

06

Ударно-ионизационные автосолитоны в кремнии с глубокими примесными уровнями

© А.М. Мусаев

Институт физики Дагестанского научного центра РАН, Махачкала
E-mail: akhmed-musaev@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 мая 2003 г.

Приводятся результаты экспериментального обнаружения и исследования автосолитонов (АС) с самопроизводством носителей заряда при ударной ионизации глубоких акцепторных уровней индия в кремнии в сильных электрических полях при температуре 77 К. В рассматриваемой модели возбуждения АС роль активатора играет концентрация свободных носителей заряда, а роль ингибитора температура носителей. Существование АС определяется тем, что область высокой концентрации носителей в центре АС не расплывается, так как диффузионный поток из центра АС уравнивается термодиффузионным.

Полупроводники и полупроводниковые структуры являются наиболее подходящими модельными системами с активной кинетической средой — неравновесной электронно-дырочной плазмой (ЭДП) для исследования механизмов образования и эволюции пространственно-уединенных диссипативных структур — автосолитонов (АС) [1].

Экспериментальное исследование ионизационных АС проведено в нескольких работах. В [2] показано, что ЭДП, полученная ударной ионизацией в пленках n -GaAs, расслаивается на шнуры тока в плотной ЭДП и на страты электрического поля в области неплотной ЭДП. В работе [3] исследованы пиковые АС в кремниевых $p-i-n$ -структурах, возбужденные локализованным импульсом света. В [4] изучены пульсирующие АС в кремнии с самопроизводством носителей заряда при ударной ионизации экситонов в сильном электрическом поле.

В данной работе приводятся результаты экспериментального обнаружения и исследования АС с самопроизводством носителей заряда при ударной ионизации глубоких акцепторных уровней индия ($\epsilon_h = 0.16$ eV) в кремнии в сильных электрических полях при температуре 77 К.

Исследования проводились на компенсированных образцах $p\text{-Si}\langle\text{In}\rangle$ с концентрацией примесей $N_A - N_D = 6.0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, изготовленных в виде прямоугольных пластин размером $5.4 \times 1.8 \times 0.4$, плоскость (5.4×1.8) которых перпендикулярна кристаллографическому направлению [111]. Антизапорные контакты ($p^+ - p$) создавались на гранях (5.4×1.8) путем напыления алюминия с последующим его сплавлением или же сплавлением алюминиевой фольги. Данные контакты исключают влияние переходных характеристик контактов на кинетику развития тока при генерационно-рекомбинационных процессах в объеме образца [5]. Необходимым условием при этом является $\tau < \tau_i$, где τ , τ_i — характерное время развития генерационно-рекомбинационного процесса и время пролета носителей тока через образец соответственно. С целью исключения поверхностных эффектов на противоположных гранях образца наносились контакты с отступлением от краев на 0.25 mm. Изучение динамических вольт-амперных характеристик (ВАХ) осуществлялось путем приложения одиночных импульсов пилообразного напряжения в режиме генератора напряжения при различных скоростях роста напряжения. Для изучения развития неустойчивости тока во времени на образец подавались прямоугольные импульсы постоянного напряжения с длительностью до $50 \mu\text{s}$. Исследование неоднородности распределения плотности тока по сечению образца проводилось посредством секционирования катодного контакта.

При низких температурах в кремнии с глубокими примесными уровнями основным механизмом, приводящим к увеличению проводимости образца в сильных электрических полях, является ударная ионизация, возникающая при напряженностях электрических полей $10^3 - 10^4 \text{ V/cm}$ [5]. Кроме ударной ионизации существуют еще несколько механизмов, которые могут привести к увеличению концентрации носителей заряда с ростом электрического поля. Это — инжекция неосновных носителей, а также инжекция основных носителей в случае тока, ограниченного объемным зарядом. Существенным фактором является также увеличение концентрации дырок при термополевой генерации носителей заряда, которая с ростом электрического поля увеличивается (в результате эффекта Пула–Френкеля). При этом электрическое поле изменяет высоту максимального энергетического барьера на величину

$$\Delta\varepsilon = -e(eE/\pi\varepsilon)^{1/2}, \quad (1)$$

где E — напряженность электрического поля и ε — диэлектрическая проницаемость кремния. Зависимость скорости термополевой гене-

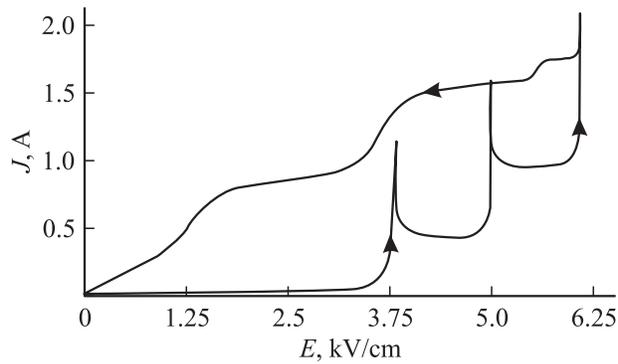


Рис. 1. Динамическая вольт-амперная характеристика образца (стрелками указаны прямой и обратный ход).

рации от электрического поля является экспоненциальной функцией величины $(\Delta\varepsilon/kT_0)$, которая в рассматриваемом случае притягивающего центра имеет вид [5]

$$\Delta\varepsilon/kT_0 = -0.84(E/10^4)^{1/2}(300\text{ K}/T_0), \quad (2)$$

где T_0 — температура решетки.

