

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ АРСЕНИДГАЛЛИЕВЫХ ПТШ, ПОДВЕРГНУТЫХ ОБЛУЧЕНИЮ γ -КВАНТАМИ ^{60}Co

*И.Ю. Ильин, Р.В. Конакова, В.В. Миленин, А.Е. Ренгевич, Е.А. Соловьев,
В.И. Приходенко*

Институт физики полупроводников НАН Украины, г.Киев

Перед та після опромінення γ -квантами ^{60}Co у діапазоні доз $1 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^9$ Р досліджені статичні вольтамперні характеристики та шумова температура на частоті 12 ГГц арсенідгалієвих польових транзисторів з затвором Шоттки (ПТШ) та НЕМТ (high electron mobility transistor). Встановлена кореляція між параметрами ПТШ та радіаційними змінами властивостей меж поділу фаз як у інтервалі доз, в якому реалізується радіаційно-стимульоване гетерування дефектів, так і радіаційна деградація приконтактних ділянок GaAs. Запропоновано інтервал доз опромінення ПТШ γ -квантами ^{60}Co , в якому параметри ПТШ помінюються. Цей інтервал відповідає дозам $1 \cdot 10^4 \dots 7 \cdot 10^7$ Р.

До и после облучения γ -квантами ^{60}Co в диапазоне доз $1 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^9$ Р исследованы статические вольтамперные характеристики и шумовая температура на частоте 12 ГГц арсенидгаллиевых полевых транзисторов с затвором Шоттки (ПТШ) и НЕМТ (high electron mobility transistor). Установлена корреляция между параметрами ПТШ и радиационными изменениями свойств границы раздела фаз как в интервале доз, в котором реализуется радиационно-стимулированное геттерирование дефектов, так и радиационная деградация приконтактных областей GaAs. Предложен интервал доз облучения ПТШ γ -квантами ^{60}Co , в котором параметры ПТШ улучшаются. Этот интервал соответствует дозам $1 \cdot 10^4 \dots 7 \cdot 10^7$ Р.

The statistic volt-ampere characteristics and the noise temperature on a frequency of 12 HzHz of arsenide gallium field effect transistor with Schottky lock and of high electron mobility transistor (HEMT) were studied before and after γ -quantum ^{60}Co irradiation in the dose range of $1 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^9$. The correlation between the PTSh parameters and the radiation-induced changes of phases boundaries properties was established for the dose range where the radiation-stimulated defect gettering is realized and the radiation degradation of nearcontact regions GaAs. The dose range of PTSh irradiation by γ -quantum ^{60}Co where the PtSh parameters improve is proposed. This range corresponds to doses of $1 \cdot 10^4 \dots 7 \cdot 10^7$ Р.

ВВЕДЕНИЕ

Радіаційно-технологічні процеси (РТП), такі як трансмутаційне ядерне легірування, іонне легірування, протонірування, іонно-плазменні процеси традиційно використовуються в технології напівпровідникових приборів і інтегральних схем на початкових і проміжних стадіях їх виготовлення: створення р-п-переходів, омических контактів, високоякісних ізолюючих шарів. В той же час ряд РТП, включаючи, наприклад, облучення приборних структур γ -квантами, підпороговими електронами, швидкими електронами з енергією 1...4 МэВ, використовуються в технології напівпровідникових приборів, як правило, на завершальних стадіях виготовлення – після операції збирання і тестування з метою атермічного геттерювання дефектів. Найбільше вивченими в цьому відношенні є подібні РТП, розроблені для управління параметрами кремнієвих інтегральних схем і дискретних приборів [1]. Відомий також досвід використання РТП в технології виготовлення СВЧ-діодів [2,3]. В той же час дані про вплив радіаційних обробок на властивості арсенідгалієвих СВЧ-транзисторів і монолітних інтегральних схем малочисленні, неоднозначні і суперечливі [4-8]. Велика частина таких досліджень

посвящена вивченню деградаційних явищ в транзисторах, викликаних впливом радіації. Незначительное количество работ, в которых рассматривается радиационно-стимулированное геттерирование в полевых транзисторах с затвором Шоттки, основывается на электрофизических измерениях параметров ПТШ. Для разработки же радиационно-технологического процесса необходимы данные о влиянии радиации на все составляющие прибора и в особенности на более уязвимые его компоненты, а именно, омические и барьерные контакты и границы раздела фаз.

