

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С СЕЛЕКТИВНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Кальфа А. А., Папковский А. Б.

Исследовано влияние пространственного переноса электронов между слоями гетероструктуры с селективным легированием из GaAs/Al_xGa_{1-x}As на статические вольтамперные и СВЧ характеристики полевых транзисторов на основе этих структур. Состояния электронов в узкозонном полупроводнике описаны в приближении треугольной потенциальной ямы, а разогрев электронов учитывается с помощью системы гидродинамических уравнений, решаемых совместно с уравнением Пуассона. Показано, что роль пространственного переноса растет с увеличением тока, протекающего в канале, т. е. с уменьшением отрицательного напряжения на затворе.

Известно, что в гетероструктурах с селективным легированием (ГСЛ) под воздействием сильного электрического поля E электроны могут переходить из потенциальной ямы узкозонного полупроводника (например, GaAs) в широкозонный полупроводник (Al_xGa_{1-x}As) [1]. Этот эффект, получивший название пространственного (в отличие от междолинного) переноса электронов, проявляется в полевых транзисторах на ГСЛ и, как показывают расчеты [2], происходит на очень малых (порядка десятых долей микрометра) длинах. Его особенности в приближении пространственно однородного поля для структуры металл—Al_xGa_{1-x}As—GaAs проанализированы нами ранее [3]. В данной работе впервые исследовано влияние пространственного переноса электронов не только на статические, но и на высокочастотные характеристики полевых транзисторов с ГСЛ.

В расчетах использована система гидродинамических уравнений, описывающая законы сохранения частиц, средних значений скорости v и энергии ϵ электронов в каждом из полупроводниковых слоев, образующих ГСЛ, которая дополнялась квазидвумерным уравнением Пуассона. Характерные времена пространственного переноса определены в приближении термоэлектронной эмиссии, а времена релаксации импульса и энергии — из статических зависимостей $v(E)$ и $\epsilon(E)$. Состояния электрона в GaAs описаны приближением треугольной потенциальной ямы. Пространственный перенос электронов учтен так же, как и в работе [3]. Параметры эквивалентной схемы транзистора, шумовые источники, минимальный коэффициент шума F_{\min} и соответствующий ему коэффициент усиления G определены по методике, описанной ранее [4].

Исследовались характеристики полевого транзистора с длиной затвора 0.5 и шириной 200 мкм, изготовленного на основе ГСЛ с толщиной чистого GaAs 500 нм, спейсера из нелегированного Al_{0.3}Ga_{0.7}As — 1 нм и легированного до концентрации $1.5 \cdot 10^{18}$ см⁻³ Al_{0.3}Ga_{0.7}As — 69 нм. Подвижность электронов в канале достигала 5400 см²/В·с при температуре 300 К. Результаты разработки такого транзистора и измерения его характеристик представлены в [5]. Теоретически эти же характеристики анализировались нами ранее [6], но без учета пространственного переноса электронов.

На рис. 1 представлены экспериментальные вольтамперные характеристики исследованного транзистора. Как видно из рисунка, учет эффекта в целом улучшает совпадение теории с экспериментом. Это особенно проявляется при нуле-

вом напряжении на затворе, когда ток I , протекающий через проводящий канал, максимален.

Расчет параметров эквивалентной схемы транзистора показал, что учет пространственного переноса электронов либо не меняет их значений, либо несколько приближает последние к экспериментальным.

