

Распределение поля и зарядов в переходе между n-GaAs и полуизолирующей подложкой, легированной хромом

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

Воронежский государственный университет
394006, Российская Федерация, г. Воронеж
Университетская пл., 1

С помощью численного моделирования проанализирована структура поля и объемного заряда на границе раздела между полуизолирующей подложкой, легированной хромом, и *n*-каналом в GaAs полевых транзисторов с затвором Шоттки. Использована четырехуровневая модель полуизолирующего GaAs с учетом глубоких уровней. Показана определяющая роль глубоких акцепторных уровней в формировании объемного заряда со стороны подложки, а также зависимость величины и распределения объемного заряда от их концентрации.

Ключевые слова: полевой транзистор с затвором Шоттки, арсенид галлия, полуизолирующая подложка, граница раздела, глубокие уровни, объемный заряд, численное моделирование.

Введение

Проблема обратимых отказов арсенид-галлиевых полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ) под действием мощных электромагнитных помех связана с процессами, протекающими на границе раздела активного слоя и полуизолирующей подложки (или буферного слоя, выращенного на подложке) [1; 2]. Эта граница характеризуется наличием потенциального барьера и сопутствующего ему дипольного объемного заряда [3]. Воздействия помех, меняя величину объемного заряда на границе раздела по сравнению с нормальным рабочим режимом, влияют на ширину канала ПТШ, что проявляется на практике в нестабильности рабочих характеристик транзистора [4]. Поскольку в полуизолирующей GaAs подложке концентрация центров с глубокими уровнями имеет тот же порядок, что и концентрация остаточных мелких примесей, или превышает ее, глубокие уровни играют важную роль в формировании отрицательного объемного заряда со стороны подложки. Влияние глубоких уровней приводит к тому, что импульсные воздействия на транзистор сопровождаются длительными переходными процессами, которые в экспериментах наблюдаются, например, в виде запаздывающей составляющей тока стока. Одновременно наблюдаются длительные временные зависимости основных высокочастотных параметров, таких как коэффициент шума и коэффициент усиления [2; 5].

Следует отметить, что подобные нарушения функционирования ПТШ имеют место при широком разнообразии видов воздействий, в число которых, кроме микроволновых импульсов, входят ионизирующее [6], рентгеновское [7], оптическое [8] излучения, видеоимпульсы и сверхкороткие импульсы [9], а также управление по подложке [3].

Для 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 раздела и роли глубоких уровней в этой структуре. В настоящей работе путем численного моделирования на основе программного симулятора полупроводниковых приборов APSYS проведен детальный анализ распределения поля и зарядов на границе раздела канал – полуизолирующая подложка, легированная хромом, в состоянии равновесия (в отсутствие приложенных напряжений).

1. Физическая модель

При изготовлении ПТШ используются различные способы получения активного слоя: ионная имплантация или выращивание легированных эпитаксиальных слоев. При этом между активным слоем и подложкой часто располагается полуизолирующий буферный слой, свойства которого, вообще говоря, отличаются

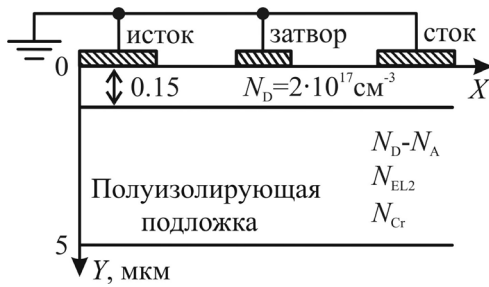


Рис. 1. Исследуемая структура ПТШ

от свойств объемного GaAs подложки. Однако во всех случаях на границе канал-подложка или канал-буфер имеют место схожие явления, вызванные глубокими уровнями подложки или буфера. Ниже исследуется модель ПТШ с резким переходом канал - полуизолирующая подложка, представленная на рис. 1. Сток и исток образуют с активным слоем омические контакты, затвор - контакт Шоттки.

Для описания электрофизических свойств полуизолирующей подложки использовалась четырехуровневая модель [3; 10], включающая в себя мелкие доноры и акцепторы с концентрациями N_D и N_A соответственно, а также глубокие доноры и акцепторы. В подложке, легированной хромом, для мелких уровней, образованных остаточными примесями, имеет место $(N_D - N_A) > 0$, кроме того, присутствуют глубокие донорные центры типа EL2, присущие любому материалу GaAs. Примесь глубоких акцепторов в виде атомов хрома Cr играет компенсирующую роль.

