

УДК 621.315.6:537.226.86

## СТОХАСТИЧЕСКИЕ АКУСТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИК–ПОЛУПРОВОДНИК

© 1998 г. В. А. Вьюн

Институт физики полупроводников СО РАН  
630090 Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 13

Поступила в редакцию 24.04.97 г.

Экспериментально обнаружены стохастические автоколебания поперечного акустоэлектрического напряжения в слоистых структурах пьезоэлектрик–полупроводник с внешней обратной связью. Исследование спектральных зависимостей и фазового портрета автоколебаний показало наличие странного аттрактора (динамического хаоса). С учетом релаксационных свойств ловушечного поперечного акустоэлектрического эффекта, обусловленных захватом носителей заряда на несколько поверхностных уровней полупроводника, предлагается возможное объяснение.

В последнее время исследование нелинейных систем в физике и других науках позволило обнаружить стохастические колебания или динамический хаос (странный аттрактор) [1–5]. В акустике большие возможности для проведения такого рода исследований представляют слоистые структуры пьезоэлектрик–полупроводник с поверхностными акустическими волнами (ПАВ). Это связано с тем, что еще в работе [8] указывалось на принципиальную возможность сочетания в одной структуре оптимальных полупроводниковых и акустических свойств, в том числе и нелинейных. Нелинейные акустоэлектронные явления находят применение для обработки радиосигналов и исследования физических свойств полупроводниковых поверхностей [6, 7]. В последнее время были обнаружены акустоэлектронная бистабильность [9–12] и автоколебания поперечного акустоэлектрического напряжения [13, 14]. Важной особенностью акустоэлектрических автоколебаний является то, что для их возникновения не требовалось отрицательной дифференциальной проводимости полупроводника или образования доменов. Они наблюдались при распространении ПАВ в слоистой структуре при наличии поперечного акустоэлектрического эффекта (ПАЭ) релаксационного ловушечного типа.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования обнаруженных стохастических акустоэлектронных автоколебаний (странный аттрактор или динамический хаос), возникающих при распространении ПАВ в слоистых структурах пьезоэлектрик–полупроводник. О возможности таких автоколебаний ранее не сообщалось.

Экспериментальная схема исследования аналогична приведенной в [13, 14] для исследования регулярных автоколебаний напряжения ПАЭ (пока-

зана на рис. 1). При комнатной температуре использовалась слоистая структура  $YZ-LiNbO_3/n-Si$  с воздушным зазором 0.1 мкм. На нерабочих сторонах пьезоэлектрической и полупроводниковой пластин располагались выходные электроды, с которых снимался электрический сигнал ПАЭ. Возбуждение ПАВ на частоте 110 МГц осуществлялось встречно-штыревым преобразователем с 12 парами электродов и апертурой 2 мм, расположенным на рабочей поверхности пьезоэлектрика. Сигнал ПАЭ после усиления низкочастотным усилителем подавался на амплитудный модулятор, модулирующий амплитуду  $V_0$  высокочастотного сигнала генератора, возбуждая при этом на частоте 110 МГц амплитудно-модулированные ПАВ. (В такой схеме с внешней обратной связью глубина модуляции ПАВ зависела от амплитуды сигнала на выходе усилителя и регулировалась его коэффициентом усиления  $K$ .) Удельное сопротивление  $n-Si$  составляло 4 кОм см, а его рабочая поверхность получалась после травления и естественного окисления на воздухе при комнатной температуре. При этом на поверхности полупроводника устанавливались плоские зоны. В таких усло-

