

## СТРУКТУРА ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА В GaAs ПТШ НА ГРАНИЦЕ МЕЖДУ АКТИВНЫМ СЛОЕМ И ПОДЛОЖКОЙ, ЛЕГИРОВАННОЙ ХРОМОМ

А. М. Бобрешов, А. В. Дыбой, Ю. Н. Нестеренко, Ю. Ю. Разуваев

*Воронежский государственный университет*

С помощью численного моделирования проанализирована структура объемного заряда на границе полужолирующей подложки, допированной хромом, и канала в GaAs ПТШ. Использована четырехуровневая модель полужолирующего GaAs с учетом глубоких уровней. Показана определяющая роль глубоких акцепторных уровней в формировании объемного заряда.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** полевой транзистор с затвором Шоттки; арсенид галлия; объемный заряд; полужолирующая подложка; глубокие уровни; численное моделирование.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Граница между  $n$ -каналом и полужолирующей подложкой оказывает существенное влияние на функциональные характеристики полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ). Это влияние связано с наличием потенциального барьера на границе и сопутствующего ему объемного заряда. Слой граничного объемного заряда имеет форму диполя с отрицательным зарядом со стороны подложки и положительным зарядом со стороны канала [1]. Положительный заряд со стороны канала образован ионизированными мелкими донорами в области потенциального барьера, обедненной подвижными носителями. В подложке из полужолирующего GaAs концентрация остаточных мелких примесей имеет тот же порядок или меньше, чем концентрация центров с глубокими уровнями, поэтому ионизированные глубокие уровни играют важную роль в формировании объемного заряда со стороны подложки.

Различного рода внешние воздействия на транзистор, которые могут изменить величину и структуру объемного заряда на границе, приводят к изменению толщины активного слоя ПТШ и, соответственно, к модуляции проводимости канала [2]. К такого рода воздействиям относятся, например, ионизирующее излучение [3], рентгеновское излучение [4], оптическое излучение [5], обратное управление со стороны подложки [1, 12] и электроперегрузки на выводах транзистора [6, 7]. Модуляция проводимости канала является вредным эффектом, приво-

дящим к ухудшению функциональных характеристик транзистора. Поскольку в формировании граничного объемного заряда участвуют глубокие уровни, которые обуславливают большое время жизни носителей, импульсные воздействия на транзистор сопровождаются длительными переходными процессами изменения проводимости канала. Эти переходные процессы на практике проявляются в виде временной нестабильности характеристик транзистора и могут вызвать такой специфический эффект, как обратимый (временный) отказ аппаратуры [6–10]. Проблема обратимых отказов имеет большое значение в свете надежности функционирования радиоприемной аппаратуры на базе ПТШ в условиях непреднамеренных и преднамеренных мощных импульсных воздействий на радиоаппаратуру.

С точки зрения понимания физических процессов, происходящих на границе канал—подложка, и связанных с ними явлений нарушения функционирования ПТШ большое значение имеют ясные представления о структуре объемного заряда границы и роли глубоких уровней в этой структуре. В настоящей работе произведен детальный анализ структуры объемного заряда границы канал—подложка в ПТШ в равновесном состоянии (в отсутствие внешних воздействий) путем численного моделирования с помощью программного симулятора полупроводниковых приборов APSYS.

### 2. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На рис. 1 показана структура ПТШ, для которой производилось моделирование. Сток и исток образуют с активным слоем омические

© Бобрешов А.М., Дыбой А.В., Нестеренко Ю.Н., Разуваев Ю.Ю., 2008



Рис. 1. Структура ПТШ, используемая для численного моделирования

контакты, затвор — контакт Шоттки. Для GaAs используется четырехуровневая модель [1, 11, 12], включающая в себя мелкие доноры и акцепторы с концентрациями  $N_D$  и  $N_A$  соответственно, а также глубокие доноры и акцепторы. Для типового объемного GaAs подложки мелкие уровни образованы остаточными примесями, для которых обычно  $(N_D - N_A) > 0$ , кроме того, всегда присутствуют глубокие донорные центры типа *EL2*, присущие любому материалу GaAs, так что в большинстве случаев для «чистого» (не легированного) GaAs имеет место проводимость *n*-типа [1, 11]. Для придания подложке полуизолирующих свойств в нее вводится компенсирующая примесь глубоких акцепторов в виде атомов хрома Cr. Поскольку и для подложки, и для активного слоя  $(N_D - N_A) > 0$ , то для простоты считаем, что в обеих рассматриваемых областях ПТШ мелкие примеси представлены только донорами ( $N_A = 0$ ). Рассматривается резкий переход между каналом и подложкой. Предполагается также, что канал содержит глубокие уровни в тех же концентрациях, что и подложка.

