

Взаимная синхронизация двух связанных генераторов автоколебаний на основе сверхрешеток GaAs/AlGaAs

© Г.К. Расулова,¹ П.Н. Брунков,² И.В. Пентин,³ В.В. Ковалюк,³ К.Н. Горшков,³ А.Ю. Казаков,³ С.Ю. Иванов,¹ А.Ю. Егоров,⁴ Д.А. Саксеев,² С.Г. Конников²

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991 Москва, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

³ Московский педагогический государственный университет,
119345 Москва, Россия

⁴ Санкт-Петербургский физико-технологический научно-образовательный центр РАН,
195220 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: rasulova@sci.lebedev.ru

(Поступило в Редакцию 2 декабря 2010 г.)

Проведено исследование взаимодействия генераторов автоколебаний на основе 30-периодной слабосвязанной сверхрешетки GaAs/AlGaAs. Воздействие одного генератора автоколебаний на другой осуществлялось при заданном постоянном смещении в отсутствие в одном из них генерации автономных колебаний. Показано, что вынужденные колебания в захватывающем генераторе возникают из-за возбуждения колебаний в системе связанных осцилляторов, образующих границу электрополевого домена на частоте одной из высших гармоник вынуждающего колебания.

Слабосвязанные полупроводниковые сверхрешетки привлекают внимание исследователей способностью генерировать устойчивые колебания тока в радиочастотном диапазоне от сотен килогерц до десятков мегагерц [1–7]. Генерация колебаний тока в слабосвязанных сверхрешетках была предсказана теоретически в 1994 г. [1], а затем в 1995 г. обнаружена экспериментально [2,3]. Автоколебания тока в слабосвязанных сверхрешетках возникают при постоянном напряжении, приложенном в области с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) вольт-амперной характеристики. Показано, что генерация колебаний тока обусловлена пространственно-временными колебаниями границы электрополевого домена [1,4]. Частота автоколебаний зависит от технологических параметров конструкции сверхрешетки, таких как уровень легирования квантовых ям, размеры квантовых ям и барьеров.

В проведенных нами исследованиях была обнаружена генерация автоколебаний тока в 30-периодной полупроводниковой сверхрешетке GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As (28/10 nm) [5,6]. Качественное рассмотрение механизма генерации автоколебаний в слабосвязанных сверхрешетках, который обусловлен периодическим расширением и сжатием границы электрополевого домена, показало [7], что процесс генерации колебаний тока должен сопровождаться оптическим излучением в дальней инфракрасной области спектра. Полагаем, что частота колебаний тока определяется временем пребывания захваченных электронов в квантовых ямах, образующих расширенную границу электрополевого домена, которое, в свою очередь, определяется временем кулоновского взаимодействия захваченных квантовой ямой электронов с электронами, входящими в квантовую яму.

Расширенная граница домена представляет собой систему связанных осцилляторов, каждый из которых представляет собой однобарьерный туннельный диод, состоящий из соседних квантовых ям, разделенных барьером [7]. Инверсная населенность уровней размерного квантования создается в момент расширения границы домена при рассогласовании уровней минизон в квантовых ямах, формирующих границу домена, и осуществляется благодаря захвату электронов квантовыми ямами и их задержке в области расширенной границы домена на время, равное периоду колебаний тока. Опустошение уровней размерного квантования происходит при сжатии границы домена, т.е. при резонансном выравнивании уровней минизон в квантовых ямах, образующих границу домена. Таким образом, оптическое излучение должно быть модулировано с частотой собственных колебаний тока в сверхрешетке. Длина волны инфракрасного излучения определяется энергией межподзонных переходов, резонансное согласование которых обеспечивает туннелирование электронов вдоль оси сверхрешетки.

