

**ПОПЕРЕЧНЫЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ
ПЕРЕНОС ЭЛЕКТРОНОВ
В СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ— $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$
И МЕТАЛЛ— $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$
С СЕЛЕКТИВНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ
В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

Пашковский А. Б.

Теоретически исследован поперечный пространственный перенос электронов в структурах металл— $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ и металл— $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с селективным легированием при их разогреве продольным электрическим полем. Показано, что в таких структурах, несмотря на большие значения разрыва зон проводимости на границе гетероперехода из-за связанного с этим повышения поверхностной плотности электронов, энергии дна размерных подзон и уменьшения ширины потенциальной ямы, а также из-за больших значений времен релаксации по энергии и импульсу и меньших значений эффективной массы электронов в узкозонном материале, поперечный пространственный перенос электронов, разогретых продольным электрическим полем, проявляется сильнее, чем в структурах металл— $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$.

Известно, что в гетероструктурах с селективным легированием (ГСЛ) можно создать двумерный (или квазидвумерный) электронный газ с высокой подвижностью электронов вдоль границы гетероперехода. Параметрами двумерной потенциальной ямы, а следовательно, и свойствами электронного газа можно управлять внешним напряжением U_s , подаваемым на металлический электрод (затвор), нанесенный на один из полупроводниковых слоев. В последние годы в полупроводниковой микроэлектронике наряду с традиционными гетероструктурами с селективным легированием $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ все чаще используются как обычные $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, так и псевдоморфные гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$, в которых значениях x и y обычно не превышают 0.2.

В связи с расчетами приборов на ГСЛ, в которых ток течет вдоль границы гетероперехода, в частности полевых транзисторов на гетероструктурах с селективным легированием (ПТ ГСЛ), возникает необходимость исследования дрейфа и изменения поверхностной плотности двумерных электронов в потенциальной яме в продольных электрических полях, при которых становятся существенными переходы электронов в верхние долины и их поперечный пространственный перенос (ППП) между слоями ГСЛ. Известно, что ППП может существенно влиять как на динамику электронов в коротком канале, так и на выходные характеристики ПТ ГСЛ [1].

Однако непосредственный анализ поперечного пространственного переноса в ПТ ГСЛ, помимо того что он, по-видимому, требует точных двумерных расчетов, даже в одномерном приближении провести трудно из-за многочисленных особенностей полевых транзисторов: неоднородного поля в канале, меняющейся по длине прибора разности потенциалов затвор—канал, краевых эффектов и т. д. Поэтому для качественного понимания физических процессов, происходящих в ПТ ГСЛ, следует изучить разогрев и поперечный пространственный перенос электронов в структурах металл—ГСЛ в сильном продольном однородном электрическом поле.

Для традиционных ГСЛ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ такие исследования были выполнены в [2-7], для ГСЛ $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ без учета размерного квантования электронов — в [7, 8], а для структур $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с учетом размерного квантования, но без учета ППП — в [9]. Однако в большинстве этих работ [2-5, 7-9] исследования проводились в структурах без затвора, в которых число электронов полагалось не зависящим от напряженности электрического поля E . В то же время в [6] для структуры металл— $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ было показано, что наличие затвора приводит к росту суммарной поверхностной плотности электронов в ГСЛ, а высокая поверхностная плотность электронов совместно с размерным квантованием — к резкому уменьшению, а иногда и полному исчезновению отрицательной дифференциальной проводимости. Поэтому представляет интерес исследовать особенности разогрева электронов с учетом как размерного квантования, так и ППП между слоями в ГСЛ на основе тройных соединений $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, которые отличаются

