

©1994 г.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ЭМИССИЯ ОПТИЧЕСКИХ ФОНОНОВ БАЛЛИСТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ОДИНОЧНЫМ БАРЬЕРОМ

Ю.В.Дубровский, И.А.Ларкин, С.В.Морозов, Ю.Н.Ханин,
Т.Г.Андерссон[†]

Институт проблем технологии микроэлектроники
и особочистых материалов Российской академии наук,
142432, Черноголовка, Россия

[†]Чалмерский технологический университет, физический
факультет, S-41296, Гетеборг, Швеция

(Получена 12 мая 1994 г. Принята к печати 23 мая 1994 г.)

Экспериментально обнаружены фононные реплики, связанные с испусканием LO -фононов баллистическими электронами на длине порядка 60 нм. Измерения проводились на симметричных гетероструктурах GaAs/AlAs/GaAs с единичным туннельным барьером и слабо легированным GaAs-спейсером. Инжектированные через туннельный гетеробарьер электроны преодолевают область слаболегированного спейсера баллистически. Магнитное поле, приложенное перпендикулярно направлению тока, подавляет фононные реплики. Предложена простая модель для объяснения экспериментальных результатов.

Последовательная эмиссия оптических фононов баллистическими электронами, инжектированными через туннельный гетеробарьер в n^- -GaAs область, изучалась в работах [1,2]. Исследовавшиеся структуры состояли из слоя n^- -GaAs толщиной 1 мкм с одной стороны барьера $Al_xGa_{1-x}As$ (21 нм в [1] и 16.5 нм в [2]) и контактных слоев n^+ -GaAs. В работе [1] фононные повторения на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) наблюдались только в магнитном поле, превышающем 4 Т, независимо от его направления. Однако в работе [2] испускание LO -фононов было зарегистрировано в отсутствие магнитного поля, приложение которого только слабо изменяло форму осцилляций.

Для объяснения природы этих осцилляций было предложено несколько моделей [3-5], в которых сделан вывод о том, что физической причиной наблюдаемых осцилляций является взаимодействие электронов с фононами только в слабо легированной области n^- -GaAs.

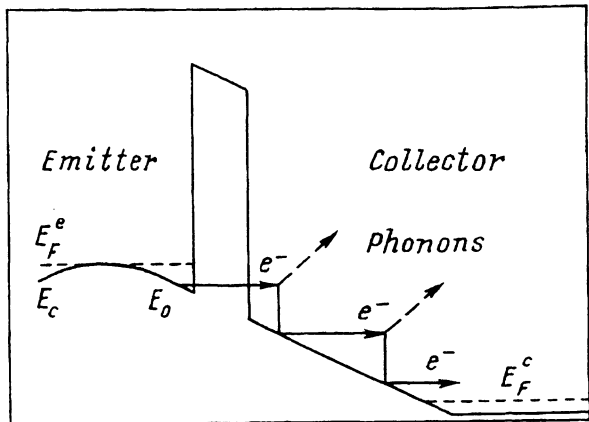


Рис. 1. Схематическая зонная диаграмма исследуемой структуры при приложенном напряжении.

При испускании LO -фононов изменяется последовательное сопротивление слоя n^- -GaAs, что приводит к модуляции падения напряжения на барьере и, следовательно, туннельного тока.

В модели [3], которая наиболее адекватно описывает эксперименты [1,2], область n^- -GaAs разделена на обедненную и квазинейтральную. В обедненной области инжектированные через барьер электроны движутся баллистически до тех пор, пока их энергия не достигнет энергии LO -фонона. Испуская фононы за очень малое время (10^{-13} с), электроны вновь ускоряются пока не достигнут квазинейтральной области. При условии, что функция распределения электронов, инжектированных в n^- -GaAs имеет резкий пик, их энергия на границе обедненной и квазинейтральной областей периодически изменяется от нуля до $\hbar\omega_{LO}$ с изменением внешнего напряжения. В квазинейтральной области происходит ударная ионизация доноров, эффективность которой зависит от энергии электронов. Таким образом, периодическое изменение эффективности ионизации является причиной осциллирующего сопротивления квазинейтральной области. В рамках этой модели обоснована необходимость наличия магнитного поля для наблюдения осциллирующего сопротивления в экспериментальных условиях работы [1]. Более общий случай с произвольной функцией распределения инжектированных через барьер электронов рассматривался в работе [6]. Было показано, что, даже в отсутствие острого пика в распределении, взаимодействие электронов с оптическими фононами и заряженными примесями приводит к осциллирующему туннельному току.