Целью данной работы является исследование взаимосвязи параметров арсенидгаллиевых ПТШ, облученных γ -квантами ^{60}Co в диапазоне доз $1 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^9$ Р, со свойствами границ раздела металл- GaAs.

ОБРАЗЦЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались арсенидгаллиевые ПТШ двух типов: с затвором Шоттки и высокой подвижностью электронов в канале (так называемые НЕМТ – high electron mobility transistor), изготовленные по промышленной технологии [9]. Структура обоих типов транзисторов приведена на рис 1,а,б. Омические контакты создавались на основе эвтектики AuGe с последующим напылением слоя золота. Барьерные

контакты к GaAs формировались с помощью Au-Ti – металлизации. ПТШ с затвором Шоттки изготавливались на основе стандартной i-n⁻-n-n⁺-структуры GaAs с удельным сопротивлением подложки $\rho > 10^7$ Ом·см², концентрацией легирующей примеси в буферном слое $\sim 10^{14}$ см⁻³, в рабочем слое $\sim 7 \cdot 10^{17}$ см⁻³ и n⁺ – $\sim 1 \cdot 10^{19}$ см⁻³, толщины соответствующих слоев приведены на рис. 1,а. НЕМТ создавались на полуизолирующей подложке i-GaAs с выращенными на ней слоями n⁻-n- δ -n⁺-n⁺ с концентрацией легирующей примеси и толщинами в n⁻-GaAs $\sim 1 \cdot 10^{14}$ см⁻³ d $\approx 1,0$ мкм, n-GaAlAs $\sim 7 \cdot 10^{14}$ см⁻³ d $\approx 0,45$ мкм, толщиной спейсера $\delta \sim 0,02$ мкм, n⁺-GaAs $\sim 1 \cdot 10^{18}$ см⁻³ d $\approx 0,35$ мкм и n₁⁺-GaAs $\sim 1 \cdot 10^{18}$ см⁻³ d $\approx 0,5$ мкм.

Чипы ПТШ были смонтированы в металлических корпусах. Образцы облучались γ -квантами ⁶⁰Со в диапазоне доз $1 \cdot 10^4 \dots 2 \cdot 10^9$ Р при интенсивности дозы 140 Р/с и температуре в зоне облучения не превышающей +40 °С. До и после облучения измерялись статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) и шумовая температура T_ш на частоте 12 ГГц. T_ш измерялась также в ПТШ исходных и облученных до дозы $7 \cdot 10^7$ Р и отожженных в интервале температур 125...275 °С в течение 0,5 ч. Часть измерений ВАХ была проведена на пластине.

На тестовых структурах до и после облучения методами электронной оже – спектроскопии исследовались профили распределения компонентов контакта. С помощью микроскопии атомных сил, вкратце, образованном в результате стравливания металлизации, исследовалась морфология поверхности границы раздела металл – GaAs.

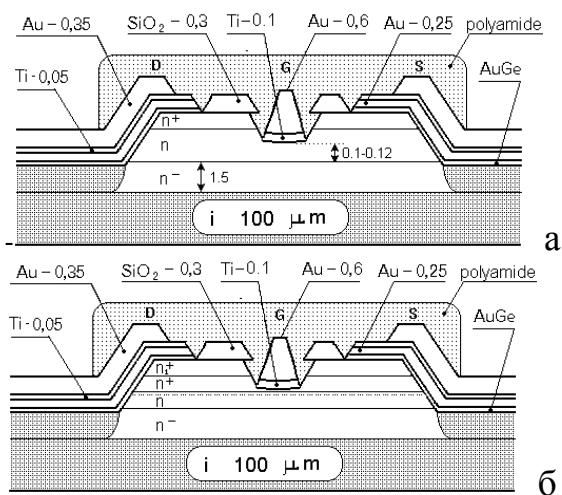


Рис.1. Поперечное сечение ПТШ (а) и НЕМТ (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ микрорельефа исходных эпитаксиальных структур GaAs показал, что исходная поверхность GaAs имеет однородное распределение микрон неоднородностей, описываемое функцией Гаусса. В структурах AuGe–GaAs в результате формирования омического контакта создается неравномерное рас-

