

УДК 530.182:621.385.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ И ПОЛОЖЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКА В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ

© 2017 г. А. Г. Баланов^{2, 3}, А. А. Короновский¹, О. И. Москаленко¹,
А. О. Сельский^{1, 2, *}, А. Е. Храмов²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.”

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

*E-mail: feanorberserk@gmail.com

Исследовано влияние возмущения концентрации легирующей примеси на характеристики тока в полупроводниковой сверхрешетке. Показано, что характеристики тока зависят от положения и формы возмущения. Возмущение оказывает большее влияние вблизи эмиттера сверхрешетки. Эффект возрастает с ростом интеграла профиля концентрации и слабо зависит от формы самого профиля.

DOI: 10.7868/S0367676517010069

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые сверхрешетки представляют собой сложные наноструктуры, содержащие несколько чередующихся тонких (порядка 10 нм) слоев различных полупроводниковых материалов [1, 2]. Данные структуры используют для исследования разнообразных квантово-механических эффектов, связанных с резонансным туннелированием и блоховскими колебаниями, при этом сверхрешетки являются уникальным полигоном для изучения и понимания процессов физики твердого тела [3, 4]. Кроме того, сверхбыстрые блоховские колебания и возникающие при приложении к сверхрешетке постоянного напряжения пространственно-временные электронные структуры, называемые доменами (по аналогии с доменами в диоде Ганна [5, 6]), делают сверхрешетку перспективным элементом для генерации, усиления и детектирования высокочастотных (до нескольких ТГц) сигналов. Прохождение доменов через полупроводниковую сверхрешетку приводит к возникновению колебаний тока, протекающего через структуру. Следует отметить, что в настоящее время все больше внимания исследователей уделяется рассмотрению транспорта электронов через полупроводниковую сверхрешетку с позиций нелинейной динамики, что позволяет выявлять и объяснять раз-

личные эффекты, наблюдающиеся в исследуемой системе [7–11].

Известно, что на электронный транспорт в сверхрешетке оказывает влияние концентрация легирующей примеси на коллекторе и эмиттере [12] или непосредственно в слоях структуры [13, 14]. В настоящей работе рассматривается, как введение неоднородности концентрации легирующей примеси в виде локального возмущения влияет на электронный транспорт в полупроводниковой сверхрешетке. В отличие от случайных флуктуаций концентрации легирующей примеси [13, 14] будет систематично рассмотрено влияние параметров возмущения, таких как локализация и форма, на характеристики тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку, прежде всего вольт-амперную характеристику.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Плотность тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку, определяется из дрейфового приближения [2, 9]

$$J = env_d(\bar{F}). \quad (1)$$

Здесь $n(x, t)$ – концентрация электронов, $J(x, t)$ – плотность тока, $F(x, t)$ – напряженность электрического поля, v_d – дрейфовая скорость электрона, вычисленная для среднего значения напря-

женности электрического поля \bar{F} , и $e > 0$ – заряд электрона. Зависимость дрейфовой скорости от напряженности электрического поля определяется по формуле Эсаки–Тсу [4]. Напряженность и концентрация могут быть вычислены при решении уравнений Пуассона и непрерывности [2, 9]:

$$\begin{aligned} e \frac{\partial n}{\partial t} &= -\frac{\partial J}{\partial x}, \\ \frac{\partial F}{\partial x} &= \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon_r} (n - n_{D0}), \end{aligned} \quad (2)$$

где t обозначает время, а координата x соответствует направлению движения электронов в полупроводниковой сверхрешетке. Параметры $\epsilon_0, \epsilon_r = 12.5$ соответствуют абсолютной и относительной диэлектрическим проницаемостям; $n_{D0} = 3 \cdot 10^{22} \text{ М}^{-3}$ – равновесная концентрация электронов.

