

Влияние шума на характеристики тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку, в режиме высокочастотной генерации колебаний

© А.О. Сельский, О.И. Москаленко, А.А. Короновский

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия

e-mail: selskiiao@gmail.com

Поступила в редакцию 02.12.2021 г.

В окончательной редакции 27.01.2022 г.

Принята к публикации 22.03.2022 г.

Рассмотрено влияние шума на характеристики тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку наноприбора, имеющего перспективы использования в терагерцовой спектроскопии. Показано, что пороговое напряжение, при котором начинается генерация колебаний тока, слабо зависит от интенсивности шума. Амплитуда колебаний вырастает при некоторых значениях интенсивности шума как для случая без магнитного поля, так и в присутствии наклонного магнитного поля. При этом с ростом интенсивности шума при развитой генерации колебаний частота основной гармоники уменьшается, а амплитуды старших гармоник могут существенно уменьшаться.

Ключевые слова: полупроводниковые сверхрешетки, СВЧ приборы, высокочастотная спектроскопия, добавленный шум, спектральный анализ.

DOI: 10.21883/OS.2022.06.52635.31-22

Введение

В настоящий момент электроника, способная работать в терагерцовой (ТГц) и суб-ТГц диапазонах, приобретает все большую актуальность во многих областях науки, включая биофизику и медицинские приложения [1]. Основными направлениями при этом оказываются создание устойчивых каналов связи между различными устройствами и ТГц спектроскопия [2–4]. В данных исследованиях использование устройств на основе нано- и микроструктур в качестве квантово-каскадных лазеров, устройств с переносом электронов и других устройств, которые демонстрируют отрицательную дифференциальную проводимость, демонстрирует хорошие результаты [5,6]. В случае, если из-за физических ограничений основная частота оказывается меньше желательной, одним из известных методов увеличения частоты генерации — работа с высшими гармониками основной частоты [7,8].

Одним из перспективных устройств, демонстрирующих спектр, содержащий мощные гармоники и работающий в суб-ТГц диапазоне, является полупроводниковая сверхрешетка. Полупроводниковые сверхрешетки состоят из чередующихся слоев различных полупроводниковых материалов (двух или более) с разной шириной полосы [9]. Такая периодическая структура способствует образованию минизон, в которых электроны могут перемещаться вдоль структуры. Если произведение концентрации носителей заряда в устройстве на длину структуры превышает критическое значение, отрицательная дифференциальная проводимость запускает

формирование распространяющихся зарядовых доменов, которые можно использовать как для генерации, так и для усиления суб-ТГц/ТГц излучения [6,10]. Недавно была показана возможность получения усиления внешнего сигнала за счет его синхронизации с основной частотой и высшими гармониками колебаний тока в сверхрешетке [11,12]. Такой подход повышает интерес к полупроводниковым сверхрешеткам с позиций высокочастотной спектроскопии.

При этом при формировании гетероструктуры неизбежно возникают пространственные неоднородности решетки (например, случайных флуктуаций концентрации легирующей примеси [13]), оказывающие влияние на ток, протекающий через полупроводниковую сверхрешетку. При случайном характере появления неоднородностей их влияние напоминает шум. Помимо этого присутствуют температурный шум и другие типы шумов в токе, протекающем через полупроводниковую сверхрешетку. В работе [14] рассматривается модель добавления шума к току, протекающему через полупроводниковую сверхрешетку. В ней, а также в ряде других работ [15,16], в частности, показано, что шум в некоторых случаях не разрушает когерентных колебаний тока, а способствует их генерации. Данный эффект чрезвычайно важен для задач спектроскопии, так как позволяет работать в области высоких частот при наличии шумов, полностью подавить которые зачастую невозможно. В приведенных выше работах основное внимание уделяется динамике электронных доменов, тогда как в настоящей статье предлагается исследовать влияние шума на характеристики тока,

протекающего через полупроводниковую сверхрешетку, включая спектр колебаний. Помимо этого планируется рассмотреть случай наличия наклонного магнитного поля, влияние которого часто приводит к устойчивости колебаний тока при внешних воздействиях [6,11,12].

