

## Высшие гармоники колебаний тока в слабосвязанных сверхрешетках GaAs/AlGaAs

© Г.К. Расулова<sup>¶</sup>, Н.П. Брунков\*, А.Е. Жуков\*, В.М. Устинов\*

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,  
119991 Москва, Россия

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

(Получена 5 декабря 2005 г. Принята к печати 19 декабря 2005 г.)

Показано, что автоколебания, наблюдаемые в слабосвязанных сверхрешетках GaAs/AlGaAs, являются результатом сложения гармонических колебаний нескольких связанных осцилляторов, каждый из которых представляет собой однобарьерный туннельный диод. Связанные осцилляторы формируют расширенную границу электрополевого домена в режиме отрицательной дифференциальной проводимости.

PACS: 72.30.+q, 73.40.Gk, 73.40.Kp.

Слабосвязанные полупроводниковые сверхрешетки (СР), в которых обнаружены спонтанные незатухающие высокочастотные колебания тока, привлекают внимание исследователей возможностью создания на их основе перестраиваемых по частоте генераторов колебаний тока, способных генерировать колебания в диапазоне частот от десятков кГц до единиц ГГц. Генерация колебаний тока в слабосвязанных сверхрешетках обусловлена наличием областей с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) в вольт-амперных характеристиках сверхрешеток.

Согласно теоретической модели [1–3], осцилляции тока в сверхрешетках возникают благодаря циклическому движению границы электрополевого домена вдоль оси сверхрешетки. Основным параметром, по которому теоретически оценивается период осцилляций, является время пролета границы домена между контактами [4]. Однако в ряде случаев для согласования расчетных и экспериментальных данных число периодов сверхрешетки, которые за период колебаний пробегает граница домена, варьируется [4,5]. При этом механизм, ответственный за уменьшение или увеличение области циклического движения границы домена, в рамках указанной теоретической модели не обсуждается.

Обнаруженные нами автоколебания в сверхрешетках GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As имеют частоту, значительно превышающую частоту колебаний, определяемую временем пролета границы электрополевого домена между контактами [6,7]. Например, при постоянном смещении 3.0 В частота осцилляций в начале 4-го плато вольт-амперной характеристики составляет 1.55 МГц, в то время как оценка частоты по времени пролета границы домена дает величину 0.48 МГц. Хотя приведенное соотношение расчетной и измеренной частот и укладывается в эмпирическую концепцию циклического движения границы домена в пределах 1/3 длины сверхрешетки [8], однако частота осцилляций в пределах каждого плато не постоянна и снижается к его концу [6,7]. Наблюдаемое

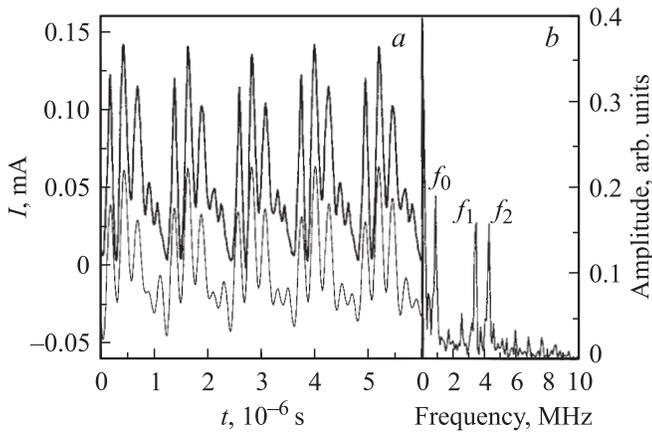
уменьшение частоты осцилляций к концу каждого плато вольт-амперной характеристики существующая теоретическая модель не объясняет.

На основании исследований частотных характеристик колебаний тока [6,7] мы предположили, что наблюдаемые автоколебания есть результат сложения гармонических колебаний нескольких связанных осцилляторов, которые в режиме отрицательной дифференциальной проводимости образуют расширенную границу электрополевого домена.

