

06.2

Радиационная стойкость квазибаллистических полевых транзисторов Шоттки с различными конструкциями буферного слоя при воздействии нейтронного облучения разных спектров

© *Е.В. Киселева, С.В. Оболенский, М.А. Китаев, О.В. Ткачев, В.П. Шукайло, В.Т. Громов*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Поступило в Редакцию 19 мая 2005 г.

Теоретически и экспериментально исследовано воздействие нейтронов со средними энергиями 1.1 и 14 MeV на характеристики квазибаллистических полевых транзисторов Шоттки с различными конструкциями буферного слоя: гомоструктурным GaAs буфером, гетеробуфером на основе AlGaAs, а также гетеробуфером на основе сверхрешетки AlAs/GaAs. Показано, что в данном ряду радиационная стойкость приборов последовательно повышается в 1.2–5 раз за счет эффекта компрессии траекторий движения электронов в канале транзистора, а также геттерирования радиационных дефектов гетерограницей буферного слоя.

Известно, что использование гетероструктур позволяет улучшить характеристики полевых транзисторов, например при формировании двумерного электронного газа в транзисторах с высокой подвижностью электронов (HEMT) [1]. Однако при сокращении размеров активных областей приборов вплоть до длин безстолкновительного пролета носителей преимущество HEMT перед обычными полевыми транзисторами Шоттки (ПТШ) нивелируется [2]. Перспективными являются ПТШ со встроенным энергетическим барьером на гетерогранице канал–буферный слой [3], который отсекает активную область прибора от подложки.

При радиационном воздействии наличие гетерограницы означает появление очередного фактора риска для транзистора: тройные со-

единения неустойчивы и могут диссоциировать при радиационном воздействии [4], а гетерограницы склонны к накоплению дефектов [5]. В литературе проблема дефектообразования на гетерогранице обычно связывается с исследованием радиационной стойкости лазерных структур и гетеробиполярных транзисторов, т.е. приборов, в которых носители движутся в поперечном (по отношению к границе раздела слоев структуры) направлении. С точки зрения полевых транзисторов следует рассматривать изменение тех параметров гетерограницы, которые существенно влияют на характеристики латерального транспорта электронов непосредственно вблизи гетеробарьера, например при исследовании радиационной стойкости НЕМТ [6]. Применительно к квазибаллистическим ПТШ на структурах с гетеробуфером подобные исследования ранее не проводились.

Исследовались квазибаллистические ПТШ с V-образным затвором и гомобуферным слоем (рис. 1, *a*) [7], буферным слоем из GaAlAs (рис. 1, *b*), а также гетеробуфером на основе сверхрешетки AlAs/GaAs (рис. 1, *c*) [3]. Период сверхрешетки оптимизирован для получения максимальной величины коэффициента отражения горячих электронов $\approx 90\%$. Это значение достигалось благодаря малой ширине первой зоны размерного квантования Γ -долины (≈ 23 MeV), которая расположена на расстоянии ≈ 180 MeV выше края зоны проводимости GaAs, что существенно больше поперечной компоненты энергии электронов в канале. Первая минizona размерного квантования для X -долины имела ширину менее 5 MeV. За счет специальной формы затвора длина канала таких ПТШ составляет 30–100 nm [7], что обеспечивает квазибаллистический характер движения носителей заряда в активной области транзистора. Поскольку между собой исследуемые транзисторы отличались только исполнением буферного слоя, то все отличия радиационной модификации их характеристик в той или иной степени связаны с наличием гетероструктуры. Таким образом, сравнение параметров ПТШ с гомо- и гетероструктурным буфером позволяет выделить информацию о радиационных изменениях транспортных свойств электронов, движущихся вдоль гетеробарьера.

