались подробности эксперимента и выяснялись дальнейшие возможности (К. П. Белов, В. Ф. Гантмахер, М. И. Каганов).

Теоретическая работа П. Г. Гусейнова была посвящена вычислению высокочастотной магнитной восприимчивости тетрагональных и ромбоэдрических слабых ферромагнетиков. Автором для магнетика типа  $\text{NiF}_2$  произведен учет анизотропии в базисной плоскости. В предположении изотропии релаксационных констант и  $g$ -фактора получена формула, определяющая анизотропию ширины резонансной линии.

Выступивший в дискуссии Е. А. Туров обратил внимание на желательность тщательной проверки зависимости ширины резонансной линии от направления магнитного поля. Это дает возможность определить анизотропию релаксационной константы. Кроме того, по угловой зависимости резонансных частот следует выяснить, какова анизотропия  $g$ -фактора. Соответствующие эксперименты желательно провести на  $\text{NiF}_2$ . А. С. Боровик-Романов жаловался на отсутствие кристаллов  $\text{NiF}_2$ .

Теория спиновых волн в настоящее время является единственной теорией, позволяющей учесть специфические свойства магнетиков при низких температурах. Хорошо известен вклад спиновых волн в теплоемкость. Температурная зависимость магнитного момента вблизи абсолютного нуля определяется спиновыми волнами.

И. Н. Калинин и А. С. Боровик-Романов исследовали теплоемкость карбонатов переходных металлов ( $\text{MnCO}_3$  и  $\text{FeCO}_3$ ) в интервале температур от  $1,5^\circ$  до  $80^\circ$  К. В первом соединении (в согласии с теорией спиновых волн) магнитная теплоемкость примерно на порядок больше теплоемкости решетки, причем отчетливо виден переход от области возбуждения нижней ветви энергетического спектра к области возбуждения обеих ветвей спектра (одна из ветвей имеет энергию активации, равную нулю). У  $\text{FeCO}_3$  при гелиевых температурах спиновые волны практически не возбуждаются, наблюдается чисто фононная теплоемкость. Выступающие в дискуссии (Б. Г. Лазарев, Б. Н. Самойлов) интересовались методикой эксперимента, а также различием между калориметрическими и магнитными опытами.

Г. И. Урушадзе теоретически изучил влияние спиновых волн на теплопроводность антиферромагнетиков при низких температурах. Автором выяснено, в каких случаях тепловой поток, переносимый спиновыми волнами, определяет теплоперенос в антиферромагнетике.

Исходя из теории спиновых волн, М. И. Каганов и В. М. Цукерник вычислили коэффициент поглощения циркулярно-поляризованного переменного магнитного поля, причем поляризация предполагалась такой, что резонанс отсутствует.

Рассчитанный коэффициент поглощения сложным образом зависит от частоты, температуры и параметров магнетика. Экспериментальные исследования позволили бы определить характер взаимодействия спиновых волн друг с другом и с фононами.

В дискуссии по докладам Г. И. Урушадзе и М. И. Каганова и В. М. Цукерника выступили Ю. М. Каган и А. Г. Гуревич.

Н. В. Волкенштейн и М. И. Турчинская рассказали об исследовании температурной зависимости намагниченности монокристалла неупорядоченного сплава  $\text{Ni}_3\text{Mn}$ . Полученные результаты авторы трактуют следующим образом: при комнатной температуре сплав парамагнитен, при азотной — ферромагнитен, при температурах 20,4° К и ниже в сплаве имеются области, находящиеся в ферро- и антиферромагнитном состояниях. Объяснение авторы видят в неоднородности концентрации компонент сплава по образцу.

Выступившие в дискуссии Е. С. Боровик и П. Н. Стеценко рекомендовали независимыми экспериментами проверить неоднородность концентрации по образцу.

В работе Е. Е. Семененко и А. И. Судовцова сделана попытка исследовать взаимодействие электронов со спиновыми волнами путем измерения сопротивления Fe при температурах ниже 1° К. Обнаружена зависимость линейного с температурой члена от внешнего магнитного поля. Это свидетельствует в пользу предположения, что это слагаемое в сопротивлении — следствие рассеяния электронов на спиновых волнах. Авторы обращают внимание на то, что слагаемое, пропорциональное  $T^2$ , также зависит от магнитного поля.