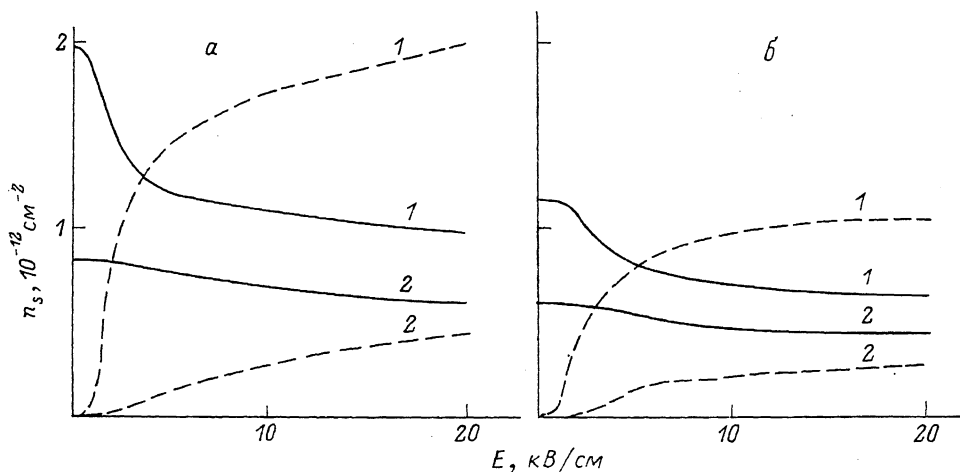


Рис. 1. Зависимость поверхностной плотности электронов в потенциальной яме n_s^I (сплошные кривые) и в широкозонном материале n_s^{II} (штриховые) от напряженности электрического поля.

Структуры: а — штриховые: металл— $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, б — металл— $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$. U_s , В: а) 1 — 0, 2 — -0.6; б) 1 — 0, 2 — -0.45.

от традиционных большими значениями разрыва зон на границе гетероперехода Δ и подвижности электронов μ , а также (в случае псевдоморфной ГСЛ) формой потенциальной ямы.

Результаты расчетов и их обсуждение

Для качественного исследования поперечного пространственного переноса электронов в ГСЛ использовалась модель работы [6], основанная на совместном решении уравнений Пуассона и системы гидродинамических уравнений. Параметры двумерного электронного газа рассчитывались в приближении заданной формы потенциальной ямы.

Исследовались структуры металл— $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ с концентрацией доноров $N_D = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, разрывом зон на границе гетероперехода $\Delta = 0.3 \text{ эВ}$ и металл— $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ с $N_D = 3.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (максимальной концентрацией, до которой удается легировать этот материал), $\Delta = 0.52 \text{ эВ}$. В обоих случаях концентрация доноров в узкозонном материале и нелегированной части широкозонного материала (спейсере) полагалась равной $N_p = N_{sp} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$, толщина спейсера $d_{sp} = 50 \text{ \AA}$. В расчетах толщина широкозонного материала подбиралась так, чтобы при $U_s = 0$ обедненные области под затвором и на границе гетероперехода смыкались. Надо отметить, что при данной концентрации доноров в псевдоморфной структуре изменение ширины

слоя $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ в пределах $100 \div 300 \text{ \AA}$ существенно не сказывается на результатах расчетов, так как в этой структуре при $U_s=0$ эффективная ширина ямы меньше этих размеров.

На рис. 1 для исследуемых структур приведены зависимости поверхностной плотности электронов в каждом из слоев ГСЛ от напряженности электрического

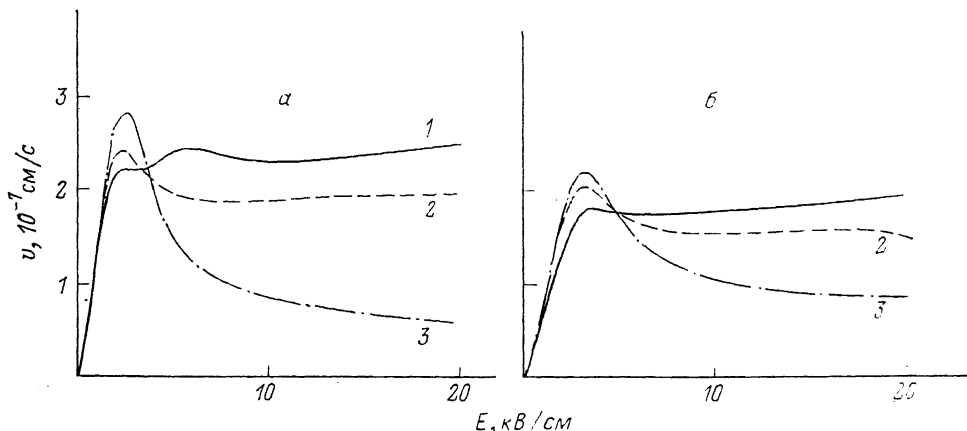


Рис. 2. Зависимость дрейфовой скорости электронов в потенциальной яме от напряженности электрического поля.

