

## Эффект Шубникова–де Гааза и высокое давление

Е. С. Ицкевич

*Институт физики высоких давлений им. Л. Ф. Верещагина РАН, г. Троицк, Московск. обл., 142190, Россия*  
E-mail: itskev@ns.hppi.troitsk.ru

Статья поступила в редакцию 14 марта 2001 г.

PACS: 71.18.+y, 81.40.Vw

*Посвящается памяти Л. В. Шубникова и  
О. Н. Трапезниковой*

100 лет тому назад, в самом начале XX века (29 сентября 1901 года) родился Лев Васильевич Шубников, сыгравший одну из главных ролей в развитии квантовой физики твердого тела. Сто лет прошло и со дня рождения его жены и сотрудника, Ольги Николаевны Трапезниковой, принимавшей горячее участие во многих работах Л. В. Возникшая в конце первой четверти века физика твердого тела лежит в основе всех достижений электроники, главной технологической базы информационной революции XX века.

Квантовые осцилляции электросопротивления, возникающие в монокристаллах металла в магнитном поле, были открыты Л. В. совместно с профессором де Гаазом, его научным шефом в Лейдене (Голландия, 1930 г.), так называемый эффект Шубникова–де Гааза (ШдГ осцилляции). Совершенные монокристаллы висмута, позволившие наблюдать ШдГ эффект, были выращены Л. В. в качестве первой задачи, поставленной де Гаазом перед приехавшим к нему на стажировку молодым ученым. На этих же кристаллах де Гааз и ван Альфен впоследствии открыли аналогичные осцилляции магнитной восприимчивости (ДГВА эффект). Оба типа осцилляций послужили основой для получения экспериментальных сведений об энергетических спектрах носителей заряда в металлах и полупроводниках.

Прежде чем излагать сформулированные в заглавии статьи вопросы, мне хочется дать некоторые сведения о самом Л. В. Лев Васильевич в 1931 г. организовал первую в Советском Союзе криогенную лабораторию в Харьковском физико-техническом институте. Стажировку в Лейдене (1926–1930 гг.) Л. В. проходил в лаборатории Камерлинг-Оннеса, который, как известно, пер-

вым в мире получил жидкий гелий. Л. В. освоил опыт экспериментирования с жидким гелием и поэтому в сравнительно короткий срок организовал получение в Харькове «всех» жидких газов — азота, водорода и гелия, позволивших проводить работы по широкой низкотемпературной тематике. В частности, значительные работы велись по сверхпроводимости. Эксперименты Л. В. создавали почву для раздумий самым крупным теоретикам страны. Проведенные им и О. Н. Трапезниковой измерения низкотемпературной теплоемкости хлоридов переходных металлов и совместно с С. С. Шалытом их магнитной восприимчивости привели к обнаружению переходов в антиферромагнитное состояние, теорию которого создал Л. Д. Ландау. Забегая вперед, заметим, что теорию квантовых осцилляционных эффектов создали в 60-х годах И. М. Лифшиц и А. М. Косевич.

Мое знакомство с жизнью и начинаниями Л. В. Шубникова началось с достаточно близкого знакомства с Ольгой Николаевной. Оно возникло в 60-е годы на базе совместных исследований теплоемкости сильно анизотропных твердых тел и продолжалось много лет. Сын О. Н. и Л. В. — Миша Шубников, тоже физик, долгие годы работал в лаборатории С. С. Шалыта в ЛФТИ и занимался исследованиями свойств полупроводников под гидростатическим давлением, продолжая начатое в 1965 г. в лаборатории исследование полупроводников под давлением. Первой такой работой было изучение влияния давления на магнитофонные осцилляции в  $n$ -InSb (С. С. Шалыт, Е. С. Ицкевич и сотр.).

Наше знакомство с О. Н. носило разносторонний характер. Она прожила долгую жизнь (скон-

чалась в 1997 г.), наполненную и трагическими обстоятельствами. После ареста и расстрела мужа, Льва Васильевича, в 1937 году, испытаний в годы Великой Отечественной войны О. Н. нашла в себе силы продолжать научную работу в С.-Петербургском университете, воспитывать сына. Она была ярким представителем петербургской интеллигенции, вобравшей в себя все интеллектуальные ценности начала XX века. Ее отличали, кроме широкой образованности, любовь к людям и достаточно редкая в прошедшем веке отзывчивость.