Так как мощность излучения одной структуры мала и составляет десятки нановатт, то для усиления мощности излучения необходимо соединить несколько структур, каждая из которых представляет собой отдельный генератор автоколебаний. Таким образом, требуется при одном фиксированном постоянном напряжении получить генерацию колебаний тока в двух или нескольких связанных мезаструктурах. Целью настоящей работы является исследование взаимной синхронизации двух генераторов автоколебаний тока на основе слабосвязанной сверхрешетки.

Исследуемые структуры были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложке n^+ -GaAs и представляют собой сверхрешетку

GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As (28/10 nm), состоящую из 30 периодов чередующихся слоев квантовых ям GaAs (28 nm) и барьеров Al_{0.3}Ga_{0.7}As (10 nm), в которых квантовые ямы однородно легировались кремнием с концентрацией 10¹⁵ см⁻³. Контактные слои GaAs со стороны подложки толщиной 1 μm и верхний толщиной 0.5 μm легировались кремнием до концентрации 2 · 10¹⁸ см⁻³.

Методом оптической фотолитографии изготавливалась квадратная сетка мезаструктур диаметром 350 μm и высотой примерно 6 μm (рис. 1, *a*). Расстояние между ближайшими мезаструктурами было равно 1000 μm. Омические контакты AuGe/Ni наносились на подложку мезаструктуры.

Для исследования воздействия одного генератора автоколебаний на другой использовалась структура с двумя мезаструктурами, расположенными на одной и той же подложке. На рис. 1, *b* приведена принципиальная схема включения двух мезаструктур M1 и M2, каждая из которых представляет собой генератор автоколебаний тока, генерирующий колебания тока с определенной частотой. Колебания тока с каждой мезаструктуры регистрировались на сопротивлениях R1 и R2, равных 36 Ω, с помощью цифрового двухканального осциллографа Tektronix TDS 2022. Для эксперимента выбраны две мезаструктуры, в которых наблюдается генерация коле-

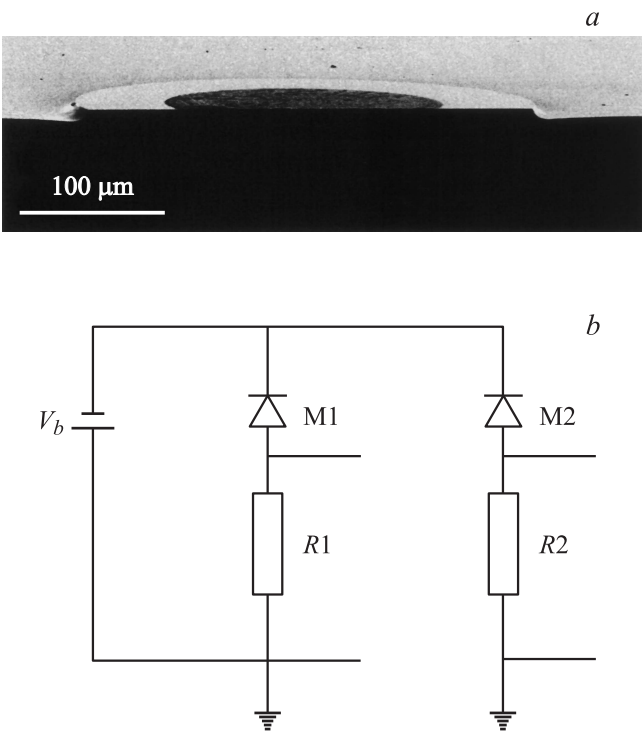


Рис. 1. *a* — изображение поперечного среза мезы на поверхности исследуемой структуры, полученное на растровом электронном микроскопе в режиме регистрации сигнала вторичных электронов; *b* — принципиальная схема включения двух мезаструктур M1 и M2 для изучения взаимной синхронизации их автоколебаний. С сопротивлений R1 и R2, равных 36 Ω, сигнал снимался с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS 2022.