Структуры: а — металл— $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, б — металл— $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$. U_s , В: а) 1 — 0, 2 — -0.6; б) 1 — 0, 2 — -0.45; 3 — объемный материал.

поля E при напряжениях на затворе $U_s=0$ и $U_s=U_p/2$, где U_p — напряжение перекрытия ГСЛ. Видно, что, несмотря на большую величину разрыва зон на границе гетероперехода, в исследуемых ГСЛ пространственный перенос проявляется сильнее, чем в структуре металл— $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$. Так, если в последней при легировании $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ с N_D до $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $U_s=0$

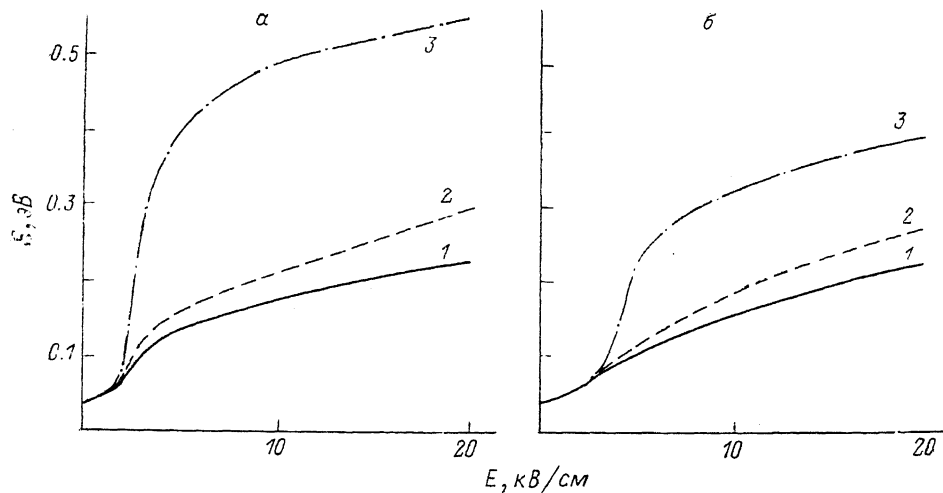


Рис. 3. Зависимость энергии электронов в потенциальной яме от напряженности электрического поля.

Структуры: а — металл— $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, б — металл— $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$. U_s , В: а) 1 — 0, 2 — -0.6; б) 1 — 0, 2 — -0.45; 3 — объемный материал.

поверхностные плотности электронов в потенциальной яме n_s^I и в широкозонном материале n_s^{II} сравнивались при $E=7.5 \text{ кВ/см}$, а в сильных полях n_s^{II} превосходила n_s^I на 30 % (см. [6]), то в структуре металл— $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ выравнивание плотностей происходило при $E=5 \text{ кВ/см}$, в сильных полях n_s^{II} превосходила n_s^I на 60 %, в структуре металл— $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ выравнивание плотностей происходило при $E=3.5 \text{ кВ/см}$, а в сильных полях n_s^{II}

превосходила n_s^I в 2 раза. В этих структурах ППП сильнее сказывается на зависимостях дрейфовой скорости и энергии электронов в потенциальной яме, а также на зависимости энергии дна низшей размерной подзоны от напряженности электрического поля (рис. 2—4). Интересно отметить, что изменение дрей-

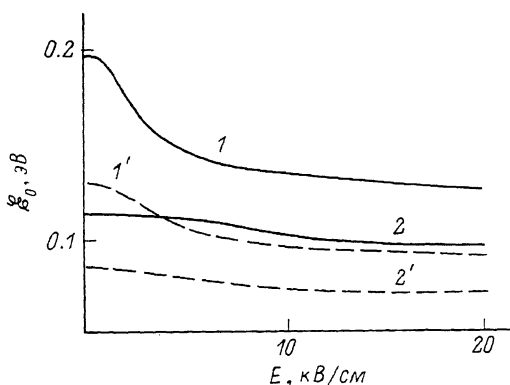


Рис. 4. Зависимость энергии дна низшей размерной подзоны от напряженности электрического поля.

