

## Особенности спектрального состава осцилляций магнетопроводимости двумерного аккумулирующего слоя на поверхности теллура ( $10\bar{1}0$ )

© В.А. Березовец, И.И. Фарбштейн, Д. Шнайдер\*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Институт технической физики технического университета,  
Брауншвайг, Германия

E-mail: losif.Farbshtein@shuvpop.ioffe.rssi.ru

(Поступила в Редакцию 14 июля 1998 г.  
В окончательной редакции 3 сентября 1998 г.)

Обнаружены дополнительные осцилляции магнитосопротивления и эффекта Холла в системе  $2D$ -дырок в аккумулирующем слое на поверхности теллура ( $10\bar{1}0$ ). Частота осцилляций оказалась равной линейной комбинации частот осцилляций проводимости  $2D$ -дырок типа Шубникова–де Гааза (ШГ) в двух  $2D$ -подзонах, образованных в приповерхностном потенциале. Механизм появления этих осцилляций связывается с осцилляцией вероятности межподзонного рассеяния при переходах между уровнями Ландау двух размерно квантованных подзон, квантованных магнитным полем, при их одновременном прохождении вблизи уровня Ферми.

В ряде работ (см., например, [1–3]) путем исследования эффекта ШГ было установлено, что в результате размерного квантования в аккумулирующем слое (АС) на поверхности теллура ( $10\bar{1}0$ ) (плоскость скола) образуются две размерно-квантованные подзоны, поверхности Ферми  $2D$ -дырок в которых сильно анизотропны: для мелкой подзоны с малой энергией Ферми это два соприкасающихся эллипса, вытянутых вдоль оси  $C_3$  кристалла, а для глубокой подзоны с большой энергией Ферми — гантелеобразная фигура. При этом был обнаружен эффект магнитного пробоя перемишки между эллипсами (шейки гантели при более высоких энергиях Ферми), приводящий к одновременному сосуществованию осцилляций ШГ с двумя периодами — одному, — соответствующему квантованию по Ландау площади одного эллипса, — другому, — примерно вдвое большему, соответствующему квантованию объединенной гантелеобразной фигуры [4]. Были определены концентрации и подвижности  $2D$ -дырок в обеих подзонах [2].

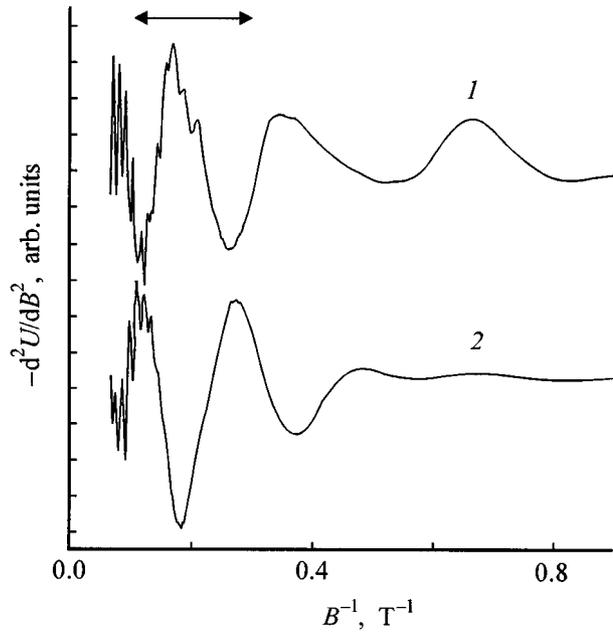
При компьютерном анализе осциллирующих составляющих экспериментально измеряемых зависимостей сопротивления и холловского напряжения от магнитного поля кроме осцилляций ШГ, обусловленных квантованием по Ландау двух  $2D$ -подзон, были обнаружены дополнительные экстремумы малой амплитуды, также периодичные на шкале обратных магнитных полей (рис. 1). Эффект имел воспроизводимый от образца к образцу характер и слабо зависел от температуры.

Технология изготовления образцов и методика измерений описаны в [2,4]. Отметим здесь, что измерения проводились в квазистационарном режиме с использованием сверхпроводящего соленоида до 12 Т в ФТИ им. А.Ф. Иоффе и биттеровского соленоида до 16 Т в лаборатории сильных магнитных полей Технического университета г. Брауншвайга, Германия. Сигнал записы-

вался в память компьютера, а затем подвергался математической обработке.