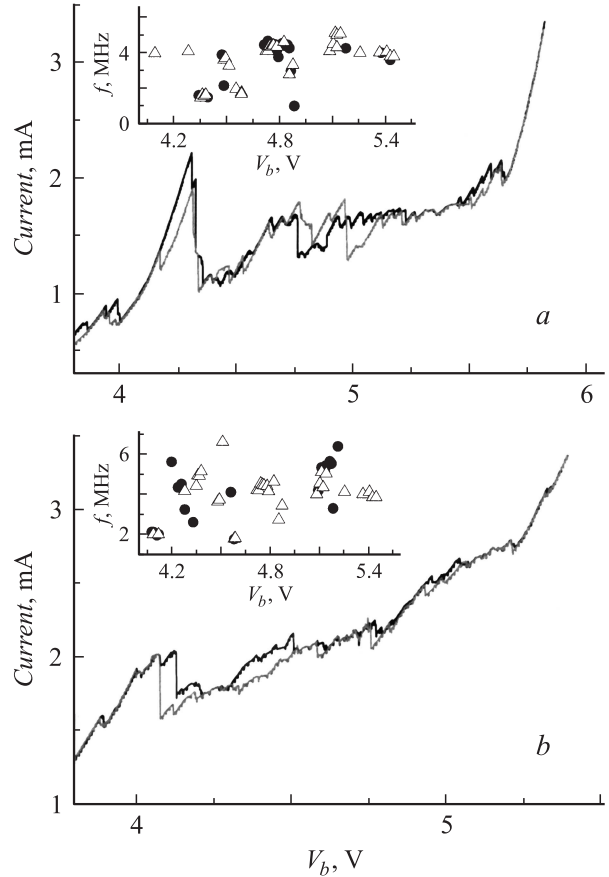


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики двух мезаструктур M1 и M2, измеренные при температуре 4.2 К. Черной кривой показана характеристика, измеренная при прямой развертке напряжения, серой — при обратной развертке. На вставках показаны зависимости частоты колебаний от напряжения для каждой мезаструктуры. Черными кружками показаны частота автоколебаний и величина постоянного напряжения для мезаструктуры, работающей автономно. Треугольниками показаны области генерации вынужденных колебаний их частоты и фиксированные напряжения при включении мезаструктур M1 и M2 по схеме на рис. 1, *b*.

баний тока при различных напряжениях смещения V_b и с различной частотой f .

Вольт-амперные характеристики мезаструктур M1 и M2 представлены на рис. 2. Для вольт-амперных характеристик слабосвязанных сверхрешеток, в которых происходит генерация автоколебания тока, характерно наличие безструктурных областей, следующих за начальным участком с отрицательной дифференциальной проводимостью [8–10]. В работе [7] было показано, что бесструктурные области образуются из-за самовозбуждения колебаний тока в соседних периодах сверхрешетки собственными автоколебаниями, возникающими в начальной области вольт-амперной характеристики с отрицательной дифференциальной проводимостью.

На вставках к рис. 2, *a* и 2, *b* для каждой мезаструктуры M1 и M2 представлены зависимости частоты колебаний f от приложенного постоянного смещения V_b . Сплошными кружками показаны частоты собственных