Структуры: 1, 2 — металл— $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, 1', 2' — металл— $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$. U_s , В: 1, 1' — 0, 2 — -0.6, 2' — -0.45.

фовой скорости электронов в узкозонном материале оказывается настолько большим, что для структур на основе $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ток, текущий через ГСЛ в сильных полях (рис. 5), может намного превышать значение $n_s^I(0)v(E)$, в то время как для сильно легированных структур металл— $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ эти вели-

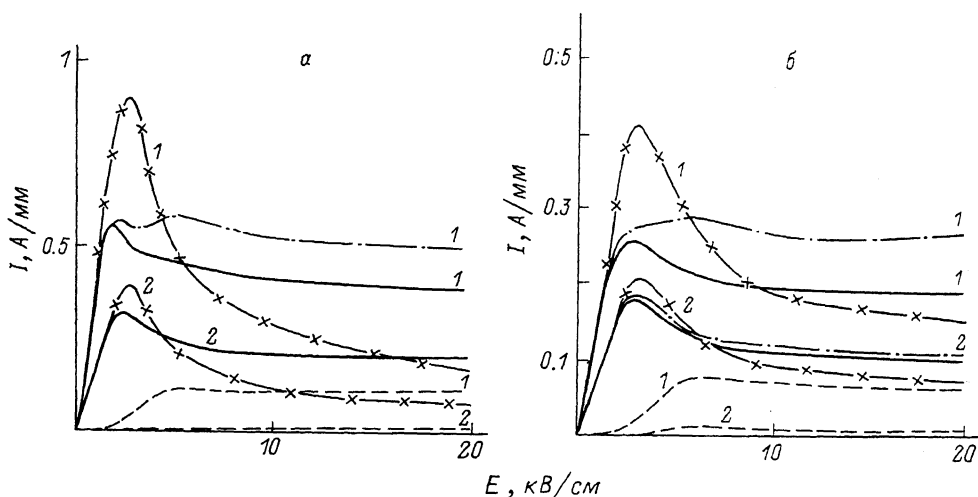


Рис. 5. Зависимости от напряженности электрического поля токов, протекающих по узкозонному (сплошные кривые) $I^I = n_s^I(E)v_1(E)$ и широкозонному материалу (штриховые) $I^{II} = n_s^{II}(E)v_2(E)$, полного тока, текущего через ГСЛ $I_{\Sigma} = I^I + I^{II}$ (штрихпунктирные), и тока, вычисляемого как $I_{\Sigma} = n_s^I(0)v(E)$ (штриховые с крестиками), где $v(E)$ — зависимость дрейфовой скорости электронов для объемного материала.

Структуры: а — металл— $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, б — металл— $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$. U_s , В: а) 1 — 0, 2 — -0.6; б) 1 — 0, 2 — -0.45.

чины примерно равны [5]. Здесь $n_s^I(0)$ — поверхностная плотность электронов в отсутствие электрического поля, а $v(E)$ — зависимость дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля в объемном материале. Поэтому, возможно, ППП будет сильнее сказываться на характеристиках ПТ ГСЛ, изготовленных на основе $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, чем на характеристиках ПТ ГСЛ, изготовленных на гетероструктурах $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$ [1].

