

Автосолитоны в системе электронно-дырочная плазма/экситоны в кремнии при температуре 4.2 К

© А.М. Мусаев

Институт физики им. Х.И. Амирханова Дагестанского научного центра Российской академии наук, 367003 Махачкала, Россия

(Получена 22 января 1999 г. Принята к печати 26 апреля 1999 г.)

Приведены результаты экспериментального обнаружения и исследования автоколебаний в системе электронно-дырочная плазма/экситон в Si при ударной ионизации экситонов в постоянном электрическом поле. Показано, что автоколебания тока обусловлены нарушением однородного распределения плотности электронно-дырочной плазмы и ее расслоением, связанным с возникновением сильно неравновесных структур — автосолитонов. Затравкой для спонтанного возбуждения автосолитонов является микроплазменный пробой обратно смещенного барьера Шоттки.

В работе [1] обнаружены автоколебания плотности неравновесной электронно-дырочной плазмы (ЭДП) в Si в области низких температур $T \simeq 4.2 \div 15$ К, при фотовозбуждении электронно-дырочных пар в сверхвысокочастотном (СВЧ) поле. Возникновение автоколебаний плотности ЭДП объяснено ударной ионизацией экситонов электронами, разогретыми в СВЧ поле, при условии $\omega\tau_p > 1$. Причиной неустойчивости является рост температуры электронов в СВЧ поле с увеличением их концентрации. В работах [1,2] показано, что в условиях разогрева электронов, когда $\omega\tau_p < 1$, (эквивалентного разогреву электронов в постоянном электрическом поле) автоколебания в образце не возникают.

В работе [3] обнаружены автоколебания тока в фотовозбужденном p -Si(B) при 2 К в постоянном электрическом поле. Автоколебания обнаружены только в образцах p -Si(B) с концентрацией термических донорных комплексов, когда $N_D \gtrsim 10^{16} \text{ см}^{-3} > N_A$, где N_A — исходная концентрация примеси бора в кремнии. Физический механизм автоколебаний авторы связывают с критическим равновесием между ударной ионизацией экситонов и степенью их захвата на термических донорах.

В данной работе приводятся результаты экспериментального обнаружения и исследования автоколебаний в неравновесной системе — ЭДП/экситоны в кремнии при ударной ионизации экситонов в постоянном электрическом поле при гелиевых температурах. Как показывают результаты эксперимента, возникновение автоколебаний связано с нарушением однородности распределения плотности плазмы и ее расслоением, вызванным появлением сильно неравновесного состояния — автосолитона (АС).

В работах [4,5] показано, что ЭДП является одним из примеров активных систем с диффузией, из общей нелинейной теории которой следует, что в области устойчивого однородного состояния таких систем можно внешним возмущением возбудить (АС также могут возникнуть спонтанно вблизи малых неоднородностей) установившиеся уединенные состояния, формы которых не зависят от вида начального возмущения, а опре-

деляются параметрами конкретной системы. Такие самоподдерживающиеся собственные локализованные состояния — автосолитоны неравновесных систем ранее экспериментально обнаружены и исследованы в [6,7].

Исследования проводились на образцах p -Si(P) с концентрацией примесей $N_D - N_A \simeq 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, изготовленных в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами $3.7 \times 1.3 \times 2.1 \text{ мм}^3$. Кристаллографическая ориентация образца и конфигурация воздействия электрического поля, а также фотовозбуждения показаны на рис. 1. Контакты создавались путем сплавления сплава Au (Sb) в вакууме на противоположных гранях размером $3.7 \times 1.3 \text{ мм}^2$. Грань образца $3.7 \times 2.1 \text{ мм}^2$ освещалась прямоугольными импульсами от источника монохроматического излучения на основе инфракрасных диодов из GaAs с энергией кванта $\hbar\omega \simeq 1.5 \text{ эВ} > \varepsilon_G^{\text{Si}}$. Длительность импульсов фотовозбуждения (40 мкс) обеспечивала установление стационарного состояния концентрации носителей и экситонов. Максимальная интенсивность фотовозбуждения $I_{p \text{ max}}$ соответствовала концентрации генерируемых электронно-дырочных пар $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Синхронно с импульсами фотовозбуждения на образец подавались импульсы постоянного электрического поля с длительностью до 100 мкс, которые задерживались относительно импульсов фотовозбуждения на $\tau_E = 0 \div 1.0$ мс. Частота подачи импульсов 3 Гц обеспечивала установление температуры образца 4.2 К к

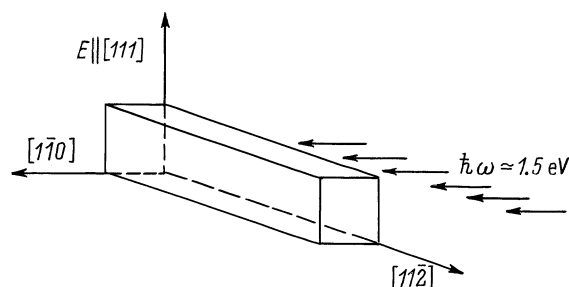


Рис. 1. Конфигурация воздействия электрического поля и фотовозбуждения относительно кристаллографических осей образца.