Зонная диаграмма четырехуровневой модели, описывающей полуизолирующий GaAs, представлена на рис. 2. Важной особенностью этой модели является то, что глубокий акцеп-

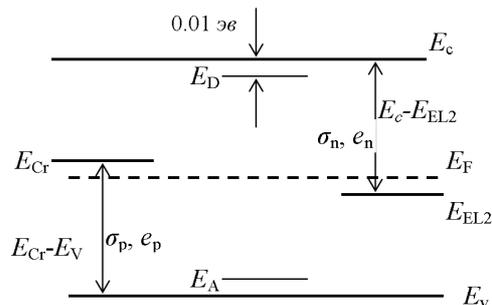


Рис. 2. Зонная диаграмма четырехуровневой модели полуизолирующего GaAs

торный уровень хрома расположен в запрещенной зоне выше, чем глубокий донорный уровень *EL2*.

Глубокий донор *EL2* с большой точностью можно считать чисто электронной ловушкой [11, 13], которая может обмениваться электроном с зоной проводимости: ловушка, занятая электроном, электрически нейтральна; отдав электрон в зону проводимости, ловушка приобретает положительный заряд. Обмен электроном между ловушкой и зоной проводимости характеризуется двумя параметрами:  $\sigma_n$  — сечение захвата электрона проводимости ионизированной ловушкой и  $e_n$  — скорость эмиссии электрона (тепловой ионизации) заполненной ловушкой.

Глубокий акцептор Cr в большинстве вариантов четырехуровневой модели считается чисто дырочной ловушкой [11, 13], обменом центров хрома с зоной проводимости пренебрегают. Ловушка, занятая дыркой, электрически нейтральна, отдав дырку в валентную зону, она приобретает отрицательный заряд. Вероятностные характеристики обмена уровня Cr с валентной зоной в результате тепловых процессов описываются параметрами  $\sigma_p, e_p$  (сечение захвата дырки и скорость эмиссии дырки).

Значения концентраций мелких и глубоких уровней, приведенные на схеме рис. 1, являются типичными для полуизолирующего GaAs, легированного хромом [11, 13]. В качестве параметров глубоких ловушек взяты значения, измеренные и приведенные в работе [12]:

— энергия ионизации уровня хрома относительно валентной зоны:

$$E_{Cr} - E_v = 0.781 \text{ эВ};$$

— сечение захвата уровня хрома:  $\sigma_p = 7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ;

— энергия ионизации уровня *EL2* относительно зоны проводимости:

$$E_c - E_{EL2} = 0.82 \text{ эВ};$$

— сечение захвата уровня *EL2*:  $\sigma_n = 2.7 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ .

Скорости эмиссии электронов и дырок  $e_n$  и  $e_p$  связаны с сечениями захвата известными соотношениями [14], вытекающими из принципа детального равновесия.

Плотность объемного заряда в единицах элементарного заряда равна:

$$Q(\text{см}^{-3}) = p - n + N_D^i + N_{EL2}^i - N_{Cr}^i,$$

где  $p$  и  $n$  — концентрации свободных дырок и электронов,  $N_D^i$  — концентрация ионизирован-

ных мелких доноров,  $N_{EL2}^i$  и  $N_{Cr}^i$  — концентрации ионизированных глубоких уровней. Целью моделирования являлось получение распределения плотности объемного заряда и всех его составляющих в области границы канал—подложка.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3 показан потенциальный барьер и общий вид распределения объемного заряда на границе канал—подложка. Распределение потенциала и электрического поля в сечении  $X = \text{const}$ , перпендикулярном к плоскости контактов, показано на рис. 4. Отметим, что здесь и далее приводятся сечения вне длины затвора с тем, чтобы не рассматривать явления в области контакта Шотки. Зонная диаграмма в области границы канал—подложка представлена на рис. 5. Энергии дна зоны проводимости  $E_c$  и вершины валентной зоны  $E_v$ , а также энергетические уровни глубоких доноров  $E_{EL2}$  и акцепторов  $E_{Cr}$  отсчитываются относительно уровня Ферми  $E_F$ . Уровень мелких доноров не показан, поскольку в масштабе диаграммы он вплотную прилегает к дну зоны проводимости (уровень  $-0.01$  эВ относительно  $E_c$ ).

