

УДК 530.182:621.385.6

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО РЕЗОНАТОРА НА ПРОСТРАНСТВЕННУЮ ДИНАМИКУ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ

© 2013 г. В. В. Макаров¹, С. А. Куркин¹, А. А. Короновский^{1,3}, К. Н. Алексеев²,
А. Е. Храмов^{1,3}, А. Г. Баланов^{1,2}

E-mail: vladmak404@gmail.ru

Исследована динамика полупроводниковой сверхрешетки, помещенной во внешний резонатор. Показано, что внешняя электродинамическая система существенно усложняет поведение сверхрешетки, возбуждая режимы хаотических колебаний, а также способствует возникновению на вольт-амперной характеристике дополнительного участка отрицательной дифференциальной проводимости, который не наблюдается в автономной системе.

DOI: 10.7868/S0367676513120168

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые сверхрешетки — наноструктуры, состоящие из нескольких (обычно несколько десятков или более) чередующихся полупроводниковых материалов с различной шириной запрещенной зоны. Впервые они были предложены в работах Л. Эсаки и Р. Тсу [1, 2] и независимо в работе [3] как одномерные структуры для изучения различных квантовых эффектов, связанных с резонансным туннелированием и блоховскими колебаниями. После публикации этих оригинальных работ были предложены и экспериментально реализованы различные типы полупроводниковых сверхрешеток с различными электромагнитными свойствами. В настоящее время полупроводниковые сверхрешетки — это удобные объекты как для изучения и понимания процессов физики твердого тела [2, 4], так и для исследования различных нелинейных явлений [5–9]. Кроме того, блоховские колебания и доменный транспорт, реализующийся в сильносвязанном типе сверхрешеток, а также ассоциирующиеся с ними нелинейные процессы [10] делают сверхрешетку перспективным элементом для генерации, усиления и детектирования высокочастотных (с частотой до нескольких десятков терагерц) сигналов [11].

В контексте использования полупроводниковых сверхрешеток в высокочастотной электронике важной задачей является изучение взаимодействия сверхрешетки с внешними электродинамическими системами, с которыми может быть связана наноструктура. Такая постановка задачи может быть рассмотрена в двух аспектах. Во-первых, на высоких частотах невозможно избавиться от паразитных емкостей и индуктивностей элементов подключения сверхрешетки (провода, контакты и т.п.), которые образуют паразитные резонансные контуры, воздействующие на сверхрешетку, поэтому при изучении режимов генерации сверхрешетки необходимо учитывать влияние такого внешнего “паразитного” резонансного контура. Во-вторых, хорошо известно, что внешние электродинамические системы часто являются эффективным способом управления сложными нелинейными колебательными процессами в диапазоне сверхвысоких частот, в частности введение дополнительных резонансных систем может приводить к возбуждению хаотических колебаний в генераторах (например, в резонансных ЛОВ или гиро-ЛБВ [12]). В данной статье представлены результаты численного исследования динамики пространственного заряда в полупроводниковой наноструктуре, помещенной во внешний добротный резонатор.

ИССЛЕДУЕМАЯ СИСТЕМА И ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Для описания коллективной динамики заряда в полупроводниковой сверхрешетке использована стандартная модель, основанная на самосогласованной системе уравнений Пуассона и непрерывности, которые интегрировались численно. Параметры анализируемой сверхрешетки были выбраны аналогично сверхрешеткам, описанным в работах

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского.

² Department of Physics, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU, United Kingdom.

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина.