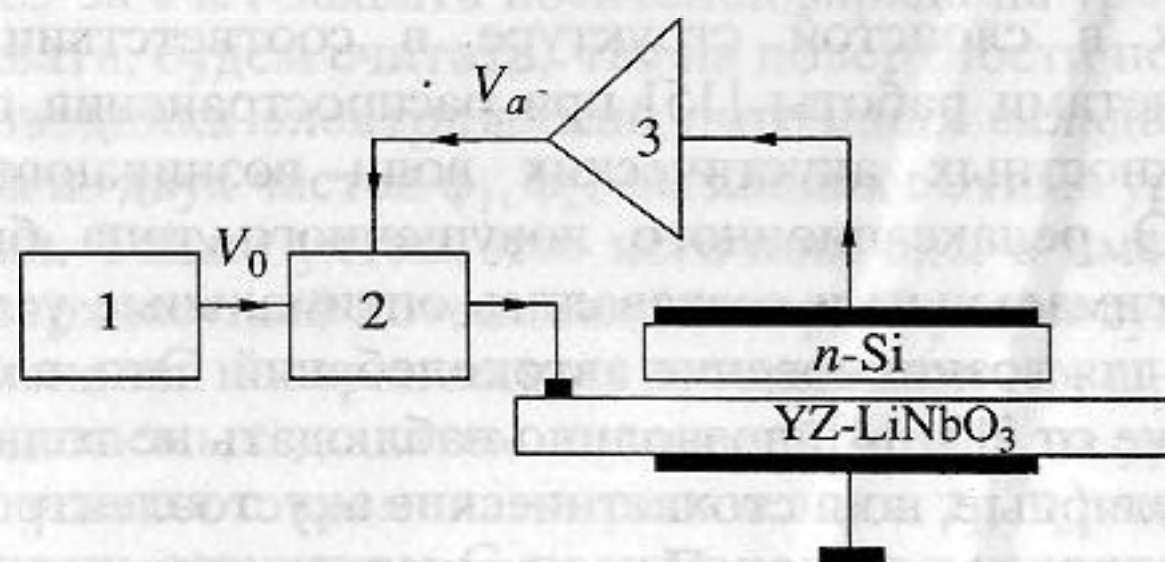


Рис. 1. Экспериментальная схема исследования:

1 – высокочастотный генератор, 2 – амплитудный модулятор, 3 – низкочастотный усилитель.