В качестве рассматриваемого возмущения используется локальное увеличение концентрации легирующей примеси. Для введения возмущения модифицируем уравнение Пуассона из (2) следующим образом:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{e}{\epsilon_0 \epsilon_r} (n - (n_{D0} + n_{D1}(x))), \quad (3)$$

где $n_{D1}(x)$ – кусочно-линейная функция следующего вида:

$$n_{D1}(x) = \begin{cases} 0, & x < x' - \Delta x \\ h, & x' - w/2 < x < x' + w/2 \\ 0, & x > x' + \Delta x \end{cases} \quad (4)$$

Здесь x' – положение центра возмущения, w определяет ширину рассматриваемого возмущения, h определяет высоту (разницу с равновесной концентрацией n_{D0}) возмущения. Вид профиля концентрации легирующей примеси $n_D(x) = n_{D0} + n_{D1}(x)$ при нескольких значениях x' , w и h продемонстрирован на рис. 1. На рисунке для удобства концентрация нормирована на значение n_{D0} , а координата центра возмущения – на длину структуры $L = 116.2 \text{ нм}$.

ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ

Рассмотрим сначала, как будут изменяться характеристики тока, в частности вольт-амперная характеристика, с изменением локализации возмущения. Зафиксируем размеры возмущения, выбрав параметры $w = 24.9 \text{ нм}$ ($w/L = 0.10715$), $h = 1.5 \cdot 10^{22} \text{ М}^{-3}$ ($h/n_{D0} = 0.5$), что соответствует профилю на рис. 1а. Для построения вольт-амперной характеристики на участке, где есть коле-

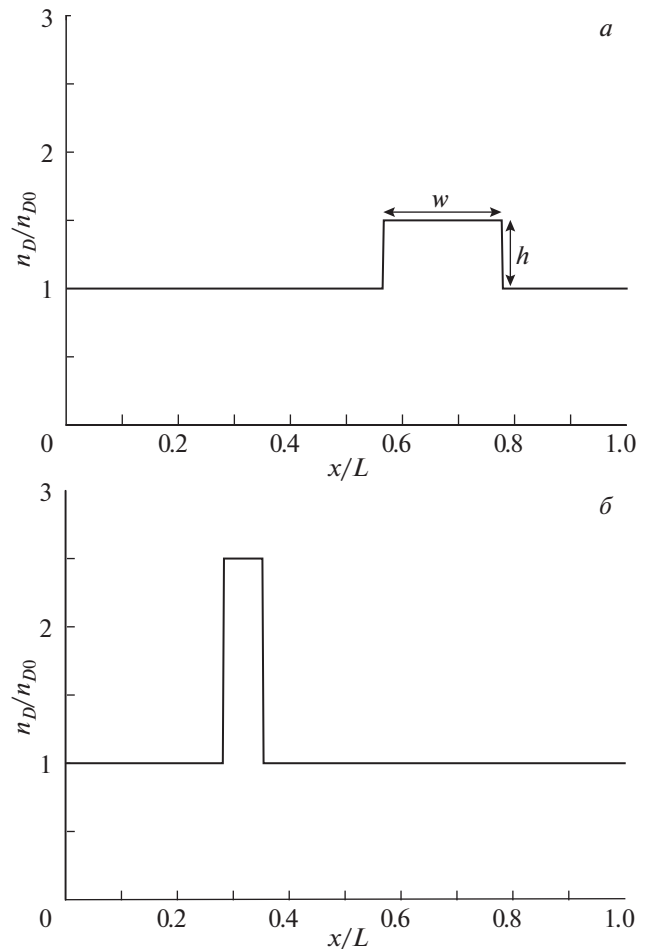


Рис. 1. Профили концентрации легирующей примеси. Приведены примеры различных положений и формы возмущений.

бания тока, значение тока на вольт-амперной характеристике усреднялось по времени (метод построения вольт-амперных характеристик и их вид для невозмущенного состояния концентрации легирующей примеси ($n_{D1}(x) = 0$ вдоль всей сверхрешетки) подробно описан в [11]). На рис. 2а продемонстрированы примеры вольт-амперных характеристик при различных положениях центра возмущения (кривая 2 – $x' = 46.5 \text{ нм}$, кривая 3 – $x' = 93 \text{ нм}$) и в случае без возмущения (кривая 1). Можно заметить, что в зависимости от положения вольт-амперные характеристики заметно изменяются. В качестве характеристики изменения вольт-амперной характеристики при смещении центра возмущения концентрации легирующей примеси введем величину Θ , рассчитываемую следующим образом:

$$\Theta = \int |I(V) - I_0(V)| dV, \quad (5)$$

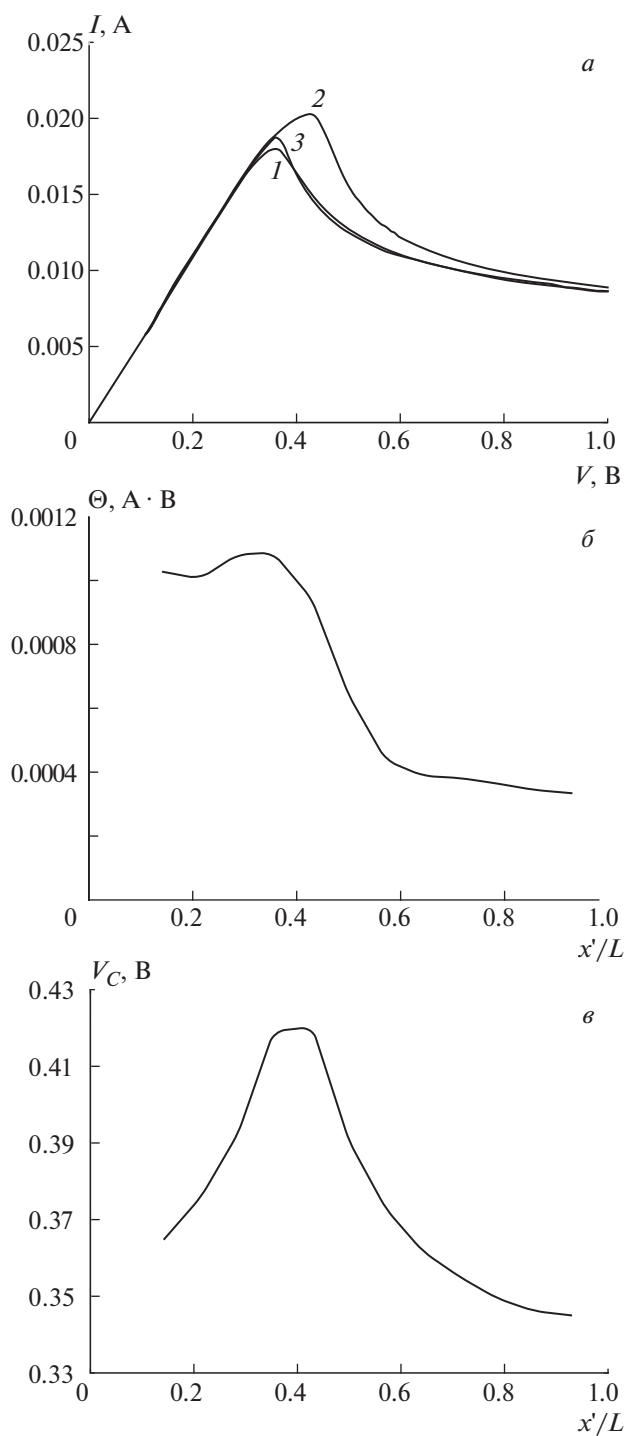


Рис. 2. *a* – вольт-амперные характеристики для различных положений возмущения концентрации легирующей примеси фиксированной формы; *б* – зависимость интегральной величины Θ от координаты центра возмущения концентрации легирующей примеси; *в* – зависимость порогового значения напряжения, при котором начинается генерация колебаний тока, от координаты центра возмущения концентрации легирующей примеси.

где $I(V)$ – значение тока при данном напряжении для возмущенного состояния; $I_0(V)$ – значение тока при данном напряжении для невозмущенного состояния. Зависимость данной величины от координаты центра возмущения приведена на рис. 2б. Можно видеть, что значение Θ выше, когда возмущение находится вблизи эмиттера гетероструктуры, и быстро уменьшается при приближении возмущения к коллектору сверхрешетки. Это говорит о том, что динамика рассматриваемой системы зависит не только от наличия возмущения концентрации легирующей примеси, но и от его локализации в пространстве.

Еще одной важной характеристикой коллективной динамики электронов является пороговое значение напряжения, V_c , при котором возникает генерация колебаний тока. На вольт-амперной характеристике данному значению соответствует начало падающего участка. Зависимость данной величины от координаты центра возмущения показана на рис. 2в. На рисунке хорошо заметно, что есть максимум порогового напряжения для значения координаты центра возмущения $x'/L = 0.4$ ($x' = 46.5$ нм). При других пространственных локализациях возмущения пороговое значение напряжения, при котором начинается генерация колебаний тока, меньше.

ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ВОЗМУЩЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ

Для исследования влияния размеров возмущения концентрации легирующей примеси на характеристики тока зафиксируем пространственную локализацию возмущения, $x'/L = 0.4$ ($x' = 46.5$ нм). Выбранное значение соответствует наиболее заметному воздействию на вольт-амперные характеристики полупроводниковой сверхрешетки.

На рис. 3а можно видеть, как изменяется зависимость тока от напряжения с ростом ширины возмущения, при фиксированной высоте $h = 1.5 \cdot 10^{22}$ м³. На рисунке представлены вольт-амперные характеристики для следующих значений: $w = 0$, случай без возмущения концентрации легирующей примеси – кривая 1, $w = 8.3$ нм – кривая 2, $w = 24.9$ нм – кривая 3, $w = 41.5$ нм – кривая 4. С ростом ширины возмущения пороговое значение напряжения, при котором начинается генерация колебаний тока, увеличивается. Максимальный ток, протекающий через структуру, также увеличивается.

Теперь зафиксируем ширину возмущения концентрации легирующей примеси $w = 24.9$ нм и будем последовательно увеличивать высоту возмущения. Вольт-амперные характеристики представ-

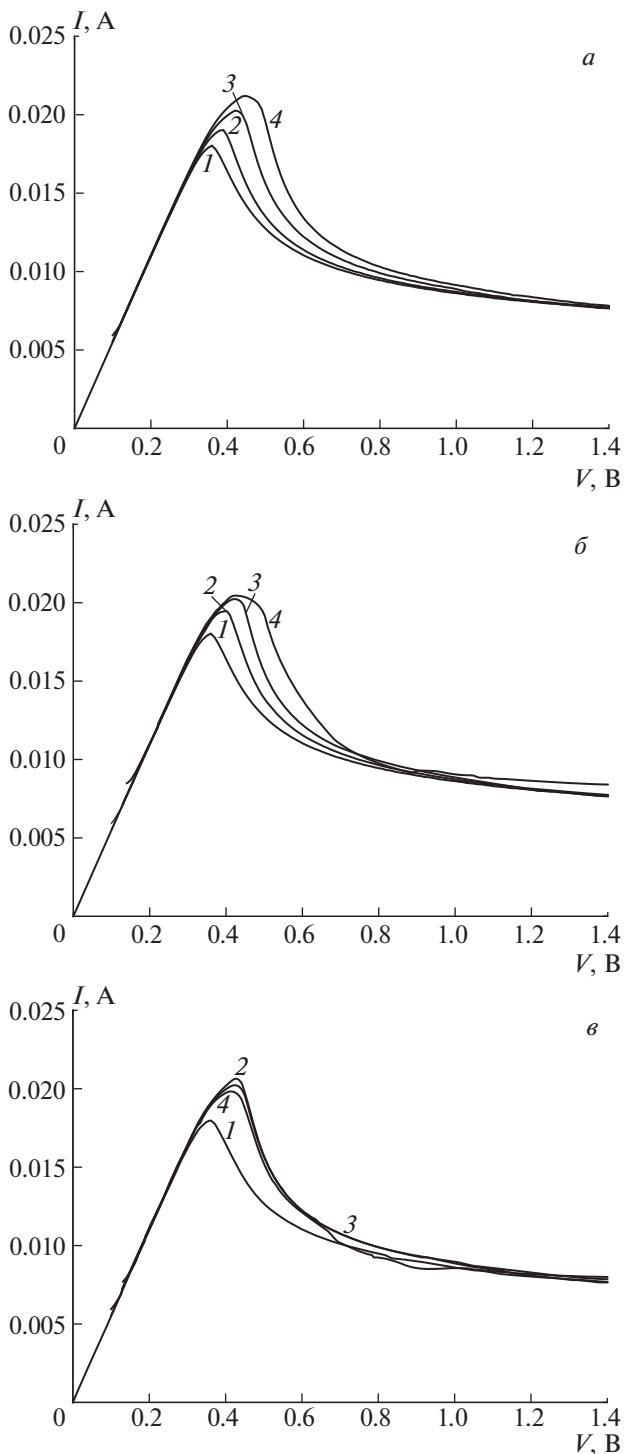


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики для различных форм возмущения концентрации легирующей примеси при фиксированном значении координаты центра возмущения. *а* – при увеличении ширины возмущения w на профиле концентрации легирующей примеси; *б* – при увеличении высоты возмущения h на профиле концентрации легирующей примеси; *в* – при выполнении условия $h \times w = \text{const}$. Кривая 1 на всех рисунках – случай без возмущения концентрации легирующей примеси.