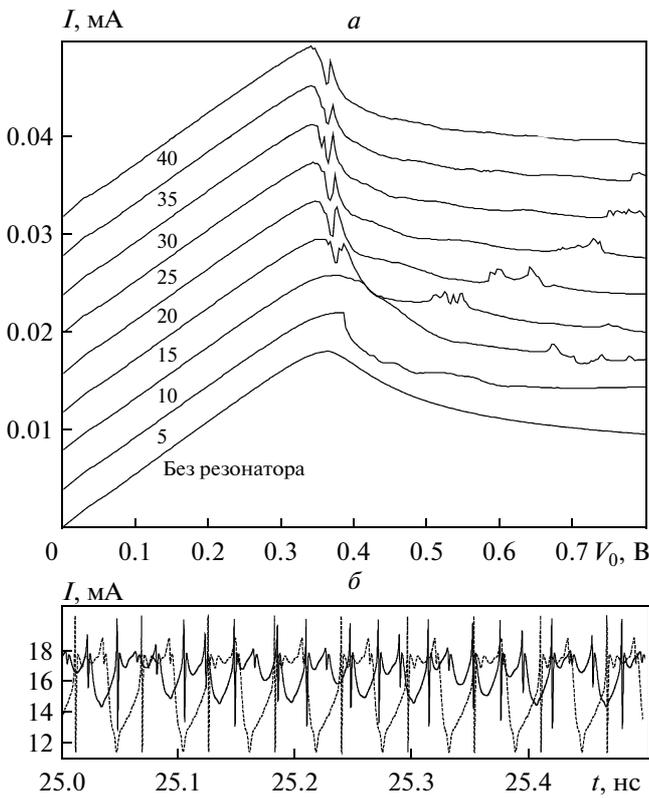


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики сверхрешетки во внешнем резонаторе при различных частотах внешнего резонатора (а). Частота резонатора представлена под каждой зависимостью. Для наглядности каждая следующая зависимость сдвинута на 4 мА. Временные реализации тока при двух различных напряжениях питания (б); сплошная линия соответствует напряжению $V_0 = 339$ мВ, пунктирная – $V_0 = 350$ мВ. Частота внешнего резонатора $f_Q = 104.5$ ГГц, добротность $Q = 150$.

[6, 9], где предполагалось, что проводящий участок минизоны разбит на $N = 480$ слоев, ширина которых достаточно мала: $\Delta x = L/N = 0.24$ нм.

Изменение плотности заряда в каждом слое n_m (правая граница которого $x = m\Delta x$) задается дискретным аналогом уравнения непрерывности тока

$$e\Delta x \frac{dn_m}{dt} = J_{m-1} - J_m, \quad m = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, J_{m-1} и J_m – плотность тока на левой и правой границах слоя m . Плотность тока определена как

$$J_m = en_m v_d(\bar{F}_m), \quad (2)$$

где \bar{F}_m – среднее электрическое поле в слое m , скорость дрейфа $v_d(\bar{F}_m)$ определялась соотношением

$$v_d = \frac{d\Delta}{2\hbar} \frac{\tau\omega_B}{(1 + \tau^2\omega_B^2)}, \quad (3)$$

где \hbar – постоянная Планка, τ – скорость рассеивания электронов, $\omega_B = eFd/\hbar$ – угловая частота

блоховских колебаний электронов (более подробно см. [1, 8]).

Электрическое поле F_m на границе слоя m может быть определено из уравнения Пуассона, которое в дискретном виде выглядит как

$$F_{m-1} = \frac{e\Delta x}{\epsilon_0\epsilon_r}(n_m - n_D) + F_m, \quad m = 1, \dots, N, \quad (4)$$

$n_D = 3 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ – плотность легирования в слоях сверхрешетки.

Для определения тока использовали омические граничные условия, $J_0 = \sigma F_0$, в сильно легированном эмиттере с электрической проводимостью $\sigma = 3788 \text{ Ом}^{-1}$. Напряжение V_{sl} , приложенное к устройству, определяется выражением

$$V_{sl} = U + \frac{\Delta x}{2} \left(\sum_{m=1}^N (F_m + F_{m+1}) \right), \quad (5)$$

где U – падение напряжения на контактах с учетом эффекта формирования слоев повышенной концентрации заряда вблизи эмиттера и пониженной концентрации зарядов вблизи коллектора сверхрешетки [6]. Зная плотность тока в каждом слое, можно вычислить суммарный ток, протекающий через сверхрешетку [10]

$$I(t) = \frac{A}{N+1} \sum_{m=0}^N J_m, \quad (6)$$

где $A = 5 \times 10^{-22} \text{ м}^2$ – поперечное сечение сверхрешетки. Заметим, что в численном моделировании предполагается нахождение сверхрешетки при низкой температуре, когда диффузионной составляющей плотности тока можно пренебречь.

Для моделирования внешнего резонансного контура воспользуемся одномодовым приближением, резонатор описывался эквивалентной схемой, уравнения Кирхгофа для которой имеют вид

$$C \frac{dV_1}{dt} = (I(X_{sl}) - I_1), \quad (7)$$

$$L \frac{dI_1}{dt} = V_{sl} - V_0 - R_1 I_1 + I(V_{sl}) R_l, \quad (8)$$

где $I(V_{sl})$ – ток, генерируемый сверхрешеткой. Резонатор характеризуется частотой f_Q и добротностью Q .