пределение микрорельефа с существенно большими неоднородностями, по сравнению с исходной поверхностью эпитаксиальной пленки GaAs. Травление декорирует планарные пологие неоднородности с периодом $\leq 0,5$ мкм. Усиление диффузионных процессов, стимулированных облучением, приводит к изменению пространственных параметров рельефной поверхности: высоты, ширины микровпадин и расстояния между ними, а их распределение не описывается нормальным законом. Можно ожидать, что в этом случае протекающие в системе под действием γ -облучения активационные процессы существенно повлияют на распределение элементов в эвтектическом сплаве.

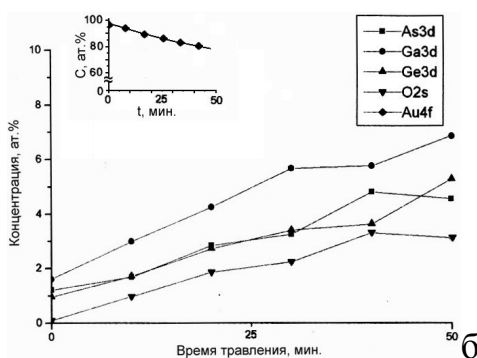
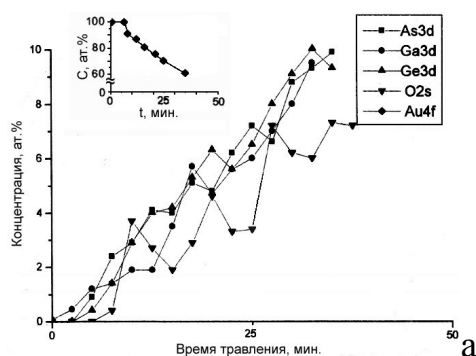


Рис.3. Профили распределения компонент контакта AuGe–GaAs до (а) и после (б) облучения γ -квантами ⁶⁰Со до дозы 10^9 Р. На вставке показано распределение Au в приповерхностном слое металлизации до (а) и после облучения до дозы 10^9 Р

Последнее было подтверждено при изучении послойного состава контакта. Типичное распределение неоднородностей и шероховатости для таких структур (исходных эпитаксиальных структур и границы раздела AuGe–GaAs) показано на рис.2,а-е. После облучения тестовых структур с омическими контактами до дозы $\sim 2 \cdot 10^7$ Р, как было показано в [10], в приконтактной области GaAs и в границе раздела фаз наблюдается структурно-примесное упорядочение, сопровождаемое некоторым увеличением холловской подвижности и времени жизни неосновных носителей заряда. Увеличение дозы γ -радиации до 10^9 Р, как видно из рис. 2,ж,з,и, приводит к увеличению гетерогенности границы раздела, увеличению

высоты микрорельефа. Об этом также свидетельствует распределение компонент контакта AuGe–GaAs до и после облучения γ -квантами ^{60}Co до дозы 10^9 P (рис. 3а,б) в тонком приповерхностном слое контакта. Аналогичная трансформация приповерхностных свойств GaAs до и после облучения отмечается также в барьерных контактах (затвор Шотт-

тки ПТШ) Au–Ti–GaAs. При этом гомогенизация контакта наблюдается при умеренных дозах γ -радиации и сопровождается улучшением электрофизических свойств барьера Шоттки: уменьшением фактора идеальности n , некоторым увеличением высоты барьера ϕ_b , уменьшением обратного тока.

