

К. ф.-м. н. Н. Б. ГОРЕВ, к. ф.-м. н. И. Ф. КОДЖЕСПИРОВА,
к. ф.-м. н. Е. Н. ПРИВАЛОВ

Украина, г. Днепропетровск, Институт технической механики
E-mail: gorev57@mail.ru

Дата поступления в редакцию
16.03 2006 г.

Оппонент к. т. н. В. И. ТИМОФЕЕВ
(НТУУ "КПИ", г. Киев)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ НА GaAs

Разброс параметров GaAs полевых транзисторов, вызванный неоднородным распределением глубоких центров, может прогнозироваться по концентрации незаполненных глубоких центров на границе "пленка—буферный слой".

Одной из основных причин, сдерживающих развитие информационной техники на арсенидгаллиевой элементной базе, является значительный разброс параметров активных элементов по полупроводниковой пластине [1, 2]. Особенно сильно это проявляется при создании интегральных схем, состоящих из большого числа полевых транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ), к которым предъявляются жесткие требования по однородности параметров.

В литературе сообщаются главным образом результаты изучения разброса параметров ПТШ на ионно-имплантированных структурах [3—5]. Вследствие этого и предлагаемые разными авторами причины разброса параметров приборов в конечном итоге связываются с особенностями технологии ионной имплантации, приводящими к варьированию вдоль пластины концентрации свободных электронов в токопроводящем канале. Однако хорошо известно, что и в случае структур, в которых активная пленка получена эпитаксиальными методами, параметры ПТШ, изготовленных на одной пластине, также варьируются в довольно широком интервале, хотя такие структуры обладают весьма высокой однородностью профиля легирования по пластине [6]. Таким образом, разброс параметров ПТШ не может быть связан только с вариацией параметров пленки. Это свидетельствует о том, что этот разброс во многом определяется и границей между активной пленкой и примыкающим к ней слоем (буферным слоем или подложкой).

Дело в том, что в силу значительного перепада концентрации свободных носителей на этой границе образуется область пространственного заряда (переход "пленка—подложка" или "пленка—буферный слой") [7]. Локализованная в пленке область обеднения этого перехода образована зарядом мелких ионизированных доноров, а его область накопления, локализованная в подложке, образована зарядом, связанным на глубоких центрах. Поскольку концентрация незаполненных глубоких центров в подложке сравнима с концентрацией легирующей примеси в пленке, локализованная в пленке область обеднения пе-

рехода сравнима по ширине с его областью накопления, и в случае тонких пленок, характерных для современной микроэлектроники, она может стать сравнимой с толщиной пленки. Поэтому параметры тонкопленочных арсенидгаллиевых приборов весьма чувствительны к свойствам полуизолирующей подложки, на которой они изготавливаются, в частности, к концентрации глубоких центров в подложке. В трехслойных структурах, в которых между пленкой и подложкой имеется буферный слой, ситуация усложняется и тем, что на характеристики ПТШ влияют глубокие центры как в буферном слое, так и в подложке.

Выявление связи между распределением глубоких центров по полупроводниковой пластине и разбросом параметров ПТШ на трехслойных структурах "пленка—буферный слой—подложка" и является целью данной работы.

Для достижения этой цели прежде всего необходимо найти величину, характеризующую интегральное влияние глубоких центров в буферном слое и подложке на характеристики ПТШ. Для этого можно воспользоваться подходом, предложенным нами в работах [8, 9], в которых рассмотрены особенности низкочастотной вольт-фарадной характеристики арсенидгаллиевых структур "пленка—буферный слой—подложка". Мы показали там, что при значениях обратного напряжения на барьере V_{rev} , при которых имеет место значительное смыкание областей обеднения барьера Шоттки и перехода "пленка—буферный слой", низкочастотная барьерная емкость C_{LF} ведет себя аномальным образом, а именно, увеличивается с ростом V_{rev} , и по этому аномальному участку низкочастотной вольт-фарадной зависимости можно определить величину, характеризующую интегральное влияние глубоких центров как в буферном слое, так и в подложке, на захват носителей из пленки. Мы назвали эту величину эффективной концентрацией незаполненных глубоких центров на границе "пленка—буферный слой". Эта эффективная концентрация N следующим образом выражается через низкочастотную барьерную емкость C_{LF} :

$$N = \min \left\{ \frac{C_{LF}^3}{q\epsilon\epsilon_0 S^2 dC_{LF}/dV_{rev}} \right\}_{dC_{LF}/dV_{rev}>0}, \quad (1)$$

где q — заряд электрона;

ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;

ϵ_0 — диэлектрическая постоянная;

S — площадь барьерного контакта.