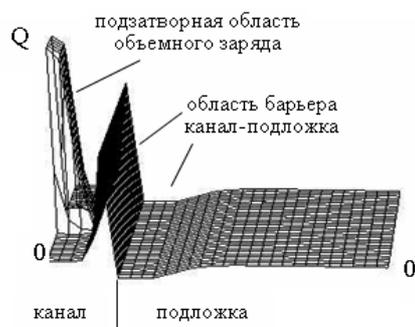
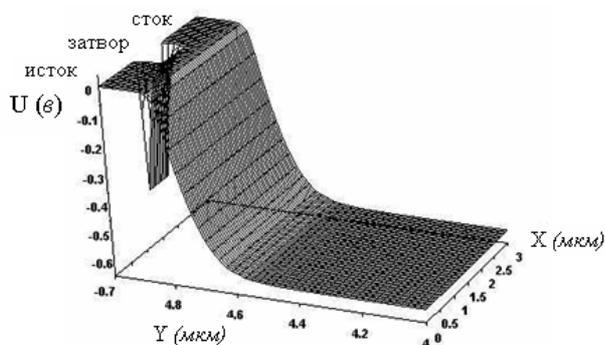


Рис. 3. Общий вид потенциального барьера и распределения плотности объемного заряда в области границы канал—подложка

Видно, что уровень  $E_{EL2}$  во всем объеме прибора расположен существенно ниже уровня Ферми, и, таким образом, глубокие доноры практически полностью заполнены электронами, то есть электрически нейтральны, не влияют на формирование объемного заряда. Уровень глубокого акцептора  $E_{Cr}$  в глубине подложки близок к уровню Ферми, так что число нейтральных и ионизированных акцепторов должно быть приблизительно одинаково. В зоне потенциального барьера на границе канал—подложка энергетические уровни искривляются таким образом, что уровень  $E_{Cr}$  существенно понижается относительно уровня Ферми, так что в области барьера и далее в области канала глубокие

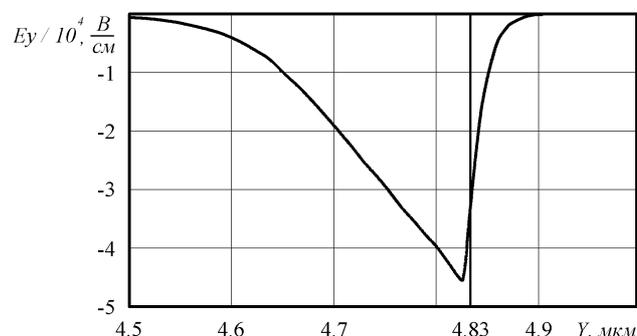
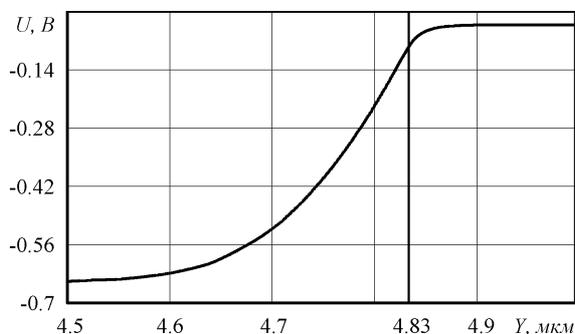


Рис. 4. Электрический потенциал  $U$  и напряженность поля  $E_y$  в области потенциального барьера

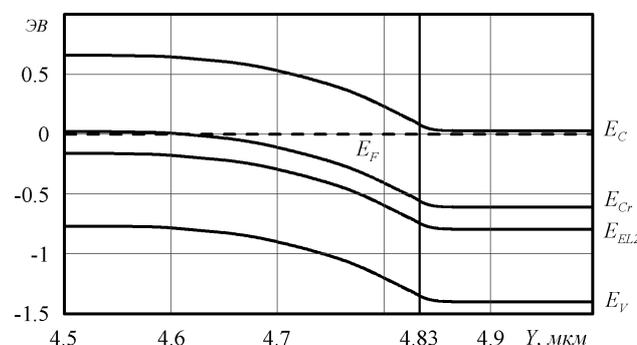


Рис. 5. Зонная диаграмма в области границы канал—подложка

акцепторы практически полностью заняты электронами, то есть заряжены отрицательно.