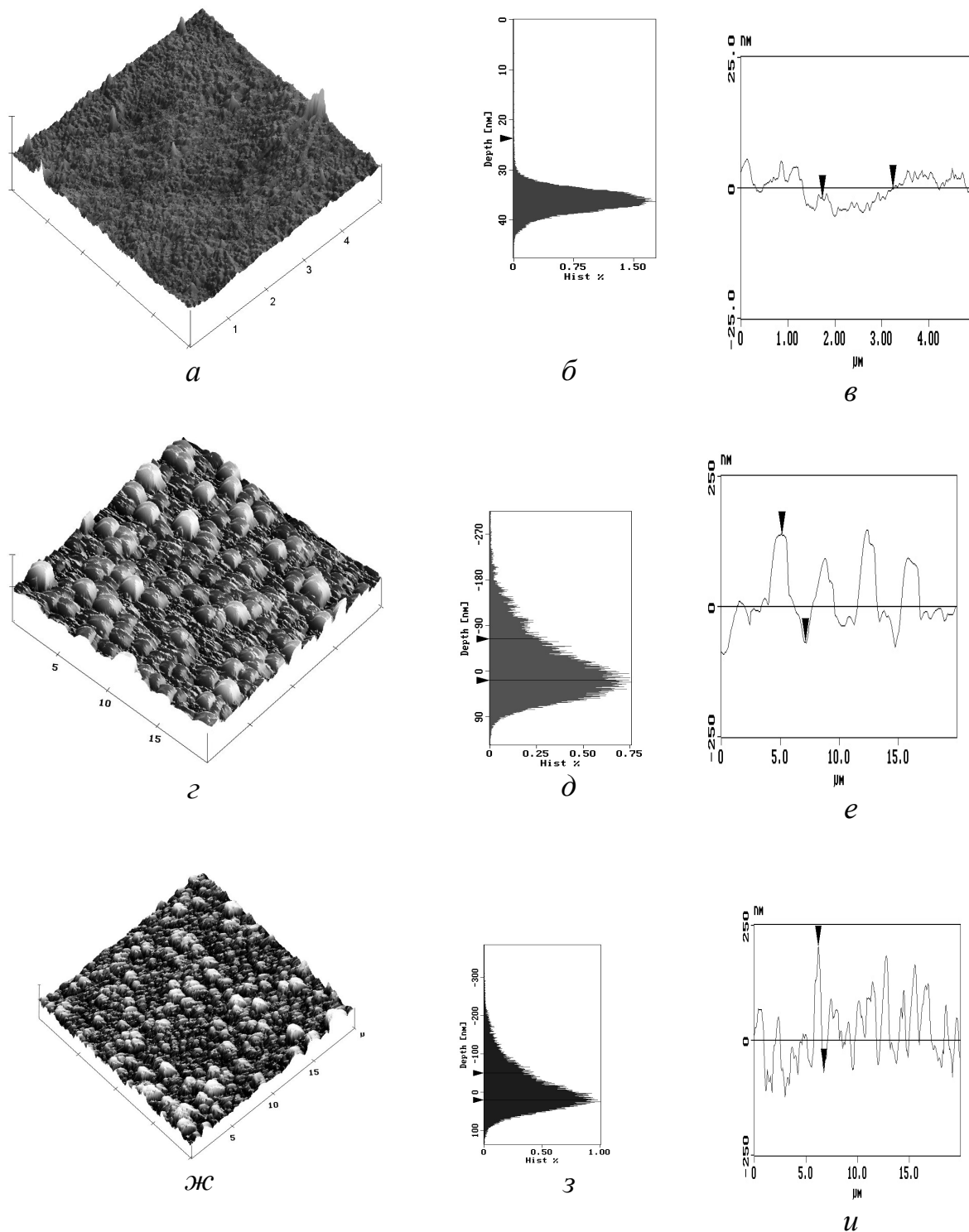
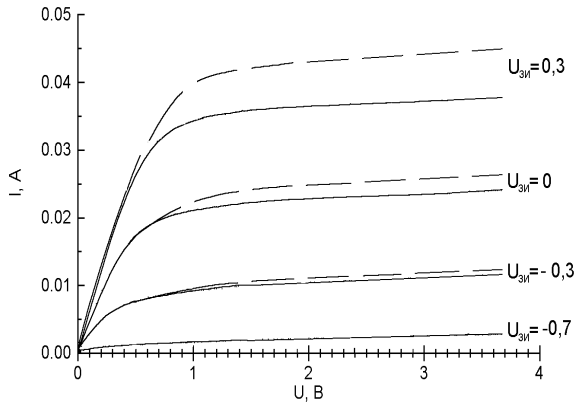
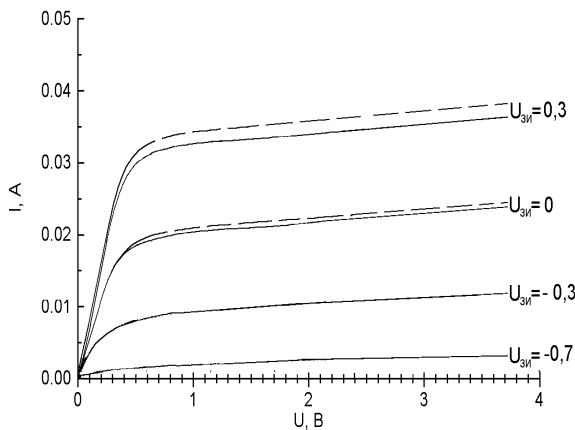


