01;09

Характер терагерцовых колебаний в резонансно-туннельных структурах

© Э.А. Полторацкий, Г.С. Рычков

Государственный научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В. Лукина, Москва, Зеленоград
E-mail: polt@niifp.zgrad.ru

Поступило в Редакцию 14 июня 2001 г.

На примере изучения сложных колебаний в резонансно-туннельных структурах предложен общий подход к изучению динамического поведения наноструктур. Используя модифицированную эквивалентную схему для резонансно-туннельной структуры, полученную на основе квантово-механического рассмотрения динамических свойств структуры, проведен анализ ее качественного поведения в фазовом пространстве. Показано, что структура может быть как в режиме "мягкого", так и в режиме "жесткого" возбуждения колебаний.

Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что наноэлементы могут иметь разнообразные динамические и статические устойчивые состояния. Точное описание поведения наноэлемента дают методы квантовой физики. Но, как правило, это приводит к необходимости анализа нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, регулярных методов решения которых не существует. Использование цифровых методов эффективно тогда, когда известно качественное поведение динамической наносистемы.

В этих условиях естественным является такой подход, когда, исходя из некоторых априорных соображений, рассматривают наноэлемент как некоторую электрическую систему (состоящую из нелинейных сопротивлений, емкостей, индуктивностей), а затем ее параметры оценивают с помощью аппарата квантовой механики. Такой подход позволяет проанализировать динамические состояния наноэлементов на языке качественной теории обыкновенных дифференциальных уравнений и показать, что за нетривиальным статическим поведением наноэлемента могут стоять сложные динамические процессы [1,2]. Примером этому служит наличие "плато" и гистерезисов на участке отрицательного дифференциального сопротивления резонансно-туннельной структуры.

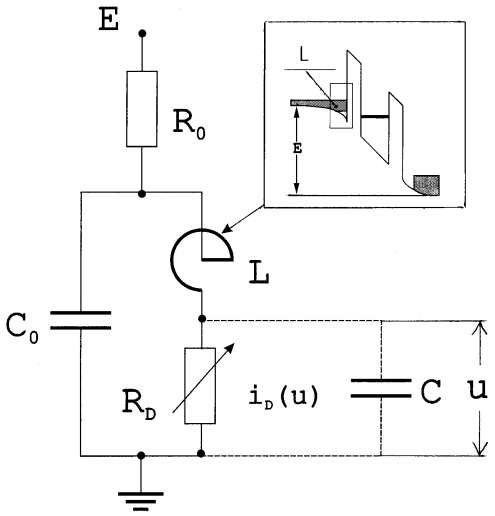

Рис. 1.

Проведенное рядом авторов численное моделирование поведения такой структуры показало возможность возбуждения в структуре терагерцовых колебаний тока, постоянная составляющая которых и дает "плато" [3–7]. Что касается гистерезисных петель, то авторы работ [4–7] объясняют их наличие перераспределением заряда между эмиттером и квантовой ямой.

Высокочастотные колебания связываются с наличием индуктивного элемента внутри резонансно-туннельной структуры. Таким элементом (см. [4–7]) является часть эмиттера, непосредственно примыкающая к барьеру (вставка на рис. 1). Введение индуктивного элемента позволило авторам работы [7] описать "мягкую" генерацию малых колебаний с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений, но в силу малых амплитуд колебаний это дает только качественное объяснение наличия "плато".

С учетом индуктивного элемента авторы работ [4–7] также предложили эквивалентную схему, представленную сплошными линиями на рис. 1, пригодную для объяснения поведения структуры лишь

при воздействии на нее малых высокочастотных возмущений. Однако, если эквивалентную схему дополнить емкостью C, (пунктирные линии на рис. 1), то открывается возможность объяснить все особенности измеряемой вольт-амперной характеристики ("плато" и гистерезисные петли) с единой точки зрения, а именно с точки зрения колебательного процесса (без ограничений на амплитуду), который в области "плато" имеет характер "мягкого" режима возбуждения колебаний, а в области гистерезисных петель — "жесткого" режима возбуждения колебаний.