Можно предложить следующее объяснение наблюдаемых закономерностей. С ростом разрыва зон на границе гетероперехода повышается поверхностная плотность электронов в потенциальной яме, а эффективная ширина ямы уменьшается, что ведет к интенсификации ППП. Кроме того, уменьшение ширины потенциальной ямы ведет к росту энергии дна размерных подзон \mathcal{E} (рис. 4), что в некоторой степени компенсирует увеличение разрыва зон и снижает эффективную высоту потенциального барьера на границе гетероперехода $V_{эфф}$ ($V_{эфф} \approx \Delta - \mathcal{E}_0$), который необходимо преодолеть электронам для перехода в широкозонный материал. Увеличение доли In в тройном соединении, кроме роста величины Δ , приводит к уменьшению эффективной массы (а следовательно, к росту частоты переходов между слоями) и увеличению времен релаксации электронов по энергии и импульсу, что способствует увеличению влияния ППП на динамику электронов.

Анализ зависимостей энергии и дрейфовой скорости электронов в ГСЛ от напряженности электрического поля показывает, что, как отмечалось ранее [7], ППП, охлаждая электроны в потенциальной яме (рис. 3), заметно снижает роль переходов между Γ - и L -долинами узкозонного материала. Эффект проявляется тем сильнее, чем выше доля In в тройном соединении, а соответственно больше величина разрыва зон на границе гетероперехода. Так, если в структуре металл— $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$ при $U_3=0$ и $E=20$ кВ/см доля электронов в L -долине составляла примерно 40 %, то в структурах металл— $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}/\text{In}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$ и металл— $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ — примерно 30 и 10 % (в последнем случае даже при $U_3=-0.6$ В доля электронов в L -долине составляла ~ 20 %), а дрейфовые скорости электронов в узкозонных материалах (рис. 2) отличались от скоростей электронов в объемных на 70 %, т. е. в 2.4 и 4 раза соответственно (для $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ даже при $U_3=-0.6$ В скорости различались более чем в 2 раза). Надо отметить, что в данных объемных материалах при $E=20$ кВ/см в L -долине находится около 75 % электронов.

Заключение. В гетероструктурах на основе $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, несмотря на большие значения разрыва зон проводимости на границе гетероперехода из-за связанности с этим повышением поверхностной плотности электронов, энергии дна размерных подзон и уменьшения ширины потенциальной ямы, а также из-за больших значений времен релаксации по энергии и импульсу и меньших значений эффективной массы электронов в узкозонном материале, в структурах металл— $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ с $x, y < 0.2$ поперечный пространственный перенос электронов, разогретых продольным электрическим полем, проявляется сильнее, чем в структурах металл— $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$.

Еще сильнее ППП изменяет дрейфовые характеристики электронов и их поверхностную плотность в потенциальной яме в структуре металл— $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$. При сильном легировании широкозонного материала в такой гетероструктуре ППП приводит к тому, что даже в сильных полях влияние L -долины $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ на характер дрейфа электронов в потенциальной яме становится небольшим. По-видимому, в таких ГСЛ это приведет к исчезновению эффектов, связанных с особенностями $\Gamma-L$ -переходов в ГСЛ и наблюдаемых в расчетах без учета пространственного переноса, или там, где перенос мал.

Список литературы

- [1] Кальфа А. А., Пашковский А. Б. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 7. С. 1187—1189.
- [2] Горфинкель В. Б., Кальфа А. А., Солодкая Т. И., Тагер А. С., Шофман С. Г. // ФТП. 1986. Т. 19. В. 12. С. 2228—2231.
- [3] Вагидов Н. З., Грибников З. С., Иващенко В. М. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 2. С. 304—311.
- [4] Вагидов Н. З., Грибников З. С., Иващенко В. М. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 6. С. 1087—1094.
- [5] Yooyama K., Hess K. // Phys. Rev. 1990. V. B33. P. 5595—5605.
- [6] Кальфа А. А., Пашковский А. Б. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 3. С. 521—527.
- [7] Sakamoto R., Akai K., Inoue M. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1989. V. 36. N 10. P. 2344—2352.
- [8] Гарматия А. В., Кальфа А. А. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 12. С. 2228—2231.
- [9] Kobayashi E., Hamaguchi S., Matsuoka T., Taniguchi K. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1989. V. 36. N 10. P. 2353—2360.