Распределение объемного заряда в сечении  $X=\text{const}$  и его структура показаны на рис. 6. Координата  $Y=4.83$  мкм на графиках соответствует границе канал—подложка. Поскольку все зависимости от  $Y$  в подложке имеют существенно более плавный характер, чем в канале, масштабы по  $Y$  в канале и в подложке выбраны разными. Следует обратить внимание на поведение мелких доноров (рис. 6,б). При детальном рассмотрении оказывается, что в данном примере их нельзя считать полностью ионизированными во всем объеме прибора. Полная ио-

низация имеет место только в подложке, где их уровень существенно выше уровня Ферми. По направлению от границы с подложкой в глубь канала по мере сближения уровня мелких доноров с уровнем Ферми (см. зонную диаграмму рис. 5) степень их ионизации уменьшается. Данное явление должно учитываться при анализе объемного заряда.

Заряд глубоких уровней (рис. 6,в) соответствует предположениям, сделанным выше при рассмотрении зонной диаграммы: глубокие доноры во всем объеме прибора практически полностью электронейтральны, в то время как ионизация глубоких акцепторов (а следовательно-

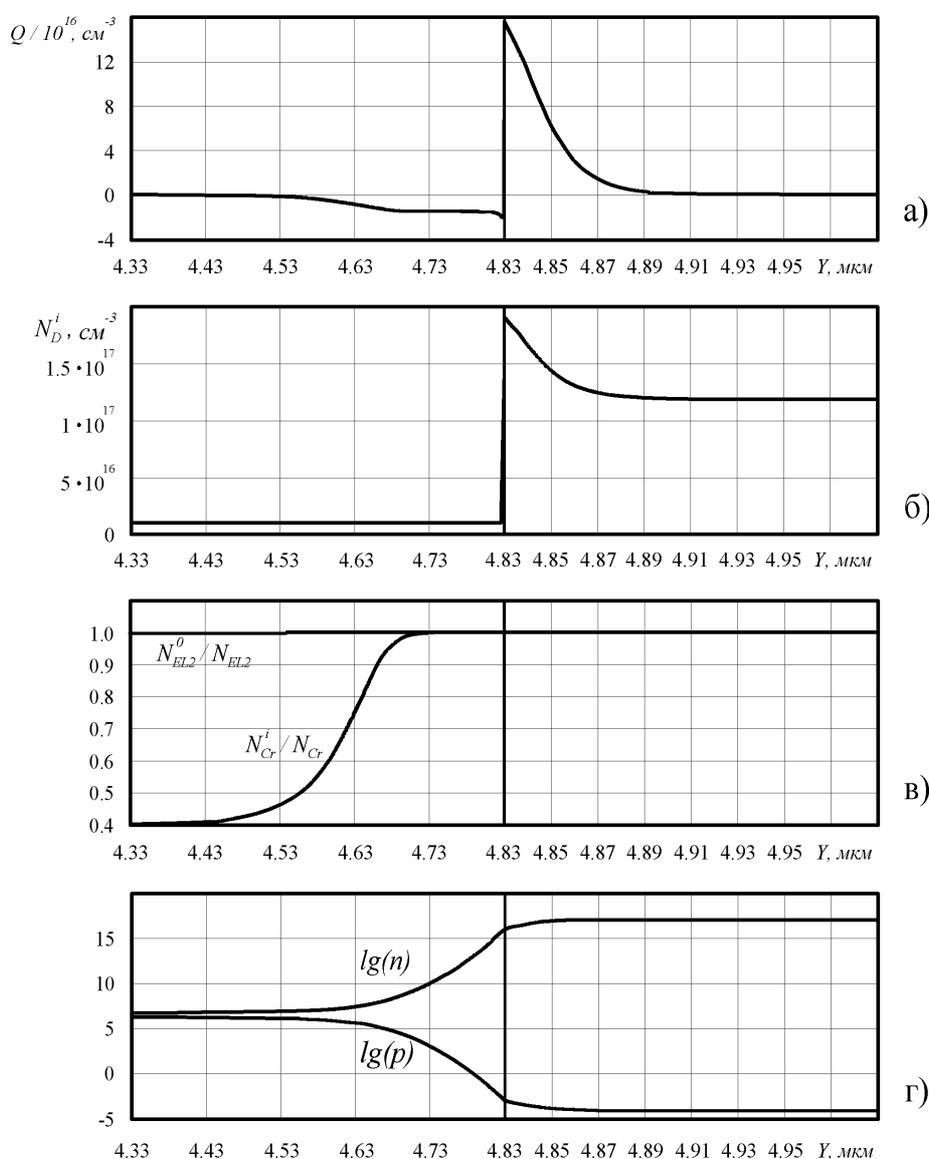


Рис. 6. Распределение плотности объемного заряда  $Q$  ( $\text{см}^{-3}$ ) (а) в области границы канал—подложка и его составляющих: б) концентрация ионизированных мелких доноров  $N_D^i$  ( $\text{см}^{-3}$ ); в) доля нейтральных глубоких доноров  $N_{EL2}^0/N_{EL2}$  и ионизированных глубоких акцепторов  $N_{Cr}^i/N_{Cr}$ ; г) концентрация свободных электронов  $\lg[n(\text{см}^{-3})]$  и свободных дырок  $\lg[p(\text{см}^{-3})]$

