

ПОЛЕВАЯ И УДАРНАЯ ИОНИЗАЦИЯ ГЛУБОКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ В ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С СЕЛЕКТИВНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

А. А. Кальфа, А. Б. Пашковский, А. С. Тагер

Научно-производственное объединение «Исток», 141120, Фрязино, Россия
(Получена 11.03.1992. Принята к печати 12.03.1992)

Исследовано влияние полевой и ударной ионизации глубоких энергетических уровней на форму вольт-амперных характеристик гетероструктурных полевых транзисторов с селективным легированием. Показано, что ударная ионизация проявляется даже при относительно малой поверхностной плотности уровней и может приводить к аномальной зависимости вольт-амперной характеристики транзистора от напряжения на затворе. Ударная ионизация глубоких уровней преобладает в истоковой части канала, в то время как в области статического домена преобладает ионизация полем затвора, а ионизация продольным электрическим полем несущественна.

Введение. Известно, что работа полевых транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием (ПТ ГСЛ) на основе $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ во многом определяется присутствием в $Al_xGa_{1-x}As$ глубоких уровней — так называемых $DХ$ -центров. В частности, $DХ$ -центры определяют температурные и временные нестабильности, гистерезис вольт-амперных характеристик (ВАХ), их чувствительность к свету и т. д. [1]. Было также показано, что высокая концентрация глубоких уровней (ГУ) при энергии ионизации (0.3 + 0.4) эВ может привести к деформации ВАХ при температуре $\cong 300$ К и в отсутствие освещения [2]. При этом предполагалось, что заполнение ГУ у границы гетероперехода определяется только их расстоянием от уровня Ферми (рис. 1). Однако в рабочем режиме принципиально возможны еще по крайней мере два механизма, определяющих ионизацию ГУ. Речь идет об ударной и полевой (вследствие эффекта Пула—Френкеля) ионизации примесных центров.

Простые оценки показывают, что оба эти эффекта, особенно с учетом значительного изменения эффективной энергии ионизации вдоль канала ПТ ГСЛ, могут вносить существенный вклад в изменение проводимости канала. Причем оба эти эффекта происходят на фоне пространственно неоднородного заполнения ГУ, обусловленного их различным положением (зависящим от напряжения на затворе) относительно уровня Ферми в различных областях канала.

Исследованию влияния ударной и полевой ионизации ГУ на статические ВАХ ПТ ГСЛ и посвящена данная работа.

1. Описание модели

Для расчетов использовалась гидродинамическая модель [3], в которой в каждом сечении канала квазиравновесное значение поверхностной плотности электронов n_s (рассчитываемое в приближении треугольной потенциальной ямы) заменялось эффективным значением

$$n_s^{\text{эф}} = n_s + n_s^y, \quad (1)$$

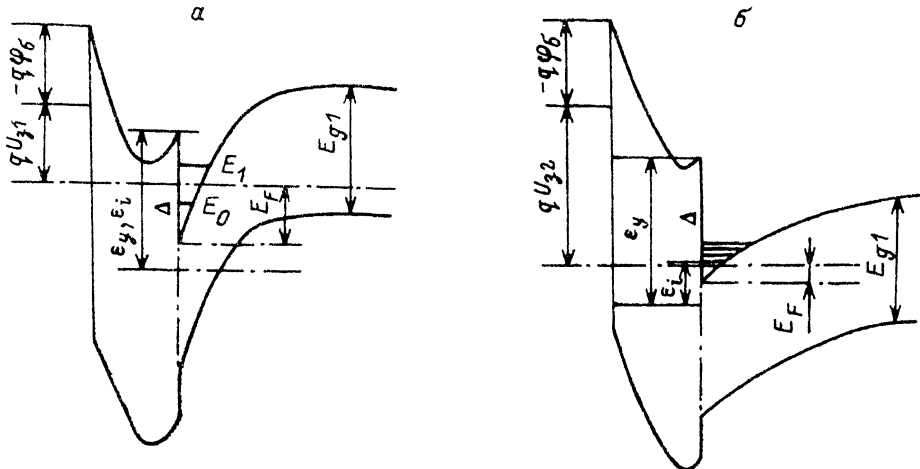


Рис. 1. Зонная диаграмма структуры металл— $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ с селективным легированием и плоскими уровнями. $a - U_{31}$, $b - U_{32}$; $U_{31} < U_{32}$.