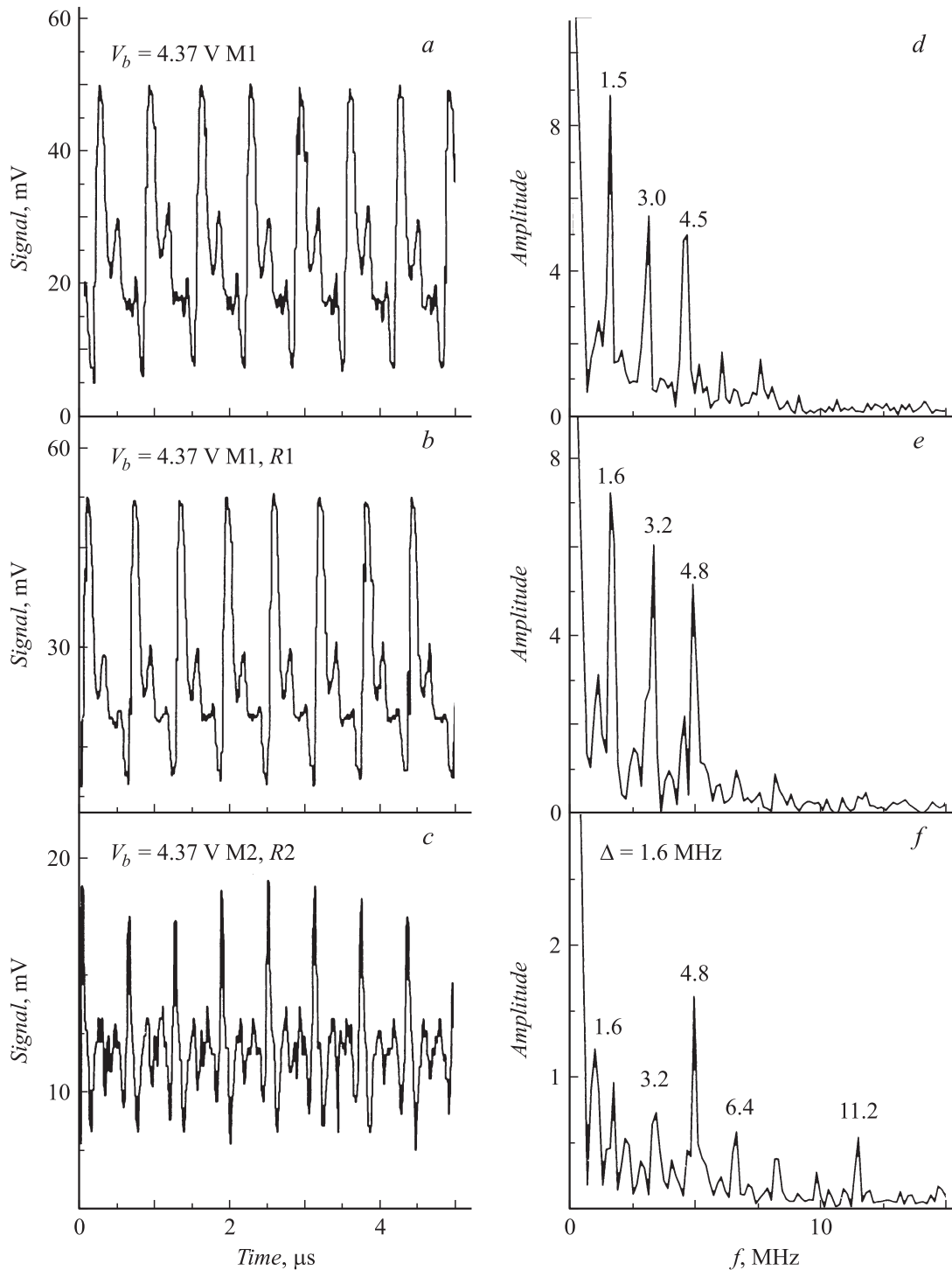


Рис. 3. Колебания тока (*a, b, c*) и их фурье-спектры (*d, e, f*), измеренные при температуре 4.2 К и постоянном смещении $V_b = 4.37$ В: *a* — автономные колебания тока в мезаструктуре M1, *b* и *c* — колебания тока в мезаструктуре M1 (*b*) и мезаструктуре M2 (*c*) при их соединении по схеме на рис. 1, *b*.