Модель

Ток, протекающий через полупроводниковую сверхрешетку, можно найти, решая систему уравнений в гидродинамическом приближении [9]: уравнение непрерывности, уравнение Пуассона, дрейфовое приближение. Для удобства численного моделирования уравнения приводятся изначально в дискретном виде. При этом сверхрешетка разделяется на большое число малых слоев (около 30–40 слоев на период структуры) и полагается, что внутри каждого слоя плотность электронов, напряженность электрического поля и плотность тока не изменяются [6].

Для настоящего исследования шум добавляется непосредственно к плотности тока в уравнение непрерывности [14,15], вследствие чего система уравнений, описывающая изменения тока в сверхрешетке, введенная по аналогии с [6,9], принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} e\Delta x \frac{dn_m}{dt} &= J_{m-1} + D\xi_{m-1} - J_m - D\xi_m, \quad m = 1 \dots N, \\ F_{m+1} &= \frac{e\Delta x}{\epsilon_0\epsilon_r} (n_m - n_D) + F_m, \quad m = 1 \dots N, \\ J_m &= en_m v_d(\bar{F}_m), \end{aligned} \quad (1)$$

где n_m — концентрация носителей заряда в m слое, J_m — плотность тока, протекающая через границу m слоя, F_m — напряженность электрического поля в m слое, $\Delta x = 0.24 \text{ nm}$ — ширина элементарного слоя, e — заряд электрона, N — количество дискретных слоев, $n_D = 3 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ — равновесная концентрация электронов, ϵ_0 и $\epsilon_r = 12.5$ — абсолютная и относительная электрические проницаемости. Здесь D — интенсивность шума, берущаяся в рамках настоящей статьи постоянной и не зависящей от плотности тока, ξ_{m-1} и ξ_m — случайные величины с распределением Гаусса с единичной дисперсией. Такое введение шума позволяет говорить о широком спектре шумовых составляющих в сверхрешетке без уточнения их природы; более того, это позволяет учесть несколько шумовых составляющих в результирующем токе, если они подчиняются распределению Гаусса.

$v_d(\bar{F}_m)$ в уравнении (1) — зависимость дрейфовой скорости от напряженности электрического поля. Данная зависимость имеет различный вид для разных внешних воздействий. Однако если не учитывать возможность межминизонного туннелирования, не вводить наклонное магнитное поле и считать температуру, близкой к абсолютному нулю, то дрейфовая скорость принимает

относительно простой вид [9]:

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

где Δ — ширина минизоны, τ — время рассеяния, ω_B — частота блоховских колебаний. В настоящей работе помимо такого простого случая рассматривается присутствие наклонного магнитного поля с индукцией $B = 15 \text{ Т}$ и углом наклона $\theta = 40^\circ$. Введение в рассмотрение магнитного поля приводит к изменению профиля дрейфовой скорости и появлению дополнительных резонансных пиков [6]. Для этого случая зависимость дрейфовой скорости от напряженности электрического поля рассчитывается численно, как в [6,17].

Влияние интенсивности шума на характеристики тока

Приложение к контактам полупроводниковой сверхрешетки достаточного значения напряжения приводит к генерации высокочастотных колебаний тока [6,18]. В экспериментальных работах данные колебания (частота может достигать десятков GHz) сложно зафиксировать, однако, как правило, о наличии колебаний говорит падающий участок на вольт-амперной характеристике [17]. В рамках численного моделирования, как в настоящей статье, аналогичный результат получается при усреднении по времени тока. На рис. 1 приведен пример временной зависимости тока и вольт-амперная характеристика в случае без наклонного магнитного поля. Кроме среднего тока на рисунке также показаны серым цветом минимальное и максимальное значения тока. Такое представление дает много информации об основных характеристиках тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку: частота колебаний, амплитуда колебаний, пороговое значение напряжения, при котором начинается генерация колебаний тока, однако оно делает график довольно громоздким.