где n_s^y — поверхностная плотность ГУ, ионизованных вследствие ударной или полевой ионизации.

В случае ионизации параллельным току полем [4]

$$n_s^y = N_s^y \cdot \exp\left(\frac{-\epsilon_{3\phi}}{kT}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{-\Delta\epsilon}{kT}\right) + \int_{\Delta\epsilon/kT}^{\epsilon_{3\phi}/kT} \exp\left\{ z - z^{3/2} \left(\frac{4}{3} \frac{(m^*)^{1/2} kT^{3/2}}{qhE} \right) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{\Delta\epsilon}{zkT}\right)^{5/2} \right] \right\} dz \right],$$

где

$$\Delta\epsilon = q \left(\frac{qE}{\pi\kappa} \right)^{1/2}.$$

В случае ударной ионизации n_s^y находится из уравнения

$$n_s^y K \sigma_3 \bar{v} n = (N_s^y - n_s^y) \sigma_i \bar{v}_i n_i.$$

Здесь E — напряженность продольного электрического поля; $\Delta\epsilon$ — понижение барьера ГУ за счет эффекта Пула—Френкеля; N_s^y — поверхностная плотность ГУ у границы гетероперехода; σ_3 — сечение захвата электрона на ГУ; \bar{v} — тепловая скорость электронов; σ_i — сечение ионизации ГУ электронами (предполагается, что σ_3 и σ_i не зависят от энергии электронов); \bar{v}_i , n_i — средняя скорость и концентрация электронов, способных ионизовать уровень, т. е. с энергией $\epsilon > \epsilon_i$; ϵ_i — энергия ионизации уровня; n — концентрация электронов; T — температура решетки; κ — диэлектрическая проницаемость. Предполагается, что вследствие ударной ионизации ГУ электрон может переходить только в состояния непрерывного спектра, начало которого соответствует расстоянию между размерными подзонами в квантовой яме, равному тепловой энергии kT .

2. Результаты расчетов и их обсуждение

На рис. 2 приведены ВАХ ПТ ГСЛ с длиной затвора $L = 1$ мкм, шириной $W = 150$ мкм, концентрацией доноров $N_D = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и толщиной спейсера $d_2 =$