Мне приходилось общаться, в том числе по научным вопросам, и с другими учениками Л. В., завоевавшими прочные позиции в науке. Кроме О. Н. и С. С. Шалыта, с Н. Е. Алексеевским, Б. Г. Лазаревым, Ю. Н. Рябининым. Это было очень полезное и приятное общение. И самый существенный контакт — с основателем и директором ИФВД РАН Леонидом Федоровичем Верецагиным, начинавшим свою научную деятельность в физике также в лаборатории Л. В. Шубникова (1934–1939 гг.) с исследования магнитной восприимчивости сплавов. И хотя в дальнейшем Л. Ф. посвятил себя исследованиям при высоких давлениях, он сохранил память о своих молодых годах и низких температурах. В 1958 году, создавая Институт физики высоких давлений с основной задачей — овладеть синтезом алмазов при высоком давлении, он пригласил меня как специалиста по физике низких температур — представителя школы Института физических проблем — для осуществления еще одного «синтеза» — соединения высокого давления и низких температур при исследовании фундаментальных свойств твердых тел. Начатая Львом Васильевичем Шубниковым научная тематика ветвилась и развивалась.

### Эффекты ШдГ и ДГВА

Мы не будем разделять эти два квантовых эффекта, так как практически при различных типах измерений они дают одинаковую информацию об исследуемом объекте. Оба возникают вследствие квантования энергетических уровней электронов проводимости в магнитном поле (квантование Ландау) и присущи металлам и полупроводникам. Эффекты были открыты благодаря применению гелиевых температур и созданию методов получения совершенных монокристаллов металлов и полупроводников.

Оба эффекта показывают при низких температурах осцилляции своих величин в магнитном поле, возможность наблюдения которых опреде-

ляется качеством исследуемых образцов, низкими температурами и достаточной величиной внешнего магнитного поля.

Период осцилляций в обратном магнитном поле связан с площадью экстремального (минимального или максимального) сечения поверхности Ферми (ПФ) плоскостью, перпендикулярной направлению поля,  $\Delta(1/H) = eh/cS$ , где  $S$  — площадь экстремального сечения ПФ, а  $e$ ,  $c$  и  $h$  — известные мировые постоянные. Меняя направление поля, можно найти форму ПФ. Измеряя зависимость амплитуд осцилляций от температуры, можно определить эффективную массу носителей, соответствующую данному сечению ПФ, а зависимость той же амплитуды от поля позволяет судить о рассеянии носителей на примесях, т.е. о качестве исследуемого кристаллического образца. Эффекты ШдГ и ДГВА оказались самым удобным и надежным методом экспериментального определения ПФ.

### Электронно-топологические переходы под давлением

Создание камеры высокого гидростатического давления для использования высокого давления при исследовании ПФ с помощью осцилляцион-

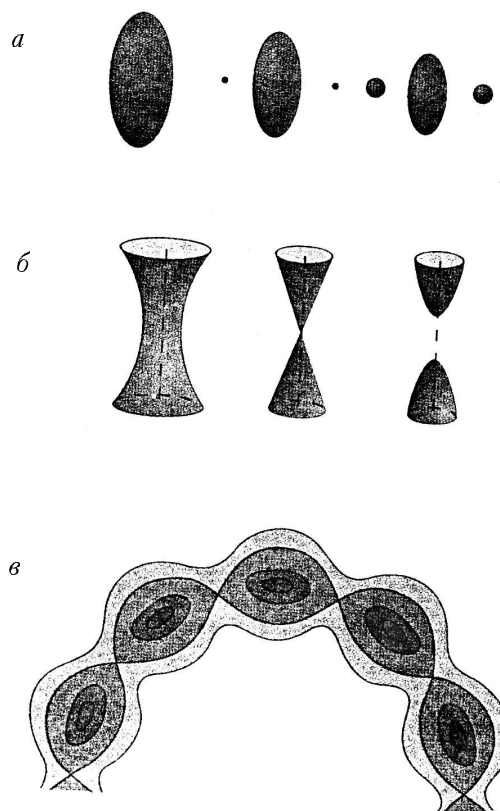


Рис. 1. Появление новой полости (а), разрыв перемычки (б) и переход системы гофрированных трубок к эллипсам (в).

ных эффектов было стимулировано вдохновляющей работой И. М. Лифшица (1960 г.), в которой были предсказаны качественные изменения ПФ металлов (фазовые переходы  $2\frac{1}{2}$  рода). Идея Лифшица может быть легко понята. Поверхности Ферми металлов, изображенные в пространстве импульсов (волновых векторов), в наиболее общем виде могут быть представлены в виде гофрированных трубок (прямых и криволинейных, см. рис. 1). В первом случае экстремальные сечения трубок могут совпадать с границами (гранями) зоны Бриллюэна — элементарной ячейки Вигнера-Зейтца в пространстве импульсов в схеме повторяющихся ячеек. Во втором случае трубка может иметь вид гофрированного кольца или системы колец, расположенных внутри ячейки либо на ее ребрах (рис. 1). Возникает непреодолимое желание сжать экстремальное сечение ПФ (перемычку) до его исчезновения и получить отдельные замкнутые части ПФ. Сделать это можно, естественно, давлением. В принципе возможен и обратный процесс — соединение под давлением разрозненных частей ПФ в единые «трубки», последнее обычно происходит с дырочными частями ПФ.

