

## КВАНТОВЫЕ "НУЛЕВЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ" В СТРУКТУРАХ С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ

*И.И.Сайдашев, И.Г.Савельев, А.М.Крещук*

В квантующих магнитных полях в структурах с двумерным электронным газом обнаружены осцилляции напряжения, совпадающие по периоду с осцилляциями Шубникова – де Гааза и не связанные с пропусканием тока через образец.

Объектом наших исследований являлись селективно-легированные гетероструктуры AlGaAs/GaAs, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии, с подвижностью электронов  $\mu = (3 \div 15) \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>/В·с при  $T = 4,2$  К и с концентрацией двумерного газа  $n = (4 \div 8) \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Измерения производились как на образцах, имеющих холловскую геометрию, так и произвольную форму (по методу Ван-дер-По), магнитное поле создавалось с помощью сверхпроводящего соленоида ( $H \leq 5$  Т) и электромагнита ( $H \leq 1,2$  Т), напряжение измерялось потенциометрическим электрометрическим методами.

На рис. 1 показана зависимость удвоенной амплитуды осцилляций Шубникова - де Гааза (ОШГ)  $\Delta V_{SH}$  от величины тока через образец при фиксированном значении магнитного поля. Величина  $\Delta V_{SH}$  линейно падает с уменьшением тока, что указывает на отсутствие разогрева электронного газа, который наступает для данного образца ( $\mu = 1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ,  $n = 6,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) при токах  $I \geq 100 \text{ мкА}$ . Однако, из рис. 1 видно, что экстраполяция прямой к  $I = 0$  дает отсечку на оси напряжений. Это приводит к неожиданному выводу, что осцилляции напряжения должны наблюдаться и в отсутствие тянущего тока через образец. И действительно, из рис. 2 видно, что в квантующих магнитных полях наблюдаются осцилляции напряжения при разорванной токовой цепи ("нулевые осцилляции" — НО, кривая 2), совпадающие по периоду с ОШГ (кривая 1). Причем, как следует из рис. 1, экспериментальные кривые, измеренные при малых токах, представляют из себя сумму аддитивных вкладов ОШГ и НО.

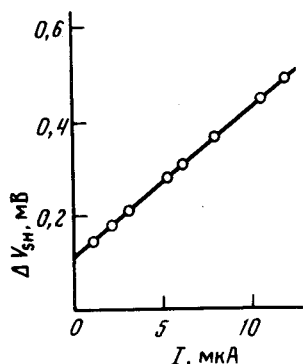


Рис. 1

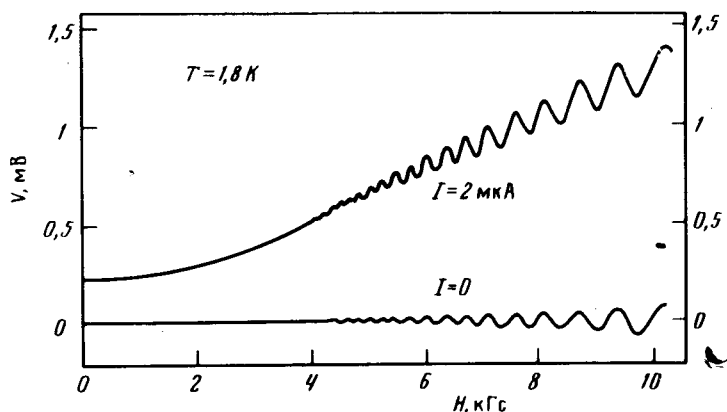


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость амплитуды осцилляций Шубникова - де Гааза от тока через образец при постоянном магнитном поле  $H = 9,5 \text{ кГс}$

Рис. 2. Осцилляции Шубникова - де Гааза и осцилляции напряжения при разорванной токовой цепи

Подобные НО наблюдались практически на всех исследованных нами образцах (более 10 шт.). Амплитуда НО изменялась от образца к образцу, а также зависела и от выбранной пары контактов. Размах этих осцилляций в поле  $H \simeq 4 \text{ Т}$  достигал значений  $\sim 10 \text{ мВ}$ . На эффект не влияла ни скорость (в наших экспериментах от 0 до  $0,5 \text{ кГс/с}$ ), ни направление развертки магнитного поля. Знак НО не зависел от направления магнитного поля. Напряжение, снимаемое с образца при фиксированном магнитном поле, оставалось неизменным в течение времени измерения ( $\sim 1 \text{ час}$ ).

Освещение образца источником типа "А" (освещенность =  $500 \text{ Лк}$ ) не приводило к заметному изменению амплитуды НО. Температурная зависимость амплитуды НО аналогична температурной зависимости ОШГ и позволяет определить эффективную массу двумерных электронов в GaAs  $m^* = (0,069 \pm 0,002) m_0$ , что хорошо совпадает с литературными данными. Период равен периоду ОШГ и дает концентрацию двумерных электронов. В магнитном поле параллельном гетерогранице НО, также как и ОШГ, исчезают. Разогрев электронного газа путем пропускания переменного тока приводит к затуханию НО. Наряду с этими чертами одинаковыми для НО и ОШГ, между ними существуют и значительные отличия.