В эксперименте измерялись сток-затворные вольт-амперные характеристики (ВАХ) ПТШ с гомо- и гетероструктурными буферными слоями до и после воздействия нейтронов различных спектров. Облучались по 30 приборов каждого типа: ПТШ с GaAs и AlGaAs буферами — нейтронами энергии 1.1 и 14 MeV со стороны затвора и со стороны

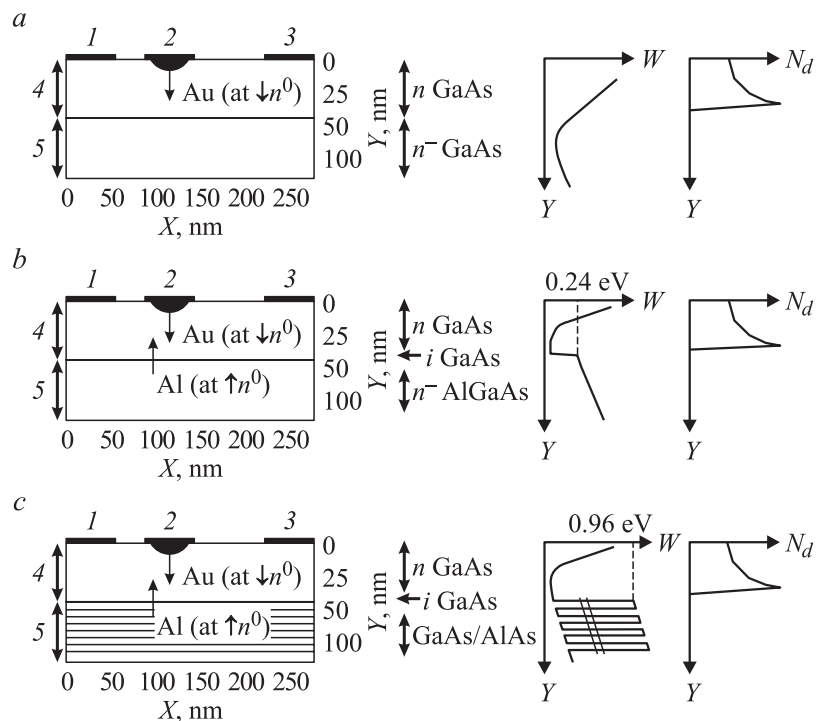


Рис. 1. Схематичное изображение структуры ПТШ с различными конструкциями буферных слоев. Приведены профили дна зоны проводимости и концентрации легирующей примеси в канале приборов. Показаны возможности инжекции атомов золота из затвора и алюминия из гетероструктурного буфера при различной направленности облучения. 1 — источник, 2 — затвор, 3 — сток, 4 — канал, 5 — буфер.

подложки; ПТШ с буфером на основе сверхрешетки — нейтронами энергии 1.1 MeV со стороны затвора. Для облучения использовался импульсный ядерный реактор, имеющий колоколообразный спектр нейтронного излучения со средней энергией 1.1 MeV и длительностью импульса $800 \mu\text{s}$; интервал времени между импульсами — одни сутки. Облучение ПТШ со сверхрешеткой проводилось в непрерывном режиме работы реактора, но с той же средней скоростью набора

флюенса. Нейтроны с энергией 14 MeV были получены при помощи генератора НГ-12: форма энергетического спектра близка к монолинии; флюенс за 10 часов непрерывной работы составляет 10^{14} см^{-2} .

Исследовались относительные изменения порогового напряжения $\Delta U/U_0 = (U_0 - U_F)/U_0$ и крутизны ВАХ $\Delta g/g_0 = (g_0 - g_F)/g_0$ в зависимости от флюенса F_n воздействия нейтронов различных энергий (рис. 2). Изменение крутизны в первую очередь определялось дефектами, содержащимися в объеме канала, а порогового напряжения — дефектами на границе канал–буферный слой.

Для объяснения экспериментальных данных проводились: 1) моделирование в квазигидродинамическом приближении [8] движения носителей в канале прибора для различных конструкций буферного слоя, которые учитывались посредством введения в профиль потенциала энергетического барьера на границе канал–буферный слой; 2) моделирование методом Монте-Карло на основе модели [9] процессов дефектообразования в приборных структурах для различных условий облучения. Учитывались инжекция атомов золота, выбитых нейтронами из затвора ПТШ, и атомов алюминия, внедренных в канал из гетеробуфера.