Есть все основания полагать, что интегральное влияние незаполненных глубоких центров в буферном слое и подложке на параметры ПТШ тоже можно характеризовать величиной N . Для проверки предположения о том, что с точки зрения влияния глубоких центров на параметры ПТШ их распределение по пластине можно характеризовать одной величиной, а именно, эффективной концентрацией N незаполненных глубоких центров на границе "пленка—буферный слой", необходимо рассчитать параметры ПТШ в широком диапазоне изменения параметров, характеризующих глубокие центры в буферном слое и подложке, и сопоставить рассчитанные параметры ПТШ с величиной N .

Низкочастотная вольт-фарадная характеристика трехслойной структуры, необходимая для определения эффективной концентрации незаполненных глубоких центров N по формуле (1), может быть рассчитана по нашей модели, описанной в работе [9], которая учитывает смыкание области обеднения барьера Шоттки и областей пространственного заряда на межсоединительных границах.

Что касается параметров транзисторов, то они обычно рассчитываются по известным аналитическим моделям ПТШ [10]. Однако все эти модели основаны на допущении, что проводящий канал электронеutralен, область обеднения барьера Шоттки полностью обеднена свободными носителями, и граница между каналом и этой областью является резкой (приближение резких границ). Приближение же это справедливо только в том случае, если ширина канала намного больше такого характерного размера как дебаевская длина, и поэтому оно становится заведомо неприменимым вблизи отсечки. Кроме того, это приближение не позволяет рассматривать влияние физических процессов в канале (например, таких как образование под затвором статического домена сильного электрического поля) на заполнение глубоких центров на границе раздела "пленка—подложка" ("пленка—буферный слой"), которое, в свою очередь, может существенно влиять на проводимость канала. Эти процессы адекватно учитываются двухмерными численными моделями [11—13], однако модели эти имеют довольно большое число входных параметров, точные значения которых часто неизвестны, и требуют довольно значительного объема вычислений.

Разумным же компромиссом между адекватностью описания и сложностью модели может быть квазидвухмерная модель ПТШ, предложенная в нашей работе [14] при рассмотрении захвата носителей из пленки на глубокие центры в буферном слое и подложке. В этой модели использованы предположения, являющиеся общепринятыми при рассмотрении структур ПТШ (продольное электрическое поле существует только в пленке и не зависит от поперечной координаты, поперечной компонентой и диффузионной составляющей продольной компоненты плотности тока можно пренебречь, все приложенное напряжение исток-сток падает на подзатворной части транзистора). Отличительной же особенностью модели является отказ от приближения резких границ, а именно, в ней предполагается, что области обеднения барьера

Шоттки и перехода "пленка—буферный слой" сомкнуты, т. е. в любом поперечном сечении транзистора концентрация n свободных носителей достигает в некоторой точке пленки x_m максимального значения n_m , меньшего концентрации N_d легирующей примеси в пленке (рис. 1). Эта модель в конечном итоге сводится к численному решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

Модель позволяет рассчитать вольт-амперную характеристику транзистора. Типичные рассчитанные вольт-амперные характеристики приведены на рис. 2 (концентрация легирующей примеси в пленке $N_d=10^{17}$ см⁻³; толщина пленки $h=0,2$ мкм; длина затвора $l=1$ мкм; ширина затвора $W=300$ мкм; толщина

