

07;13

## Высокочастотный импеданс полупроводниковой сверхрешетки во внешней резонансной системе

© В.В. Макаров<sup>1,2</sup>, В.А. Максименко<sup>1,2</sup>, А.А. Короновский<sup>2,1</sup>,  
Ю.М. Скворцова<sup>1</sup>, А.Е. Храмов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет  
им. Ю.А. Гагарина

<sup>2</sup> Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: vladmak404@gmail.com, aeh@nonlin.su.ru

Поступило в Редакцию 23 декабря 2014 г.

Исследован высокочастотный импеданс перспективного элемента устройств суб-ТГц- и ТГц-диапазонов — полупроводниковой сверхрешетки, связанной с внешней электродинамической системой. Определено характерное поведение величины импеданса при воздействии внешнего гармонического ВЧ-сигнала в области синхронизации на первой и высших гармониках частоты доменного транспорта. Показано, что диагностика синхронных режимов в полупроводниковой сверхрешетке во внешнем резонаторе возможна по анализу динамики амплитуды и фазы импеданса.

В настоящее время одной из наиболее перспективных задач, связанных с переходом в суб-ТГц- и ТГц-диапазоны частот, является создание полупроводниковых устройств, способных работать в широком диапазоне температур, что является важным условием их практического применения. Одним из перспективных устройств в качестве элементной базы ТГц-диапазона может рассматриваться полупроводниковая сверхрешетка, которая представляет собой чередующиеся микроскопические слои двух или более полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны [1–3]. Такая периодическая структура способствует возникновению энергетических минизон, в которых электроны демонстрируют ряд интересных квантово-механических эффектов, включая лестницу Ванье–Штарка, последовательное и резонансное туннелирование, блоховские колебания [4,5]. Кроме того, свободное перемещение электронов внутри минизон способствует возникновению

неустойчивости при превышении критического значения приложенного электрического поля, что приводит к появлению доменов сильной концентрации заряда. Частота прохождения таких доменов через наноструктуру может достигать десятков и сотен гигагерц [6]. Важной особенностью полупроводниковой сверхрешетки является возможность работы при комнатной температуре [7], что делает ее перспективным источником суб-THz- и THz-диапазона [7–10].

Как было показано ранее в работе [10], представляет большой интерес исследование динамики полупроводниковой сверхрешетки, помещенной во внешнюю резонансную систему, так как в реальных устройствах полупроводниковые активные элементы неразрывно связаны с внешними электродинамическими структурами. Как было обнаружено, резонансная система способствует возникновению широких областей хаотической динамики в системе, а также позволяет эффективно управлять мощностью и частотным составом генерируемого полупроводниковой сверхрешеткой электромагнитного излучения. В этом контексте представляется также важным исследование высокочастотного импеданса сверхрешетки [11], связанной с резонансной системой, что позволит провести детальный анализ поведения системы в различных электронных схемах, в которых полупроводниковая сверхрешетка может выступать в качестве либо генератора, либо усилителя сигналов суб-THz- и THz-диапазонов.

В рамках данной работы был исследован высокочастотный импеданс полупроводниковой сверхрешетки, связанной с внешней электродинамической системой, а также определено характерное поведение величины импеданса при воздействии внешнего гармонического ВЧ-сигнала в области синхронизации на первой и высших гармониках частоты доменного транспорта.

Для описания коллективной динамики заряда в полупроводниковой сверхрешетке использовалась стандартная модель, детально описанная в [7–9,12], основанная на самосогласованной системе уравнений Пуассона и непрерывности, которые интегрировались численно. Физические параметры анализируемой сверхрешетки были выбраны согласно модели экспериментального образца, исследованного ранее в [10]. Заметим, что в данной работе предполагается нахождение сверхрешетки при низкой температуре, когда диффузионной составляющей плотности тока можно пренебречь.