Зонная диаграмма четырехуровневой модели, описывающей полуизолирующий GaAs, представлена на рис. 2. Особенностью этой модели является то, что глубокий акцепторный уровень хрома расположен в запрещенной зоне выше, чем глубокий донорный уровень EL2.

Кинетика тепловых процессов захвата-возбуждения носителей для глубоких уровней в симуляторе APSYS описывается в рамках рекомбинационной статистики Шокли - Рида - Холла с помощью сечений захвата электронов σ_n и дырок σ_p . В расчетах использовались следующие параметры для уровней EL2 и Cr [10-12] при температуре 300 К:

- энергия ионизации уровня EL2 относительно зоны проводимости: $E_C - E_{EL2} = 0.688$ эВ;
- сечение захвата для электронов уровня EL2: $\sigma_{n,EL2} = 4.68 \times 10^{-16}$ см²;
- сечение захвата для дырок уровня EL2: $\sigma_{p,EL2} = 2 \times 10^{-18}$ см²;

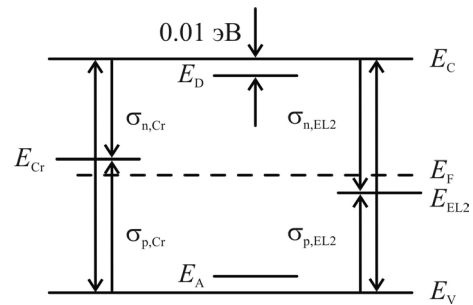


Рис. 2. Четырехуровневая модель полуизолирующего GaAs

- энергия ионизации уровня Cr относительно валентной зоны: $E_{Cr} - E_V = 0.755$ эВ;

- сечение захвата для электронов уровня Cr: $\sigma_{n,Cr} = 1.17 \times 10^{-19}$ см²;

- сечение захвата для дырок уровня Cr: $\sigma_{p,Cr} = 5 \times 10^{-17}$ см².

Из приведенных значений сечений захвата следует, что с большой точностью центры EL2 можно считать электронными ловушками, а центры хрома - дырочными ловушками.

2. Материалы подложки

Моделирование перехода канал-подложка проводилось для трех материалов подложки с одинаковыми, типовыми [10; 11], значениями концентрации мелких примесей $(N_D - N_A) = 10^{16}$ см⁻³ и концентрации ловушек EL2 $N_{EL2} = 1.5 \times 10^{16}$ см⁻³, но с различным содержанием хрома N_{Cr} . Исследовались распределение поля и структура объемного заряда в переходе в зависимости от степени компенсации подложки. Параметры исследуемых материалов приведены в таблице ниже. Первый из этих материалов имеет компенсационное отношение $N_{Cr} / [N_{EL2} + (N_D - N_A)] = 1$. Остальные два материала характеризуются повышенным содержанием хрома.

Все три материала обладают хорошими полуизолирующими свойствами, имеют высокие значения удельного сопротивления ρ . В таблице ниже приведены оценочные значения ρ , полученные в предположении [10; 11], что подвижность электронов $\mu_n = 4000$ см²/(Vs), а отношение подвижностей электронов и дырок $\mu_n / \mu_p = 15$.

3. Результаты расчетов

Зонная диаграмма перехода и распределение Y-составляющей напряженности электрического поля в поперечном сечении $X = \text{const}$, перпендикулярном к плоскости контактов, показаны на рис. 3. Отметим, что здесь и далее приводятся сечения вне длины затвора с тем,

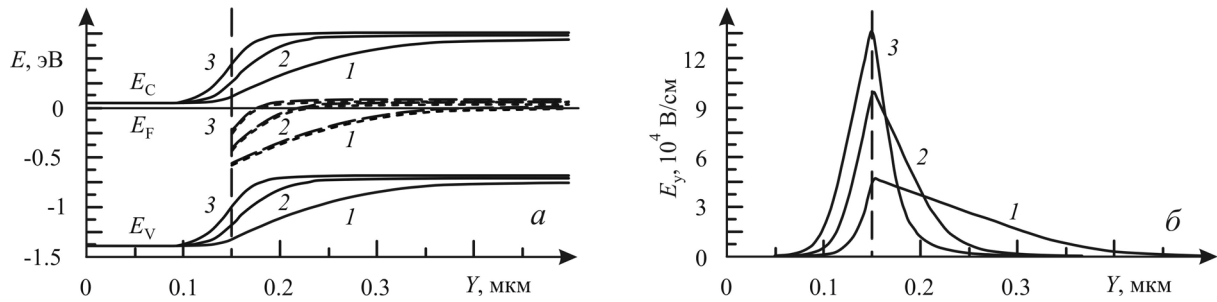


Рис. 3. Зонная диаграмма (а) и распределение напряженности электрического поля (б) в области перехода между каналом и подложкой. Глубокие уровни на зонной диаграмме показаны линиями: EL2 (---), Cr (-----)