Граница электрополевого домена в сверхрешетке представляет собой область пространственного заряда, падение напряжения, на котором обеспечивает резонансное согласование уровней минизон в соседних квантовых ямах. Формирование границы домена происходит в условиях, при которых минизоны в соседних квантовых ямах разомкнуты (область ОДП в вольт-амперной характеристике). Для резонансного согласования уровней минизон с эмиттера инжектируется необходимое количество заряда. Из-за диссипации энергии при переносе заряда вдоль оси СР не все инжектированные с эмиттера электроны одновременно достигают периода СР, в котором происходит формирование границы домена. В слабосвязанных полупроводниковых сверхрешетках из-за слабого перекрытия электронных волновых функций между соседними квантовыми ямами (ширина ям и барьеров превышает длину когерентности электрона) велика вероятность захвата электронов квантовыми ямами. Поэтому электроны, потерявшие часть энергии в результате участия в процессах рассеяния во время туннелирования вдоль оси СР, захватываются квантовыми ямами, расположенными позади периода, в котором происходит формирование границы домена, образуя протяженную (несколько периодов СР) границу домена.

Мы предположили [6,7], что генерация осцилляций тока происходит в области расширенной границы электрополевого домена, в которой слабые флуктуации плотности захваченного ямами заряда приводят к рассогласованию резонансно-выровненных минизон. Частота

<sup>¶</sup> E-mail: rasulova@mail.l.lebedev.ru



**Рис. 1.** *a* — осцилляции тока, измеренные при постоянном смещении 3.295 В (жирной линией). Тонкой линией показаны колебания, рассчитанные по формуле (1). Для наглядности расчетный спектр сдвинут вниз по оси ординат на 0.05 мА. *b* — преобразование Фурье измеренных автоколебаний.

колебаний определяется скоростью резонансного согласования и рассогласования уровней минизон и зависит от величины расстройки резонанса уровней минизон в соседних квантовых ямах. Ясно, что меньшей величине расстройки резонанса соответствует большая частота генерируемых колебаний. Мы полагаем, что в режиме ОДП расширенная граница домена представляет собой ансамбль связанных по фазе осцилляторов, каждый из которых генерирует колебания с собственной частотой. Осциллятор представляет собой две соседние квантовые ямы, разделенные барьером, которые можно представить как однобарьерный туннельный диод. Расширенная граница электрополевого домена проявляет себя в гистерезисе тока, наблюдаемом в вольт-амперных характеристиках при изменении направления развертки напряжения [9,10], а также в сдвиге линии фотолуминесценции в сторону больших энергий при обратной развертке приложенного напряжения [11].

Следует отметить, что рассматриваемая система с полупроводниковой сверхрешеткой, в которой происходит генерация колебаний тока, отвечает основным требованиям, предъявляемым к автоколебательным системам [12]: рассматриваемая система является автономной диссипативной системой с внутренней обратной связью [9,10] и с внутренним источником энергии, которым является эмиттер, поставляющий требуемое количество заряда для резонансного согласования уровней минизон в соседних квантовых ямах.

Для того чтобы подтвердить наши предположения о том, что автоколебания в слабосвязанных СР есть результат сложения нескольких гармонических колебаний, были исследованы высокочастотные колебания тока в сверхрешетке GaAs/AlGaAs методом синхронизации собственных колебаний внешним источником синусоидальных колебаний.

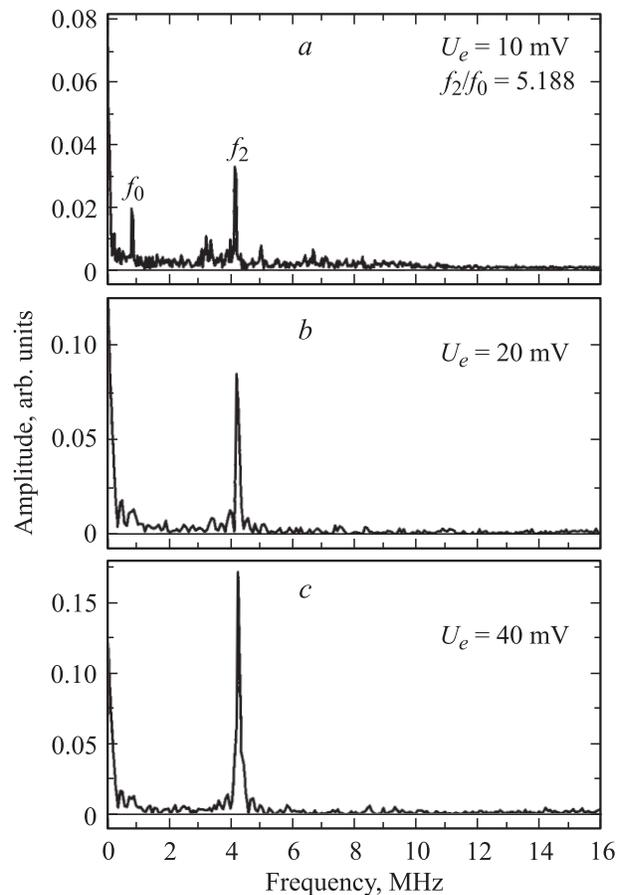
Измерения проводились на 30-периодных сверхрешетках GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As (ширина ямы GaAs — 28 нм, толщина барьера Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As — 10 нм) при температуре 4.2 К. Источником синусоидальных высокочастотных колебаний служил генератор сигналов Г4-153.