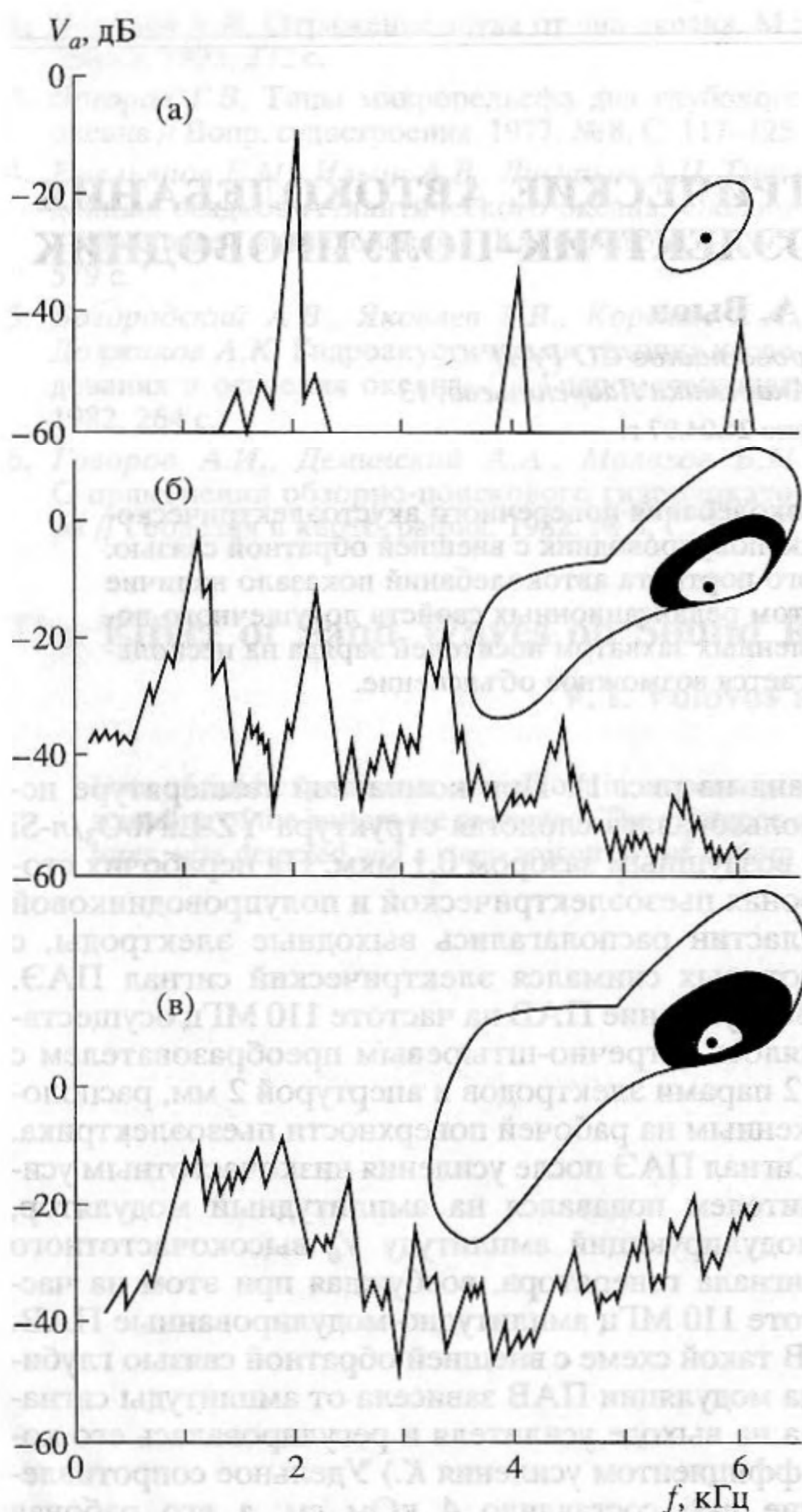


Рис. 2. Спектральные зависимости и фазовые портреты (в верхней части рисунков) для сигналов ПАЭ при различных напряжениях накачки  $V_0 = 0.94$  В (а), 2.3 В (б), 7.1 В (в).

виях в слоистой структуре в соответствии с расчетами работы [15] при распространении поверхностных акустических волн возникающий ПАЭ релаксационного ловушечного типа был максимальным и создавались оптимальные условия для возникновения автоколебаний. Это, в отличие от [13, 14], позволило наблюдать не только регулярные, но и стохастические акустоэлектронные автоколебания. При подготовке эксперимента непосредственно проверялось, чтобы ПАЭ был ловушечным, а именно: при включении или выключении сигналов ПАВ имел характерные ре-

лаксационные переходные участки [16, 17]. (Это условие является необходимым для возникновения автоколебаний [13, 14]).

Для исследования характера автоколебаний экспериментально снимались их частотный спектр и фазовый портрет. Частотный спектр получался стандартным анализатором спектра, а фазовый портрет – непосредственно на экране осциллографа при подаче на его пластины усиленного сигнала  $V_a$  с выхода усилителя и производной по времени от этого сигнала  $dV_a/dt$ .

Автоколебания поперечного акустоэлектрического напряжения возникали в килогерцовом диапазоне частот, начиная с некоторых значений коэффициента усиления  $K$  и амплитуды высокочастотного сигнала накачки  $V_0$ . Так, при коэффициенте усиления  $K = 40$  дБ они возникали, начиная с порогового значения  $V_0 = 0.9$  В. При значениях  $V_0$ , близких к 0.9 В, автоколебания были квазигармоническими, которые при увеличении  $V_0$  становились сильно нелинейными. При дальнейшем увеличении  $V_0$  при другом его пороговом значении 2.1 В они превращались в стохастические. (При возникновении автоколебаний в схеме из-за наличия обратной связи, естественно, осуществляется автомодуляция интенсивности ПАВ. При этом глубина модуляции тем выше, чем больше амплитуда автоколебаний.)

На рис. 2 показаны экспериментально полученные спектральные характеристики и фазовые портреты сигнала ПАЭ для различных амплитуд высокочастотного сигнала накачки  $V_0$ . На рис. 2а для сравнения приведены результаты для регулярных автоколебаний. Периодические автоколебания имеют основную на 2 кГц частоту и кратные ей гармоники. Их фазовый портрет представляет собой замкнутый предельный цикл, а основная частота уменьшается при увеличении  $V_0$ . На рис. 2б, 2в представлены результаты для случая стохастических автоколебаний. Для них характерно, что спектр является сплошным, хотя на рис. 2б на спектральных зависимостях еще можно отметить присутствие основной на частоте 1.1 кГц и кратной ей гармоник. Однако при увеличении  $V_0$  основную и кратные ей гармоники уже отметить трудно (см. рис. 2в). На фазовом портрете автоколебаний видны устойчивый и неустойчивый (странный) аттракторы. Первый изображен сплошной линией, а последний – сплошной темной областью, которую с наибольшей вероятностью “заштриховывает” система, вращаясь вокруг нуля (отмеченного точкой). При этом система какую-то часть времени проводит на устойчивом аттракторе, а затем срывается и переходит на неустойчивый. Такой переход из регулярного режима автоколебаний к стохастическому характерен для сценария перехода к динамическому хаосу через перемежаемость [1–5, 18].