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики для разных значений интенсивности шума для случаев без магнитного поля и в присутствии наклонного магнитного поля. Стоит уточнить, что в присутствии наклонного магнитного поля вольт-амперные характеристики существенно изменяются. Значение напряжения, при котором начинается генерация, увеличивается, так же как и частота, и амплитуда генерации [6,17]. При этом меняется сильно и форма колебаний — они становятся существенно нелинейными. Ранее было показано, что в присутствии наклонного магнитного поля полупроводниковые сверхрешетки более устойчивы к влиянию внешних воздействий [6,11,12].

Для шума, добавляемого к току, можно видеть следующие закономерности. Небольшие значения интенсивности шума мало влияют на вольт-амперные характеристики. После того как интенсивность шума превышает некоторый порог влияние становится существенным.

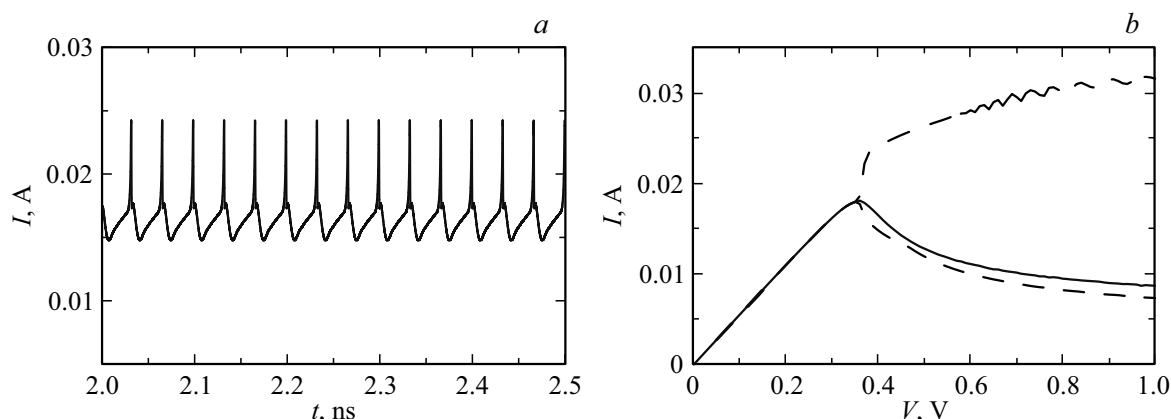


Рис. 1. (а) Временная зависимость тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку, для случая без шума и магнитного поля при напряжении $V = 0.4$ В. (б) Зависимость среднего (сплошная линия), максимального и минимального (штриховые линии) тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку, от напряжения, приложенного к структуре.