В настоящей работе представлены результаты исследований эмиссии фононов баллистическими электронами в структурах, отличных от использовавшихся в [1,2]. Мы исследовали симметричные структуры n^+ -GaAs/ n^- -GaAs/ i -GaAs/ i -AlAs/ i -GaAs/ n^- -GaAs/ n^+ -GaAs, выращенные МЛЭ, с относительно тонкими слабо легированными/нелегированными слоями n^- -GaAs/ i -GaAs толщиной 50/10 нм и барьером AlAs толщиной 5 нм. Схематическая зонная диаграмма нашей структуры при приложении внешнего напряжения приведена на рис. 1. На ВАХ исследуемых структур наблюдались особенности, которые мы интерпретируем как фононные повторения. Однако, в отличие от

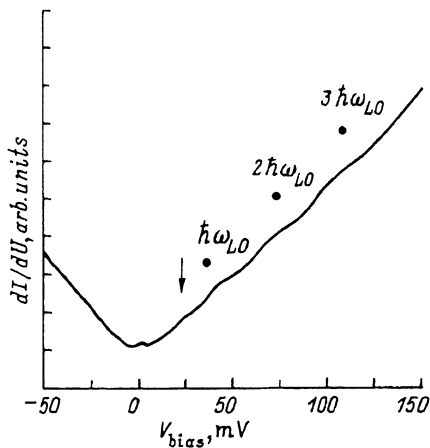


Рис. 2. Экспериментальная зависимость $\partial I/\partial V$ от приложенного напряжения V при нулевом магнитном поле. Напряжения, соответствующие энергиям оптических фононов в GaAs обозначены треугольниками.

ранних работ [1,2], они подавлялись магнитным полем, параллельным плоскости гетероперехода. Такое поведение нельзя адекватно объяснить в рамках моделей [3-5].

На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость $\partial I/\partial V$ от приложенного к структуре напряжения V . Все измерения проводились при температуре 4.2 К с помощью техники lock-in. Треугольниками отмечены точные значения напряжений, соответствующих энергиям продольных оптических фононов $n\hbar\omega_{LO}$ в GaAs, где $n = 1, 2, 3, \dots$, $\hbar\omega_{LO} = 36$ мэВ. Периодическая структура на кривой при положительных V коррелирует с отмеченными напряжениями. Точное определение положения фононных повторений затруднительно, поскольку часть напряжения V падает на левом спейсере (см. рис. 1).

Не совсем ясно происхождение максимума, обозначенного стрелкой на рис. 2. Одно из возможных объяснений связано с коротковолновыми акустическими (ТА) фононами [7]. Слабый пик проводимости при нулевом напряжении (рис. 2) мы связываем с наличием аккумуляционных слоев у гетерограниц из-за встроенного заряда в барьере.

На рис. 3 представлена экспериментальная зависимость $\partial^2 I/\partial V^2 = f(V)$, где параметром является магнитное поле, параллельное интерфейсу ($\mathbf{B} \perp \mathbf{J}$). Как видно из рисунка, магнитное поле подавляет фононные повторения, и при $B \approx 3.8$ Т они практически исчезают. Однако $\mathbf{B} \parallel \mathbf{J}$ не влияет на экспериментальные кривые. Отметим существенные отличия наших структур от использовавшихся в ранних экспериментах [1,2], которые не позволяют применить модель, предложенную в работе [3], для интерпретации эксперимента. Во-первых, в наших образцах слабо легированная область существенно более тонкая (10 нм нелегированного GaAs и 50 нм GaAs с $n = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³). Эта область обеднена носителями уже при падении потенциала на ней, равного 60 мВ. По этой причине в наших структурах отсутствует квазинейтральная слабо легированная область при напряжениях на образце, соответствующих фононным повторениям. Такая область и ее последовательное сопротивление играют принципиальную роль в экспериментах [1,2] и отвечают за модуляцию тока в рамках модели [3]. Во-вторых, в наших экспериментах из-за существенно более тонких

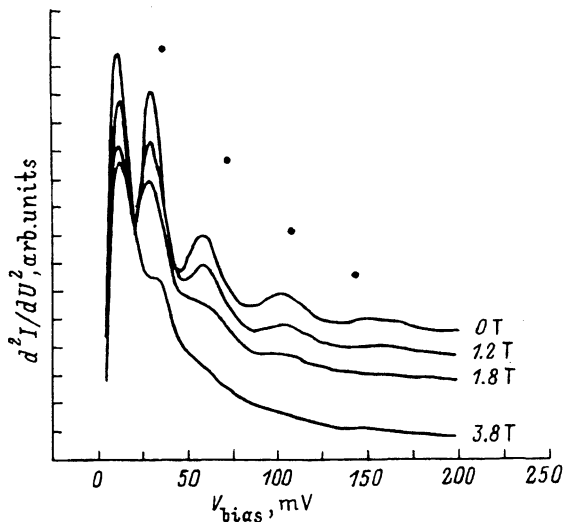


Рис. 3. Экспериментальная зависимость d^2I/dU^2 как функция приложенного напряжения при различных $B \perp J$. Температура — 4.2 К.