Расчеты и эксперимент показали следующее:

1. Наличие гетеробуфера приводит к компрессии траекторий носителей заряда: основная масса электронов движется по коротким траекториям в тонкой области канала вблизи гетерограницы, что объясняет последовательное снижение скорости изменения параметров в 2–3 раза по мере увеличения энергетического барьера на гетерогранице канал–буферный слой (рис. 2).

2. Энергия электронов в канале составляет 0.4–0.7 eV, поэтому рассеяние носителей заряда происходит на субкластерах радиационных дефектов (СКРД) [10], а не на кластерах в целом. Средний размер СКРД при облучении нейтронами с энергией 14 MeV примерно в 2 раза больше, чем при 1.1 MeV; разброс размеров СКРД больше в 2.5 раза. Это объясняет в 1.2–2 раза большую скорость изменения параметров гомоструктурного ПТШ и больший (в среднем) разброс параметров при воздействии нейтронов энергии 14 MeV (рис. 2).

3. Наблюдается чувствительность крутизны гомоструктурных приборов к направлению облучения. Это объясняется тем, что глубина инжекции золота составила $\approx 40 \text{ nm}$ при энергии нейтронов 1.1 MeV и $\approx 100 \text{ nm}$ при 14 MeV. В результате, при воздействии нейтронов

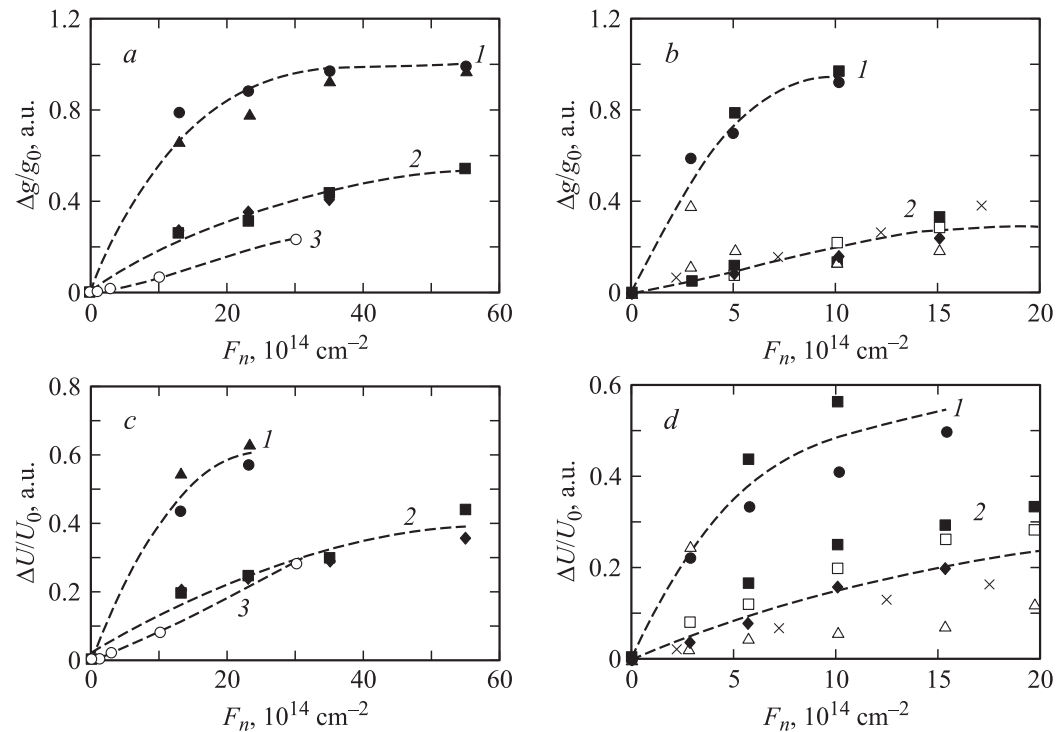


Рис. 2. Изменения крутизны ВАХ (*a, b*) и порогового напряжения (*c, d*) ПТШ с GaAs (*1*), AlGaAs (*2*) и GaAs/AlAs (*3*) буферными слоями при облучении нейтронами энергии 1.1 MeV (*a, c*) и 14 MeV (*b, d*). Данные приведены для приборов, являющихся характерными представителями своей группы.