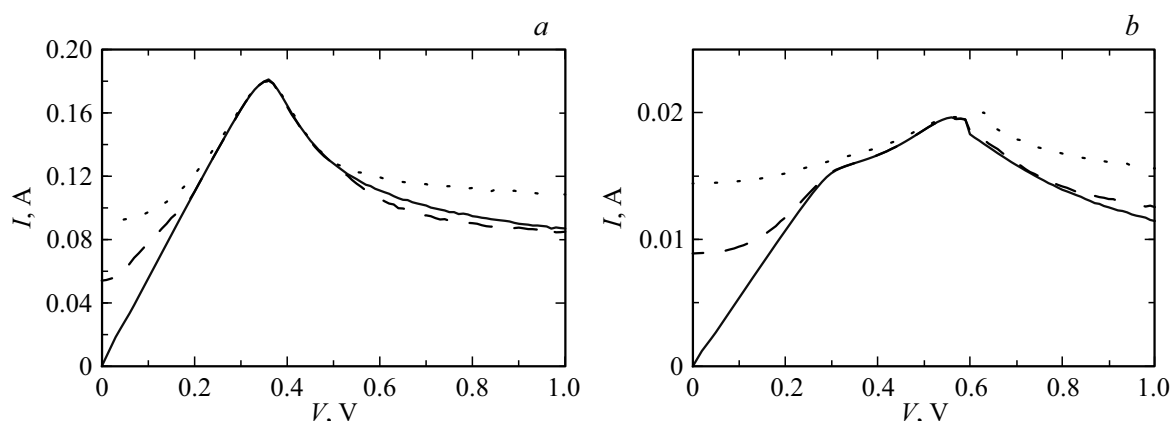


Рис. 2. Зависимость среднего тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку, от напряжения, приложенного к структуре, для разных значений интенсивности шума. Сплошная линия — $D = 0 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, штриховая линия — $D = 3.6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, пунктирная линия — $D = 7 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. а — случай без магнитного поля, б — случай с магнитным полем.

В присутствии наклонного магнитного поля, что ожидаемо, требуется более высокое значение интенсивности для того, чтобы изменения вольт-амперных характеристик стали значительны. Пороговое значение напряжения, при котором начинается генерация колебаний тока, почти не изменяется в присутствии шума для случая без магнитного поля и изменяется только при высоких интенсивностях шума в присутствии наклонного магнитного поля. Средний ток под действием шума возрастает, если интенсивность шума достаточная.

Важным представляется еще одно отличие случая без шума и при наличии шума, добавляемого к току. При малых значениях напряжения без шума вольт-амперная характеристика представляет собой линейную зависимость. Однако под действием добавленного шума можно видеть, что для малых значений напряжения средний ток возрастает, зависимость становится нелинейной. Это связано с тем, что добавленный шум приводит к генерации более высокочастотных, но менее мощных колебаний при малых значениях напряжения.

С ростом напряжения эта генерация прекращается, и за счет симметричности распределения Гаусса среднее значение тока оказывается эквивалентным случаю без добавленного шума. Однако при значительной интенсивности шума в случае наклонного магнитного поля различие между случаем с шумом и без сохраняется вплоть до порогового значения. Возможно, именно это приводит к тому, что значение напряжения, при котором наблюдается падающий участок на вольт-амперной характеристике, увеличивается.

Представленные на рис. 2 вольт-амперные зависимости дают некоторое представление о влиянии шума на ток, протекающий через полупроводниковую сверхрешетку. Однако такое представление не отличается точностью и мало что может сказать об амплитуде колебаний. С этой целью на рис. 3 показаны цветом двухпараметрические зависимости амплитуды колебаний тока от напряжения и интенсивности шума $a(V, D)$ для случаев без магнитного поля и в присутствии наклонного магнитного поля.