### Камеры высокого давления

Низкотемпературные камеры гидростатического давления, пригодные для осцилляционных экспериментов, были созданы в 1962–1963 гг. (Е. С. Ицкевич). Это система цилиндр—поршень, в рабочем объеме которой имеется среда для передачи давления к кристаллическому образцу (обычно смесь органических жидкостей). Генерирующий давление поршень может фиксироваться на разных степенях сжатия среды. Такая методика создания гидростатического давления в объеме, практически без потери величины давления, принципиально отличает ее от «clamped cell» техники, предложенной в 1953 г. Честером и Джонсом, фиксировавших безобъемные наковальни, в которых не создается гидростатика.

Возможность использования камеры для изучения влияния давления на ШдГ и ДГВА эффекты была доказана экспериментами с монокристаллами цинка, на которых наблюдалось семикратное изменение периода ШдГ осцилляций игольчатой части ПФ под давлением 1,6 ГПа, что соответствует такому же увеличению минимального сечения этой части ПФ, перпендикулярного кристаллографической оси [0001].

Электронно-топологические переходы (ЭТП) — фазовые переходы  $2\frac{1}{2}$  рода под давлением. Нарушение связности гофрированных трубок ПФ металлов при ЭТП помимо осцилляционных эффектов может наблюдаться и по изменениям траекторий носителей тока в магнитном поле, т. е. по угловой зависимости магнитосопротивления в постоянном сильном магнитном поле.

Образцы монокристаллов кадмия были исследованы обоими способами и получено полное совпадение характеристик наблюдавшихся ЭТП (С. Л. Будько, А. Н. Вороновский, А. Г. Гапотченко, Е. С. Ицкевич). На рис. 2 показаны ДГВА осцилляции в кадмии, а на рис. 3 — происходящие ЭТП.

Эти результаты, вместе с аналогичными результатами Б. Г. Лазарева с сотр., экспериментами Н. Б. Брандта и Я. Г. Пономарева и теорией И. М. Лифшица, были зарегистрированы как Открытие (Диплом № 238). Все это демонстрирует прямую (по участию учеников и последователей) и идейную связь с Л. В. Шубниковым как с создателем нового направления в физике твердого

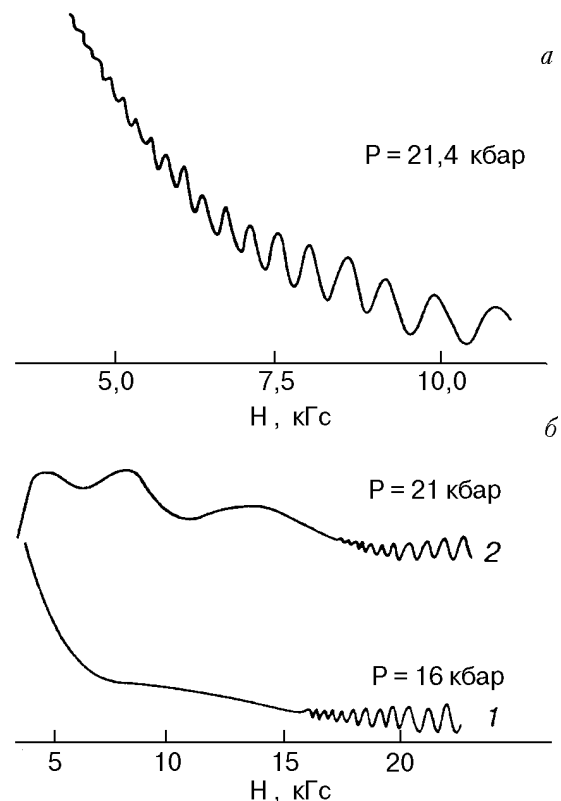


Рис. 2. ДГВА осцилляции в кадмии, обусловленные новыми частями ПФ, возникающими при фазовых переходах  $2\frac{1}{2}$ -го рода; а — частота осцилляций,  $\mathbf{H} \parallel [11\bar{2}0]$ ; б — частота осцилляций,  $\mathbf{H} \parallel [0001]$ ; до перехода (1), после перехода (2).