Емкость C, которая представляет емкость квантовой ямы с находящимся в ней зарядом, шунтирует нелинейное сопротивление, имеющее статическую (а не измеряемую) вольт-амперную характеристику $i_D(u)$ непосредственно туннельно-резонансной структуры (т.е. без учета сопротивления контактов). Добавление этой емкости, даже сколь угодно малой, вызывает во внутреннем контуре, образованном элементами L, C и R_D, колебания высокой частоты. Анализ колебаний динамической системы, описываемой обыкновенными дифференциальными уравнениями, эквивалентен анализу предельных циклов этой динамической системы. Для динамических систем, которые описываются эквивалентной схемой, изображенной на рис. 1, разработаны критерии наличия и отсутствия предельных циклов [8–11]. Заметим, что при $C \ll C_0$ колебания, возникающие в контуре L, C, $i_D(u)$, будут шунтироваться емкостью C_0, а цепочка C_0R_0 будет играть роль цепочки, стабилизирующей внешнее напряжение E на рассматриваемом контуре. Ради простоты будем полагать, что $R_0 = 0$. Тогда (в некотором приближении) число предельных циклов просто равно числу точек пересечения при $u > E$ кривой $i_D(u)$ с ее зеркальным отражением относительно прямой $u = E$. Циклы вложены друг в друга и их устойчивость чередуется (критерий зеркального отражения [11]). В качестве статической вольт-амперной характеристики возьмем ту, которая изображена на рис. 2. Она представлена непрерывной кривой, переходящей в области отрицательного дифференциального сопротивления в пунктирную линию. Для построения вольт-амперной характеристики, соответствующей измеренной, необходимо знать постоянную составляющую колебаний тока в контуре, которая сильно зависит от характера колебаний, а он может изменяться от гармонических колебаний до релаксационных. Наша задача состоит не в том, чтобы точно определить положение "плато" и гистерезисных петель, а показать, что они есть и что в их основе лежат высокочастотные колебания. Поэтому будем считать, что колебания носят ярко

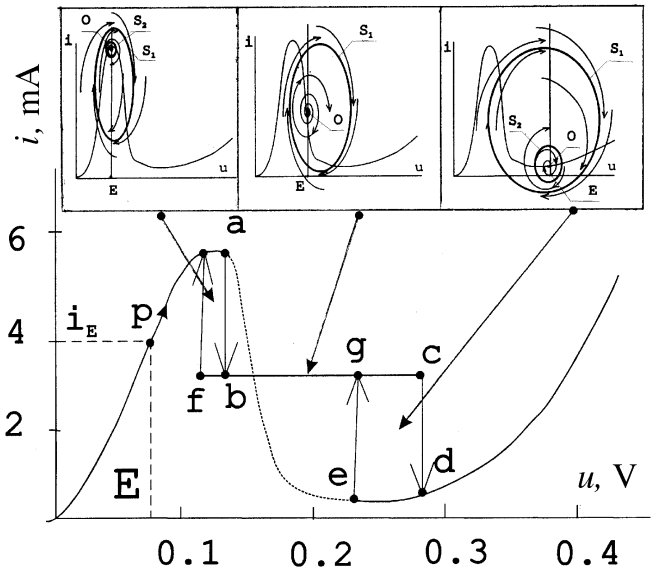

Рис. 2.

выраженный релаксационный характер и средний ток этих колебаний равен $i_{\text{ср}} = (I_p + I_v)/2$, где I_p и I_v — значения функции $i_D(u)$ в максимуме и минимуме (см. рис. 2).

С учетом сделанных допущений, используя критерий "зеркальных отражений" для системы с $C \neq 0$, получаем (сплошные линии на рис. 2) вольт-амперную характеристику, которая соответствует измеряемой. За качественными изменениями поведения системы лучше следить при движении по вольт-амперной характеристике точки p, абсцисса которой равна E, а ордината — току i_E. Качественное поведение системы представлено на вставке в форме фазовых портретов, соотнесенных с определенными участками характеристики. Когда напряжение E увеличивается от нуля, то динамическая система будет находиться тольков в устойчивом статическом состоянии. При достижении точкой p точки a устойчивая особая точка системы превращается в неустойчивую и возникают колебания (так называемая "мягкая" генерация). Внешне это соответствует скачку точки p из точки a в точку b. При дальнейшем