Для понимания возникающих автоколебаний дополнительно экспериментально снимались амплитудная и переходная характеристики всей системы (слоистой структуры, усилителя и модулятора). При этом непосредственно снималась форма сигнала ПАЭ и зависимость его амплитуды на выходе усилителя  $V_a$  от амплитуды импульсного прямоугольного сигнала модуляции  $V_m$ , идущего на модулятор, при различных напряжениях высокочастотного сигнала накачки  $V_0$  в случае возникновения и без автоколебаний. Полученные результаты приведены на рис. 3, 4.

Осциллограммы сигналов ПАЭ (рис. 3) показывают форму переходных участков при включении и выключении ПАВ, когда подается на амплитудный модулятор прямоугольный сигнал модуляции  $V_m$  длительностью 20 мкс. Отметим, что для исследуемой слоистой структуры, в отличие от [17], переходные участки нельзя аппроксимировать одной экспонентой с некоторым временем релаксации. На них можно выделить быструю и медленную релаксации, характерные для релаксационных процессов на быстрых и медленных поверхностных состояниях полупроводника [19].

Амплитудные зависимости  $V_a$  от  $V_m$  (рис. 4) показывают характер нелинейности всей системы. В частности, значение  $V_a$  при увеличении  $V_m$  при малых значениях увеличивается линейно, а далее стремится к насыщению. Скорость роста тем выше, чем больше амплитуда сигнала накачки  $V_0$ . Автоколебания возникают в случае  $V_a > V_m$  на участке вблизи нуля.

Обсудим возможность возникновения стохастических автоколебаний в слоистой структуре пьезоэлектрик-полупроводник. Для этого, не останавливаясь на физике образования ловушечного ПАЭ, который ранее обсуждался (см., например, [8, 15–17]), приведем феноменологическое рассмотрение. Будем считать, что при распространении ПАВ возникает ПАЭ, амплитудные и переходные характеристики которого имеют показанные на рис. 3, 4 свойства. При этом отметим, что при рассмотрении ловушечного ПАЭ и акустоэлектрических автоколебаний недостаточно учесть один уровень захвата на поверхности полупроводника, как это делалось в [13, 14]. Это связано с тем, что в этом случае фазовое пространство рассматриваемой системы является двумерным, а для возникновения стохастических автоколебаний необходимым условием является размерность фазового пространства более двух [1–5]. Поэтому в феноменологической модели в ловушечном ПАЭ в слоистой структуре в полупроводнике учтем два уровня захвата носителей заряда на поверхностные состояния. (Это соответствует обсуждаемым выше осциллограммам для сигнала ПАЭ и свойствам поверхности полупроводника [19].)