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ

Для изучения влияния внешнего резонатора на высокочастотную генерацию были построены вольт-амперные характеристики (ВАХ) системы “сверхрешетка во внешнем резонаторе” при различных частотах внешнего резонатора, которые представлены на рис. 1а. Зависимости имеют типичный для сверхрешеток вид с пиком Есаки–Тсу и падающим участком, обуславливающим от-

рицательную дифференциальную проводимость [1]. Обратим внимание на появление скачков на ВАХ, тогда как зависимость для автономной системы (сверхрешетка без резонатора) гладкая. При увеличении частоты резонатора начало генерации смещается в сторону низких напряжений.

Также обратим внимание на появление существенного провала на ВАХ в области $V_0 \approx 370$ мВ при приближении частоты резонатора к частоте собственных колебаний сверхрешетки при данном напряжении ($f \approx 17$ ГГц). Отметим, что данный провал практически не сдвигается при дальнейшем увеличении частоты резонатора и соответствует началу генерации в системе с низкочастотным резонатором. Данный эффект связан с тем, что высокочастотный добротный резонатор способствует возникновению генерации на более низком напряжении за счет согласования частоты резонатора и частоты следования доменов, которая падает при увеличении напряжения вместе с дрейфовой скоростью электронов. На рис. 1б приведены временные реализации колебаний тока, генерируемого сверхрешеткой при двух различных напряжениях питания: до и после провала, с резонатором, настроенным на частоту $f_0 = 104.5$ ГГц, добротность резонатора $Q = 1500$. Видно, что частота генерации до провала существенно выше, чем после него, амплитуда демонстрирует обратную зависимость, что говорит о существенной перестройке движения доменов.

Для детального изучения данного эффекта на рис. 2 приведены спектры и пространственно-временная динамика доменов при двух различных напряжениях питания. Спектр 2а иллюстрирует режим, реализующийся до перестройки движения доменов ($V_0 = 339$ мВ). Спектр соответствует развитым хаотическим колебаниям пространственного заряда в сверхрешетке и имеет множество пиков на частоте 20–30 ГГц, частота наиболее интенсивной гармоники лежит в области 50 ГГц. Пространственно-временное распределение заряда (рис. 2б) отражает хаотическую динамику: домены следуют нерегулярно, концентрация заряда сильно различается. При повышении напряжения до 350 мВ динамика доменов в полупроводниковой сверхрешетке перестраивается: в спектре (рис. 2в) наблюдается простой периодический режим, присутствует только основная частота и ее гармоники, базовая частота генерации уменьшается до 18 ГГц, при этом амплитуда спектральных компонент возрастает более чем в 10 раз по сравнению со случаем меньшего приложенного напряжения. Из рис. 2г видно, что данный переход связан со стабилизацией пространственно-временной картины: движение становится регулярным, концентрация заряда в доменах увеличивается. Заметим, что между доменами высокой концентрации следуют небольшие сгустки заряда с высокой скоростью (отмечены стрелкой).