но аккумулируемый ими отрицательный заряд) возрастает при приближении из глубины подложки к границе с каналом.

Концентрации свободных электронов и дырок, ввиду очень большого диапазона их изменения в структуре прибора, показаны на рис. 6, г в логарифмическом масштабе. Концентрация дырок весьма невелика в глубине подложки, еще больше уменьшается в области потенциального барьера и сходит на нет в канале. Таким образом, свободные дырки практически не участвуют в формировании объемного заряда. Концентрация свободных электронов в глубине подложки сравнима с концентрацией свободных дырок, но возрастает в зоне потенциального барьера за счет их диффузии из  $n$ -канала. В узком слое подложки, непосредственно прилегающем к границе с каналом, концентрация электронов достигает величины, сравнимой с концентрациями глубоких и мелких примесей, и может повлиять на формирование объемного заряда в этом слое.

Объемный заряд (рис. 6, а) со стороны подложки образован в основном алгебраической суммой зарядов глубоких акцепторов и полностью ионизированных мелких доноров. В глубине подложки эти заряды взаимно компенсируют друг друга, так что выполняется условие электронейтральности, а в области потенциального барьера заряд атомов хрома превышает заряд мелких доноров, за счет чего формируется объемный заряд отрицательного знака. В тонком слое подложки, прилегающем к каналу, плотность отрицательного заряда немного возрастает за счет свободных электронов. Положительный объемный заряд со стороны канала формируется, в основном, как алгебраическая