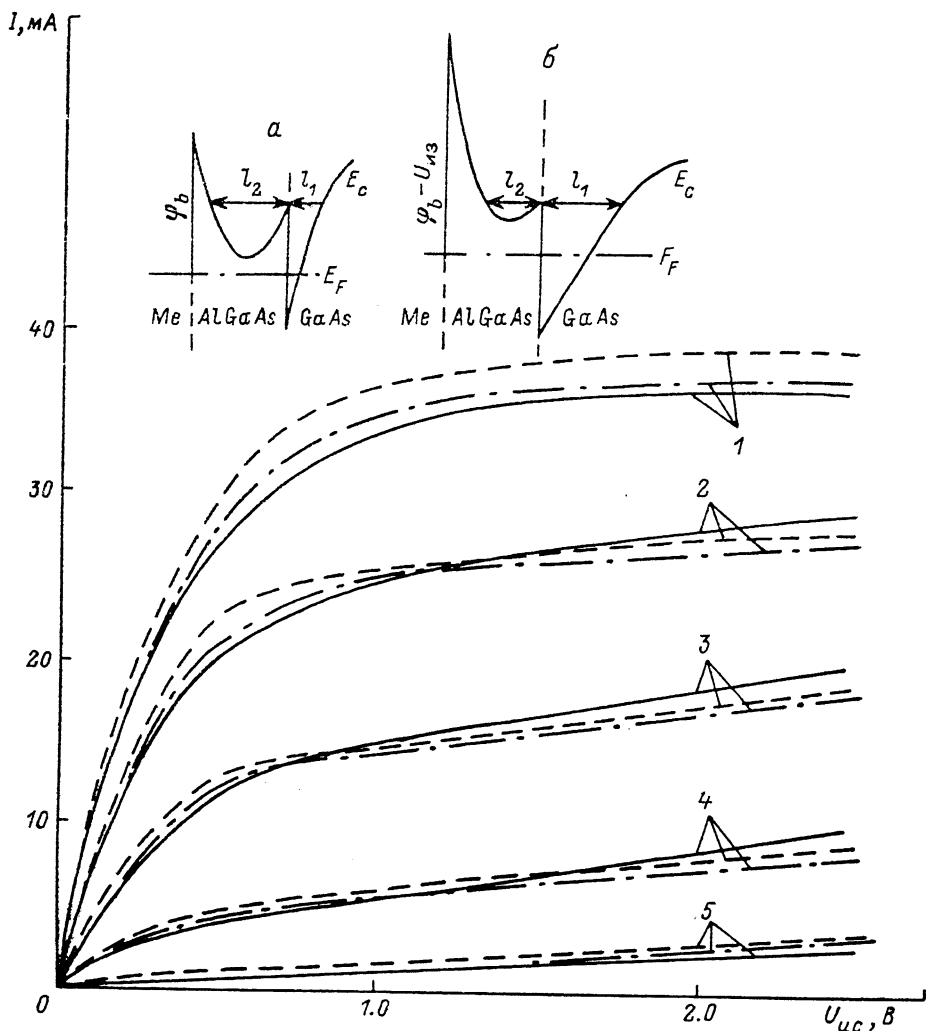


Рис. 1. Вольтамперные характеристики транзистора.

Сплошные кривые — эксперимент, штриховые — расчет без учета эффекта пространственного переноса электронов, штрихпунктирные — расчет с учетом эффекта. U_{gs} , В: 1 — 0, 2 — 0.2, 3 — 0.4, 4 — 0.6, 5 — 0.8. На вставке — координатная зависимость энергии дна зоны проводимости в гетеропереходе при $U_{gs}=0$ (а) и > 0 (б); U_{gs} — напряжение исток—сток, ϕ_b — высота потенциального барьера Шоттки, E_c — энергия дна зоны проводимости, E_F — энергия Ферми.

На рис. 2 приведены зависимости $F_{min}(I)$ и $G(I)$ на частоте 12 ГГц. Как видно из рисунка, при малых токах результаты хорошо согласуются с экспериментом. Учет эффекта пространственного переноса электронов в этом случае не принципиален. С ростом I теоретические и экспериментальные кривые все более различаются, однако зависимости, рассчитанные с учетом эффекта, всегда ближе к экспериментальным.

Наблюдаемые закономерности хорошо соответствуют высказанным ранее соображениям, согласно которым роль пространственного переноса электронов тем больше, чем больше отношение эффективных значений ширины потенциальной ямы l_1 и широкозонного полупроводника l_2 [1]. С ростом отрицательного напряжения на затворе U_{gs} (что соответствует уменьшению поверхностной плотности

электронов в потенциальной яме и соответственно I) l_1 растет, а l_2 уменьшается (см. вставку на рис. 1), т. е. уменьшается отношение l_2/l_1 . Это приводит к уменьшению эффекта пространственного переноса электронов и его влияния как на статические вольтамперные, так и на СВЧ характеристики транзистора.

Из расчетов также следует принципиальная необходимость учета пространственного переноса электронов в полевых транзисторах на ГСЛ, особенно при больших токах, соответствующих открытому каналу.

Авторы благодарны А. С. Тагеру за внимание к работе.

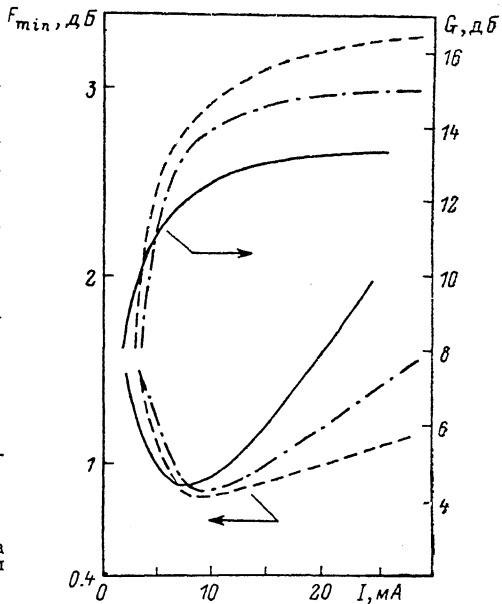


Рис. 2. Зависимости минимального коэффициента усиления G и коэффициента шума F_{\min} от тока.

Сплошные кривые — эксперимент, штриховые — расчет без учета эффекта пространственного переноса электронов, штрихпунктирные — расчет с учетом эффекта.

Список литературы

- [1] Кальфа А. А., Тагер А. С. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 8. С. 1353—1363.
- [2] Гарматин А. В., Кальфа А. А. // Электрон. техн. Сер. Электроника СВЧ. 1986. № 5 (389). С. 46—51.
- [3] Кальфа А. А., Пашковский А. Б. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 3. С. 521—526.
- [4] Пашковский А. Б., Тагер А. С. // Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1987. Т. 30. В. 9. С. 1150—1157.
- [5] Tanaka K., Ogawa M., Togashi K., Takakuwa H., Ohke H., Kanazawa M., Kato Y., Watanabe S. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1986. V. ED-33. N 12. P. 2053—2058.
- [6] Кальфа А. А., Пашковский А. Б. // Электрон. техн. Сер. Электроника СВЧ. 1988. № 9 (413). С. 42—46.

Научно-производственное объединение «Исток»
Фрязино

Получена 12.02.1990
Принята к печати 21.02.1990