энергии 1.1 MeV в канал прибора попадает небольшое число атомов золота (в основном они задерживаются в подслое Ti), хотя с ростом флюенса доля „золотых“ кластеров будет расти. Атомы титана создают нарушения уже за пределами активной области. При облучении со стороны затвора нейтронами энергии 14 MeV для всех типов приборов СКРД в канале будут в основном образованы атомами золота. В канале гетероструктурных ПТШ инжектируются также атомы алюминия, выбитые нейтронами из гетеробуферных слоев при облучении со стороны подложки и частично — со стороны затвора. По сравнению с влиянием собственных атомов Ga и As атомы алюминия (в силу малой массы) производят в канале слабые нарушения, так что в первом приближении инжекцию алюминия можно не учитывать при обеих энергиях нейтронного воздействия.

4. В случае гетероструктуры чувствительность крутизны к направлению потока нейтронов неразличима (рис. 2, *b*). По-видимому, это объясняется перестройкой/перераспределением точечных дефектов в активной области прибора: напряженная граница раздела канал–буферный слой является своего рода геттером, собирающим на себя часть дефектов из объема канала. В пользу подобного предположения выступают еще два факта. Во-первых, в случае ПТШ с AlGaAs буфером появляется чувствительность порогового напряжения к направлению облучения (рис. 2, *d*). При этом разброс напряжений отсечки превышает разброс данных о крутизне, а для прибора со сверхрешеткой, в отличие от остальных, скорость изменения порогового напряжения на 20–30% превышает скорость изменения крутизны, что подтверждает вывод о смещении дефектов в сторону сверхрешетки. Во-вторых, для гетероструктурных приборов неразличима чувствительность к энергии нейтронного облучения. Вероятно, отличия концентрации и топологии дефектов в активной области приводят к изменениям процессов перераспределения дефектов так, что в случае нейтронов энергии 14 MeV эффект геттерирования выражен сильнее.

В итоге положительное влияние на радиационную стойкость оказывает не только компрессия траекторий (повышение стойкости в 2–3 раза) при наличии энергетического барьера для электронов, но и геттерирование (повышение в 1.5–2 раза), причем в случае ПТШ со сверхрешеткой (благодаря наличию нескольких напряженных слоев) эффект выражен сильнее, чем в случае буфера на основе AlGaAs.

Авторы выражают благодарность Козлову В.А., Трофимову В.Т., Громову Д.В. за ценные рекомендации и замечания.

Работа выполнена при частичной поддержке фонда РФФИ, гранты № 04–02–17385 и 05–02–17121, SFR–973799.

Список литературы

- [1] *Пожеда Ю.* Физика быстродействующих транзисторов. Вильнюс: Мокслас, 1989. 264 с.
- [2] *Shur Michael S.* // IEEE Electron Device Letters. 2002. V. 23. № 9. P. 511–514.
- [3] *Волчков П.А., Журавлев К.С., Китаев М.А.* и др. // Изв. РАН. Серия физическая. 2004. Т. 68. № 1. С. 94–101.
- [4] *Вавилов В.С.* Действие излучений на полупроводники. М.: Физматгиз, 1963. 264 с.
- [5] *Шур М.* Современные приборы на основе арсенида галлия. М.: Мир, 1991. 632 с.
- [6] *Ренгевич А.Е.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 8. С. 55–58.
- [7] *Оболенский С.В., Китаев М.А.* // Письма в ЖТФ. 2000. № 10. С. 13–16.
- [8] *Оболенский С.В.* // Изв. вузов: Электроника. 2002. № 6. С. 31–38.
- [9] *Biersak J.P.* // Nuclear instruments and methods in physic research. 1987. № 1. P. 21–36.
- [10] *Киселева Е.В., Оболенский С.В.* // ВАНТ. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2004. В. 1–2. С. 46–48.