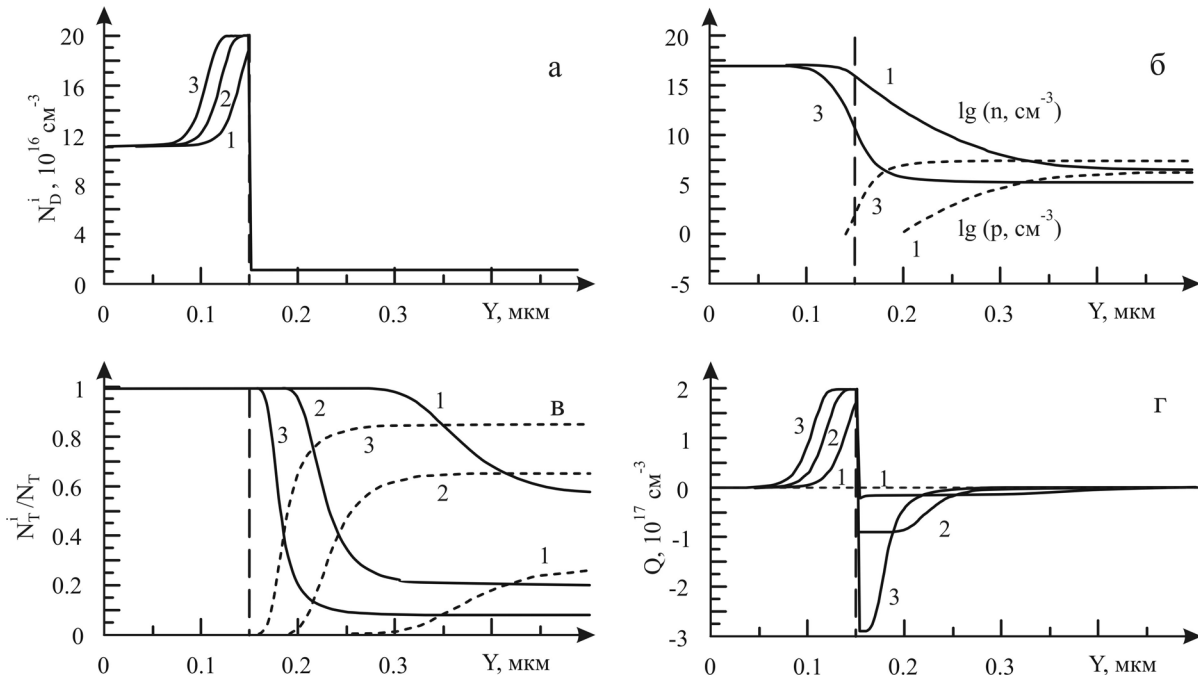


Рис. 4. Объемный заряд и его структура в области перехода между каналом и подложкой: а – концентрация ионизированных мелких доноров; б – концентрация свободных носителей; в – доля ионизированных глубоких уровней EL2 (---) и Cr (-----); з – плотность объемного заряда Q

чтобы не рассматривать явления в области контакта Шоттки, а номера кривых соответствуют номерам материала подложки таблицы. Координата $Y = 0.15$ мкм на графиках, согласно модели рис. 1, соответствует границе канал-подложка. Энергии дна зоны проводимости E_C и потолка 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 на зонной диаграмме не показан, поскольку в масштабе диаграммы он вплотную прилегает к дну зоны проводимости.

Видно, что с увеличением содержания хрома в подложке уровень Ферми в ней понижается, соответственно, возрастает контактная разность потенциалов. Одновременно происходит уменьшение ширины области электрического поля и увеличение его напряженности на границе раздела. При этом область поля смещается в сто-

рону канала: если для материала 1 поле сконцентрировано преимущественно в подложке, то для материала 3 – преимущественно в пространстве канала. Таким образом, при увеличении концентрации хрома в подложке происходит расширение обедненной области канала у границы раздела и соответственное уменьшение эффективной толщины активного слоя. В области перехода в результате искривления зон глубокие уровни принимают положение существенно ниже уровня Ферми, в результате чего глубокие акцепторы здесь должны практически полностью заряжаться (отрицательно), а глубокие доноры – нейтрализоваться.