Рис.2. Морфология поверхности, распределение неоднородностей и шероховатость поверхности GaAs (а,б,в), границы раздела исходного сформированного контакта AuGe–GaAs (г,д,е), границы раздела AuGe–GaAs после облучения γ -квантами ^{60}Co до дозы 10^9 P (ж,з,и). Масштаб по оси z для рисунков: а – 50 нм на деление, г и ж – 500 нм на деление



а



б

Рис.4. ВАХ ПТШ (а) и НЕМТ (б) до (сплошная линия) и после облучения (пунктирная линия) γ -квантами ^{60}Co до дозы $2 \cdot 10^6 \text{ P}$

Исследования статических ВАХ транзисторов обоих типов (с затвором Шоттки и НЕМТ) показали, что радиационные изменения ВАХ коррелируют со свойствами границы раздела фаз. Так при облучении γ -квантами ^{60}Co до доз $\sim 10^6 \dots 10^7 \text{ P}$, когда наблюдается структурное упорядочение в приповерхностных слоях GaAs, для приборов обоих типов наблюдалось увеличение крутизны, начального тока стока транзисторов. Причем, для ПТШ с затвором Шоттки этот эффект выражен сильнее, чем для НЕМТ. На рис. 4а, б приведены типичные ВАХ транзисторов обоих типов, исходные и после облучения до дозы $2 \cdot 10^6 \text{ P}$ соответственно.

Радиационная обработка дозами выше 10^8 P приводит к ухудшению ВАХ ПТШ. Этот результат находится в соответствии с данными работы [10]. Для НЕМТ деградационные изменения наступают после облучения до дозы $2 \cdot 10^9 \text{ P}$.

С помощью стандартной методики на частоте 12 ГГц до и после облучения проводились измерения шумовой температуры транзисторов. Оказалось, что

в интервале доз $10^5 \dots 7 \cdot 10^7 \text{ P}$ шумовая температура ПТШ уменьшается, с дальнейшим ростом дозы облучения $T_{\text{ш}}$ увеличивается (рис.5) и при дозах $5 \cdot 10^8 \text{ P}$ значительно превышает исходную $T_{\text{ш}}$ (ПТШ деградирует). Эти данные находятся в соответствии со структурно-примесным упорядочением приконтактных областей ПТШ ($T_{\text{ш}}$ уменьшается) и с увеличением гетерогенности границы раздела ($T_{\text{ш}}$ увеличивается)

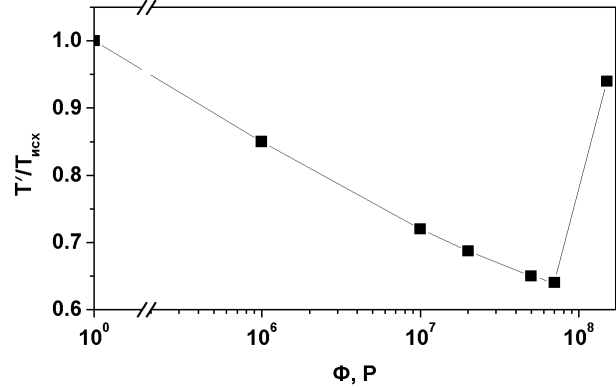


Рис.5. Дозовая зависимость T'/T_0 (T_0 – шумовая температура исходного ПТШ, T' – шумовая температура ПТШ после облучения)