началу каждого импульса. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) снимались путем подачи пилообразного напряжения длительностью до 20 мкс.

На рис. 2 показаны осциллограммы тока через образец при различных значениях интенсивности фотовозбуждения и напряженности прикладываемого электрического поля. Как видно из осциллограмм, после подачи импульса электрического поля с некоторой задержкой появляется импульс тока проводимости. Время задержки этого импульса уменьшается с увеличением напряженности электрического поля и интенсивности фотовозбуждения. Характерной особенностью временной зависимости проводимости при $\tau_E \neq 0$ является появление первичного одиночного пика тока и с возникновением следующих типов колебаний: одиночных импульсов, релаксационных, хаотических. При одновременной подаче импульсов фотовозбуждения и электрического поля временная задержка между первым пиком и последующими отсутствует. На рис. 3 показаны типичные динамические

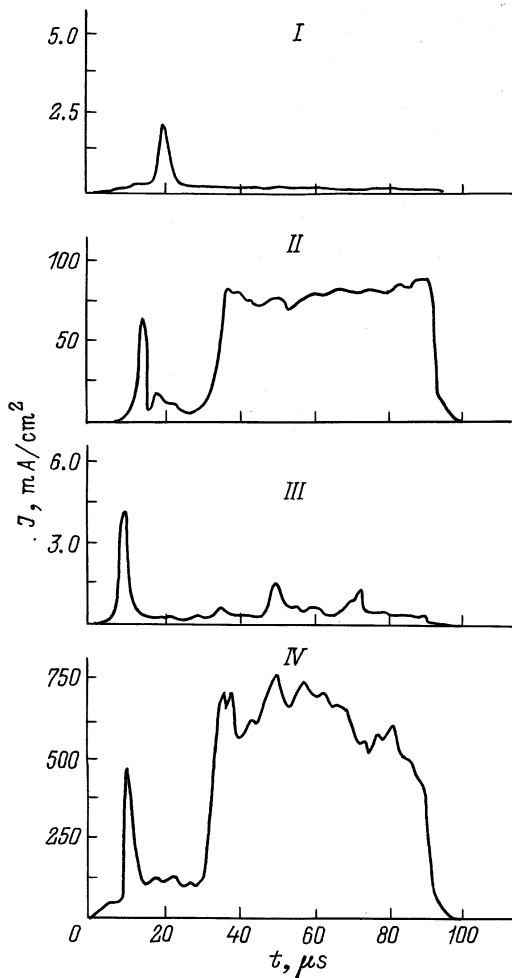


Рис. 2. Осциллограммы тока при различных значениях напряженности электрического поля и интенсивности фотовозбуждения: *I* — $E = 1.5$ кВ/см, $I_p = 0.05 I_{p \max}$; *II* — $E = 1.5$ кВ/см, $I_p = 0.5 I_{p \max}$; *III* — $E = 2.5$ кВ/см, $I_p = 0.05 I_{p \max}$; *IV* — $E = 2.5$ кВ/см, $I_p = 0.5 I_{p \max}$.