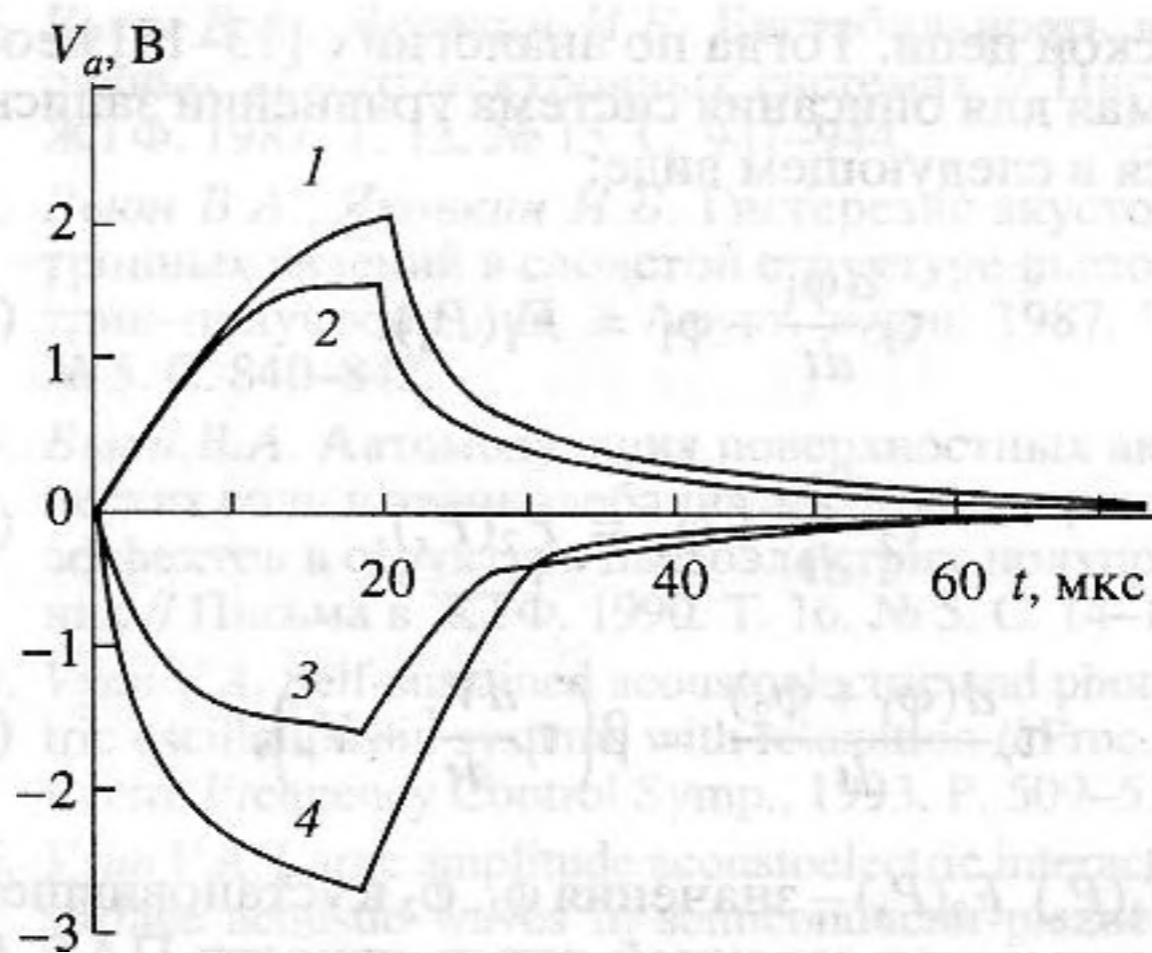


Рис. 3. Форма сигналов ПАЭ  $V_a$  для различных амплитуд сигналов импульсных напряжений модуляции  $V_m = +2.0$  В (1, 2),  $-2.0$  В (3, 4) и накачки  $V_0 = 1.5$  В (1, 4),  $0.6$  В (2, 3)