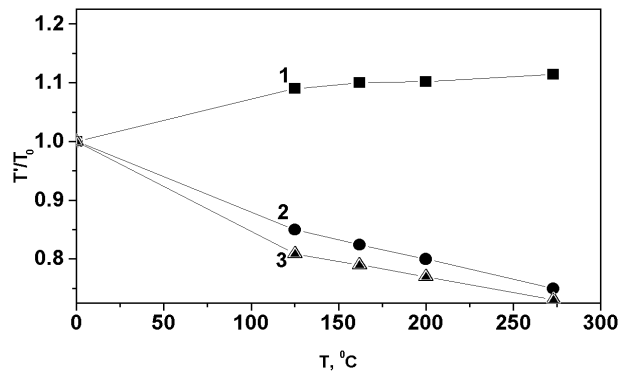


Рис.6. Влияние температуры отжига на T'/T_0 исходных ПТШ (кривая 1) и 2^x облученных ПТШ до дозы $7 \cdot 10^7$ (кривые 2,3)

Исследовалось также влияние температуры отжига в интервале температур $125 \dots 275 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 0,5 ч. на $T_{\text{ш}}$ ПТШ до и после облучения до дозы $7 \cdot 10^7 \text{ P}$ (рис. 6). Из данных, приведенных на рис.6, видно, что термообработка необлученных ПТШ (кривая 1) в указанном температурном интервале несколько повышает $T_{\text{ш}}$ после отжига при $T=125 \text{ }^\circ\text{C}$, и в дальнейшем она не изменяется вплоть до обработки при $T=275 \text{ }^\circ\text{C}$. Отжиг облученных ПТШ в интервале $T=125 \dots 275 \text{ }^\circ\text{C}$ (кривые 2 и 3.6) приводит к уменьшению $T_{\text{ш}}$ на 50 % исследуемых приборов.

Облучение до дозы $7 \cdot 10^7 \text{ P}$ и термообработка НЕМТ при $T=125 \dots 275 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 0,5 ч. существенно не изменяет $T_{\text{ш}}$. Следует отметить также тот факт, что сравнение дозовых зависимостей основных параметров ПТШ и НЕМТ в интервале доз $10^4 \dots 2 \cdot 10^9 \text{ P}$ показали, что НЕМТ являются радиационно-стойкими вплоть до дозы $2 \cdot 10^9 \text{ P}$, тогда

как ПТШ ухудшают свои параметры начиная с дозы $\sim 10^8$ Р. Отмеченная корреляция параметров ПТШ с параметрами границы раздела фаз омический (барьерный) контакт-GaAs может быть понята, если учесть, что в результате воздействия радиации происходит радиационно-стимулированная релаксация внутренних механических напряжений (ВМН) в транзисторном чипе, смонтированном на кристаллодержателе. При этом в результате поглощения дислокациями точечных дефектов, дислокации, пересекающие область пространственного заряда (ОПЗ), так называемые “наклонные” дислокации и энергетически невыгодные выводятся из ОПЗ, что приводит к структурно-примесному упорядочению и обуславливает улучшение как параметров полупроводника, так и приборной структуры [11]. Ранее, в [10], нами было показано, что в облученных ПТШ, расположенных на пластине GaAs, такой процесс наблюдается в области умеренных доз γ -радиации ($\sim 3 \cdot 10^6 \dots 2 \cdot 10^7$ Р). Подтверждением этого является эксперимент, проведенный на специально изготовленной структуре, в которой деформация, вызванная упругим изгибом тестовой структуры омического или барьерного контактов, уменьшается примерно в 1,5 раза по сравнению с исходным состоянием. Следствием этого процесса (релаксации ВМН) являлось улучшение рекомбинационных свойств в приконтактной области GaAs, а именно, увеличения на 10...20% диффузионной длины неосновных носителей тока. Логично предположить, что подобный факт имеется и в корпусированном «чипе» ПТШ, хотя ВМН в корпусированном приборе прямыми методами измерить не представляется возможным. Косвенным доказательством этого процесса является увеличение крутизны и начального тока стока ПТШ, связанных с холловской подвижностью μ_n носителей в канале, а именно: ее увеличением в результате релаксации ВМН и структурно-примесного упорядочения в области границы раздела фаз.