Е. А. Туров (выступивший в дискуссии) отметил, что линейный закон справедлив в весьма узкой области температур. Поэтому член с  $T^2$  может также зависеть от взаимодействия со спиновыми волнами.

Магнитная структура Сг привлекает исследователей уже несколько лет. Р. А. Алиханов доложил результаты нейтронографических исследований Сг различной чистоты, показавшие, что структура Сг весьма чувствительна к примесям. В частности, винтовая магнитная структура, по-видимому, имеет место только в Сг с примесями. С другой стороны, существование двух точек перехода у Сг не связано с его чистотой. Результаты Т. И. Костиной по измерению магнитной восприимчивости подтверждают существование двух точек перехода. В дискуссии выступили Е. С. Боровик-Романов, И. Я. Дехтяр, М. И. Каганов.

б) Ядерный и электронный парамагнитный резонанс. Интересная картина влияния косвенного обменного взаимодействия через электроны проводимости на ядерный парамагнитный резонанс была наблюдаема в растворах изотопов  $\text{Tl}^{203}$  и  $\text{Tl}^{205}$  (Ю. С. Каримов, И. Ф. Щеголев). В слабых магнитных полях косвенный обмен приводит к образованию единой спиновой системы, и в спектре смеси изотопов наблюдается один пик поглощения. С ростом внешнего магнитного поля обменное взаимодействие разрывается, и наблюдаются два пика, соответствующие поглощению различными изотопными ядрами. Экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с теорией Кубо—Томита.

В монокристаллическом алюминии обнаружен парамагнитный резонанс с  $g=2,06$  (А. А. Галкин, В. П. Набережных). Из независимости времени релаксации от температуры в интервале 4—20° К делается вывод, что рассеяние обусловлено примесями с сильной спин-орбитальной связью. Асимметрия резонансной кривой другого знака, чем в щелочных металлах.

Анализ взаимодействия гиперзвука с неравновесной спин-системой показывает, что существуют благоприятные условия для усиления и генерации гиперзвука по принципу мазера (У. Х. Копвиллем, В. Д. Корепанов). Вообще говоря, условия генерации для фононов являются более благоприятными, чем для фотонов. Удобным объектом должны явиться редкоземельные ионы, так как у них спин-решеточное взаимодействие особенно велико.

У. Х. Копвиллем и Р. М. Мицеева предложили новый метод поляризации ядер в диамагнитных и парамагнитных кристаллах, основанный на применении импульсной магнитной и ультразвуковой методики. Этот метод должен приводить к высокой степени поляризации, не зависящей от релаксационных процессов и сохраняющейся в течение ядерной спин-решеточной релаксации.

С. А. Алтыгулером, Ш. Ш. Башкировым и М. М. Зариповым проведен анализ характера расщепления  $d$ -термов титана в корунде и исследованы особенности парамагнитного резонанса и парамагнитной релаксации в этой системе. Релаксация должна быть однофононной лишь при  $T \lesssim 1^\circ \text{К}$ ; при более высокой температуре преобладают двухфононные процессы. Полученная температурная зависимость времени релаксации удовлетворительно согласуется с экспериментом.

Времена спин-решеточной и спин-спиновой релаксаций в метане, определенные методом «спинового эха», оказались близкими по величине. В интервале  $T=77\text{—}100^\circ \text{К}$  они изменяются примерно на порядок. Оценка коэффициента самодиффузии жидкого метана дает  $D \sim 10^{-7} \text{ см}^2/\text{сек}$  (Е. Е. Богатырев, А. А. Галкин, И. В. Матяш, Л. М. Тарасенко).