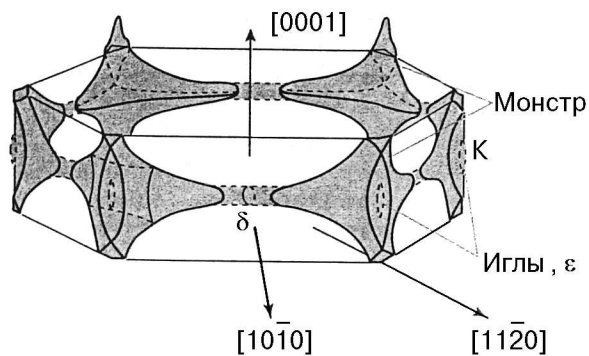


Рис. 3. Схематическое изображение поверхности Ферми кадмия. Открытая дырочная поверхность — «монстр» (вторая зона Бриллюэна). В базисной плоскости есть разрывы и не образуются открытые направления вдоль осей  $[11\bar{2}0]$  и  $[10\bar{1}0]$ . В точках  $K$  нет «игл». Штриховые линии изображают переходы у кадмия: возникновение перемычки ( $\delta$ ) и «иглы» ( $\epsilon$ ).

тела. Эффект Шубникова–де Гааза — главный инструмент этих работ.

При помощи ШдГ осцилляций нашей группой были найдены ЭТП в висмуте и сплавах  $\text{Bi-Sb}$  (Е. С. Ицкевич, Л. М. Фишер, 1967 г.) в полупроводниках, совместно с ЛФТИ и ФИАН в теллуре, совместно с ЛФТИ в  $n$ - и  $p$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Успешные поиски ЭТП осцилляционными методами проводились и в других лабораториях: на кафедре физики низких температур МГУ (Н. Б. Брандт с сотр.), в ДонФТИ (А. А. Галкин с сотр.). Следует отметить красивую работу Н. Я. Мининой (МГУ), открывшей целую серию ЭТП в  $\text{Bi}$  и сплавах  $\text{BiSb}$  с помощью созданных ею методов односторонней деформации монокристаллов.

Так было создано новое направление физики твердого тела — исследование качественных изменений (переходов) в электронных спектрах металлов и полупроводников.

Кроме ЭТП, с помощью осцилляционных методов под давлением изучались изменения ПФ в магнитоупорядоченных металлах —  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Cr}$  (ИФВД и ИОФАН, 1977–1979 гг.). В общей сложности в нашей группе было сделано более 30 работ, в которых под давлением исследовались осцилляционные эффекты.

Поскольку многие лаборатории в разных странах изучали с помощью осцилляционных методов влияние давления на различные изменения ПФ металлов (не только ЭТП), накопился материал, позволяющий оценить применимость различных моделей в условиях всестороннего сжатия. Оказалось, что достаточно хорошо работает теория псевдопотенциала.

В последнее время изучение электронных спектров под давлением с помощью ШдГ осцилляций распространилось и на двумерные системы. В качестве примера можно привести измерения магнитосопротивления и ЭДС Холла в полях до 7 Тл при  $T = 4,2$  К под давлением до 2,5 ГПа для систем с квантовыми ямами  $\text{GaSb}/\text{InAs}/\text{GaSb}$  различной ширины и с разным типом интерфейса. Из анализа наблюдавшихся ШдГ осцилляций и зависимости компонент тензора магнитосопротивления в рамках модели с двумя типами носителей определена зависимость от давления концентраций электронов и дырок. Показано, что под давлением происходит переход от полуметаллического к полупроводниковому типу проводимости, сопровождаемый появлением области отрицательного магнитосопротивления, которая сохраняется вплоть до давлений, соответствующих переходу в диэлектрическое состояние. Существование области отрицательного магнитосопротивления может быть объяснено в рамках представлений о слабой локализации в системе двумерных электронов. Получена количественная информация о концентрации и подвижности носителей в изученной системе, а также о соотношении времен упругой и неупругой релаксаций для квазидвумерных электронов и их зависимости от давления (Е. М. Дижур и др., ИФВД, 1998 г.).

В заключение можно сказать, что Л. В. Шубников создал способ исследования, позволивший изучать поведение электронов проводимости в металлах и полупроводниках под давлением.

Дальнейшее развитие физики твердого тела привело к открытию переходов из одних состояний в другие практически без изменений кристаллической структуры в новых объектах, в частности, в ВТСП купратах и КМС манганатах, которые стали называться «квантовыми фазовыми переходами».