Апробация данного радиационно-технологического процесса на заключительном этапе изготовления арсенидгаллиевых ПТШ в условиях производства в ОАО НПП «Сатурн» показала, что при этом улучшаются не только качество ПТШ, но и на 10...15% может увеличиться процент выхода годных приборов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, при разработке полевых транзисторов с барьером Шоттки и НЕМТ необходимо учитывать дефектообразование в приконтактных областях GaAs, сводя его к минимуму уже в готовом приборе путем атермической обработки γ -квантами ^{60}Co . Проведение данного радиационно-технологического процесса в интервале доз $1 \cdot 10^4 \dots 7 \cdot 10^7$ Р при-

водит к улучшению низкочастотных параметров транзисторов и шумовой температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.С.Вавилов, Б.М.Горин, Н.С.Данилкин и др. *Радиационные методы в твердотельной электронике*. М.: «Радио и связь». 1990, 184 с.
2. Р.В.Конакова, Ю.А.Тхорик, Л.С.Хазан. Особенности радиационной технологии при изготовлении GaAs диодов для СВЧ-электроники // *Арсенид галлия*. Под ред. Гамана В.И. Томск: ТГУ, 1982, с.183-185.
3. Р.В.Конакова, Ю.А.Тхорик, Л.С.Хазан. Возможности радиационной технологии при изготовлении диодов // *Электронная техника*. Сер.2. Полупроводниковые приборы. 1988, вып. 2, с.47-56.
4. Е.Р.Аствацатурьян, Д.В.Громов, В.В.Елесин и др. Радиационные процессы в GaAs полупроводниковых приборах и интегральных схемах.. // *Зарубежная радиоэлектроника*. 1988, №1, с.48-83.
5. С.И.Бойко, В.И.Осинский, И.К.Синищук и др. Исследование влияния радиационных дефектов на динамические параметры транзисторов с барьером Шоттки методом тока, индуцированного электронным зондом. // *Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов*. Кишинев.: Штиинца. 1991, с. 75-76.
6. N.Arpatazani, M.Papastamtion, G.J.Papaioannou et al. The gamma ray radiation effects in high-electron-mobility transistor. // *Semicond. Sci. Technol.* 1995, №10, p.1445-1451.
7. С.В.Оболенский, Г.П.Павлов. Влияние нейтронного и космического облучения на характеристики полевого транзистора с затвором Шоттки // *ФТП*. 1995, т. 29, вып. 3, с.413-420.
8. Р.В.Конакова, В.В.Миленин, Е.А.Соловьев и др. Влияние радиации на вольтамперные характеристики арсенидгаллиевых полевых транзисторов с затвором Шоттки. // *Радиоэлектроника*. 1999, №4, с.73-75.
9. В.И.Босый, А.В.Ивашук, И.Ю.Ильин и др. Малошумящие транзисторы миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Материалы и технология. // *Материалы конференции «Крымико-96» 6^{ой} Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*. Крым, Украина, 16-19 сентября 1996. Севастополь: Вебер, 1996, с.3-9.
10. Р.В.Конакова, В.В.Миленин, Е.А.Соловьев и др. Влияние γ -радиации на электрофизические свойства арсенидгаллиевых ПТШ // *Радиоэлектроника*. 2000, №6, с.45-51.
11. Е.Ф.Венгер, М.Грендел, В.Данишка и др. *Структурная релаксация в полупроводниковых кристаллах и приборных структурах*. // Под ред. Ю.А.Тхорика. Киев: «Феникс». 1994, 248 с.