автоколебаний каждой мезаструктуры, когда вторая структура электрически отсоединена. Треугольниками показаны частоты вынужденных колебаний при включении мезаструктур по схеме рис. 1, *b*. Из приведенных частотных зависимостей видно, что при отсутствии в определенной области напряжений собственных автономных колебаний из мезаструктур, включение двух

мезаструктур по схеме рис. 1, *b* приводит к возникновению в ней генерации вынужденных колебаний тока, вызванной автоколебаниями, генерируемыми в другой мезаструктуре. Таким образом, если автоколебания в каждой отдельной мезаструктуре генерируются в определенной узкой области напряжений, то включение двух мезаструктур по схеме рис. 1, *b* расширяет диапазон на-

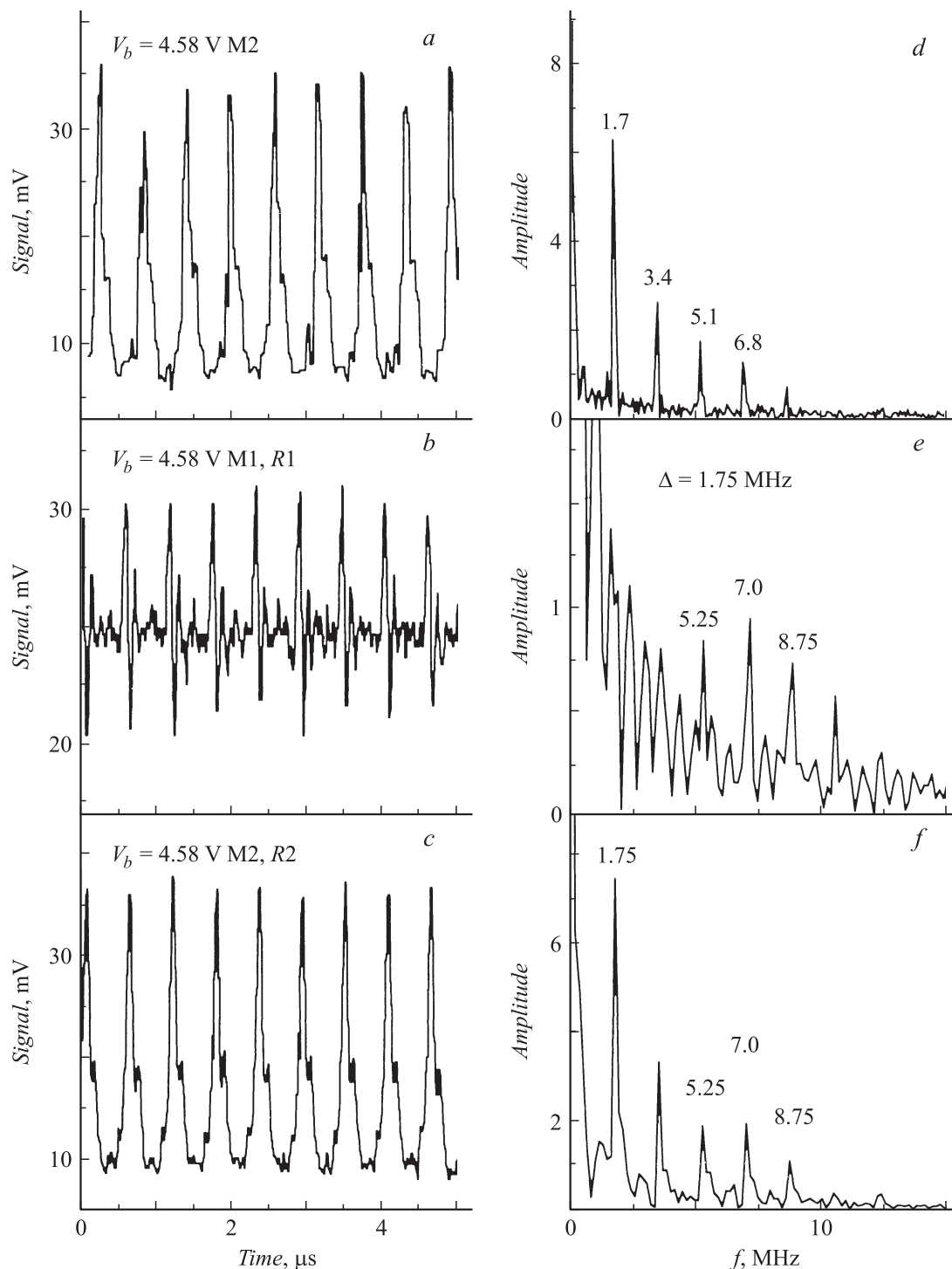


Рис. 4. Колебания тока (*a, b, c*) и их фурье-спектры (*d, e, f*), измеренные при температуре 4.2 К и постоянном смещении $V_b = 4.58$ В; *a* — автономные колебания тока в мезоструктуре M2, *b* и *c* — колебания тока в мезоструктуре M1 (*b*) и мезоструктуре M2 (*c*) при их соединении по схеме рис. 1, *b*.

пряжений смещения V_b , в котором наблюдаются колебания тока от 4.1 до 5.4 В (вставки на рис. 2, *a* и 2, *b*). Нами исследуется воздействие одного генератора на другой при отсутствии в одном из них генерации автономных колебаний при заданном постоянном смещении V_b .

На рис. 3 показаны колебания тока, измеренные при постоянном смещении $V_b = 4.37$ В, для случая когда

мезоструктура M1 является вынуждающим генератором колебаний тока, а в мезоструктуре M2 отсутствуют собственные автоколебания. На рис. 3, *a* показаны автономные колебания тока в мезоструктуре M1. На рис. 3, *b* и *c* представлены колебания тока, измеренные на сопротивлении R1 (мезоструктура M1) и на сопротивлении R2 (мезоструктура M2), при их включении по схеме