## 6. Низкотемпературная термодинамика. Механические свойства твердых тел

Различие физических свойств изотопов одного элемента проявляется в основном при низких температурах. Поэтому неудивительно, что изотопия ежегодно занимает большое место на совещаниях. В этом году этому вопросу было посвящено три доклада. В первом (В. С. Коган, Б. Г. Лазарев, В. И. Хоткевич, Р. Ф. Булатова, А. С. Булатов) было рассказано о проведении рентгеноструктурных исследований изотопов ряда элементов с молекулярными ( $H_2$ ,  $HD$ ,  $D_2$ ,  $Ne^{20}$ ,  $Ne^{22}$ ) и металлическими ( $Li^6$ ,  $Li^7$ ,  $Ni^{58}$ ,  $Sn^{116}$ ,  $Sn^{124}$ ) силами связи в твердом состоянии. Исследование показало, что изотопический эффект существенно зависит от сил связи: он значительно больше у молекулярных кристаллов. Была изучена также зависимость от температуры: эффект при некоторой температуре меняет знак. Во втором докладе (Р. Ф. Булатова, В. С. Коган, Б. Г. Лазарев) сообщалось об измерении взаимной растворимости дейтерия и дейтероводорода в твердой фазе при  $T=1,5^\circ$  и  $4,2^\circ K$ . Хотя структуры  $HD$  и  $D_2$  изоморфны, имеет место ограниченная растворимость.

Е. С. Боровик, выступивший в дискуссии, отметил, что, сравнивая различные структуры, необходимо свести результаты к одной приведенной температуре. Б. Г. Лазарев заметил, что различие величины изотопического эффекта для решеток с разными силами связи столь велико, что приведение к одной температуре не может перекрыть эту разницу. В пределах группы веществ с одиотипными силами связи, естественно, надо заботиться о приведении температур.

Третий доклад (В. Н. Григорьев) был посвящен измерению различия давлений насыщенных паров изотопов криптона и ксенона, приведенных на безнасадочной ректификационной колонке, работающей при малых скоростях пара. Оказалось, что  $(\Delta p/p)_{Kr} \approx 1,2 \cdot 10^{-4}$ ,  $(\Delta p/p)_{Xe} \approx 2 \cdot 10^{-5}$  (на единицу массового числа). На вопрос Е. С. Боровика, как определялось число теоретических тарелок колонки, без которого нельзя измерить  $\Delta p/p$ , автор ответил, что число теоретических тарелок определялось как по расчетным формулам, так и непосредственно по зависимости обогащения от скорости отбора.

Р. Ф. Булатова и В. Н. Григорьев рассказали об использовании миниатюрной безнасадочной колонки (диаметр 2 мм, высота 300 мм) для получения практически чистого ортоводорода из естественной смеси (75%  $o\text{-}H_2$  и 25%  $p\text{-}H_2$ ).

Б. Г. Лазарев в дискуссии по этому докладу отметил, что метод определения концентрации орто- и параводорода, использованный авторами, проще, чем методы, которыми пользовались ранее. Точность же метода ( $\sim 2\text{--}3\%$ ) вполне удовлетворительна.

Ю. А. Готлиб и И. В. Сочава доложили результаты теоретического расчета теплоемкости линейных полимерных цепей типа  $(-CH_2-)$  при низких температурах. Расчет проведен методом Борна—Кармана. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными показывает, что наблюдаемая на опыте линейная зависимость от температуры — следствие наложения сильно раздвинутых по температуре ветвей колебательного спектра полимерной цепи. Как выяснилось из ответов на вопросы (Е. С. Боровику, Б. Г. Лазареву), упругие постоянные для цепей берутся из оптических работ; измерений в области гелиевых температур на этих объектах нет. В частности, неизвестно, до каких температур выполняется закон  $C \sim T^3$ .

С. И. Новиковой была исследована температурная зависимость коэффициента теплового расширения  $\alpha$  элементов IV группы и изоэлектронных по отношению к ним соединений  $A_{III}B_V$  в области низкотемпературной аномалии  $\alpha < 0$ . Во всех случаях полярная связь усиливает аномалию. Это наблюдение согласуется с теорией Баррона и Блекмана, которыми предсказана подобная аномалия константы Грюнайзена (с которой непосредственно связано  $\alpha$ ) для ионных кристаллов.