Для моделирования внешнего резонансного контура используется одномодовое приближение, в рамках которого резонатор описывается эквивалентной схемой [10], уравнения Кирхгофа для которой имеют вид

$$C \frac{dV_1}{dt} = I(V_{sl}) - I_1, \quad (1)$$

$$L \frac{dI_1}{dt} = V_{sl} - V - R_1 I_1 + I(V_{sl}) R_l, \quad (2)$$

где  $I(V_{sl})$  — ток, генерируемый сверхрешеткой. Резонатор характеризуется частотой  $f_Q$  и добротностью  $Q$ .  $V(t) = V_0 + V_{ext}$  — напряжение, прикладываемое к сверхрешетке, состоящее из постоянного напряжения  $V_0$  и переменного внешнего воздействия  $V_{ext}$

$$V_{ext}(t) = V_m \cos(2\pi f_e t), \quad (3)$$

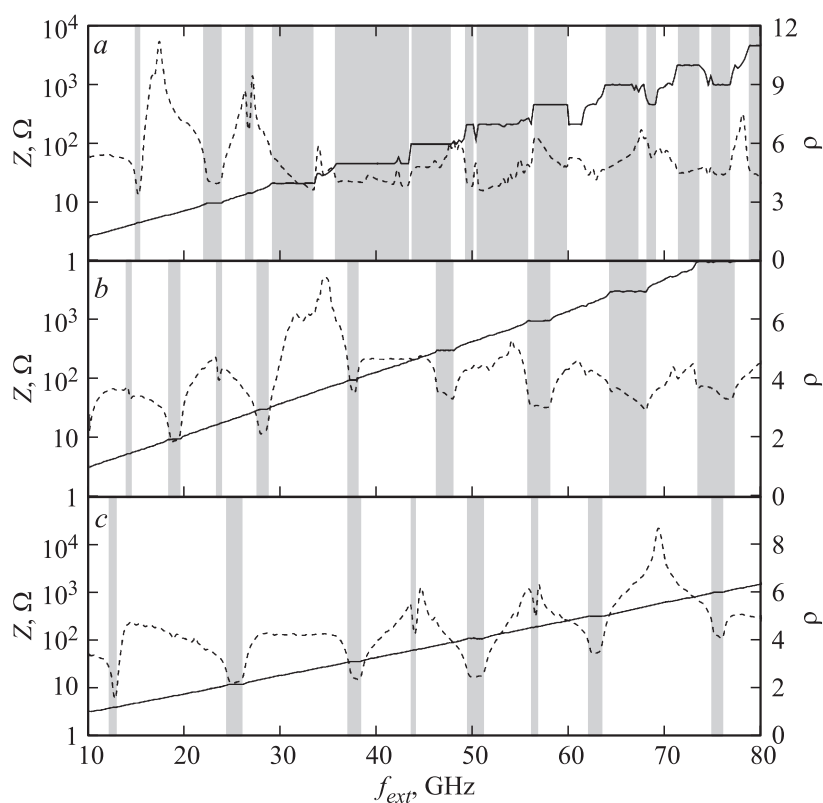
где  $V_m$  — амплитуда и  $f_e$  — частота внешнего сигнала.

Чтобы рассчитать импеданс, временная реализация колебаний тока сверхрешетки раскладывалась в спектр Фурье, в котором проводился поиск гармоник тока, соответствующей частоте внешнего воздействия  $f_e$ . Амплитуда  $|Z|$  и фаза  $\varphi_z$  импеданса, согласно работе [13], рассчитывались следующим образом:

$$|Z| = V_m / I(f_e), \quad \varphi_z = \varphi_U - \varphi_I(f_e),$$

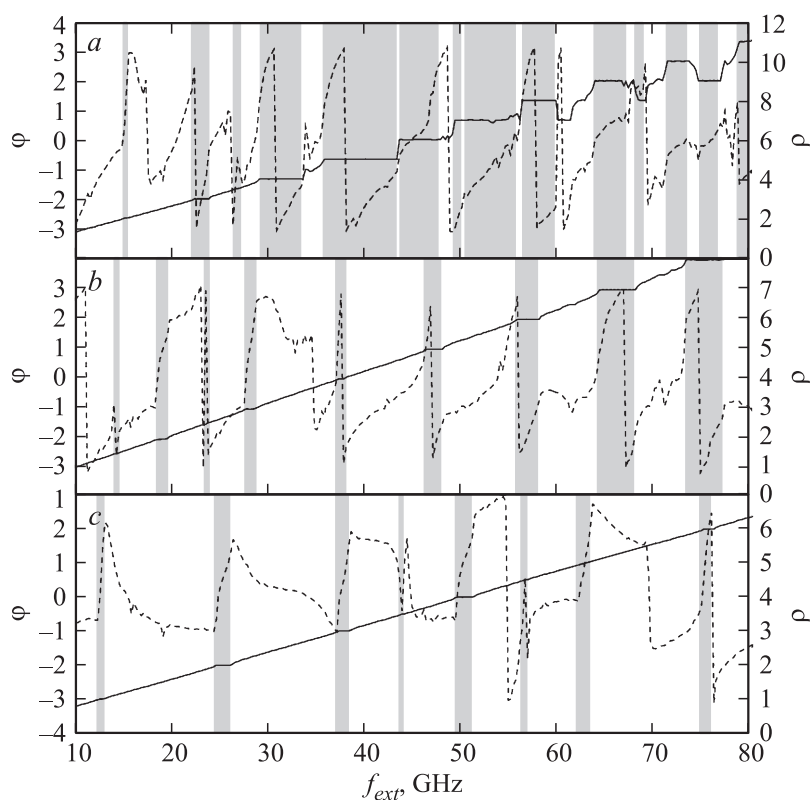
где  $I(f_e)$  — амплитуда гармоники тока на частоте внешнего воздействия,  $\varphi_I(f_e)$  — фаза гармоники тока, определяемая по спектру Фурье,  $\varphi_U$  — фаза внешнего воздействия. Для диагностики синхронизации было использовано „число вращения“  $\rho$ , представляющее собой отношение частоты внешнего воздействия к основной частоте колебаний в системе.

На рис. 1 и рис. 2 показаны рассчитанные с помощью описанной выше модели зависимости амплитуды  $|Z|$  и фазы  $\varphi_z$  ВЧ-импеданса от частоты внешнего воздействия для фиксированной амплитуды внешнего воздействия  $V_m = 20 \text{ mW}$  при различных частотах внешнего резонатора. Области синхронизации, которые соответствуют рациональным числам вращения  $\rho = f_e / f_0$ , где  $f_0$  — частота колебаний тока, текущего через сверхрешетку, показаны на рисунках серыми полосами. Частоты внешнего резонатора выбирались в данном случае исходя из основной



**Рис. 1.** Амплитуда импеданса (пунктирная линия) и число вращения (сплошная линия) при изменении частоты внешнего сигнала для различных частот внешнего резонатора: 17.3 GHz (*a*), 34.6 GHz (*b*), 69.2 GHz (*c*). Добротность внешнего резонатора  $Q = 750$ , напряжение питания  $V_0 = 510$  mV, амплитуда внешнего сигнала  $V_m = 20$  mW.

частоты доменного транспорта автономной сверхрешетки, которая составляет 17.3 GHz при напряжении питания 510 mV, и соответствовали первой (*a*), второй (*b*) и четвертой (*c*) гармоникам. Для удобства восприятия все зависимости импеданса приведены в логарифмическом масштабе.



**Рис. 2.** Фаза импеданса (пунктирная линия) и число вращения (сплошная линия) при изменении частоты внешнего сигнала для различных частот внешнего резонатора: 17.3 GHz (*a*), 34.6 GHz (*b*), 69.2 GHz (*c*). Добротность внешнего резонатора  $Q = 750$ , напряжение питания  $V_0 = 510$  mV, амплитуда внешнего сигнала  $V_m = 20$  mW.