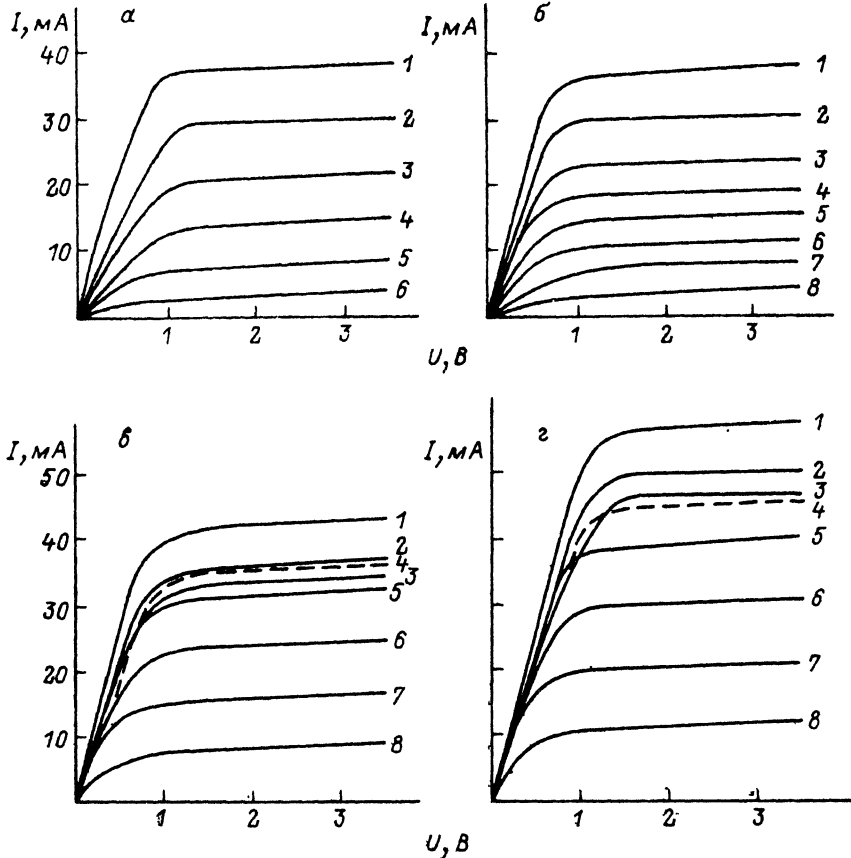


Рис. 2. Расчетные ВАХ ПТ ГТЛ с ударной ионизацией ГУ на границе гетероперехода при поверхностной плотности ГУ 10^{12} см^{-3} и энергии $\epsilon_\gamma = 0.4 \text{ эВ}$. а — без учета ГУ; б — с учетом ГУ; σ_1/σ_3 : б — 1, в — 10, г — 100. Напряжение на затворе U_3 , В: 1 — +0.6, 2 — +0.4, 3 — +0.2, 4 — 0, 5 — -0.2, 6 — -0.4, 7 — -0.6, 8 — -0.8. Штрихами показаны аномальные ВАХ.

$= 30 \text{ А}$, рассчитанные без учета и с учетом ударной ионизации ГУ при $N_2^+ = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и энергии залегания уровней $\epsilon_\gamma = 0.4 \text{ эВ}$ и различных отношениях сечения ионизации к сечению захвата. Как видно из рисунка, ударная ионизация может приводить к качественному изменению ВАХ прибора и, в частности, к аномальной зависимости тока стока от напряжения на затворе U_3 при $U_3 = (0 \div (-0.2)) \text{ В}$. Видно, что существует отношение сечения ионизации к сечению захвата, при котором аномальность ВАХ максимальна [для данного транзистора $(\sigma_1/\sigma_3)^A \approx 10$]. Расчеты показали, что при увеличении ϵ_γ величина $(\sigma_1/\sigma_3)^A$ возрастает. Интересно отметить, что как при малых, так и при больших отношениях σ_1/σ_3 ударная ионизация ГУ внешне может проявляться на ВАХ ПТ ГТЛ таким же образом, как и ионизация ГУ полем затвора в объеме широкозонного материала [2]. Правда, в последнем случае концентрация ГУ должна заметно превосходить концентрацию доноров. Следует также отметить, что при поверхностной плотности ГУ $N_2^+ = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и их энергии ионизации $\epsilon_\gamma = 0.4 \text{ эВ}$. ВАХ ПТ ГТЛ, рассчитанные без учета ударной ионизации, не отличаются заметно от ВАХ ПТ ГТЛ, в которых ГУ отсутствуют вообще.

Еще одна отличительная особенность ударной ионизации — высокая чувствительность формы ВАХ к поверхностной плотности глубоких уровней (рис.

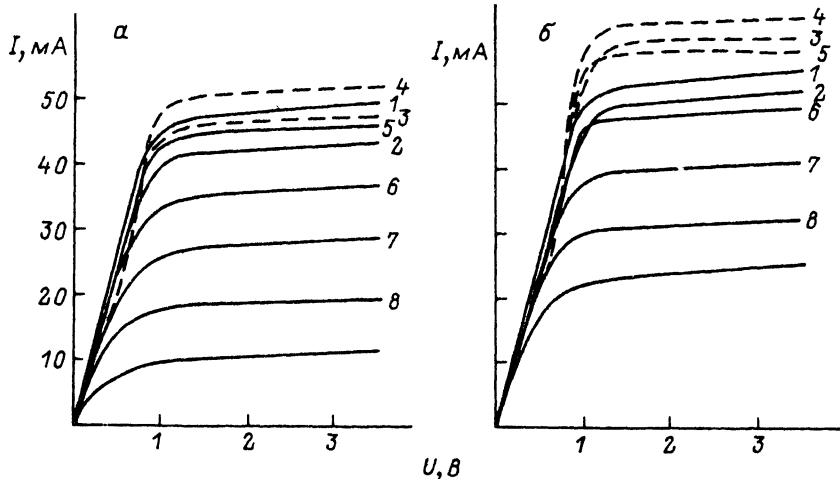


Рис. 3: Расчетные ВАХ ПТ ГСЛ с ударной ионизацией ГУ при $\epsilon_y = 0.4$ эВ, $\sigma_i/\sigma_3 = 10$. Поверхностная плотность ГУ: а — $1.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, б — $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Напряжение на затворе U_3 , В: 1 — +0.6, 2 — +0.4, 3 — +0.2, 4 — 0, 5 — -0.2, 6 — -0.4, 7 — -0.6, 8 — -0.8.