На рис. 1, *a* показаны осцилляции тока, измеренные при постоянном смещении 3.295 В (жирной линией). На рис. 1, *b* представлен фурье-спектр этих колебаний. Обращает на себя внимание, что в разложении Фурье регистрируются линии на основной частоте ( $f_0$ ) и на частотах 4-й ( $f_1$ ) и 5-й ( $f_2$ ) гармоник с практически равной амплитудой, а линии на частотах 2-й и 3-й гармоник отсутствуют.

Анализ амплитудно-частотного спектра собственных автоколебаний показал, что наблюдаемые автоколебания есть результат сложения трех гармонических колебаний с заданной амплитудой ( $a_i$ ), частотой ( $f_i$ ) и начальным фазовым углом ( $\varphi_i$ ):

$$f(t) = \sum_i a_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i), \quad i = 0, 1, 2. \quad (1)$$

Рассчитанные по формуле (1) осцилляции показаны на рис. 1, *a* тонкой линией.



**Рис. 2.** Фурье-спектры автоколебаний, синхронизованных внешними гармоническими колебаниями с частотой 4.2 МГц и с различной амплитудой  $U_e$ , указанной на рис. *a*–*c*.

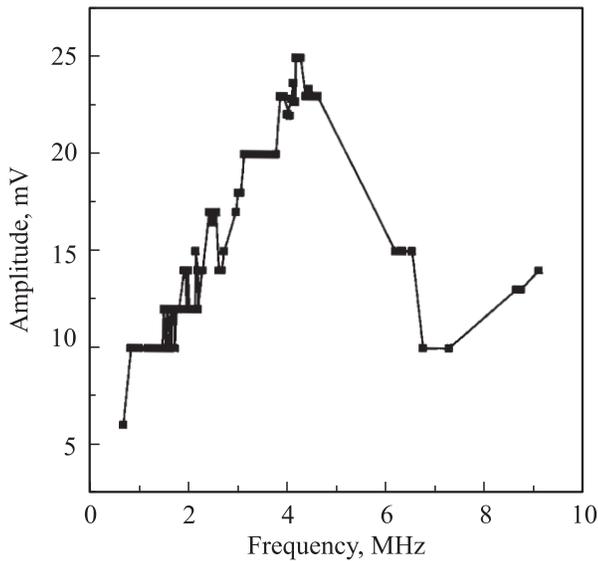


Рис. 3. Амплитудно-частотная зависимость синхронизованных автоколебаний.

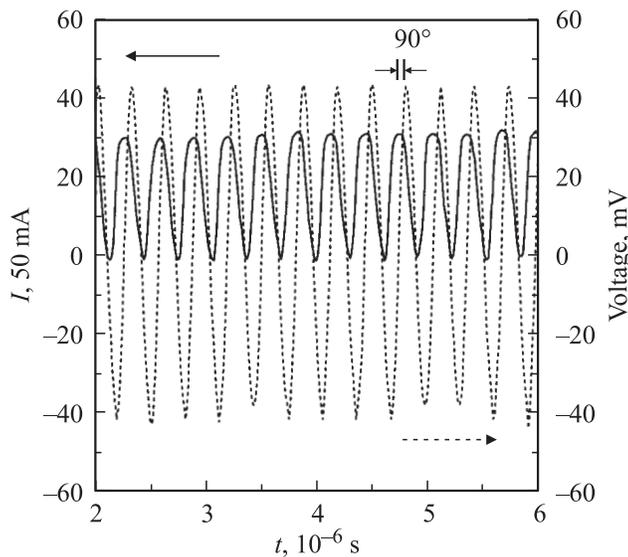


Рис. 4. Синхронизованные автоколебания, измеренные при постоянном смещении 4.4 В (сплошная линия). Пунктирной линией показаны колебания от внешнего генератора. Сдвиг фаз между синхронизованными колебаниями и внешними гармоническими осцилляциями равен  $\pi/2$ .