увеличении напряжения E режим "мягкой" генерации сохраняется, пока p не достигнет точки g. Участок bg носит название "плато" и в фазовом пространстве системы ему соответствует неустойчивая особая точка O и устойчивый предельный цикл S_1 (вставка на рис. 2). Дальнейшее увеличение напряжения приводит на фазовом портрете к рождению из особой точки O неустойчивого предельного цикла S_2 и соответствующему переходу системы из "мягкого" режима генерации к "жесткому". "Жесткий" режим характеризуется наличием двух устойчивых состояний: одно статическое, представленное устойчивой особой точкой O, и второе — динамическое, которому на фазовом портрете соответствует предельный цикл S_1 (вставка на рис. 2, связанная с гистерезисной петлей $gcde$). Поскольку при увеличении E система находилась в колебательном режиме, то она будет продолжать его сохранять, находясь в "жестком" режиме возбуждения колебаний, пока точка p не достигнет c. В этот момент на фазовом портрете системы происходит слияние устойчивого предельного цикла S_1 с неустойчивым S_2, и система переходит в устойчивое статическое состояние O. Внешне это представляется резким переходом точки p из c в d. Теперь при уменьшении E система будет находиться в устойчивом статическом состоянии, хотя у нее есть и устойчивое динамическое состояние. Это будет продолжаться пока p не достигнет e. Здесь неустойчивый предельный цикл S_2 сливается с особой точкой O, которая превращается в неустойчивую особую точку. Система переходит в "мягкий" режим генерации, который продолжается пока не будет достигнута точка b. При дальнейшем уменьшении E система будет находиться в возбуждении, хотя у нее есть и устойчивое статическое состояние. В этом случае на фазовом портрете системы имеется устойчивый предельный цикл S_1 и неустойчивый S_2 (соответствующая вставка на рис. 2). Система находится в режиме "жесткого" возбуждения колебаний. Наконец, когда точка p достигнет точки f, система перейдет в единственное статическое устойчивое состояние O. Таким образом, динамические процессы приводят к появлению на измеряемой вольт-амперной характеристике двух гистерезисных петель (связанных с "жестким" режимом генерации) и "плато" (связанного с "мягким" режимом генерации). Чтобы обнаружить "жесткую" генерацию при квантово-механических методах исследования, следует найти режим "мягкой" генерации и, постепенно меняя напряжение смещения, войти в режим "жесткой" генерации.

Работа выполнена при частичной поддержке российско-украинской программы "Нанофизика и наноэлектроника".

Список литературы

[1] *Poltoratsky E.A., Rychkov G.S.* // Int. Symp. "Nanostructures: physics and technology". Abstracts of invited lectures and contributed papers. St.Petersburg, 1994. P. 292–294.
[2] *Полторацкий Э.А., Рычков Г.С.* // Труды Второй Международной научно-технической конференции "Микроэлектроника и информатика", Москва, Зеленоград, 1997. С. 66–80.
[3] *Biegel B.A., Plammer J.D.* // Phys. Rev. B. 1996. V. 54. N 11. P. 8070–8082.
[4] *Jensen K.L., Buot F.A.* // Phys. Rev. Lett. 25 February 1991. P. 1078–1081.
[5] *Buot F.A., Rajagopal A.K.* // J. Appl. Phys. 1994. V. 76 (9). P. 5552–5560.
[6] *Buot F.A., Rajagopal A.K.* // Materials Science and Engineering. 1995. B35. P. 303–317.
[7] *Buot F.A., Zhao P., Cui H.L.* et al. // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. N 8. P. 5644–5665.
[8] *Рычков Г.С.* // Сибирский математический журнал. 1966. Т. VII. № 6. С. 1425–1431.
[9] *Рычков Г.С.* // Дифференциальные уравнения. 1994. Т. 30. № 3. С. 405–408.
[10] *Рычков Г.С.* // Дифференциальные уравнения. 1985. Т. XXI. № 6. С. 991–997.
[11] *Рычков Г.С.* Динамические системы в микро- и наноэлектронике. Докторская диссертация. М., 1994.