Из рис. 1, *a, c* хорошо видно, что амплитуда импеданса максимальна на частоте резонатора и возрастает в асинхронных режимах. Возникновение синхронизации при этом сопровождается резким уменьшением величины импеданса, тогда как разрушение синхронного состояния отражается в ее увеличении. Данная тенденция менее выражена на

высших гармониках при малой расстройке частоты резонатора и собственной частоты колебаний сверхрешетки (рис. 1, *a*) за счет реализации в системе режимов нерегулярной динамики и переходов между хаотическими и периодическими режимами колебаний при изменении параметров [10,14,15]. Обнаруженный эффект представляет интерес для экспериментальных исследований в области использования сверхрешетки как усилителя высокочастотного сигнала, так как позволяет легко детектировать синхронные режимы по изменению амплитуды импеданса с помощью анализатора цепей. Заметим, что скачки амплитуды импеданса на границах синхронного состояния становятся более выраженными при увеличении частоты резонатора, что дает нам основания говорить о применимости данного метода оценки синхронизации в суб-THz- и THz-диапазоне, когда прямые измерения затруднены.

Обратимся к динамике фазы импеданса, зависимости которой от частоты внешнего воздействия представлены на рис. 2, *a–c*. Легко заметить, что значение фазы импеданса также очень чувствительно к установлению синхронных режимов в системе. Фаза импеданса медленно возрастает с увеличением частоты внешнего воздействия в асинхронном режиме и резко нарастает при установлении синхронного состояния. Кроме того, значение фазы совершает резкий скачок на резонансной частоте внешнего резонатора, что может использоваться для диагностики характеристик паразитных резонансных контуров, образованных контактами наноструктуры.

В заключение отметим, что в данной работе изучен высокочастотный импеданс полупроводниковой сверхрешетки, помещенной во внешнюю резонансную систему, как перспективного элемента устройств суб-THz- и THz-диапазона. Проанализированы зависимости импеданса при различных частотах внешнего резонатора, определено характерное поведение импеданса на границе синхронного состояния и вне областей синхронизации. Выявленные эффекты обладают большой важностью для диагностики синхронных режимов в экспериментальных исследованиях и при создании усилителей высокочастотного сигнала с использованием полупроводниковой сверхрешетки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-12-00222). В.А. Максименко также выражает благодарность фонду некоммерческих программ „Династия“ за индивидуальную стипендию, направленную на поддержку его научной деятельности.

## Список литературы

- [1] *Овсянников М.И.* // ФТП. 1970. Т. 4. В. 12. С. 2225.
- [2] *Шук А.Я.* // ФТП. 1974. Т. 8. В. 10. С. 1841.
- [3] *Esaki L., Tsu R.* // IBM J. Research Development. 1970. V. 14. N 1. P. 61.
- [4] *Bonilla L.L., Grahn H.T.* // Rep. Prog. Phys. E. 2005. V. 68. N 3. P. 577.
- [5] *Hofbeck K., Grenzer J., Schomburg E.* et al. // Phys. Lett. A. 1996. V. 218. P. 349.
- [6] *Eisele H.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 072 101.
- [7] *Selskii A.O., Koronovskii A.A., Hramov A.E.* et al. // Phys. Rev. B. 2011. V. 84. P. 235 311.
- [8] *Tsu R.* Superlattices to nanoelectronics. Amsterdam: Elsevier Science, 2005.
- [9] *Wacker A.* // Phys. Rep. 2002. V. 357. N 1. P. 121.
- [10] *Hramov A.E., Makarov V.V., Koronovskii A.A.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 116 603.
- [11] *Макаров В.В., Москаленко О.И., Короновский А.А.* и др. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2012. Т. 76. N 12. С. 1471–1474 (*Makarov V.V., Moskalenko O.I., Koronovskii A.A.* et al. // BRAS: Physics. 2012. V. 76. N 12. P. 1316–1318).
- [12] *Баланов А.Г., Гринавей М.Т., Короновский А.А.* и др. // ЖЭТФ. Т. 141. В. 5. С. 960 (*Balanov A.G., Greenaway M.T., Koronovskii A.A.* et al. // JETP. 2012. V. 114. N 5, P. 836–840).
- [13] *Jappsen A.-K., Amann A., Wacker A., Scholl E., Schomburg E.* // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. N 6. P. 3137.
- [14] *Alvaro M., Carretero M., Bonilla L.L.* // EPL. 2014. V. 107. N 3. P. 37 002.
- [15] *Макаров В.В., Осипов Г.В., Максименко В.А., Харченко А.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 2. С. 34–40.