лены на рис. 3б: $h = 0 \text{ м}^3$, случай без возмущения концентрации легирующей примеси – кривая 1, $h = 0.75 \cdot 10^{22} \text{ м}^3$ – кривая 2, $h = 1.5 \cdot 10^{22} \text{ м}^3$ – кривая 3, $h = 3 \cdot 10^{22} \text{ м}^3$ – кривая 4. Как и при возрастании ширины возмущения концентрации легирующей примеси, в данном случае с ростом высоты возмущения наблюдается возрастание порогового напряжения, при котором начинается генерация тока, и максимального тока.

На основании этих результатов было предложено построить вольт-амперные характеристики для случая, когда изменение ширины возмущения обратно пропорционально высоте: $h \times w = \text{const}$. Это означает равенство площади возмущения на профиле концентрации (или интегралу профиля) легирующей примеси при изменении формы возмущения. На рис. 3 построены вольт-амперные характеристики для следующих параметров возмущения: кривая 1 – случай без возмущения концентрации легирующей примеси, кривая 2 – $h = 0.9 \cdot 10^{22} \text{ м}^3$, $w = 41.5 \text{ нм}$, кривая 3 – $h = 1.5 \cdot 10^{22} \text{ м}^3$, $w = 24.9 \text{ нм}$, кривая 4 – $h = 4.5 \cdot 10^{22} \text{ м}^3$, $w = 8.3 \text{ нм}$. Из рисунка видно, что при сохранении площади возмущения изменение формы почти не оказывает влияния на вольт-амперные характеристики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что характеристики колебаний тока, протекающего через сверхрешетку, зависят от пространственной локализации возмущения концентрации легирующей примеси. Если возмущение находится ближе эмиттера сверхрешетки, то вольт-амперная характеристика существенно изменяется. В частности, увеличивается пороговое значение напряжения, при котором начинается генерация колебаний, и максимальное значение тока по сравнению с невозмущенной динамикой электронов в сверхрешетке. Если же сместить возмущение ближе к коллектору устройства, то вольт-амперная характеристика оказывается близка к случаю без возмущения.

Помимо этого показано, что величина изменений характеристик связана с параметрами возмущения; с ростом высоты и ширины возмущения на профиле концентрации легирующей примеси пороговое значение напряжения и максимальное значение тока увеличиваются. При этом при выполнении условия $h \times w = \text{const}$, что соответствует сохранению интеграла профиля возмущения, характеристики тока практически не изменяются при различных параметрах возмущения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №16-32-60059, № 16-32-80125).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шук А.Я. // ФТП. 1974. Т. 8. С. 1841.
2. Wacker A. // Phys. Rep. 2002. V. 357. P. 1.
3. Келдыш Л.В. // Физика тв. тела. 1962. Т. 4. С. 2265.
4. Esaki L., Tsu R. // IBM J. Res. Develop. 1970. V. 14. P. 61.
5. Scheuerer R., Schomburg E., Renk K. F. et al. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 81. P. 1515.
6. Eisele H., Khanna S.P., Lineld E.H. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 072101.
7. Bonilla L.L., Grahn H.T. // Rep. Prog. Phys. 2005. V. 68. P. 577.
8. Fromhold T.M., Patanè A., Bujkiewicz S. et al. // Nature. V. 428. P. 726.
9. Selskii A.O., Koronovskii A.A., Hramov A.E. et al. // Phys. Rev. B. 2011. V. 84. P. 235311.
10. Bonilla L.L., Teitsworth S.W. Nonlinear Wave Methods for Charge Transport. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 2010.
11. Hramov A.E., Makarov V.V., Koronovskii A.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 116603.
12. Maksimenko V.A., Makarov V.V., Koronovskii A.A. et al. // Europhys. Lett. 2015. V. 109. P. 47007.
13. Wacker A., Schwarz G., Prengel F. et al. // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. P. 13788.
14. Patra M., Schwarz G., Scholl E. // Phys. Rev. B. 1998. V. 57. P. 1824.