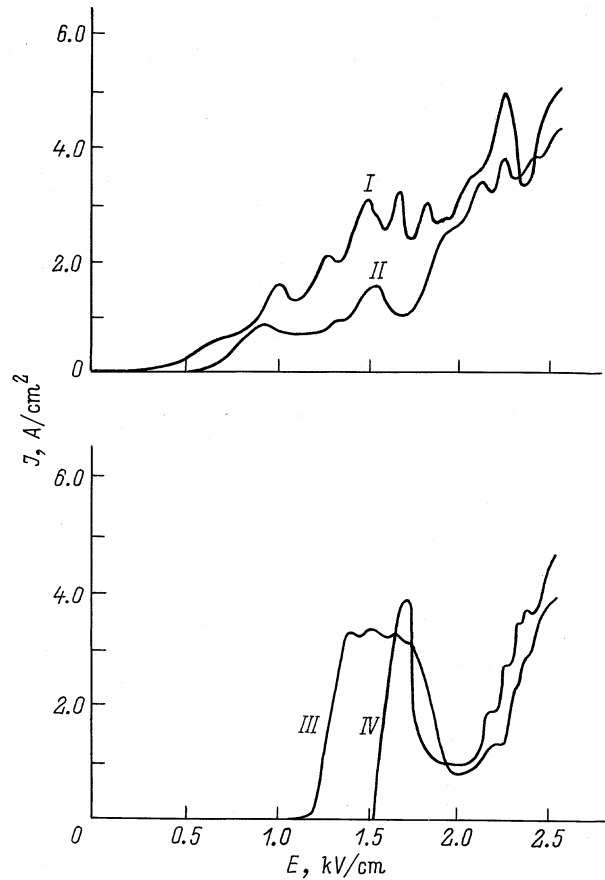


Рис. 3. Динамические вольт-амперные характеристики образца при различных значениях задержки импульсов электрического поля относительно импульсов фотовозбуждения (τ_E). *I* — ВАХ во время фотовозбуждения; *II* — $\tau_E = 1.0$ мкс; *III* — $\tau_E = 10$ мкс; *IV* — $\tau_E = 30$ мкс.

ВАХ образца, полученные в режиме генератора напряжения при различных значениях задержки импульсов пилообразного напряжения относительно импульсов фотовозбуждения (τ_E). Пороговое поле пробоя E_B зависит как от интенсивности фотовозбуждения I_p , так и от времени задержки τ_E . С уменьшением интенсивности фотовозбуждения и с увеличением времени задержки τ_E пороговое поле пробоя E_B увеличивается. На ВАХ в зависимости от режима их измерения наблюдаются как *S*-образные, так и *N*-образные участки отрицательного дифференциального сопротивления. Начальный пик тока особенно выражено проявляется при больших значениях времени задержки τ_E (рис. 3, кривые *III*, *IV*). Зондовые измерения при малой напряженности электрического поля показывают наличие стационарного высокополевого домена на катоде образца. С увеличением напряженности поля до пороговой величины в образце скачком возникают колебания тока. Эти явления ранее были обнаружены автором на образцах кремния с барьером Шоттки [8].

Для объяснения явления необходимо рассмотреть физические процессы, происходящие в приконтактной и в базовой областях образца.

Как известно, с кремнием *n*-типа практически все металлы образуют барьер Шоттки с относительно большой высотой (более 0.5 эВ). Поэтому для снижения контактного потенциального барьера и получения омического контакта непосредственно у границы с металлом создают сильно легированный примесями тонкий слой. Обедненная область при этом так тонка, что существенной становится полевая эмиссия, и при малых смещениях контакт имеет малое сопротивление [9]. Однако при низких температурах и небольших концентрациях примесей в образце ширина обедненного приконтактного слоя становится существенной. При этом туннельная составляющая тока через контакт уменьшается и ток в основном обусловлен генерацией электронно-дырочных пар в обедненной области [9]. В этом случае характерным является неоднородность пробоя по площади барьера, связанного с микроплазменным механизмом пробоя и с локализацией тока на отдельных участках с малым поперечным сечением [10]. Микроплазменный пробой области пространственного заряда (ОПЗ) у катода является затравкой для спонтанного возбуждения АС в образце. Генерация носителей в ОПЗ приводит к перераспределению напряжения между ОПЗ и базой образца, что в свою очередь приводит к ударной ионизации экситонов в базовой области. Для поддержания пробоя экситонов необходимо, чтобы концентрация экситонов превышала некоторую критическую для данного поля величину. Это условие выполняется благодаря радиальной диффузии экситонов из периферийных областей образца. Однако процесс эксклюзии свободных носителей, а также уменьшение концентрации экситонов в области пробоя при ограниченной подпитке экситонами этой области могут привести к срыву ионизации экситонов, и система возвращается в исходное состояние. Наблюдаемый на ВАХ и временных характеристиках начальный выброс тока связан именно с ионизацией ограниченного количества свободных экситонов.