рис. 1, *b*. Частотный спектр каждого колебания показан в правой части рисунка (рис. 3, *d, e, f*). Из рис. 3 следует, что колебания, измеренные на каждой мезаструктуре при их соединении, являются периодическими, частота вынужденного колебания кратна фундаментальной частоте вынуждающего колебания. Таким образом, осуществляется частотная синхронизация колебаний связанных генераторов. Из сравнения частот колебаний связанного и автономного генераторов следует, что фундаментальная частота колебаний связанного генератора изменяется по сравнению с автономной частотой отдельной мезаструктуры из-за взаимной подстройки частот двух связанных генераторов. Амплитуда вынужденных колебаний в мезаструктуре М2 в 4 раза меньше, чем амплитуда вынуждающих колебаний (рис. 3, *b, c*). Основная частота вынужденных колебаний (линия в фурье-спектре с наибольшей амплитудой) в мезаструктуре М2 равна 4.8 МГц и соответствует частоте третьей гармоники фундаментальной частоты вынуждающих колебаний в мезаструктуре М1 (рис. 3, *e, f*). Как видно из рис. 3, *f*, вынужденные колебания модулированы с частотой модуляции $\Delta = 1.6$ МГц, равной фундаментальной частоте колебаний, генерируемых в мезаструктуре М1.

На рис. 4 показаны колебания тока (рис. 4, *a–c*) и их фурье-спектры (рис. 4, *d–f*), измеренные при напряжении смещения $V_b = 4.58$ В для случая, когда мезаструктура М2 является генератором вынуждающих колебаний. Фундаментальная частота автономных колебаний мезаструктуры М2 равна 1.7 МГц (рис. 4, *d*). Как видно из рисунков 4, *b* и *c*, амплитуда вынужденных колебаний в мезаструктуре М1, измеренных на сопротивлении $R1$, в 2 раза слабее амплитуды вынуждающих колебаний в мезаструктуре М2. При соединении мезаструктур по схеме рис. 1, *b* фундаментальная частота вынуждающих колебаний в мезаструктуре М2 становится равной 1.75 МГц, а основная частота вынужденных колебаний в М1 равна 7 МГц, что соответствует частоте четвертой гармоники, при этом вынужденные колебания модулированы с частотой $\Delta = 1.75$ МГц. Таким образом, при соединении двух мезаструктур по схеме рис. 1, *b* в мезаструктуре, в которой при данном напряжении первоначально колебания отсутствовали, происходит возбуждение колебаний тока с частотой, высшей гармоники частоты вынуждающих колебаний.