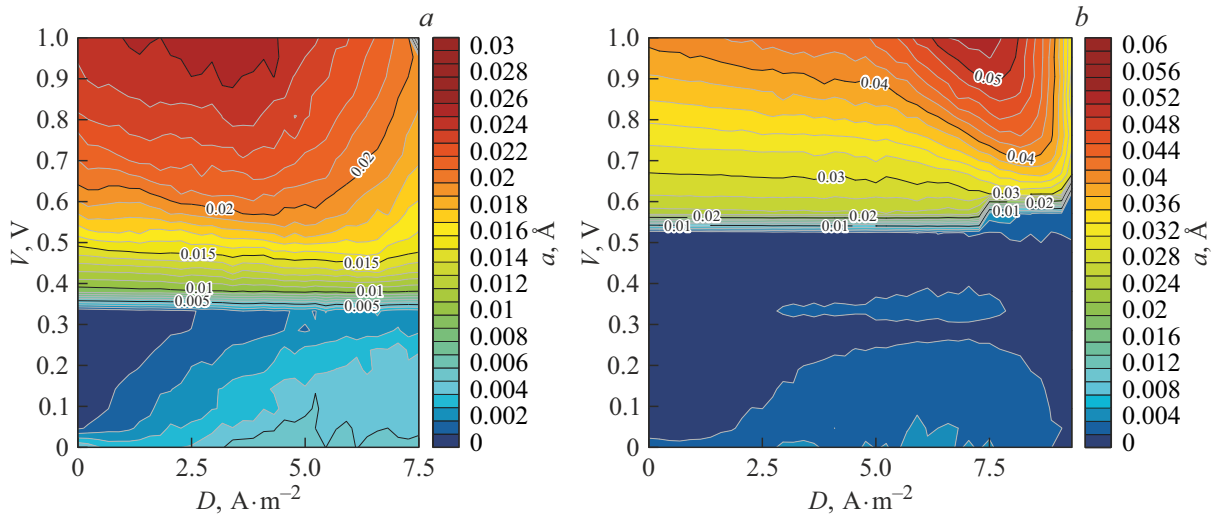


Рис. 3. Зависимости амплитуды колебаний тока, протекающего через структуру, от напряжения, приложенного к сверхрешетке, и интенсивности шума. (а) Случай без магнитного поля, (b) случай с магнитным полем.

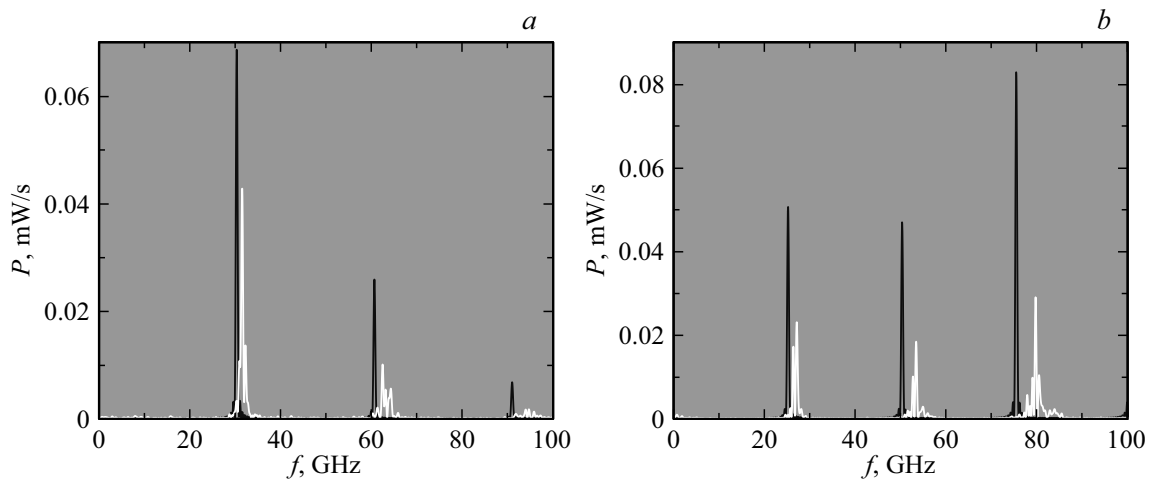


Рис. 4. Спектральные плотности мощности колебаний тока при различных параметрах магнитного поля и напряжениях, приложенных к полупроводниковой сверхрешетке, для случаев без добавленного шума (черная линия) и с добавленным шумом интенсивности $D = 7.5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. (а) Случай без магнитного поля, (b) в присутствии наклонного магнитного поля. (а) $V = 0.4 \text{ V}$, (b) $V = 0.6 \text{ V}$.