В. А. Перваков и В. И. Хоткевич в докладе «Влияние дефектов кристаллической решетки на теплоемкость металлов при низких температурах» рассказали об измерении разности теплоемкостей  $Au$ ,  $Ag$ ,  $Cu$  в пластически деформированном (или насыщенном вакансиями) состоянии и отожженном состоянии в интервале температур  $4,2\text{--}300^\circ K$ . Во всех случаях наблюдался прирост теплоемкости, который можно было описать уменьшением температуры Дебая.

В дискуссии обсуждались подробности эксперимента и выяснялся характер нарушений в искаженной решетке (И. Я. Дехтяр, Б. Г. Лазарев, Е. С. Боровик, Е. Ицкевич).

Два доклада были посвящены исследованию механических свойств твердых тел при низких температурах. Следует отметить, что этому вопросу уделяется все больше внимания, особенно в связи с открытием у ряда металлов полиморфизма, проявляющегося как при понижении температуры, так и в процессе пластического деформирования. В последнем случае деформация происходит в веществе с непрерывно

меняющимися параметрами, что приводит к особым механическим свойствам металла: сильному повышению пластичности, однородности деформации, упрочнению.

Об исследовании Na при растяжении в интервале температур 1,6—300° К, охватывающем область его полиморфных превращений, доложили И. А. Гиндин, Б. Г. Лазарев, Я. Д. Стародубов и М. Б. Лазарева. У Na аналогично Li, исследованному ранее, обнаружены особенности поведения механических свойств, подтверждающие наличие «механических» критериев низкотемпературного полиморфизма (минимум относительного удлинения, немонотонный рост пределов текучести, прочности, микротвердости).

В дискуссии по этому докладу выступили О. В. Клявин и И. Б. Боровский.

В работе О. В. Клявина и А. В. Степанова изучалось влияние состояния поверхности на диаграммы растяжения Al при гелиевых температурах. Обнаружено влияние обработки поверхности (электролитической полировки и травления), а также скорости деформации на число и характер скачков, наблюдаемых на диаграммах растяжения Al (99,3%) при  $T=1,3^\circ\text{К}$ .

Выступивший в дискуссии И. А. Гиндин отметил, что скачки в подобных условиях наблюдаются у ряда металлов, и высказал сомнение в правильности трактовки полученных результатов.

## 7. Ядерные исследования

После открытия Мёссбауэра весьма усилились связи между физикой конденсированного состояния и ядерными исследованиями, так как резонансное поглощение  $\gamma$ -квантов дает очень большие дополнительные возможности для исследования энергетического спектра твердых тел, в частности расщепления ядерных уровней во внешних и внутренних полях. Поэтому неудивительно, что большинство докладов, заслушанных на заседаниях секции «Ядерные исследования», было посвящено эффекту Мёссбауэра.

В работе В. В. Скляревского, В. В. Самойлова и Б. И. Степанова было исследовано сверхтонкое расщепление ядерных уровней  $\text{Dy}^{161}$  и  $\text{Ir}^{193}$  с помощью эффекта Мёссбауэра. Интересно отметить, что расщепление имеется в парамагнитной области. Это позволяет сделать некоторые выводы о спиновой релаксации. Кроме того, авторами обращено внимание на слабую зависимость эффекта от температуры; эффект наблюдался даже при температуре порядка  $10^3$  °К. Последнее обстоятельство связано (как отметил Ю. М. Каган) с сильным различием масс атомов в решетке (в случае исследования  $\text{Dy}^{161}$  источником служил  $\text{Gd}^{150}\text{O}_3$ , а поглотителем  $\text{Dy}^{161}\text{O}_3$ ). В дискуссии по этому докладу выступили М. Я. Азбель, Н. Е. Алексеевский, Ю. М. Каган, У. Х. Копвиллем.

В. А. Брюханов, Н. Н. Деягини и В. С. Шпинель доложили об исследовании резонансного поглощения  $\gamma$ -квантов с энергией 23,8 кэВ ядрами  $\text{Sn}^{119}$  в различных кристаллах. Источником служил  $\text{Sn}^{119m}$  в виде соединения  $\text{SnO}_2$ , поглотителями —  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{SnO}$ ,  $\beta\text{-Sn}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ . Эксперимент проводился при нескольких температурах.