Анализ характера увеличения концентрации носителей заряда при различных скоростях роста электрического поля показывает, что эффект Пула–Френкеля при увеличении напряжения со скоростью не менее $40\text{ V}/\mu\text{s}$ не играет существенной роли. Это связано с тем, что в адиабатических условиях температура образца за короткое время не успевает существенно увеличиться, в то же время с ростом выделяемой джоулевой мощности роль данного эффекта возрастает. Основным механизмом увеличения концентрации основных носителей при этом является ударная ионизация примесей. Концентрация свободных носителей при напряженностях электрического поля, достаточных для эффективной ударной ионизации, определяется из условий баланса между скоростью захвата, ударной ионизации и термополевой генерации.

На рис. 1 показана типичная динамическая ВАХ образца, полученная при скорости роста пилообразного напряжения $50\text{ V}/\mu\text{s}$. Характерной особенностью наблюдаемой ВАХ является то, что в процессе увеличения напряжения образование пикообразных участков тока происходит

пороговым образом. С ростом электрического поля число пиков тока в системе увеличивается. Исследование ВАХ различных участков образца (при секционировании катодного контакта), приведенных на рис. 2, показало, что пики с пороговым характером роста тока принадлежат к различным участкам образца, причем эти пики в значительной степени подобны по форме и электрическим характеристикам. При уменьшении скорости роста пилообразного напряжения ВАХ образца постепенно видоизменяется. При этом напряжение ионизации примесей уменьшается, а зависимость $J(E)$ имеет не столь резкий характер, что объясняется джоулевым разогревом решетки и термополевой ионизацией примесей. Отсюда следует, что с увеличением температуры решетки режим ударной ионизации переходит в режим термополевой ионизации. Действием данного фактора можно объяснить и особенности ВАХ при обратном переходе, т.е. гистерезисное явление при спаде напряженности электрического поля. Результаты измерений показывают: чем больше мощность потерь в области ионизации, тем при меньших напряжениях происходит падение концентрации дырок. Роль эффекта Пула–Френкеля при напряженностях электрических полей, не превышающих поле ударной ионизации, существенна, но не очень велика. Как показано в работе [6], при низких температурах в кремнии, легированном индием, концентрация дырок при увеличении напряженности электрического поля от 10^2 до $4 \cdot 10^3$ В/см возрастает не более чем в 3 раза.

Спад тока в областях ионизации при росте электрического поля обусловлен рассеянием дырок на фононах и уменьшением подвижности носителей вследствие джоулевого разогрева области ионизации образца. В кремнии при температурах $T > 77$ К и при воздействии электрического поля доминирующим является рассеяние на деформационном акустическом и оптическом потенциалах, подвижность носителей уменьшается с ростом поля. Это подтверждают и зависимости проводимости образца от температуры при различных значениях приложенного электрического поля.

Полученные результаты позволяют непротиворечиво интерпретировать обнаруженные явления на базе модели статического АС с локальным самопроизводством носителей заряда, развитой в работе [1]. Затравками для спонтанного возбуждения АС могут быть как неоднородности распределения концентрации примесей, так и неоднородности другого характера, приводящие к ударной ионизации в

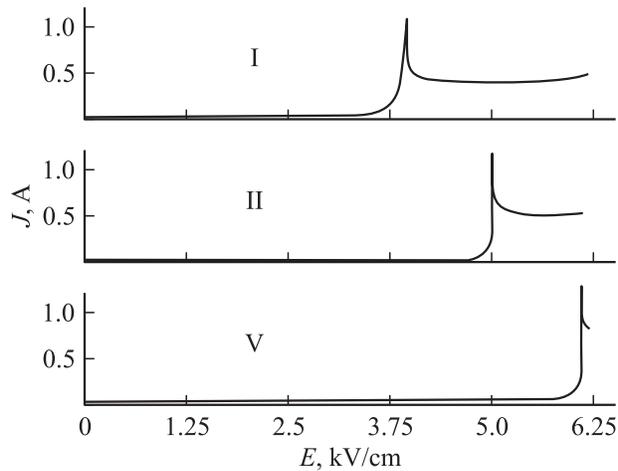


Рис. 2. Динамические вольт-амперные характеристики (I, II, V) участков образца с расщепленным катодным контактом.

локальных областях. В рассматриваемом механизме расслоения роль активатора играет концентрация свободных носителей заряда (p), а роль ингибитора — температура носителей. Положительная обратная связь по активатору связана с возрастающей зависимостью скорости ионизации глубоких примесных уровней, так как скорость ионизации является резко возрастающей функцией концентрации носителей заряда. Демпфирующая роль ингибитора связана с уменьшением температуры носителей заряда при их рассеянии на фонах, что ограничивает скорость ударной ионизации. При этом рост температуры в областях АС решетки приводит к еще большему уменьшению энергии носителей.

Распределения концентрации и потока энергии носителей в АС данной системы описываются диффузионными уравнениями. Бифуркационным параметром в данной модели является напряженность электрического поля, $\alpha = \tau_p / \tau_T \ll 1$, а отношение $\varepsilon = l/L$ в зависимости от параметров системы может быть как больше, так и меньше единицы. Где τ_p, l — характерное время и длина изменения концентрации и τ_T, L — характерные время и длина изменения средней температуры носителей заряда.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 02-02-17888.

Список литературы

- [1] Кернер Б.С., Осипов В.В. Автосолитоны. М.: Наука, 1991. 199 с.
- [2] Кернер Б.С., Синкевич В.Ф. // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 36. В. 10. С. 359–362.
- [3] Ващенко В.Н., Кернер Б.С., Осипов В.В. и др. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 10. С. 1705–1707.
- [4] Мусаев А.М. // ФТП. 1999. Т. 33. В. 10. С. 1183–1186.
- [5] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир, 1977. 568 с.
- [6] McCombs A.E. // Int. Journ. Electron. 1972. V. 32. P. 361–363.