Из зависимости амплитуды колебаний видно, что хоть до порогового значения амплитуда колебаний и отличается от нуля при значительных интенсивностях шума, однако амплитуда колебаний оказывается все равно значительно меньше, чем для колебаний за пороговым значением напряжения. При высоком напряжении при этом можно видеть отчетливый рост амплитуды при умеренных значениях шума, добавляемого к току. В случае без магнитного поля наибольший рост амплитуды приходится на значение интенсивности шума $D = 2.5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. Тогда как в присутствии наклонного магнитного поля наибольшая амплитуда наблюдается при интенсивности шума $D = 7.5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. Амплитуда при этом может вырастать под влиянием шума почти на 20%.

Влияние интенсивности шума на спектральные характеристики колебаний тока

В случае без шума, если нет магнитного поля, спектр состоит из основной частоты и множества кратных ей гармоник. Чем выше частота гармоники, тем ниже спектральная плотность мощности (рис. 4, а, черные линии). В присутствии наклонного магнитного поля при некоторых напряжениях из-за усложнения вида колебаний возможна ситуация, когда спектральная плотность мощности кратных гармоник выше, чем на основной частоте (рис. 4, б, черные линии) [11]. Также, как правило, в присутствии наклонного магнитного поля частота

и амплитуда колебаний больше, чем в случае, когда магнитного поля нет.

При небольших значениях напряжения, близких к порогу начала генерации колебаний, для обоих случаев с магнитным полем и без него частота колебаний при добавлении шума немного возрастает, при этом спектральная плотность мощности заметно уменьшается. Интересно, что при этом и основная частота, и гармоники представляют уже не один пик на зависимости спектральной плотности мощности от частоты, а несколько близлежащих пиков. Аналогичная картина наблюдается как в случае без магнитного поля, так и в присутствии наклонного магнитного поля. При этом при наличии магнитного поля сохраняется ситуация, когда спектральная плотность мощности одной из кратных гармоник выше, чем на основной частоте.

Также важно отметить, что спектральная плотность мощности кратных гармоник в случае без магнитного поля при добавлении шума уменьшается столь сильно, что почти пропадает, напоминая небольшой всплеск. В случае с наклонным магнитным полем спектральная плотность мощности кратных гармоник остается примерно на том же уровне, что и для случая без добавления шума.

Заключение

В настоящей работе подробно изучено, как влияет шум, добавляемый к току, на амплитуду и спектр его колебаний в полупроводниковых сверхрешетках. Рассматривался как случай без магнитного поля, так и в присутствии наклонного магнитного поля. Показано, что влияние шума может привести к увеличению амплитуды колебаний. При этом для того, чтобы влияние шума на вольт-амперную характеристику стало заметным, необходимо добавить к току шум значительной интенсивности. Помимо этого для малых значений напряжения шум индуцирует колебания тока чрезвычайно малой амплитуды.

Для спектральной плотности мощности колебаний тока показано, что с ростом интенсивности шума частота колебаний сначала незначительно возрастает, затем уменьшается. При наличии шума для малых значений напряжения основная частота и кратные гармоники представляют собой не один, а несколько близлежащих пиков спектральной плотности мощности. Значения спектральной плотности мощности уменьшаются с ростом частоты кратных гармоник, почти полностью затухая. В присутствии наклонного магнитного поля изменение частоты становится заметнее, а затухания значений спектральной плотности мощности кратных гармоник не наблюдается.

Полученные результаты представляют интерес для высокочастотной спектроскопии, так как демонстрируют устойчивость колебаний тока, протекающего через полупроводниковую сверхрешетку, к шумам, что позволяет