Свободные носители, поглощая энергию поля, вызывают рост температуры кристаллической решетки. Это приводит к термической диссоциации связанных экситонов, т.е. когда температура решетки достигает $T \geq 10$ К, экситоны в основном переходят в свободное состояние. Времена жизни экситонов при этом сильно увеличиваются [11]. При пробое рост концентрации свободных носителей происходит лавинообразно. Концентрация экситонов в этой области соответственно уменьшается, образуя уединенное устойчивое локализованное состояние. Несмотря на резкое возрастание концентрации свободных носителей в области локализации АС, произведение $N_{ex}D_{ex}$ в ней практически постоянно, что обусловлено компенсацией ионизированных экситонов диффузионным потоком экситонов, направленным в эту область. Расслоение плотности ЭДП подтверждают зондовые измерения, а также исследования по распределе-

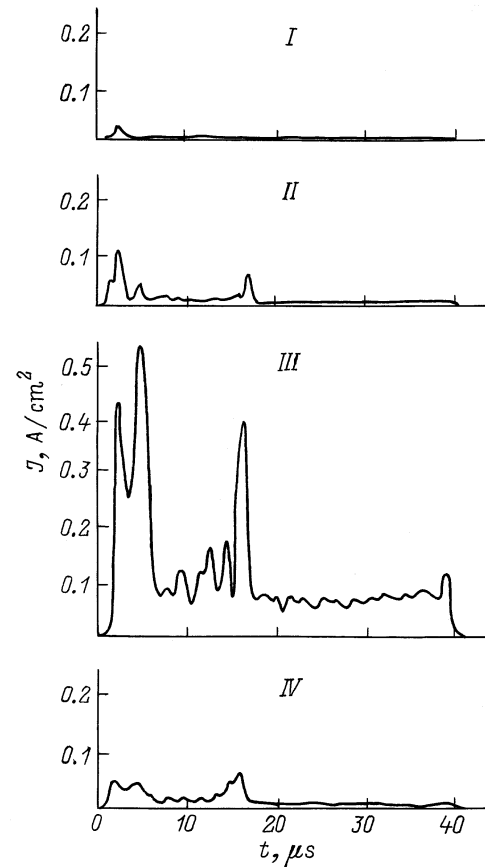


Рис. 4. Осциллограммы тока (*I ÷ IV*) участков образца с расщепленным анодным контактом при $E = 2.2$ кВ/см, $\tau_E = 10$ мкс, $I_p = 0.1 I_{p \max}$.

нию плотности тока в образце посредством расщепления анодного контакта. На рис. 4 показаны осциллограммы тока (*I ÷ IV*) областей образца при расщеплении анодного контакта на четыре равные части. Как видно из этих рисунков, АС локализован в *III* области образца. Существенным фактором, влияющим на кинетические эффекты экситонов при гелиевых температурах в Si, является поток неравновесных фононов [12]. При разогреве свободных носителей в электрическом поле происходит интенсивная генерация неравновесных фононов. Длина свободного пробега длинноволновых фононов в области гелиевых температур в Si велика и сравнима с размерами образца. Этот поток является достаточно мощным для того, чтобы увлечь экситоны со скоростью, близкой к скорости звука, к поверхности образца. Резкое изменение кинетики проводимости ионизированных экситонов (типа излома кривой с последующим быстрым спадом почти до нуля в течение короткого времени) можно объяснить воздействием на экситоны потока неравновесных фононов. С этим фактором связана и наблюдаемая в данной работе пульсация автосолитонов. Неравновесная локализованная область обусловлена возрастающей зависимостью скорости ионизации экситонов ν_i от концентрации свободных носителей n_e , с одной

стороны, и уменьшением потока экситонов в область ионизации вследствие воздействия фононов, с другой стороны. Временная эволюция плотности электронов n_e и экситонов N_{ex} в постоянном электрическом поле определяется уравнениями

$$\partial n_e / \partial t = -e^{-1} \operatorname{div} J_e - \gamma n_e^2 - n_e / \tau_e + \beta n_e N_{ex}, \quad (1)$$

$$\partial N_{ex} / \partial t = -\operatorname{div} J_{ex} + \gamma n_e^2 - N_{ex} / \tau_{ex} - \beta n_e N_{ex}, \quad (2)$$

где $\tau_e = l/v_e$ — время дрейфа электронов через образец, τ_{ex} — время жизни экситонов, γ — коэффициент связывания экситонов, β — коэффициент ударной ионизации экситонов, J_e , J_{ex} — плотность потока концентрации электронов и экситонов. Поток концентрации экситонов определяется диффузией и фононным увлечением

$$J_{ex} = D_{ex} \nabla N_{ex} - \lambda_{ep} g N_{ex}, \quad (3)$$

где D_{ex} — коэффициент диффузии экситонов, λ_{ep} — коэффициент электрон-фононного взаимодействия;

$$g \sim 1/c \rho [n_e e \mu E^2 v/V - \lambda/b(T - T_0)], \quad (4)$$

c — удельная теплоемкость, ρ — плотность, $\mu = \mu_n \simeq \mu_p$ — подвижность носителей, v/V — доля объема, соответствующая локализации АС; λ — коэффициент теплопередачи, b — толщина образца, T_0 — температура окружающей среды.