3). Если при ионизации ГУ полем затвора в объеме $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ или на границе гетероперехода увеличение их числа ведет в основном к количественным изменениям ВАХ, то при ударной ионизации увеличение поверхностной плотности ГУ ПТ ГСЛ качественно меняет ВАХ.

Расчеты показывают, что при заданной выше поверхностной плотности ГУ их ионизация сильным продольным полем несущественна даже при $\epsilon_y = 0.3$ эВ. Гораздо раньше наступает ионизация полем затвора.

На рис. 4 приведены распределения в канале ПТ ГСЛ поверхностной плотности ГУ, ионизованных вследствие ударной ионизации, и суммарной поверхностной плотности ионизованных ГУ, а также энергии дна низшей размерной подзоны. Как следует из рисунка, ударная ионизация определяет концентрацию глубоких заряженных центров в большей (преимущественно истоковой) части канала. В области статического домена у стокового края затвора роль ударной ионизации мала, так как здесь примеси ионизируются преимущественно сильным полем затвора.

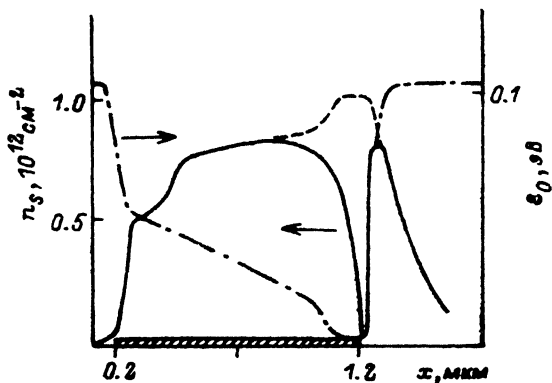


Рис. 4: Распределения в канале ПТ ГСЛ поверхностной плотности глубоких уровней, ионизованных вследствие ударной ионизации (сплошная линия), суммарной поверхностной плотности ГУ (штриховая линия), энергии дна низшей размерной подзоны (штрихпунктирная линия). $U_{ис} = 3.5$ В, $U_3 = 0$, $\epsilon_y = 0.6$ эВ, $\sigma_i/\sigma_3 = 10$, поверхностная плотность ГУ 10^{12} см^{-2} .

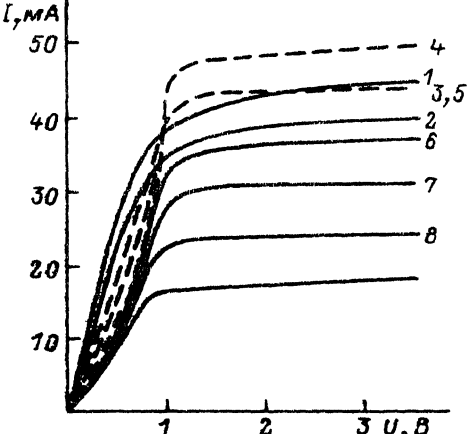


Рис. 5. Расчетные ВАХ ПТ ГСЛ с ударной ионизацией ГУ при $\epsilon_y = 0.6$ эВ, $\sigma_i/\sigma_s = 10$, поверхностной плотности ГУ $2 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$. Напряжение на затворе U_3 , В: 1 — +0.6, 2 — +0.4, 3 — +0.2, 4 — 0, 5 — -0.2, 6 — -0.4, 7 — -0.6, 8 — -0.8.