С двумя сообщениями, посвященными развитию теории эффекта Мёссбауэра, выступил Ю. М. Каган. В первом рассматривалось влияние оптических ветвей колебаний решетки на эффект и было показано, что в ряде случаев учет этих колебаний позволяет объяснить наблюдавшуюся слабую температурную зависимость. Во втором сообщении (совместно с Я. А. Иосилевским) построена теория эффекта Мёссбауэра для примесного ядра в кристалле.

Оба доклада вызвали большой интерес. В обсуждении приняли участие М. А. Кривоглаз (который, в частности, указал на причину уширения линий, обусловленной примесными колебаниями), В. С. Шпинель, Н. Е. Алексеевский и др.

Теории эффекта Мёссбауэра были посвящены также два сообщения А. Ф. Лубченко и И. П. Дзюба.

В последние годы большое число работ связано с изучением взаимодействия электронов и ядер в твердом теле. Важной характеристикой, описывающей это взаимодействие, может служить магнитное поле, определяющее поляризацию ядер.

Б. Н. Самойлов, В. В. Скляревский и Е. П. Степанов рассказали об исследовании анизотропии  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучения ядер Sb, помещенных в ферромагнитные металлы. Эти исследования позволили определить не только величину магнитного поля на ядре ( $\sim 10^5\text{—}10^6$  э), но и его знак.

Анализ проведенных экспериментов, как отметил Ю. М. Каган, показывает, что за поле на ядре, по-видимому, несут ответственность не электроны проводимости, а глубинные электроны. Это, по словам Е. А. Турова, подтверждается экспериментами по ядерному резонансу на ферромагнитных диэлектриках. Кроме Ю. М. Кагана и Е. А. Турова в обсуждении приняли участие Н. Е. Алексеевский, И. Ф. Щеголев, В. С. Шпинель, А. С. Боровик-Романов и др.

## 8. Низкотемпературная техника

Большая часть докладов, представленных на секции, освещала работу криогенного отдела ОИЯИ. Основной обзорный доклад по организации работы и оборудованию лаборатории был сделан А. Г. З е л ь д о в и ч е м.

Имеющиеся в ОИЯИ ожижительные установки предназначены для выдачи в дьюары водорода и гелия и для заполнения и термостатирования жидкостных камер. Наличие большого компрессорного зала с суммарной производительностью около  $1000 \text{ м}^3$  водорода в час позволит обеспечить водородный ожижитель производительностью  $250 \text{ л}$  жидкости в час. Этот ожижитель должен обслуживать водородные пузырьковые камеры и устанавливаться в помещении синхрофазотрона на расстоянии  $1100 \text{ м}$  от компрессорного зала, с которым связан трубопроводами высокого и низкого давления.

Водород получают в электролизере производительностью  $24 \text{ м}^3/\text{час}$ , и хранится он в ресиверах под давлением.

В настоящее время работают комбинированный водородно-гелиевый ожижитель ВГО-1 производительностью  $40 \text{ л}/\text{час}$  водорода и  $30 \text{ л}/\text{час}$  гелия и две установки ВОС-3, форсированные до производительности  $20 \text{ л}/\text{час}$  жидкого водорода. Работают два гелиевых компрессора по  $240 \text{ м}^3/\text{час}$  каждый.

Газообразные водород и гелий очищаются от примесей воздуха на активированном угле, охлажденном до температуры  $78^\circ \text{ К}$ .

Сжатый газ очищается от масла в маслоотстойниках, заполненных кольцами Рашига, и фильтруется через волокнистый материал. Водород пропускается еще и через хромо-никелевый катализатор для удаления следов кислорода.

Все помещения снабжены газоанализаторами, автоматически включающими систему вентиляции при опасной концентрации водорода в воздухе.

В лабораториях имеется централизованная разводка для откачки и сбора гелия в газгольдеры. Газгольдерная размещена на некотором расстоянии от здания и оборудована телеметрическим указателем положения колоколов.