гетеробарьеров плотность тока на 2 порядка больше, чем в образцах, исследовавшихся в работе [2]. Поэтому мы считаем, что модуляция среднего отрицательного заряда в обедненной области при испускании фононов играет определяющую роль в нашем случае. Отметим, что в модели [3] такой механизм возникновения осцилляций обсуждался, но был исключен из-за малой плотности тока в экспериментах [1,2].

Качественно наши экспериментальные результаты можно объяснить следующим образом. Изменение средней скорости инжектированных электронов при испускании фононов приводит к изменениям общего заряда и падения напряжения в обедненной области, что и является причиной наблюдаемой модуляции дифференциального сопротивления. Магнитное поле, приложенное перпендикулярно току, нарушает баллистический характер движения электронов из-за силы Лоренца и электрон-электронных соударений, что приводит к подавлению фононных повторений. На это указывает и тот факт, что при $B \approx 3.8$ Т, когда наблюдаемые осцилляции практически исчезают, ларморовский диаметр в GaAs совпадает с толщиной спейсера в наших образцах (≈ 60 нм). Интересно отметить, что в наших экспериментах несколько LO-фононов испускается горячими электронами на длине не более 60 нм, при том, что время пролета этого расстояния того же порядка, что и время фононной эмиссии ($\approx 10^{-13}$ с).

Полагая среднюю скорость электронов $\approx 10^7$ см/с и исходя из полученных в эксперименте токов, получаем среднюю концентрацию электронов в этой области $\approx 10^{12}$ см $^{-3}$, что составляет 10^{-4} от концентрации доноров. Если рассматривать обедненную область как последовательное сопротивление в нашей структуре, то можно ожидать что относительная величина модуляции дифференциального сопротивления должна быть порядка 10^{-4} . Это и наблюдается в эксперименте.

Другим интересным результатом наших экспериментов является то, что фононные реплики отчетливо наблюдаются только когда электроны инжектируются через туннельный барьер AlAs в слабо легированную область, выращенную после барьерного слоя. При обратном

направлении тока, когда электроны инжектируются в слабо легированный слой, выращенный на GaAs-подложке, фоннные реплики практически не видны (см. рис. 2). Причиной этого, по-видимому, является более высокое легирование нижнего слоя n^- -GaAs из-за «затянутых» диффузионных профилей примеси из подложки.

Таким образом, в наших экспериментах наблюдалась периодическая структура ВАХ туннельных однобарьерных гетероструктур n^+ -GaAs/ n^- -GaAs/ i -AlAs/ n^- -GaAs/ n^+ -GaAs (с относительно тонким слоем n^- -GaAs толщиной 60 нм), период которой соответствует энергии LO-фононов $\hbar\omega_{LO} = 36$ мэВ в GaAs. В отличие от работ [1,2], фоннная структура подавлялась магнитным полем, перпендикулярным направлению тока. Предложена простая модель, позволяющая качественно объяснить экспериментальные результаты.

Список литературы

- [1] T.W. Hickmott, P.M. Solomon, F.F. Fang, F. Stern, R. Fischer, H. Morkoc. Phys. Rev. Lett., **52**, 2053 (1984).
- [2] P.S.S. Guimaraes, D.C. Taylor, B.R. Snell, L. Eaves, K.E. Singer, G. Hill, M.A. Pate, G.A. Toomb, F.W. Sheard. J. Phys. C., **18**, L605 (1985).
- [3] L. Eaves, P.S.S. Guimaraes, F.W. Shead, B.R. Snell, D.C. Taylor, G.A. Toombs, K.E. Singer. J. Phys. C., **18**, L885 (1985).
- [4] J.P. Leburton. Phys. Rev. B, **31**, 4080 (1985).
- [5] E.S. Hellman, J.S. Harris. Phys. Rev. B., **33**, 8284 (1986).
- [6] A. Grinberg, S. Luryi. Phys. Rev. B., **42**, 1705 (1990).
- [7] P. Thomas, H.J. Queisser. Phys. Rev., **175**, 983 (1968).

Редактор В.В. Чалдышев