Для того чтобы выделить гармонические составляющие исследуемого сложного колебания, собственные автоколебания структуры были синхронизованы внешним гармоническим сигналом с различной амплитудой в диапазоне частот 0.5–10 МГц. Так как результаты исследований синхронизации автоколебаний на частотах близких к 4-й и 5-й гармоникам аналогичны, то здесь мы приводим данные измерений с частотой внешнего сигнала, близкой к 5-й гармонике собственных колебаний. На рис. 2 представлены фурье-спектры колеба-

ний, измеренных при постоянном смещении 3.295 В, синхронизованных внешним гармоническим сигналом с частотой 4.2 МГц и с различной амплитудой. Из рис. 2, а видно, что при амплитуде внешнего сигнала  $U_e = 10$  мВ измеряется квазипериодический сигнал с двумя несоизмеримыми частотами (отношение частот  $f_2/f_0 = 5.188$  — иррационально). При увеличении амплитуды внешнего сигнала в 2 раза ( $U_e = 20$  мВ) колебания на частоте основной гармоники ( $f_0$ ) подавляются, собственные колебания структуры синхронизируются внешней силой и в фурье-спектре присутствует только одна линия, соответствующая синусоидальным колебаниям с частотой внешней силы (рис. 2, б). Из рис. 2, с следует, что с увеличением амплитуды внешнего сигнала амплитуда синхронизованных колебаний растёт.

Измерение зависимости амплитуды синхронизованного сигнала от частоты (рис. 3) показало, что рост амплитуды сигнала достигает максимума на частотах, близких к 5-й гармонике. В области частот 5–8 МГц синхронизация отсутствует. Как видно из рис. 3, амплитуда синхронизованного сигнала с частотой 4.2 МГц возрастает в 5 раз по сравнению с амплитудой колебаний на частоте основной гармоники, т.е. наблюдается когерентное усиление сигнала. Мы полагаем, что когерентное усиление сигнала происходит из-за взаимной синхронизации в ансамбле из нескольких осцилляторов, обусловленное постоянным сдвигом фазы колебаний осцилляторов. А именно, колебания, генерируемые в области расширенной границы электрополевого домена несколькими связанными однобарьерными туннельными диодами, синхронизируются за счет внутреннего взаимодействия, подстраивая собственные частоты.

Исследование синхронизации собственных колебаний тока в сверхрешетке внешними гармоническими колебаниями при различных величинах постоянного смещения, приложенного в областях с отрицательной дифференциальной проводимостью, показало, что при синхронизации колебаний с частотой, близкой к частоте основной гармоники  $f_0$ , ток  $I$  опережает по фазе внешнее переменное напряжение  $U = U_0 \sin \omega t$  на  $90^\circ$ , т.е. проявляется емкостной характер реактивности системы. Влияние контактов исключается, так как при постоянном смещении, приложенном в области с положительной дифференциальной проводимостью (на линейном участке вольт-амперной характеристики), сигналы, снимаемые со структуры и с генератора, синфазны; т.е. в этой области напряжений сверхрешетка ведет себя как омическое сопротивление. На рис. 4 пунктирной линией показан внешний сигнал от генератора (ось ординат справа), а сплошной линией — синхронизованный сигнал от структуры (ось слева), измеренный при постоянном смещении 4.4 В. Такое поведение характерно для прохождения переменного тока через конденсатор и описывается как

$$I(t) = C \left( \frac{dU}{dt} \right) = C \omega U_0 \cos \omega t. \quad (2)$$