использовать данные колебания как источник когерентных электромагнитных волн. Даже при значительной интенсивности шума, добавляемого к току, в сверхрешетке продолжается генерация электронных доменов, обеспечивающая колебания тока с устойчивыми спектрами. В случае использования внешнего резонатора для работы со старшими гармониками для повышения частоты больший интерес вызывает случай с наклонным магнитным полем, так как в присутствии магнитного поля значения спектральной плотности мощности старших гармоник остаются достаточно большими.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (проект № СП-497.2021.5).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Tonouchi. *Nature Photonics*, **1**, 97–105 (2007). DOI: 10.1038/nphoton.2007.3
- [2] C. Yu, S. Fan, Y. Sun, E. Pickwell-MacPherson. *Quant. Imaging Med. Surg.*, **2**, 33–45 (2012). DOI: 10.3978/j.issn.2223-4292.2012.01.04
- [3] S. Bartalini, L. Consolino, P. Cancio, P. De Natale, P. Bartolini, A. Taschin, M. De Pas, H. Beere, D. Ritchie, M.S. Vitiello, R. Torre. *Phys. Rev. X*, **4**, 021006 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevX.4.021006
- [4] T. Kashiwagi. *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 082603 (2014). DOI: 10.1063/1.4866898
- [5] D.K. Polyushkin, I. Marton, P. Racz, P. Dombi, E. Hendry, W.L. Barnes. *Phys. Rev. B*, **89**, 125426 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevB.89.125426
- [6] A.O. Selskii, A.A. Koronovskii, A.E. Hramov, O.I. Moskalenko, K.N. Alekseev, M.T. Greenaway, F. Wang, T.M. Fromhold, A.V. Shorokhov, N.N. Khvastunov, A.G. Balanov. *Phys. Rev. B*, **84**, 235311 (2011). DOI: 10.1103/PhysRevB.84.235311
- [7] V.L. Bratman, A.E. Fedotov, Y.K. Kalynov. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **27** (2), 456–461 (1999). DOI: 10.1109/27.772273
- [8] M.K. Hornstein, V.S. Bajaj, R.G. Griffin. *IEEE Transactions on Electron Devices*, **52** (5), 798–807 (2005). DOI: 10.1109/TED.2005.845818
- [9] A. Wacker. *Phys. Rep.*, **357**, 1–111 (2002). DOI: 10.1016/S0370-1573(01)00029-1
- [10] J.B. Gunn. *IBM J. Res. Dev.*, **8**, 141 (1964). DOI: 10.1147/rd.82.0141
- [11] A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, S.A. Kurkin, V.V. Makarov, M.B. Gaifullin, K.N. Alekseev, N. Alexeeva, M.T. Greenaway, T.M. Fromhold, A. Patane, F.V. Kusmartsev, V.A. Maximenko, O.I. Moskalenko, A.G. Balanov. *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 116603 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.116603

- [12] A.A. Koronovskii, A.E. Hramov, V.A. Maximenko, I.O. Moskalenko, K.N. Alekseev, M.T. Greenaway, T.M. Fromhold, A.G. Balanov. *Phys. Rev. B*, **88**, 165304 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevB.88.165304
- [13] A. Wacker, G. Schwarz, F. Prengel, E. Scholl, J. Kastrup, H.T. Grahn. *Phys. Rev. B*, **52**, 13788 (1995). DOI: 10.1103/PhysRevB.52.13788
- [14] J. Hizanidis, A. Balanov, A. Amann, E. Scholl. *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 244104 (2006). DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.244104
- [15] J. Hizanidis, A. Balanov, A. Amann, E. Scholl. *Intern. J. Bifurcation and Chaos*, **16**, 1701–1710 (2006). DOI: 10.1142/S0218127406015611
- [16] E. Mampo, M. Ruiz-Garcia, M. Carretero, H.T. Grahn, Y. Zhang, L.L. Bonilla. *Phys. Rev. Lett.*, **121**, 086805 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevLett.121.086805
- [17] T.M. Fromhold, A. Patane, S. Bujkiewicz, P.B. Wilkinson, D. Fowler, D. Sherwood, S.P. Stapleton, A.A. Krokhin, L. Eaves, M. Henini, N.S. Sankeshwar, F.W. Sheard. *Nature*, **428**, 726–730 (2004). DOI: 10.1038/nature02445
- [18] R. Scheuerer, E. Schomburg, K.F. Renk, A. Wacker, E. Scholl. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 1515–1517 (2002). DOI: 10.1063/1.1500770