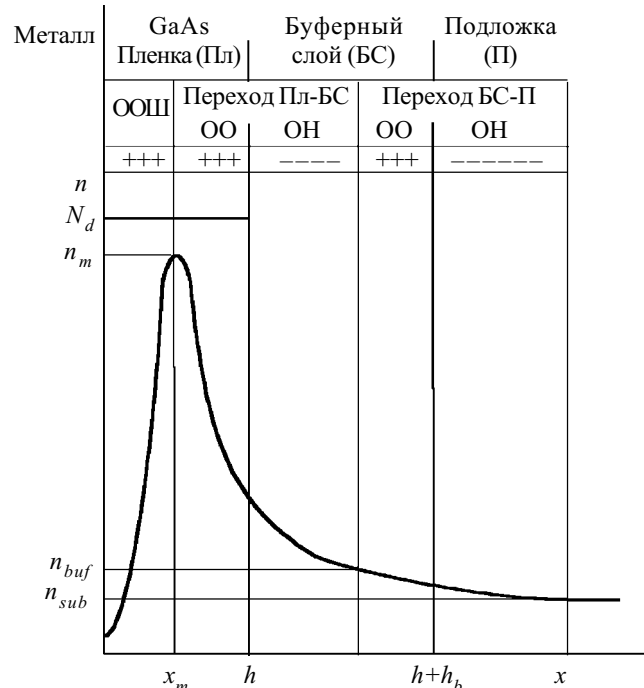


Рис. 1. Схематический вид распределения концентрации свободных носителей n и пространственного заряда поперек ПТШ на трехслойной структуре "пленка—буферный слой—подложка":

ООШ — область обеднения барьера Шоттки; ОО — область обеднения; ОН — область накопления

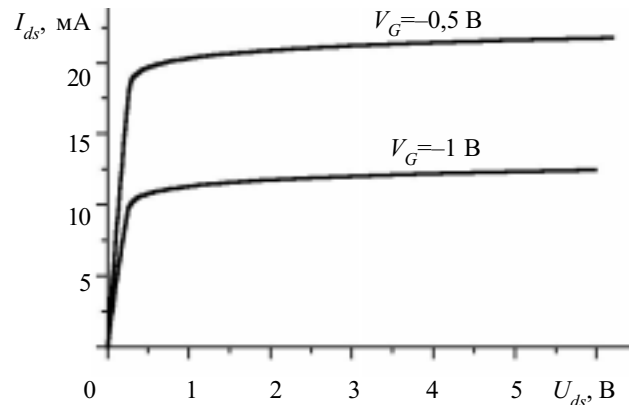


Рис. 2. Рассчитанные зависимости тока стока I_{ds} от напряжения исток-сток U_{ds} при разных значениях напряжения затвора V_G

буферного слоя $h_b=0,7$ мкм; концентрация глубоких центров в буферном слое $N_{ib}=2\cdot 10^{16}$ см⁻³; параметр Шокли–Рида глубоких центров в буферном слое $n_{1b}=10^{11}$ см⁻³ (этот параметр, зависящий от глубины энергетического уровня глубокого центра, равен концентрации свободных носителей в зоне проводимости в случае, когда уровень Ферми совпадает с этим энергетическим уровнем); концентрация свободных носителей в нейтральной области буферного слоя $n_{buf}=10^{13}$ см⁻³ (в случае смыкания области обогащения перехода "пленка—буферный слой" и области обеднения перехода "буферный слой—подложка" эта область стягивается в одну точку); концентрация глубоких центров в подложке $N_t=5\cdot 10^{16}$ см⁻³; параметр Шокли–Рида глубоких центров в подложке $n_1=10^{10}$ см⁻³; концентрация свободных носителей в глубине подложки $n_{sub}=10^8$ см⁻³; высота барьера Шоттки $\phi_b=0,8$ эВ; $T=300$ К).

Зная вольт-амперные характеристики для различных значений напряжения затвора, можно определить основные параметры ПТШ, а именно, ток насыщения I_{sat} , крутизну g_m и напряжение отсечки V_{po} (напряжение отсечки обычно определяется как напряжение затвора, при котором ток насыщения достигает некоторой заданной малой величины, которую обычно принимают равной 10 мкА).