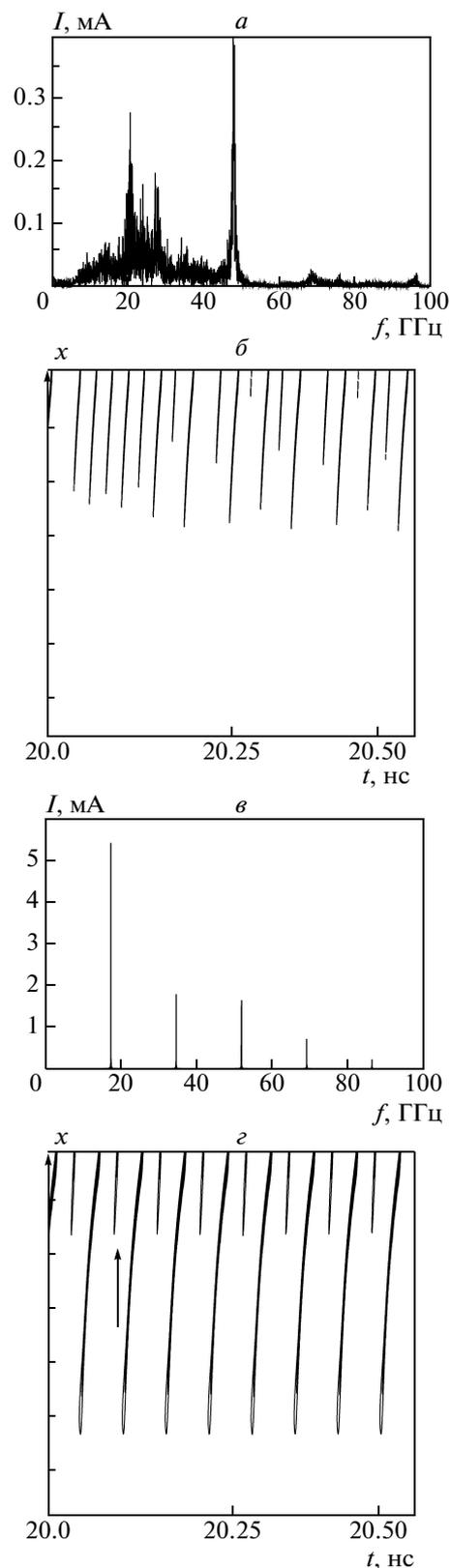


Рис. 2. Спектры (а, в) и пространственно-временное распределение заряда в слоях сверхрешетки (б, г) при различных напряжениях питания: $V_0 = 339$ мВ (а, б), $V_0 = 350$ мВ (в, г). Частота внешнего резонатора $f_0 = 104.5$ ГГц, добротность $Q = 150$.

Наблюдаемые эффекты позволяют сделать вывод, что внешний добротный резонатор способствует появлению второго участка отрицательной дифференциальной проводимости на ВАХ сверхрешетки и, как следствие, вынужденной генерации при более низком напряжении питания, связанной с возбуждением доменов с низкой концентрацией заряда, быстро движущихся через пространство сверхрешетки и характеризующейся ВЧ-колебаниями напряжения в резонаторе. В этом случае существует возможность увеличить скорость движения доменов за счет роста резонансной частоты электродинамической системы. Данный режим характеризуется высокой базовой частотой и шумоподобным спектром излучения с малой мощностью. При увеличении напряжения до порога генерации собственных колебаний сверхрешетки происходит перестройка электронного транспорта. Концентрация заряда в домене возрастает, что приводит к существенному уменьшению следующего за ним домена, который превращается в быстрый электронный сгусток (стрелка на рис. 2з), в результате чего основная частота генерации смещается в область 20 ГГц, а мощность колебаний значительно возрастает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена динамика полупроводниковой сверхрешетки во внешнем добротном резонаторе. Построены вольт-амперные характеристики и исследовано поведение сверхрешетки при различных частотах резонатора. Показано, что при превышении частотой резонатора частоты собственных колебаний сверхрешетки на ВАХ возникает дополнительный участок отрицательной дифференциальной проводимости, обусловленный возбуждением доменов заряда высокочастотными колебаниями напряжения в резонаторе. Выявленный эффект пред-

ставляет интерес как для фундаментального исследования полупроводниковых наноструктур, так и для практического применения сверхрешеток для генерации СВЧ- и ТГц-колебаний.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашения 14.В37.21.1207, 14.В37.21.0569), Совета по грантам Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых – кандидатов (МК-672.2012.2) и докторов (МД-345.2013.2) наук, ведущих научных школ (проект НШ-1430.2012.2), РФФИ (проект № 12-02-33071), а также фонда некоммерческих программ “Династия”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Esaki L., Tsu R.* // IBM J. Res. Dev. 1970. V. 14. № 1. P. 61.
2. *Tsu R.* Superlattices to nanoelectronics. N.Y.: Elsevier, 2005.
3. *Овсянников М.И., Романов Ю.А., Шабанов В.Н., Логинова Р.Г.* // ФТП. 1970. Т. 4. № 12. С. 2225.
4. *Шук А.Я.* // ФТП. 1974. Т. 8 С. 1841.
5. *Bonilla L.L., Grahn H.T.* // Rep. Prog. Phys. 2005 V. 68. P. 577.
6. *Fromhold T.M., Patane A., Bujkiewicz S. et al.* // Nature. 2004. V. 428. P. 726.
7. *Balanov A.G., Fowler D., Patan'e A. et al.* // Phys. Rev. E. 2008. V. 77. № 2. Pt. 2. 026209.
8. *Selskii A.O., Koronovskii A.A., Hramov A.E. et al.* // Phys. Rev. B. 2011. V. 84. 235311.
9. *Баланов А.Г., Гринавей М.Т., Короновский А.А. и др.* // ЖЭТФ. Т. 141. Вып. 5. С. 960.
10. *Wacker A.* // Phys. Rep. 2002. V. 357. № 1 P. 121.
11. *Waschke C., Roskos H.G., Schwedler R. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 70. P. 3319.
12. *Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Antonsen T.M.* // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. № 21. P. 218301.