В данном механизме расслоения ЭДП роль активатора играет концентрация свободных носителей (n_e), а роль ингибитора — функция потока концентрации экситонов, зависящая от взаимодействия с фононным потоком. Положительная обратная связь по активатору связана с возрастающей зависимостью скорости ионизации экситонов ν_i от концентрации носителей n_e . Демпфирующая роль ингибитора определяется тем, что с увеличением концентрации свободных носителей увеличивается генерируемый ими поток неравновесных фононов, увлекающих экситоны, тем самым ограничивая их поступление в область ионизации. Это в свою очередь из-за сильной зависимости скорости ионизации от концентрации экситонов приводит к резкому уменьшению концентрации носителей в области ионизации. Существование АС в данной системе определяется величинами

$$\varepsilon = l/L, \quad \alpha = \tau_e / \tau_{ex},$$

где

$$l = (D_e \tau_e)^{1/2}, \quad L = (D_{ex} \tau_{ex})^{1/2}$$

— диффузионная длина свободных носителей и экситонов, D_e , D_{ex} — коэффициенты диффузии носителей и экситонов. Устойчивость АС объясняется тем, что стенка АС имеет малый размер $l \ll d \ll L$, где нарастание концентрации свободных носителей демпфируется соответствующим уменьшением концентрации экситонов. Такое демпфирование реализуется лишь в некотором диапазоне изменений E . При $E > E_c$

статический АС в результате неустойчивости превращается в пульсирующий. Возникновение пульсирующих АС связано с тем, что $\tau_e \ll \tau_{ex}$. При $\tau_e \ll \tau_{ex}$ за флуктуацией концентрации носителей (активатора) n_e с частотой порядка $(\tau_e \tau_{ex})^{-1/2}$ флуктуация потока экситонов (ингибитора) $\sim N_{ex} D_{ex}$ не успевает варьироваться, поэтому флуктуации концентрации n_e нарастают. Рассмотренная система является активной системой с перекрестной диффузией и самопроизводством частиц. В соответствии с классификацией систем, приведенной в [4], данная модель относится к классу $K\Omega$ -систем. Реализуемое в системе явление $K\Omega$ -типа допускает существование пульсирующих АС, объем и форма которых периодически изменяются во времени.

Список литературы

- [1] Б.М. Ашкинадзе, А.В. Субашиев. Письма ЖЭТФ, **46**, 284 (1987).
- [2] Э.М. Шахвердиев, Э.А. Садыхов. ФТП, **28**, 424 (1994).
- [3] H. Weman, A. Henry, V. Monemar. Sol. St. Electron., **32**, 1563 (1989).
- [4] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. УФН, **157**, 201 (1989).
- [5] Б.С. Кернер, В.В. Осипов. УФН, **160**, 1 (1990).
- [6] Б.С. Кернер, Д.П. Литвин, В.И. Санкин. Письма ЖТФ, **13**, 819 (1987).
- [7] М.Н. Винославский. ФТТ, **31**, 315 (1989).
- [8] А.М. Мусаев. ФТП, **31**, 724 (1997).
- [9] Э.Х. Родерик. *Контакты металл-полупроводник* (М., Радио и связь, 1982).
- [10] З.С. Грибников. ФТП, **11**, 2111 (1977).
- [11] R.V. Hammond, R.N. Silver. Appl. Phys. Lett., **36**, 68 (1979).
- [12] В.С. Багаев, Т.И. Галкина, Н.Н. Сибельдин. В кн.: *Электронно-дырочные капли в полупроводниках* (М., Наука, 1988).

Редактор В.В. Чалдышев

Autosolitons in a electron-hole plasma/exitons system of silicon at 4.2 K

A.M. Musaev

Kh.I. Amirkhanov Institute of Physics Daghestan Scientific Center of Russian Academy of Sciences, 367003 Makhachkala, Russia

Abstract Results of an experimental discovery and investigation of auto-oscillation for electron-hole plasma/exitons system in the Si at impact ionization of exitons in direct electric field are presented. It is shown that current auto-oscillations occur due to the destruction of homogeneous distribution of the electron-hole plasma density and the electron-hole plasma stratification caused by formation of strong nonequilibrium state of — auto-solitons. The microplasma breakdown of an inversely displaced Schottky barrier is the cause for the spontaneous excitation of autosolitons.