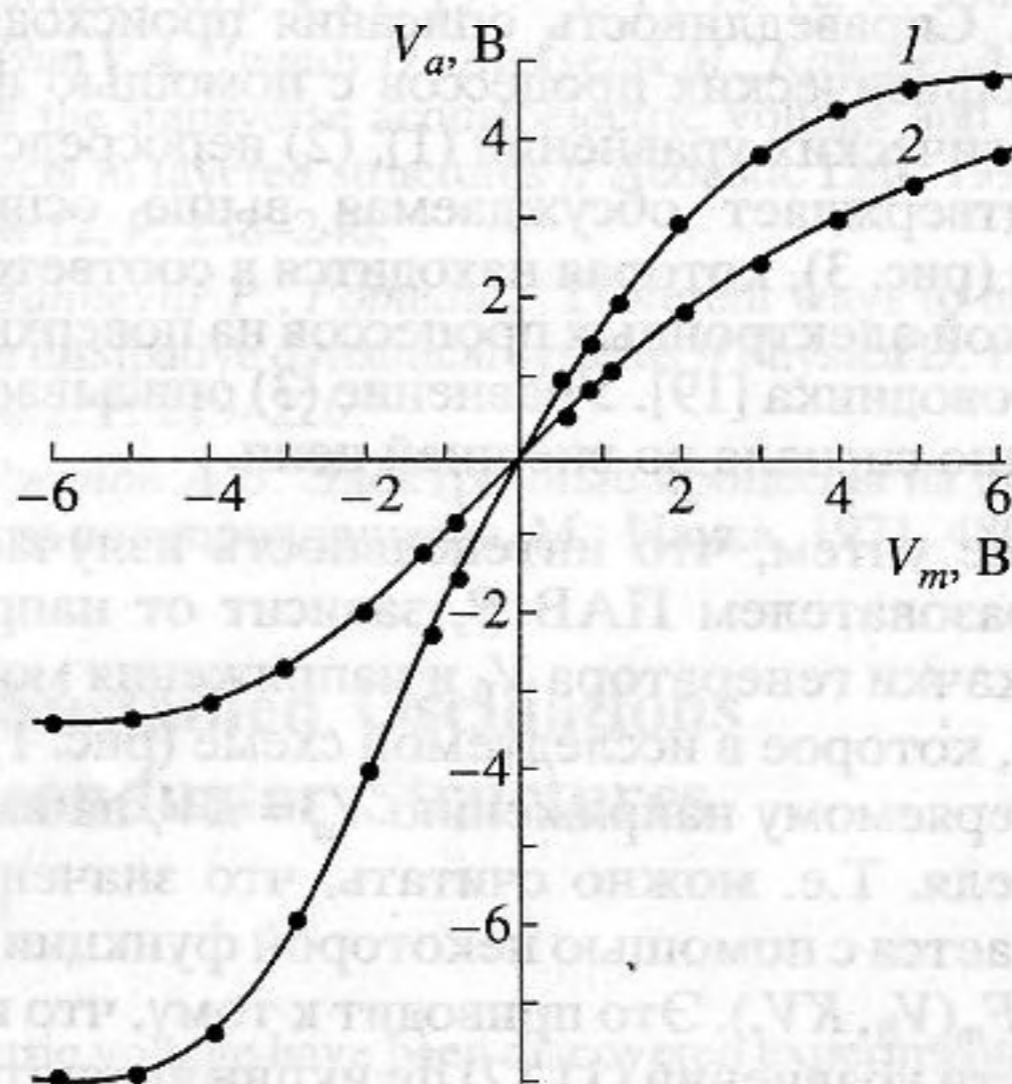


Рис. 4. Зависимость напряжения ПАЭ  $V_a$  от напряжения модуляции  $V_m$  для различных напряжений накачки  $V_0 = 1.5$  В (1),  $0.6$  В (2).

Тогда, учитывая релаксацию ловушечного ПАЭ за счет захвата носителей заряда на уровни захвата, будем считать, что на поверхности полупроводника электрический потенциал складывается из двух частей  $\phi_1, \phi_2$ , связанных с этими уровнями. Также учтем, что источник эдс, а именно поверхностный потенциал (который равен сумме изменения поверхностных потенциалов  $-\phi_1$  и  $-\phi_2$ , создаваемых захватом носителей заряда на уровни захвата с временами релаксации  $\tau_1, \tau_2$ ) через емкость структуры  $C$ , подключается к усилителю с входным сопротивлением  $R$  и емкостью  $C$ . Это приводит к тому, что напряжение на входе усилителя  $V_r$  связано с  $(\phi_1 + \phi_2)$  уравнением для элект-

рической цепи. Тогда по аналогии с [13–15] необходимая для описания система уравнений записывается в следующем виде:

$$\tau_1 \frac{d\varphi_1}{dt} + \varphi_1 = F_1(P_s), \quad (1)$$

$$\tau_2 \frac{d\varphi_2}{dt} + \varphi_2 = F_2(P_s), \quad (2)$$

$$\tau_r \frac{d(\varphi_1 + \varphi_2)}{dt} = \beta \left( \tau_r \frac{dV_r}{dt} + V_r \right), \quad (3)$$

где  $F_1(P_s)$ ,  $F_2(P_s)$  – значения  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  в установившемся режиме при заданной интенсивности ПАВ  $P_s$ ;  $\tau_r = RC_0$  – время релаксации цепи (которое в эксперименте составляло 50 мкс);  $C_0 = C_s + C$ ;  $\beta = C_0/C_s$ . Уравнения (1), (2) описывают релаксационный характер ПАЭ, напряжение которого равно  $(\varphi_1 + \varphi_2)$  и обусловлено захватом носителей заряда на два уровня. Справедливость описания происходящих электрофизических процессов с помощью феноменологических уравнений (1), (2) непосредственно подтверждает обсуждаемая выше осциллограмма (рис. 3), которая находится в соответствии с физикой электронных процессов на поверхности полупроводника [19]. Уравнение (3) описывает релаксацию сигнала во внешней цепи.