Как следует из рис. 1 для данного образца амплитуде НО соответствует амплитуда ОШГ при токе  $I \simeq 4 \text{ мкА}$ . Однако, как видно из рис. 2 (кривая 1), ОШГ при этом происходят на фоне гигантского положительного магнитосопротивления  $\Delta R/R_0 \sim 500\%$ , которое практически не проявляется при измерении НО в слабых магнитных полях (кривая 2). Кроме того НО и ОШГ, как правило, имели сдвиг фазы, который приводил к существенному искажению результирующих кривых  $V(H)$ , вплоть до появления дополнительных максимумов.

Картина осцилляций при этом подобна зависимости, наблюдаемой при сильном спиновом расщеплении уровней Ландау (рис. 3).

Также из рис. 3 видно, что экспериментальные кривые ОШГ могут пересекать лишь приборного нуля, но в наших экспериментах никогда не пересекают НО, а в режиме квантового эффекта Холла (КЭХ) кривые ОШГ и НО касаются друг друга (рис. 3, б). Таким образом НО можно рассматривать как изменение в квантовых магнитных полях точки отсчета — "нуля" для ОШГ, что обусловлено аддитивностью ОШГ и НО.

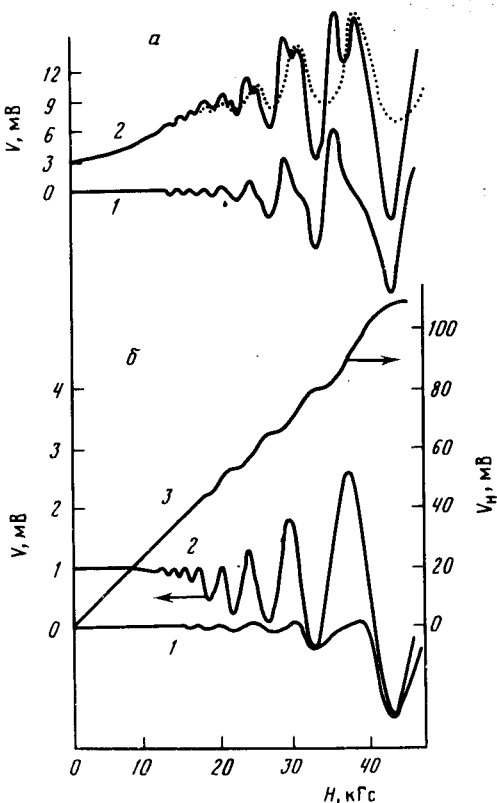


Рис. 3. Зависимость осцилляций напряжения от магнитного поля для образца, в котором: а — КЭХ не реализуется ( $\mu = 5 \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>/В·с;  $n = 8 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>): кривая 1 —  $I = 0$  мкА; 2 —  $I = 100$  мкА. Пунктиром показана кривая осцилляций Шубникова — де Гааза, полученная вычитанием кривой 1 из 2. б — Наблюдается квантование холловского сопротивления (кривая 3) ( $\mu = 4,3 \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>/В·с;  $n = 6,4 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>): 1 —  $I = 0$  мкА; 2, 3 —  $I = 25$  мкА

Шунтирование образца внешним сопротивлением при появлении НО приводит к протеканию через него тока и, следовательно, к выделению мощности, которая имела величину  $\sim 10^{-13} - 10^{-12}$  Вт. При разомкнутой токовой цепи и  $dH/dt = 0$  одним из возможных ее источников, например, может быть генерирование шумовой мощности в электрических цепях, идущих от образца и находящихся при комнатной температуре.

Мы полагаем, что наблюдавшаяся недавно в <sup>2</sup> "топологическая" разность потенциалов на контактах МДП-структуры, выполненной в форме диска Корбино в режиме КЭХ имеет ту же природу, что и НО.

Однако, приведенная в <sup>2</sup> возможная интерпретация на основе существования замороженных зарядов в случае, когда  $\rho_{xx} = 0$ , по-видимому, неприменима, так как НО отчетливо наблюдаются не только в режиме КЭХ (рис. 3, б), но и при его отсутствии, когда  $\rho_{xx} \neq 0$  (рис. 2 и 3, а).

Таким образом в настоящее время не существует теоретической интерпретации эффекта НО.

Необходимо подчеркнуть, что данное явление имеет достаточно общий характер. Оно наблюдается на образцах разной геометрии (двойной холловский крест, диск Корбино, образцы произвольной формы), в двумерных каналах, изготовленных на основе гетеропереходов AlGaAs/GaAs и кремниевых МДП-структурах <sup>2</sup>. Кроме того, первые измерения на гетеро-структурах InGaAs/InP также продемонстрировали эффект сходный с описанным выше.

## Литература

1. Блюмина М.Г.; Денисов А.Г., Полянская Т.А., Савельев И.Г., Сеничкин А.П., Шмарцев Ю.В. Письма в ЖЭТФ, 1986, 44, 257.
2. Веселаго В.Г., Заварицкий В.Н., Нунупаров М.С., Беркут А.Б. Письма в ЖЭТФ, 1986, 44, 382.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
1 декабря 1986 г.

---

/