На рис. 3 приведено сопоставление эффективной концентрации N незаполненных глубоких центров на границе "пленка—буферный слой" и тока насыщения, крутизны и напряжения отсечки ПТШ, рассчитанных в широком диапазоне параметров, характеризующих

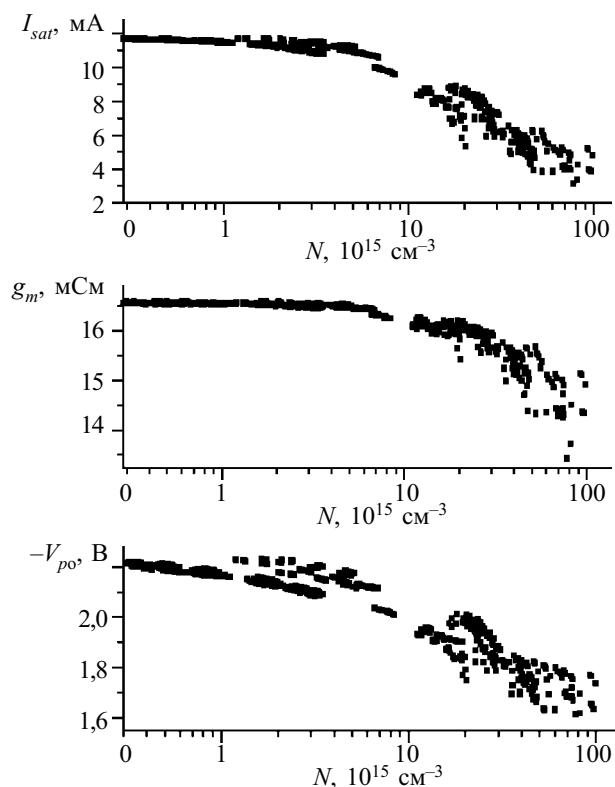


Рис. 3. Рассчитанные зависимости тока насыщения I_{sat} , крутизны g_m и напряжения отсечки V_{po} ПТШ от эффективной концентрации N незаполненных глубоких центров на границе "пленка—буферный слой"

глубокие центры и их распределение в рассматриваемой структуре: концентрация глубоких центров в буферном слое N_{ib} равна $10^{16}, 2\cdot 10^{16}, 3\cdot 10^{16}$ см⁻³; параметр Шокли–Рида этих глубоких центров n_{1b} равен $10^{10}, 10^{12}$ см⁻³; концентрация свободных носителей в нейтральной области (точке) буферного слоя n_{buf} равна $10^{12}, 10^{13}, 10^{14}$ см⁻³; толщина буферного слоя h_b равна 0,05, 0,1, 0,3, 0,4, 0,6, 0,8, 0,9, 1,0 мкм (обычно толщина буферного слоя составляет около 1 мкм, однако диффузия глубоких центров из подложки может уменьшить эффективную толщину буферного слоя, и поэтому расчет был проведен также и для $h_b \ll 1$ мкм); концентрация глубоких центров в подложке N_t равна $5\cdot 10^{16}, 10^{17}$ см⁻³; концентрация свободных носителей в глубине подложки n_{sub} равна $5\cdot 10^8, 10^{10}$ см⁻³ (ток насыщения и крутизна рассчитаны при напряжении затвора $V_G=-1$ В). Толщина пленки h , концентрация легирующей примеси в пленке N_d , а также концентрация мелких доноров в подложке N_s имели фиксированные значения $h=0,2$ мкм, $N_d=10^{17}$ см⁻³ и $N_s=5\cdot 10^{15}$ см⁻³. Затвор имел длину 1 мкм и ширину 300 мкм.

Как видно из графиков, вариация концентрации N по пластине приводит к заметному разбросу параметров ПТШ даже при фиксированной толщине и плотности легирования пленки. Из графиков также видно, что имеется довольно хорошая корреляция между параметрами ПТШ и величиной N , а именно, ток насыщения, крутизна и абсолютная величина напряжения отсечки имеют явную тенденцию к уменьшению с увеличением N . Физический механизм этого уменьшения заключается в том, что увеличение N приводит к сужению проводящего канала в пленке вследствие увеличения отрицательного заряда, связанного на глубоких центрах в буферном слое.