Далее учтем, что интенсивность излучаемых преобразователем ПАВ  $P_s$  зависит от напряжения накачки генератора  $V_0$  и напряжения модуляции  $V_m$ , которое в исследуемой схеме (рис. 1) равно измеряемому напряжению  $V_a = KV_r$  на выходе усилителя. Т.е. можно считать, что значение  $P_s$  выражается с помощью некоторой функции от  $V_0$  и  $KV_r$ :  $F_m(V_0, KV_r)$ . Это приводит к тому, что в правой части уравнений (1), (2) функции являются зависящими от  $V_0$  и  $KV_r$ :  $F_1(V_0, KV_r)$ ,  $F_2(V_0, KV_r)$ . Так, в зависимости от модулирующего напряжения  $KV_r$  эти функции имеют вид, аналогичный представленным на рис. 4 зависимостям.

Не останавливаясь на конкретном виде функций  $F_1(V_0, KV_r)$  и  $F_2(V_0, KV_r)$ , отметим некоторые свойства полученной после этого системы уравнений (1)–(3). Она является замкнутой нелинейной дифференциальной системой уравнений относительно трех неизвестных  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $V_r$  с параметрами  $K$  и  $V_0$ . При изменении этих параметров  $K$  и  $V_0$  система уравнений (1)–(3) претерпевает несколько бифуркаций. Так, при увеличении параметра  $V_0$  или  $K$  происходит бифуркация Хопфа и возникают регулярные автоколебания. После линеаризации системы уравнений (1)–(3) условие равенства нулю ее детерминанта позволяет получить характеристическое уравнение (например, аналогично [3]) и для случая квазигармонических

автоколебаний найти выражение для циклической частоты:

$$\omega = \{2/[a_1 + (a_1^2 + a_2)^{1/2}]\}^{1/2}, \quad (4)$$

а также критерий возникновения автоколебаний в мягком режиме:

$$\frac{dF_1(V_0, KV_r)}{dV_r} > \beta \frac{(\tau_1 + \tau_2)\tau_r + \tau_1\tau_2 - 1/\omega^2}{\tau_r(\tau_2 + \tau_1\gamma)}, \quad (5)$$

где

$$a_1 = [(\tau_1\tau_r - \tau_2^2) + (\tau_2\tau_r - \tau_1^2)\gamma]/(1 + \gamma),$$

$$a_2 = 4\tau_1\tau_2\tau_r(\tau_2 + \gamma\tau_1)/(1 + \gamma),$$

$$\gamma = [dF_2(V_0, KV_r)/dV_r]/[dF_1(V_0, KV_r)/dV_r],$$

а производные берутся при  $V_r = 0$ . (Результат (4), (5) совпадает с частным [13, 14] в случае учета ловушечного ПАЭ с одним уровнем захвата, когда  $\omega = (\tau_1\tau_r)^{-1/2}$ .)

При увеличении параметров  $V_0$  или  $K$  происходит другая бифуркация, когда возникают стохастические автоколебания. При этом следует отметить, что поскольку фазовое пространство рассматриваемой системы уравнений имеет размерность больше двух (а именно трехмерное), то удовлетворяется необходимое условие возникновения стохастических автоколебаний [1–5]. Но это еще не является достаточным условием. Окончательное установление стохастических автоколебаний трудоемко и возможно только численно при решении нелинейной дифференциальной системы уравнений (1)–(3) с учетом экспериментальных результатов (рис. 3, 4). Проведенные оценки показывают возможность возникновения стохастических автоколебаний.