Распределение объемного заряда в поперечном сечении $X = \text{const}$ и его структура показаны на рис. 4. Плотность объемного заряда, отнесенная к величине элементарного заряда, определялась как

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

где p и n – концентрации свободных дырок и электронов; N_D^i – концентрация ионизированных мелких доноров; N_{EL2}^i и N_{Cr}^i – концентрации ионизированных глубоких уровней. Предполагалось, что мелкие примеси представлены только донорами ($N_A = 0$).

На рис. 4, а показано пространственное распределение концентрации ионизированных мелких доноров $N_D^i(Y)$. Полная ионизация мелких доноров имеет место только в подложке, где их уровень существенно выше уровня Ферми. В канале уровень Ферми близок к уровню мелких доноров в связи с их высокой концентрацией ($2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$), поэтому мелкие доноры ионизированы не полностью. Степень их ионизации возрастает при приближении из глубины канала к поверхности раздела с подложкой, где энергетические уровни повышаются относительно уровня Ферми.

Поперечное распределение концентраций свободных электронов и дырок показано на рис. 4, б. В глубине подложки концентрация носителей мала, причем в нормально компенсированной подложке (материал № 1) n и p близки друг к другу, а при высоком содержании хрома существенно различаются с преобладанием дырок. При переходе через потенциальный барьер в область канала концентрация дырок стремится к нулю, а концентрация электронов – к максимальному значению.

Степень ионизации глубоких уровней в подложке N_T^i / N_T характеризуется кривыми рис. 4, в. В глубине подложки уровни ловушек близки к уровню Ферми, поэтому их ионизация сильно зависит от содержания хрома, влияющего на положение E_F . В области же потенциального барьера для всех рассматриваемых материалов подложки при приближении к границе раздела доля ионизированных ловушек EL2 стремится к нулю, а доля ионизированных ловушек Cr – к единице. С точки зрения статистики Ферми – Дирака это объясняется изменением положения энергетических уровней относительно уровня Ферми в области потенциального барьера в соответствии с зонной диаграммой рис. 3. С точки же зрения статистики Шокли – Рида – Холла [13] такое поведение ионизации глубоких уровней в области перехода связано с изменением концен-

трации свободных носителей в этой области в соответствии с рис. 4, б, поскольку доля глубоких уровней, занятых электронами, в стационарном состоянии зависит от локальных концентраций свободных носителей n и p . В результате уменьшение p при приближении из глубины подложки к границе с каналом ведет к освобождению ловушек Cr от дырок и к их ионизации, а увеличение n – к захвату ловушками EL2 электронов и к их нейтрализации.

Объемный заряд перехода канал-подложка, распределение плотности которого в единицах элементарного заряда показано на рис. 4, г, представляет собой диполь с положительным знаком со стороны канала и отрицательным – со стороны подложки. В полуизолирующей подложке объемный заряд образован в основном алгебраической суммой зарядов ионизированных глубоких доноров, глубоких акцепторов и мелких доноров. В глубине подложки действует механизм компенсации, в силу которого происходит переход электронов с мелких и глубоких доноров на глубокие акцепторы. При этом выполняется условие электронейтральности. В области потенциального барьера, где ловушки EL2 в основном нейтрализуются, а ловушки Cr ионизируются, образуется объемный заряд как алгебраическая сумма отрицательного заряда ионизированных ловушек Cr и положительного заряда ионизированных мелких доноров. Поскольку в подложке в области перехода $N_{Cr}^i > N_D^i$, то объемный заряд имеет отрицательный знак. В подложке с относительно невысоким содержанием хрома (материал № 1) в тонком слое, прилегающем к каналу, плотность отрицательного заряда немного возрастает за счет свободных электронов, концентрация которых здесь (рис. 4, б) сравнима с концентрацией примеси хрома. Положительный объемный заряд со стороны канала формируется как алгебраическая сумма плотностей ионизированных мелких доноров и свободных электронов.

Рис. 3, б и 4, г показывают, что ширина проводящего канала ПТШ сильно зависит от содержания хрома в подложке: чем выше концентрация Cr, тем уже канал и меньше его проводимость. Это обстоятельство может явиться причиной разброса параметров приборов, изготовленных на подложках с различными уровнями легирования.

Заключение

Произведен анализ равновесного перехода канал – полуизолирующая подложка, легированная хромом, в арсенид-галлиевом ПТШ. Анализ проведен в рамках четырехуровневой модели полуизолирующего GaAs. **Определена структура** объемного заряда в области перехода для подложек с различным содержанием хрома. Показано решающее значение глубоких акцепторных уровней хрома в образовании объемного заряда со стороны подложки. Концентрация глубоких

акцепторов сильно влияет как на толщину перехода, так и на ширину канала, а следовательно, и на функциональные параметры ПТШ. При импульсных воздействиях изменение величины и структуры объемного заряда вследствие перезарядки глубоких уровней является причиной длительных переходных процессов в ПТШ.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (ГК № 14.514.11.4079).