Для детального анализа спектра осцилляций было применено Фурье-преобразование. На рис. 2 показаны результаты такого преобразования с применением прямоугольного окна, выполненного для функций, представленных на рис. 1. Применение разных фильтров при Фурье-преобразовании [5] принципиально картину не меняло. Видно, что кроме острого пика вблизи нуля с частотой  $\Omega_1$ , который соответствует осцилляциям с большим периодом от мелкой подзоны (рис. 1), пика с частотой  $\Omega_0$  вблизи 80 Т, соответствующего квантованию глубокой подзоны, и слабо выраженной особенности на частоте  $2\Omega_1$ , связанной с эффектом магнитного пробоя, имеется еще ряд пиков, самый заметный из которых соответствует частоте вблизи  $\Omega_{\text{com}} \cong 20\text{ Т}$  (на рис. 2 — стрелка). Чтобы исключить возможность ошибки из-за использования дискретного преобразования Фурье, из зависимостей, представленных на рис. 1, вычитались полученные компьютерным моделированием кривые, соответствующие наименьшей из частот (рис. 2). Амплитуды и частоты пиков, отмеченных на рис. 2 стрелкой, в результате этой операции не менялись. Следует заметить: дополнительные осцилляции становятся заметными тогда, когда уровни Ландау в мелко лежащей подзоне имеют малые номера; при возрастании магнитного поля амплитуда осцилляций меняется слабо; осцилляции лучше разрешаются и имеют большую амплитуду на зависимости холловского напряжения от поля.

Количественный анализ показал, что период обнаруженных осцилляций не соответствует основным гармоникам осцилляций ШГ на частотах  $(\Omega_0 \pm \Omega_1)/2$ , которые могут возникнуть в результате линейной суперпозиции осцилляций с разными периодами, соответствующими двум  $2D$ -подзонам.



**Рис. 1.** Осциллирующая часть холловского напряжения (1) и магнетосопротивления (2) образца теллура с 2D-слоем на поверхности (10 $\bar{1}0$ ). Стрелкой обозначена область наиболее отчетливого проявления дополнительных осцилляций.  $T = 1.9$  К.

Подобное явление наблюдалось ранее при исследовании Вi и сплавов Вi–Sb, легированных донорной примесью Те и послужило указанием на сильную нелинейность эффекта ШГ, в результате которой монокристалл в магнитном поле выступает в качестве смесителя частот [6]. Наиболее последовательное объяснение этого эффекта дано в [7], где появление дополнительных частот в эффекте ШГ связывается с наличием в полупроводнике нескольких групп носителей заряда с разными сечениями Ферми (в Вi и сплавах Вi–Sb это — по разному ориентированные в  $k$ -пространстве электронные долины). Авторы работы [7] детально рассмотрели вопрос о влиянии междолинного рассеяния на спектр осцилляций ШГ при переходах между квантовыми уровнями разных долин, расположенными вблизи уровня Ферми. Было показано, что кроме "традиционной" перенормировки эффективного времени релаксации на уровне Ландау ("температура Дингла") учет междолинного механизма рассеяния при переходах между квантованными уровнями приводит в квазиклассическом приближении к появлению в выражении для недиагональных по индексу долин компонент тензора проводимости  $\sigma_{ij}$  дополнительных слагаемых  $\delta\sigma_{ij}$  пропорциональных

$$\delta\sigma_{ij} \sim \cos 2\pi [n(\varepsilon_F^\alpha / \hbar\Omega^\alpha) \pm m(\varepsilon_F^\beta / \hbar\Omega^\beta)], \quad (1)$$

где  $\Omega^{\alpha,\beta}$  — циклотронные частоты в  $\alpha$  и  $\beta$ -долинах соответственно;  $n$  и  $m$  — целые числа;  $\varepsilon_F^{\alpha,\beta}$  — энергии Ферми для соответствующих долин;  $\hbar$  — постоянная Планка. Соотношение (1) указывает, что в эффекте ШГ кроме основных частот ШГ ( $\Omega^\alpha$  и  $\Omega^\beta$ ) должны