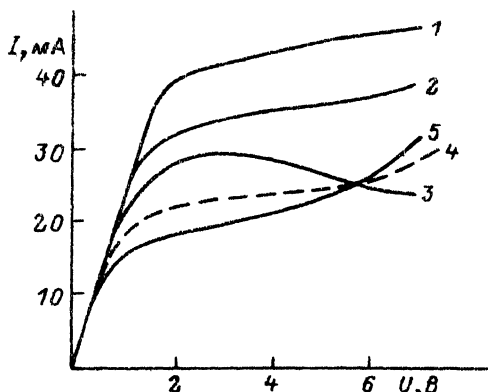


Рис. 6. Типичные ВАХ полевых транзисторов на некоторых ГСЛ. Напряжение на затворе U_3 , В: 1 — 0, 2 — -0.5, 3 — -1, 4 — -1.5, 5 — -2.

Из-за того что энергия электронов и положение ГУ изменяются вдоль канала ПТ ГСЛ, последние в случае $\epsilon_y = 0.4$ эВ сильно ионизируются уже при сравнительно небольших напряжениях на стоке. Поэтому для $\epsilon_y = 0.4$ эВ при фиксированном напряжении на затворе форма ВАХ качественно не отличается от ВАХ ПТ ГСЛ без ГУ. Однако с увеличением глубины уровней ВАХ транзистора начинают приобретать ярко выраженный активационный характер (рис. 5).

Аномальная зависимость тока стока от напряжения на затворе наблюдалась нами на экспериментальных образцах ПТ ГСЛ, сформированных на отдельных структурах, полученных методом молекулярной эпитаксии по технологии, описанной в работе [3]. Параметры транзисторов были близки к использованным в расчете. Типичная ВАХ одного из таких транзисторов приведена на рис. 6. Качественное совпадение ВАХ, представленных на рис. 2 и 6, служит аргументом в пользу предложенного механизма влияния ударной ионизации ГУ на ВАХ ПТ ГСЛ.

Заключение. Исследования влияния ионизации ГУ на ВАХ ПТ ГСЛ, проведенные с помощью разработанной модели, показали следующее:

а) при поверхностных плотностях ГУ, сравнимых с поверхностной плотностью электронов в канале, ионизация глубоких уровней продольным электрическим полем несущественна — гораздо раньше наступает ионизация ГУ поперечным полем затвора;

б) эффект проявляется даже при относительно малой поверхностной плотности ГУ (соизмеримой с поверхностной плотностью легирующей примеси), когда их ионизация полем затвора не меняет существенным образом концентрацию электронов в канале;

в) ударная ионизация ГУ преобладает в истоковой части канала ПТ ГСЛ, в то время как в области статического домена эти уровни ионизованы полем затвора;

г) изменение ВАХ при ударной ионизации гораздо более чувствительно к изменению поверхностной плотности глубоких уровней, чем при их ионизации полем затвора;

д) в зависимости от отношения сечения ионизации к сечению захвата ударная ионизация может внешне проявляться на ВАХ ПТ ГСЛ либо так же, как

ионизация глубоких уровней в объеме полем затвора (резко снижая крутизну и увеличивая напряжение отсечки), либо может приводить к аномальной зависимости тока стока от напряжения на затворе U_3 , появлению участков отрицательной крутизны, при которой ток стока растет с увеличением ($-U_3$); при этом каждому значению энергии ионизации уровней соответствует некоторое отношение сечения сечения ионизации к сечению захвата, при котором аномальность ВАХ максимальна; аномальная зависимость тока стока от напряжения на затворе наблюдалась экспериментально на отдельных образцах ПТ ГСЛ на гетероструктурах $Al_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$, изготовленных методом молекулярной эпитаксии.

Авторы благодарны Е. И. Голанту за помощь в работе и полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] М. Шур. Современные приборы на основе арсенида галлия. М. (1991).
- [2] В. С. Ершов, З. А. Зайцевская, А. А. Кальфа, А. Р. Крюков, С. В. Матыцин, А. Б. Пашковский, Ю. Ю. Федоров. ФТП, 25, 776 (1991).
- [3] А. А. Кальфа, А. Б. Пашковский. Электрон. техн., сер. 1, Электроника СВЧ, 9 (413), 42 (1988).
- [4] G. Vinsent, A. Chantre, D. Bois. J. Appl. Phys., 50, 5484 (1979).
- [5] П. С. Белоусов, А. А. Кальфа, А. Р. Крюков, С. В. Матыцин, В. А. Михайлов, А. Б. Пашковский. Электрон. техн., сер. 1, Электроника СВЧ, 1 (425), 20 (1990).

Редактор Л. В. Шаронова