В докладе А. Г. З е л ь д о в и ч а и Ю. К. П и л и п е н к о описана конструкция и результаты испытаний комбинированного ожижителя ВГО-1. Водородно-гелиевый ожижитель ВГО-1 выполнен в виде двух отдельных блоков, каждый из которых может работать самостоятельно. Ожижение происходит за счет эффекта Джоуля—Томсона с предварительным охлаждением водорода азотом, гелия — водородом, кипящим при пониженном давлении. Производительность водородной части ожижителя  $40 \text{ л}/\text{час}$ , гелиевой —  $30 \text{ л}/\text{час}$ .

Размеры каждого из блоков: диаметр  $500 \text{ мм}$  и высота  $2200 \text{ мм}$ . Теплоизоляция гелиевого блока высоковакуумная с азотным экраном, а водородного — мипора с форвакуумной откачкой. Теплообменники изготовлены из пучка трубок одинакового диаметра, спаянных оловом на тепловой контакт. Ожижитель обслуживают водородный и гелиевый компрессоры производительностью  $180$  и  $240 \text{ м}^3/\text{час}$  соответственно.

Выступивший в прениях Е. С. Б о р о в и к провел анализ работы теплообменников, показав, что теплообменники, состоящие из большого числа спаянных между собой тонких трубок, применяемые в ожижителях ВОС-3 и ВГО-1, невыгодны, так как разделение потока газа низкого давления на ряд параллельных ветвей уменьшает число Рейнольдса, что, следовательно, ухудшает условия теплообмена. Е. С. Боровик отметил, что применение теплообменников, состоящих из спаянных на тепловой контакт трубок разного диаметра, в которых каждый поток газа идет по своей трубке, позволило бы уменьшить вес и объем ожижителя в 3—6 раз и значительно упростило бы его изготовление при сохранении той же производительности.

А. И. С у д о в ц о в сравнил водородную секцию ожижителя ВГО-1 с работающим в Харькове водородным ожижителем с поперечноточными теплообменниками. Он отметил преимущества последнего: небольшой вес и размер, а также малое гидравлическое сопротивление потоку газа низкого давления.

Доклад Ю. К. П и л и п е н к о посвящен анализу работы и результатам испытания ребристого противоточного теплообменника типа «трубка в трубке». На внутренней трубке  $7 \times 1,5 \text{ мм}^2$  накатываются наружные ребра высотой  $1 \text{ мм}$ , толщиной  $0,3 \text{ мм}$  и шагом  $1 \text{ мм}$ , что должно улучшить условия теплопередачи для газа низкого давления, проходящего в межтрубном пространстве. В заключение доклада было отмечено, что один из теплообменников ВГО-1, весящий  $40 \text{ кг}$  с гидравлическим сопротивлением  $700 \text{ мм рт. ст.}$ , может быть заменен теплообменником с ребристыми трубками, вес которого не превышает  $20 \text{ кг}$  при сопротивлении  $200 \text{ мм рт. ст.}$ .

И. Ф. М и х а й л о в в прениях отметил, что аналогичный теплообменник, состоящий из трубок различного диаметра, будет весить 6—8 кг. Кроме того, в ребристом теплообменнике может быть осуществлен эффективный теплообмен только между двумя потоками газа, что неприемлемо для верхних теплообменников ожижителей.

Методы очистки сжатых газов от паров масла рассмотрены в докладе Н. Е. Б у я н о в о й и А. Г. З е л ь д о в и ч а. Для проведения этих исследований авторами был

разработан метод люминесцентного анализа, регистрирующий 0,005 мг масла на 1 м<sup>3</sup> газа.

В результате проведенных экспериментов определена поглотительная способность различных веществ по отношению к парам масла. Оказалось, что волокнистые материалы, стеклянная и медицинская вата являются наиболее емкими поглотителями. Их поглотительная способность примерно в 10 раз больше, чем у активированного угля, глинозема, селикагеля и других адсорбентов. Полученные результаты позволяют рассчитывать фильтры для компрессоров.