В нашей интерпретации механизма генерации колебаний тока в сверхрешетке мы предположили, что в неравновесном случае (режим с ОДП) расширенную границу электрополевого домена следует рассматривать как совокупность связанных однобарьерных туннельных диодов, каждый из которых генерирует колебания с собственной частотой. При этом каждый однобарьерный диод можно рассматривать как емкость, в которой барьер есть слой диэлектрика, а квантовые ямы по обеим сторонам есть обкладки конденсатора. То, что в наших экспериментах при внешнем гармоническом воздействии ток опережает напряжение по фазе на  $\pi/2$ , свидетельствует о том, что в области с ОДП, в которой возникают осцилляции тока, туннелирование незначительно и туннельный переход эквивалентен емкости. Следовательно, предложенный нами в работе [7] релаксационный механизм генерации колебаний в слабосвязанных сверхрешетках справедлив и определяется процессами типа „накопление–сброс“. Период осцилляций определяется временем резонансного рассогласования и согласования минизон в соседних квантовых ямах и может быть описан переходными процессами, происходящими при заряде и разряде емкости [7]. Таким образом, модель пространственно-временных колебаний границы домена в слабосвязанных сверхрешетках нуждается в дальнейшем развитии. Недавно динамика нескольких волновых фронтов (высокополевых доменов) в слабосвязанных сверхрешетках была описана с привлечением модели нескольких переключаемых резервуаров (an  $n$ -tank switched arrival system), уровень заполнения которых контролировался общим сервером [13,14].

Таким образом, в результате синхронизации автоколебаний в сверхрешетках GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As внешним источником гармонических колебаний выделены отдельные гармонические составляющие наблюдаемого сложного автоколебания. Возникновение когерентности является индикатором синхронизации ансамбля осцилляторов. Подтверждена справедливость предложенного нами [7] релаксационного механизма генерации осцилляций тока в слабосвязанных сверхрешетках.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований президиума РАН „Низкоразмерные квантовые структуры“.

## Список литературы

- [1] L.L. Bonilla, J. Galan, J.A. Cuesta, F.C. Martinez, J.M. Molera. Phys. Rev. B, **50**, 8644. (1994).
- [2] O.M. Bulashenko, M.J. Garcia, L.L. Bonilla. Phys. Rev. B, **53**, 10 008 (1996).
- [3] A. Wacker, M. Moscoso, M. Kindelan, L.L. Bonilla. Phys. Rev. B, **55**, 2466 (1997).
- [4] J. Kastrup, R. Hey, K.H. Ploog, H.T. Grahn, L.L. Bonilla, M. Kindelan, M. Moscoso, A. Wacker, J. Galan. Phys. Rev. B, **55**, 2476 (1997).
- [5] D. Sanchez, L.L. Bonilla, G. Platero. Phys. Rev. B, **64**, 114 311 (2001).
- [6] G.K. Rasulova, M.V. Golubkov, A.V. Leonov, P.N. Brunkov, S.O. Usov, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, S.G. Konnikov. Semicond. Sci. Technol., **19**, S77 (2004).
- [7] G.K. Rasulova, M.V. Golubkov, A.V. Leonov, P.N. Brunkov, S.O. Usov, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov, S.G. Konnikov. Suprlat. Microstr., **37**, 139 (2005).
- [8] L.L. Bonilla, H.T. Grahn. Rep. Prog. Phys., **68**, 577 (2005).
- [9] G.K. Rasulova, Yu.A. Efimov, V.N. Murzin. J. Appl. Phys., **82**, 3381 (1997).
- [10] G.K. Rasulova. J. Appl. Phys., **88**, 4170 (2000).
- [11] A.M. Tomlinson, A.M. Fox, C.T. Foxon. Phys. Rev. B, **61**, 12 647 (2000).
- [12] П.С. Ланда. *Нелинейные колебания и волны* (М., Наука, 1997).
- [13] A. Amann, K. Peters, U. Parlitz, A. Wacker, E. Schöll. Phys. Rev. Lett., **91**, 066 601 (2003).
- [14] A. Amann, E. Schöll. J. St. Phys., **119**, 1069 (2005).

Редактор Т.А. Полянская

## High frequency oscillation harmonics in weakly coupled GaAs/AlGaAs superlattices

G.K. Rasulova, P.N. Brunkov\*, A.E. Zhukov\*, V.M. Ustinov\*

Lebedev Physical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
119991 Moscow, Russia

\* Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Self-sustained current oscillations observed in weakly coupled GaAs/AlGaAs superlattices are the superposition of sinusoidal oscillations of several coupled oscillators. Each oscillator is a single barrier resonant tunneling diode. The expanded electric field domain boundary in the negative differential conductance regime are formed by coupled oscillators.