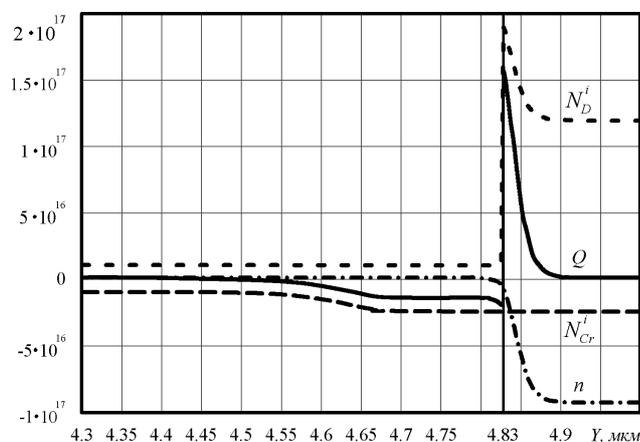


Рис. 7. Структура объемного заряда

сумма плотностей ионизированных мелких доноров и свободных электронов. Этот положительный заряд немного снижается за счет ионизированных глубоких акцепторов в канале. Данная схема формирования результирующего объемного заряда  $Q$  наглядно демонстрируется на рис. 7, где составляющие заряда представлены на одном графике в едином масштабе. На графике не представлены концентрация дырок  $p$  и концентрация ионизированных глубоких доноров  $N_{EL2}^i$ , которые в масштабах рисунка близки к нулю.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численного моделирования произведен детальный анализ структуры объемного заряда границы  $n$ -канал — полуизолирующая подложка в арсенид-галлиевом ПТШ. На основе четырехуровневой модели GaAs, допированного хромом, показано решающее значение глубоких акцепторных уровней хрома в образовании объемного заряда. Перезарядка этих уровней является причиной длительных переходных процессов в ПТШ при импульсных воздействиях.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-02-99012 р\_офи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линдквист П. Ф. Полуизолирующие подложки из арсенида галлия / П. Ф. Линдквист, У. М. Форд // Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления : пер. с англ. / под ред. Д. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Канделуола. — М.: Радио и связь, 1988. — С. 7—36.
2. Itoh T. Stability of Performance and Interfacial Problems in GaAs MESFET's / Т. Itoh, Н. Yanai // IEEE Transactions on Electron Devices. — 1980. — Vol. ED-27, № 6. — Р. 1037—1045.
3. Аствацатурьян Е. Р. Радиационные эффекты в GaAs-полупроводниковых приборах и интегральных схемах / Е. Р. Аствацатурьян, Д. В. Громов, В. В. Елесин и др. // Зарубежная электронная техника : сб. обзоров. — М. : Изд-во МЭП СССР, 1988. — № 1. — С. 48—83.
4. Simons M. Transient radiation study of GaAs metal semiconductor field effect transistors implanted in Cr-doped and undoped substrates / M. Simons, E. E. King, W. T. Anderson, H. M. Day // J. Appl. Phys. — Nov 1981. — Р. 6630—6636.
5. Аствацатурьян Е. Р. Модель долговременной релаксации фототока в GaAs-структурах с затвором Шоттки / Е. Р. Аствацатурьян, Д. В. Громов, В. В. Елесин // Микроэлектроника. — 1989. — Т. 18, Вып. 5. — С. 434—438.

6. Антипин В. В. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / В. В. Антипин, В. А. Годовицын, Д. В. Громов и др. // Зарубежная радиоэлектроника. — 1995. — № 1. — С. 37—53.

7. Баранов И. А. Стойкость твердотельных модулей СВЧ к кратковременным электроперегрузкам / И. А. Баранов, О. И. Обрезан, А. И. Ропий // Обзоры по электронной технике. — Сер. 1, СВЧ-техника. — М.: ЦНИИ «Электроника», 1997. — 111 с.

8. James D. S. A study of high power pulsed characteristics of lower-noise GaAs MESFET's / D. S. James, L. Dormer // IEEE Trans. — 1981, — Vol. MTT-29, № 12. — P. 1298—1310.

9. Антипин В. В. Изменение параметров малошумящего усилителя при воздействии мощных импульсных помех / В. В. Антипин, В. А. Годовицын, Д. В. Громов и др. // Радиотехника. — 1991. — № 8. — С. 18—20.

10. Антипин В. В. Деградация малошумящих СВЧ полевых транзисторов с затвором Шотки на арсениде галлия при воздействии мощных импульсных микроволновых помех / В. В. Антипин, В. А. Годовицын, Д. В. Громов и др. // Радиотехника. — 1994. — № 8. — С. 34—38.

11. Martin G. M. Compensation mechanisms in GaAs / G. M. Martin, J. P. Farges, G. Jacob, J. P. Hallais, G. Poiblaud // J. Appl. Phys. — 1980. — Vol. 51, № 5. — P. 2840—2852.

12. Kocot C. Backgating in GaAs MESFET's / C. Kocot, C. A. Stolte // IEEE Trans., 1982. — Vol. ED-29, № 7. — P. 1059—1064.

13. Полуизолирующие соединения  $A^{III}B^V$ : пер. с англ. / под ред. Дж. У. Риса. — М.: Металлургия, 1984. — 256 с.

14. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках / А. Милнс. — М.: Мир, 1977. — 564 с.