В прениях А. И. С уд о в ц о в рассказал об установке для очистки газа методом вымораживания, работающей в ФТИ АН УССР. Преимуществом установки является то, что в ней происходит очистка газа не только от паров масла и влаги, но и от большинства продуктов разложения масла. При работе такой установки с гелиевым компрессором 35 м<sup>3</sup>/час расход жидкого азота не превышает 1 л/час.

Два доклада А. В. Б е л о н о г о в а посвящены экспериментальному исследованию последствий нарушения вакуумной изоляции дьюаров.

В одном докладе рассматривается разрушение наружной стенки дьюара, в другом — внутренней.

Определенные автором величины тепловых нагрузок позволяют рассчитывать предохранительные устройства, предотвращающие разрыв сосудов. Разработана и предлагается конструкция простого предохранительного клапана для быстрого отвода образовавшихся паров.

В связи с широким применением жидких газов результаты этой изыскательной работы весьма актуальны.

Л. Б. Г о л о в а н о в доложил результаты исследования теплопроводности многослойной изоляции и сравнил ее с порошковой и высоковакуумной. Теплопроводность многослойной изоляции определялась по количеству водорода, испаряющегося из измерительного объема. Исследовались изоляции, состоящие из стеклоткани с алюминиевой фольгой толщиной 0,01 мм и стекловаты с такой же фольгой. Изоляция помещалась в герметическом кожухе, где поддерживалось давление 10<sup>-2</sup> мм рт. ст. Наилучшие результаты были получены при применении изоляции из стеклоткани с пятью слоями фольги на 1 см толщины. Теплопроводность ее составляла  $5,8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{ккал}}{\text{час} \cdot \text{град} \cdot \text{м}}$ . Такая изоляция лучше порошковой, но при применявшихся

толщинах 60—80 мм уступает высоковакуумной с холодным экраном.

Эта изоляция использовалась при изготовлении водородной мишени, представляющей собой цилиндрический водородный сосуд длиной 1500 мм и диаметром 200 мм. Дношники сосуда изготовлены из нержавеющей стали толщиной 0,14 мм. Этот цилиндр заключен в вакуумный кожух с такими же дношниками. Кроме многослойной изоляции предусмотрена возможность высоковакуумной откачки кожуха.

Доклад Р. А. Б у я н о в а, А. Г. З е л ь д о в и ч а и Ю. К. П и л и п е н к о посвящен термодинамическому анализу каталитического превращения ортоводорода в параводород в процессе ожижения. В работе рассмотрен цикл с охлаждением за счет дросселирования и показано, что в зависимости от места расположения конверторов по температуре перераспределяются термодинамические потери, что в свою очередь ведет к изменению площадей теплообмена.

В прениях выступил А. Б. Ф р а д к о в, заметив, что при двойном конвертировании водорода на уровне азотной и водородной ванн потеря холодопроизводительности сокращается на 30%.

В своем докладе А. Б. Ф р а д к о в предложил конструкцию установки для получения жидкого неона за счет использования холода жидкого водорода, состоящую из теплообменника и сборника жидкого неона. Неон хороший хладагент, его теплота испарения в 40 раз больше, чем у гелия, и в 3,5 раза больше, чем у водорода. Б е н ь я м и н о в и ч в прениях отметил, что неон как хладагент может быть использован в области температур от 18 до 35° К, и сказал, что очень желательна разработка небольших неоновых ожижителей для научно-исследовательских учреждений и заводских лабораторий.

С большим интересом был выслушан доклад Н. Н. М и х а й л о в а и А. Я. Г о в о р и з ИФП АН СССР, посвященный термометрам сопротивления из свинцовистой латуни для измерения температур гелиевой области. Имевшаяся в лаборатории Камерлинг-Оннеса катушка термочувствительной фосфористой бронзы, полученная от фирмы Гартман и Браун, была израсходована в 1930—1932 гг. С тех пор велись разработки методов получения термочувствительных сплавов. Полученные бронзы с небольшой примесью свинца отличались плохими механическими свойствами и малым интервалом измеряемых температур.

Авторами был приготовлен ряд медноцинковых сплавов с небольшой примесью свинца. Сплав, содержащий 62% Cu, 36,2% Zn, 1,7% Pb и 0,1% W, оказался наиболее подходящим материалом для термометров.