Таким образом, в слоистых структурах пьезоэлектрик–полупроводник при наличии ПАЭ ловушечного типа, обусловленного захватом носителей заряда на несколько уровней полупроводника, в системе с внешней обратной связью возможны не только регулярные, но и стохастические акустоэлектронные автоколебания (странный аттрактор или динамический хаос). Эти автоколебания, как и акустоэлектронная бистабильность [9–12] возникают не за счет отрицательной дифференциальной проводимости полупроводника или образования акустоэлектронных доменов, а за счет наличия релаксационных процессов на поверхности полупроводника.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 96-02-19393).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.; Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорга-

- низующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985. 423 с.
2. *Неймарк Ю.И., Ланда П.С.* Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 424 с.
  3. *Дмитриев А.С., Кислов В.Я.* Стохастические колебания в радиофизике и электронике. М.: Наука, 1989. 280 с.
  4. *Шустер Г.* Детерминированный хаос. Введение. М.: Мир, 1989. 280 с.
  5. *Шёлль Э.* Самоорганизация в полупроводниках: Неравновесные фазовые переходы в полупроводниках, обусловленные генерационно-рекомбинационными процессами. М.: Мир, 1991. 464 с.
  6. *Гуляев Ю.В., Пустовойт В.И.* Усиление поверхностных волн в полупроводниках // ЖЭТФ. 1964. Т. 47. № 12. С. 2251–2253.
  7. *Коршак Б.А., Лямов В.Е., Солодов И.Ю., Еленский В.Г.* Нелинейные акустические устройства обработки сигнальной информации // Зарубежн. радиоэлектрон. 1981. № 1. С. 58–77.
  8. *Вьюн В.А., Ржанов А.В., Яковкин И.Б.* Акустоэлектронные методы исследования поверхности полупроводников. Новосибирск: ИФП СО АН СССР, 1987. 126 с.
  9. *Vyun V.A., Yakovkin I.B.* Nonlinear acoustoelectronic phenomena in layered structures // Int. J. Engng. Sci. 1991. V. 29. № 3. P. 411–418.
  10. *Вьюн В.А., Гайнер А.В., Сурдутович Г.И., Яковкин И.Б.* Гистерезисные явления в акустоэлектронных структурах // Докл. АН СССР. 1987. Т. 296. № 3. С. 583–587.
  11. *Вьюн В.А., Яковкин И.Б.* Бистабильность в гибридных акустоэлектронных системах // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 15. С. 941–944.
  12. *Вьюн В.А., Яковкин И.Б.* Гистерезис акустоэлектронных явлений в слоистой структуре пьезоэлектрик–полупроводник // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 5. С. 840–842.
  13. *Вьюн В.А.* Автомодаляция поверхностных акустических волн и автоколебания акустоэлектрических эффектов в структуре пьезоэлектрик–полупроводник // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 5. С. 14–18.
  14. *Vyun V.A.* Self-sustained acoustoelectric and photoelectric oscillations in systems with relaxation // Proc. IEEE Intern. Frequency Control Symp., 1993. P. 509–513.
  15. *Vyun V.A.* Large amplitude acoustoelectric interaction of surface acoustic waves in semiconductor-piezoelectric structure // Proc. IEEE Ultrasonics Symp., 1994. P. 441–445.
  16. *Гуляев Ю.В., Кмита А.М., Медведь А.В., Плесский В.П., Шибанова Н.Н., Федорец В.Н.* Исследование нелинейных акустоэлектрических эффектов и акустопроводимости в слоистой структуре  $\text{LiNbO}_3\text{-Si}$  // ФТТ. 1975. Т. 17. № 12. С. 3505–3515.
  17. *Vyun V.A., Ivanov O., Alekseyuk M., Kawalec A.* Kinetics of the transverse acoustoelectric voltage and photo effects in layered structures // Acoustic Lett. 1991. V. 14. № 12. P. 238–240.
  18. *Manneville P., Pomeau Y.* Different ways to turbulence in dissipative dynamical systems // Physica D. 1980. V. 1. № 2. P. 219–226.
  19. *Ржанов А.В.* Электронные процессы на поверхности полупроводников. М.: Наука, 1971. 480 с.

## Stochastic Acoustoelectric Self-Sustained Oscillations in Layered Piezoelectric–Semiconductor Structures

V. A. V'yun

Stochastic self-sustained oscillations of transverse acoustoelectric voltage have been discovered experimentally in layered piezoelectric–semiconductor structures with external feedback. An investigation of the spectral functions and the phase portrait of self-sustained oscillations has revealed the presence of a strange attractor (dynamic chaos). A possible explanation for the phenomenon is given taking into account the relaxation properties of the transverse acoustoelectric trapping effect caused by the trapping of charge carriers into several surface states of a semiconductor.