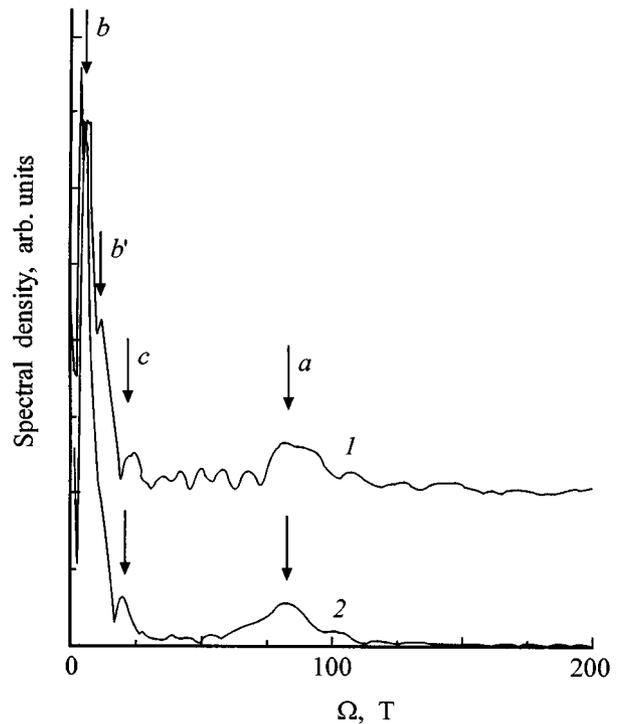
существовать и комбинированные частоты

$$\Omega_{\text{com}} = n\Omega^\alpha \pm m\Omega^\beta. \quad (2)$$

Поскольку на поверхности теллура (10 $\bar{1}0$ ) существуют две 2D-подзоны с различающимися подвижностями и концентрациями 2D-дырок, а экспериментально наблюдаемый спектр осцилляций ШГ подобен предсказываемому в [7], естественно было попытаться связать обнаруженные дополнительные частоты осцилляций ШГ с проявлением механизма междолинного рассеяния в условиях квантования по Ландау спектра обеих 2D-подзон в магнитном поле. Мы применили выводы этой работы к нашему случаю. Оказалось, что самый большой дополнительный пик в Фурье-спектре, отмеченный стрелкой на рис. 2, отвечает соотношению

$$\Omega_{Sh-dH} = \Omega_0 - 13\Omega_1. \quad (3)$$

Проведенный анализ спектров ШГ всех образцов показал, что этот пик наблюдался для всех значений концентраций 2D-дырок в АС с вариацией коэффициента при  $\Omega_1$  в (3) в узком интервале  $11 \leq m \leq 14$ . Столь большое значение коэффициента  $m$  в рамках предлагаемого объяснения можно связать с тем, что квантуемые сечения поверхностей Ферми в двух рассматриваемых подзонах сильно отличаются друг от друга.



**Рис. 2.** Результат Фурье-анализа зависимостей, представленных на рис. 1. 1 — холловское напряжение, 2 — магнетосопротивление.  $a$  — частота  $\Omega_0$ , соответствующая квантованию глубокой подзоны,  $b$  и  $b'$  — частоты  $\Omega_1$  и  $2\Omega_1$ , соответствующие квантованию мелкой подзоны в условиях осуществления магнитного пробоя,  $c$  — частота дополнительных осцилляций  $\Omega_{\text{com}}$ .

Происхождение всех остальных дополнительных пиков в Фурье-спектре, изображенном на рис. 2, требует отдельного рассмотрения.

Таким образом, прецизионные измерения зависимости сопротивления и эффекта Холла от магнитного поля в двумерном аккумуляирующем слое на поверхности теллура с кристаллографическими индексами (10 $\bar{1}$ 0) при гелиевых температурах привели к обнаружению осцилляций измеряемых величин с частотами, кратными частотам осцилляций Шубникова–де Гааза для поверхностей Ферми 2D-дырок в размерно квантованных подзонах, образованных в приповерхностном потенциале. Появление этих осцилляций связывается с вероятностью межподзонного рассеяния в квантующем магнитном поле.

Работа выполняется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-02-16959) и Немецкого общества академических обменов Германии (DAAD).

## Список литературы

- [1] В.А. Березовец, И.И. Фарбштейн. ФТП **29**, 5/6, 965 (1995).
- [2] В.А. Березовец, Д.В. Машовец, А.О. Смирнов, Д.В. Смирнов, И.И. Фарбштейн. ФТТ **33**, 12, 3502 (1991).
- [3] V.A. Berezovets, A.O. Smirnov, I.I. Farbstein, D. Schneider. Solid State Commun. **96**, 6, 349 (1995).
- [4] В.А. Березовец, А.О. Смирнов, И.И. Фарбштейн. ФТТ **30**, 7, 2218 (1988).
- [5] Ф.Дж. Херрис. ТИИЭР **66**, 1, 60 (1978).
- [6] Н.Б. Брандт, С.М. Чудинов. УФН **137**, 3, 479 (1982).
- [7] В.А. Козлов, Е.Е. Нариманов, К.А. Сахаров ФТТ **36**, 2, 309 (1994).