Полученный результат подтверждает наше предположение [7], о том что расширенная граница электрополевого домена представляет собой систему связанных осцилляторов, каждый из которых представляет собой резонансный туннельный диод, генерирующий колебания с собственной частотой, которая зависит от величины энергетического рассогласования минизон в соседних квантовых ямах.

Как видно из рис. 3 и 4, автоколебания в слабо-связанных сверхрешетках имеют сложный частотный спектр и представляют собой суперпозицию нескольких гармонических колебаний с различными амплитудами, частотами и начальными фазовыми углами [5,6]. Генерация колебаний тока (периодическое согласование и

рассогласование минизон в соседних квантовых ямах в области расширенной границы электрополевого домена) инициируется в квантовых ямах с наименьшей величиной энергетической расстройки резонансного выравнивания уровней минизон и приводит к возбуждению колебаний тока с частотой одной из высших гармоник фундаментальной частоты собственных автоколебаний.

Проведенные ранее исследования синхронизации автоколебаний в слабо-связанных сверхрешетках внешней силой показали, что для синхронизации колебаний на частоте высших гармоник требуется меньшая амплитуда внешней силы [11]. Таким образом, соединение двух генераторов автоколебаний на основе слабо-связанной сверхрешетки, один из которых является вынуждающим, приводит к возбуждению вынужденных колебаний с частотой высшей гармоники фундаментальной частоты вынуждающего колебания в другом генераторе. Синхронизация двух связанных генераторов происходит на частоте, отличной от частоты автономной генерации отдельной мезаструктуры, и свидетельствует о том, что частота возбуждаемой системы подтягивается к частоте внешнего воздействия, при этом изменяются частоты обоих генераторов.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 16.740.11.0044 от 01.09.2010 с использованием оборудования регионального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

Список литературы

- [1] Bonilla L.L., Galan J., Cuesta J.A., Martinez F.C., Molera J.M. // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 50. P. 8644–8657.
- [2] Kwok S.H., Norris T.B., Bonilla L.L., Galan J., Cuesta J.A., Martinez F.C., Molera J., Grahn H.T., Ploog K., Merlin R. // Phys. Rev. B. 1995. Vol. 51. P. 10 171–10 174.
- [3] Graph H.T., Kastrup J., Ploog K., Bonilla L.L., Galan J., Kindelan M., Moscoso M. // Jpn. J. Appl. Phys. 1995. Vol. 34. P. 4526–4528.
- [4] Bulashenko O.M., Garcia M.J., Bonilla L.L. // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 53. P. 10 008–10 018.
- [5] Rasulova G.K., Golubkov M.V., Leonov A.V., Brunkov P.N., Zhukov A.E., Ustinov V.M., Usov S.O., Konnikov S.G. // Superlat & Microstr. 2005. Vol. 37. P. 139–150.
- [6] Rasulova G.K., Golubkov M.V., Leonov A.V., Brunkov P.N., Zhukov A.E., Ustinov V.M., Usov S.O., Konnikov S.G. // Semicond. Sci. & Techn. 2004. Vol. 19. P. S77–S79.
- [7] Rasulova G.K., Brunkov P.N., Egorov A.Yu., Zhukov A.E. // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. P. 033 711.
- [8] Kastrup J., Hey R., Ploog K.H., Grahn H.T., Bonilla L.L., Kindelan M., Moscoso M., Wacker A., Galan J. // Phys. Rev. B. 1997. Vol. 55. P. 2476–2488.
- [9] Zhang Y., Kastrup J., Klann R., Ploog K.H., Grahn H.T. // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 77. P. 3001–3004.
- [10] Luo K.J., Teitsworth S.W., Kostial H., Grahn H.T., Ohtari N. // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 74. P. 3845–3847.
- [11] Расулова Г.К., Брунков П.Н., Жуков А.Е., Устинов В.М. // ФТП. 2006. Т. 40. С. 846–849.