Таблица

Содержание хрома и удельное сопротивление для исследуемых подложек

Материал №	$N_{Cr}, \text{см}^{-3}$	$\frac{N_{Cr}}{N_{EL2} + (N_D - N_A)}$	$\rho, \text{Ом} \cdot \text{см}$
1	2.5×10^{16}	1	4.7×10^8
2	1×10^{17}	4	1.3×10^9
3	1×10^{17}	12	8.3×10^8

Список литературы

1. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / В.В. Антипин [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 1. С. 37–53.
2. Баранов И.А., Обрезан О.И., Ропий А.И. Стойкость твердотельных модулей СВЧ к кратковременным электроперегрузкам // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. СВЧ-техника. М.: ЦНИИ «Электроника», 1997. 111 с.
3. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления / под ред. Д.В. Ди Лоренцо, Д.Д. Канделуола. М.: Радио и связь, 1988. 496 с.
4. Itoh T., Yanai H. Stability of Performance and Interfacial Problems in GaAs MESFET's // IEEE Trans. Electron Devices. 1980. V. 27. № 6. P. 1037–1045.
5. James D.S., Dormer L. A study of high power pulsed characteristics of low-noise GaAs MESFET's // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. 1981. V. 29. № 12. P. 1298–1310.
6. Радиационные эффекты в GaAs-полупроводниковых приборах и интегральных схемах / Е.Р. Аствацатурьян [и др.] // Зарубежная электронная техника: сб. обзоров. М.: Изд. МЭП СССР, 1988. № 1. С. 48–83.
7. Transient radiation study of GaAs metal semiconductor field effect transistors implanted in Cr-doped and undoped substrates / M. Simons [et al.] // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. № 11. P. 6630–6636.
8. Аствацатурьян Е.Р., Громов Д.В., Елесин В.В. Модель долговременной релаксации фототока в GaAs-структурах с затвором Шоттки // Микроэлектроника. 1989. Т. 18. Вып. 5. С. 434–438.
9. Механизмы обратимых отказов GaAs ПТШ при мощных импульсных воздействиях / А.М. Бобрешов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2008. Т. 11. № 3. С. 60–68.
10. Compensation mechanisms in GaAs / G.M. Martin [et al.] // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. № 5. P. 2840–2852.
11. Полуизолирующие соединения $A^{III}B^V$ / под ред. Дж.У. Риса. М.: Металлургия, 1984. 256 с.
12. Simplified simulation of GaAs MESFET's with semi-insulating substrate compensated by deep levels / K. Horio [et al.] // IEEE Trans. Computer-Aided Design. 1991. V. 10. № 10. P. 1295–1302.
13. Shockley W., Read W.T., Jr. Statistics of the recombinations of holes and electrons // Phys. Rev. 1952. V. 87. № 5. P. 835–842.

Field and charge distribution in the junction between n-GaAs and semiinsulating chrome doped substrate

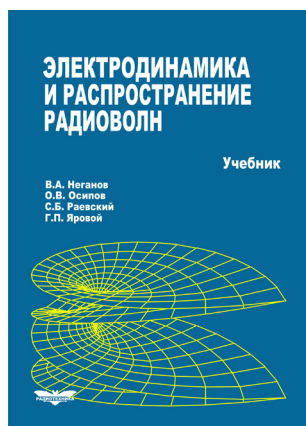
A.M. Bobreshov, Yu.N. Nesterenko, Yu.Yu. Razuvaev

Field and volume charge structure in the junction between semiinsulating chrome doped substrate and n-channel of GaAs MESFET was analyzed by means of a computational modeling. It was used a four-level model of semiinsulating GaAs with deep levels. The obtained results show, that deep acceptor level makes capital contribution in volume charge forming from the side of a substrate. Magnitude and distribution of this charge depend on deep acceptors concentration.

Keywords: MESFET, GaAs, semi-insulating substrate, interface, deep levels, space charge, computational modeling.

Неганов, В.А.

Электродинамика и распространение радиоволн: учебник / В.А. Неганов [и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.



ISBN 978-5-88070-154-4

УДК 537.87(075.3)
ББК 22.3
Н 41

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Осуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноведущих структурах и др.

Предназначается для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов, а также инженеров-радиотехников и радиофизиков.