Еще лучшие термочувствительные свойства имеет стандартная свинцовистая латунь для часовой промышленности марки ЛС-59-1. Вопросы, заданные доклад-

чику, касались в основном сравнения такого термометра с угольным: зависимости его показаний от измерительного тока, магнитного поля, остаточного сопротивления и т. д.

В заключение Н. Н. Михайлов отметил стабильность показаний металлического термометра сопротивления и его точность.

Влияние физических свойств подложек на поведение сверхпроводящих элементов памяти разбиралось в докладе С. Я. Берковича, П. П. Головастика и Р. А. Ченцова, представленного Институтом точной механики и вычислительной техники АН СССР.

На вычислительной машине М-20 авторами был проведен анализ теплопередачи от тонкой пленки из сверхпроводящего материала, нанесенного на подложку и помещенного в жидкий гелий. Нагрев пленки предусматривался импульсами тока прямоугольной формы. Показано, что при работе такого элемента средняя его температура зависит от теплоемкости подложки, так как в установлении температуры основную роль играет теплопередача от пленки к подложке, а не в гелий.

Р. И. Исаева, А. С. Расторгуев, Р. А. Ченцов и В. А. Громковский провели измерения тока, разрушающего сверхпроводимость пленок в температурной области от критической до  $2^{\circ}$  К. Получены кривые охлаждения пленок при прогреве их импульсами тока длительностью от 0,02 до 0,5 мсек.

Роль подложки в процессе охлаждения пленки экспериментально изучалась при измерении скорости охлаждения пленки, нанесенной на подложки различной величины. Из этих измерений определены коэффициенты теплопередачи от оловянной пленки в гелий, от кварцевой подложки в гелий и между пленкой и подложкой.

А. Е. Дубравская, А. И. Зимарев и Р. А. Ченцов предложили новый сверхпроводящий элемент памяти, в котором используются два связанных сверхпроводящих контура, выполненных из пленок. Один из них — целиком сверхпроводящий, а второй изменяет свое состояние в зависимости от информации. Этот элемент сконструирован с учетом всех необходимых условий быстрого теплоотвода, что позволяет получить до  $2 \cdot 10^4$  срабатываний в секунду, чем выгодно отличается от сверхпроводящих элементов памяти Кроу. Величина сигнала элемента 10 мв.

Три типа регуляторов параметров жидкого азота и водорода предложили в своем докладе Л. Б. Голованов и Е. М. Дьячков (ОИЯИ). В первом типе регуляторов уровня чувствительным элементом является сильфон, закрепленный на конце заливной трубки и заполненный газом, конденсирующимся при соприкосновении сильфона с жидкостью, уровень которой поддерживается. Точность поддержания уровня 2—3 мм. Второй тип регулятора уровня отличается от первого тем, что располагается вне заливаемого сосуда, а управляющий импульс посылается выносным датчиком, расположенным в рабочем объеме.

Авторами разработан сильфонный регулятор, поддерживающий постоянное давление в бачке водородной пузырьковой камеры с точностью 0,05 ат.

С. Ф. Гришин, выступивший в прениях, рассказал об используемых в ФТИ АН УССР электрических регуляторах уровня, датчиком для которых служит катушка из медной проволоки, меняющая сопротивление в зависимости от температуры. При повышении температуры датчика реле включает нагреватель в дьюаре, из которого и происходит сифонный залив жидкости за счет повышения давления над ней.

Б. Н. Есельсон, Б. Г. Лазарев, А. Д. Швец доложили о создании во ФТИ АН УССР (Харьков) ряда простых криостатов для получения температур ниже  $1^{\circ}$  К. В конструкциях применяются адсорбционные угольные насосы для откачки паров Не. В приборе с 40 г активированного угля минимальная температура  $0,7^{\circ}$  К жидкого Не<sup>4</sup> поддерживается в течение двух часов. Использование жидкого Не<sup>3</sup> позволяет получать температуры до  $0,35^{\circ}$  К.

М. Каганов, И. Михайлов, Э. Раиба