Итак, несмотря на то, что в рассматриваемой структуре распределение глубоких центров по пластине характеризуется несколькими параметрами (концентрация глубоких центров в буферном слое и подложке, их глубина, толщина буферного слоя), о разбросе параметров ПТШ, вызванном неоднородным распределением глубоких центров по пластине, можно судить по одной величине, а именно, по эффективной концентрации незаполненных глубоких центров на границе "пленка—буферный слой".

Таким образом, разброс параметров полевых транзисторов можно прогнозировать до изготовления приборов по эффективной концентрации незаполненных глубоких центров на границе "пленка—буферный слой", определяемой с помощью вольт-фарадных измерений в исходных пластинах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Костылев С. А., Прохоров Е. Ф., Уколов А. Т. Влияние полуизолирующей подложки на параметры арсенидгаллиевых полевых транзисторов с барьером Шоттки // Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ.— 1986.— № 7.— С. 1—39.
2. Костылев С. А., Прохоров Е. Ф., Уколов А. Т. Явления токопереноса в тонкопленочных арсенидгаллиевых структурах.— Киев: Наук. думка, 1990.
3. Ishii Y., Miyazawa Y., Ishida S. Threshold voltage scattering of GaAs MESFET's fabricated on LEC-grown semi-insulating substrates

// IEEE Transactions on Electron Devices.— 1984.— Vol. ED-31, N 6.— P. 800—804.

4. Nanishi Y., Ishida S., Miyazawa S. Correlation between dislocation distribution and FET performances observed in low Cr doped LEC GaAs // Japanese Journal of Applied Physics.— 1983.— Vol. 22, N 1.— P. L54—L56.

5. Kasahara J., Arai M., Watanabe N. Extremely uniform threshold voltage distribution of GaAs FET made on LEC-grown crystals // Electronics Letters.— 1985.— Vol. 21, N 22.— P. 1040—1042.

6. Гассанов Л. Г., Лаурс Е. П., Груша С. А. Современный уровень и перспективы развития арсенидгаллиевых приборов СВЧ на базе технологии молекулярно-лучевой эпитаксии // Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ.— 1985.— №. 8.— С. 1—50.

7. Хучуа Н. П., Хведелидзе Л. В., Тигишвили М. Г. и др. Роль глубоких уровней в технологии арсенида галлия // Микроэлектроника.— 2003.— Т. 32, № 5.— С. 323—343.

8. Kostylev S. A., Prokhorov E. F., Gorev N. B. et al. Low-frequency capacitance-voltage characterization of deep levels in film-buffer layer-substrate GaAs structures // Solid-State Electronics.— 1999.— Vol. 43, N 1.— P. 169—176.

9. González-Hernández J., Prokhorov E., Gorev N. B. et al. Nondestructive technique for the characterization of deep traps at interlayer interfaces in thin-film multilayer semiconductor structures // Journal of Vacuum Science & Technology B.— 1999.— Vol. 17, N 5.— P. 2357—2360.

10. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия.— М.: Мир, 1991.

11. Horio K., Asada K., Yanai H. Two-dimensional simulation of GaAs MESFETs with deep acceptors in the semi-insulating substrate // Solid-State Electronics.— 1991.— Vol. 34, N 4.— P. 335—343.

12. Horio K., Fuseya Y., Kusuki H., Yanai H. Simplified simulations of GaAs MESFET's with semi-insulating substrate compensated by deep levels // IEEE Transactions on Computer-Aided Design.— 1991.— Vol. 10, N 10.— P. 1295—1302.

13. Horio K., Fuseya Y. Two-dimensional simulations of drain-current transients in GaAs MESFET's with semi-insulating substrate compensated by deep levels // IEEE Transactions on Electron Devices.— 1994.— Vol. ED-41, N 8.— P. 1340—1346.

14. Горев М. Б., Коваленко Ю. А., Коджеспірова І. Ф., Прохоров С. Ф. Квазідвовимірна модель захоплення носіїв у структурі арсенідгалійового польового транзистора з затвором Шоткі // Радиофізика и электроника. (Харьков)— 1998.— Т. 3, № 3.— С. 103—105.