

ВЛИЯНИЕ γ -РАДИАЦИИ ^{60}Co НА МЕЖФАЗНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КОНТАКТАХ Au-Ti-Al-Ti-n-GaN

А.Е. Беляев¹⁾, Н.С. Болтовец²⁾, В.Н. Иванов²⁾, Л.М. Капитанчук¹⁾, Р.В. Коначова¹⁾, Я.Я. Кудрик¹⁾,
В.В. Миленин¹⁾, В.Н. Шеремет¹⁾, Ю.Н. Свешников³⁾

¹⁾ Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, Киев,
03028, Украина, телефон +38044-525-61-82; E-mail: konakova@isp.kiev.ua

²⁾ Государственное предприятие НИИ «Орион», Киев, 03057, Украина,
телефон +38044-465-05-48, E-mail: bms@i.kiev.ua

³⁾ ЗАО «Элма-Малахит», Зеленоград, Россия

Рассмотрены радиационные эффекты в многослойной металлизации Au-Ti-Al-Ti-n-GaN при воздействии на исходные и подвергнутые кратковременному высокотемпературному отжигу в атмосфере азота контактные структуры облучения гамма-квантами ^{60}Co до доз $4 \cdot 10^8$, 10^9 и $2 \cdot 10^9$ Р. Исходные контактные структуры в результате облучения не претерпевают существенных изменений при полном сохранении слоевой структуры металлизации.

В результате отжига при 700 °С слоевая структура контакта разрушается из-за ускорения процессов взаимной диффузии на межфазных границах. Морфологические и структурные трансформации в контактной металлизации, стимулированные термоотжигом, усиливают при радиационных воздействиях массоперенос компонентов металлизации. При этом после облучения до дозы $2 \cdot 10^9$ Р титан и галлий обнаруживаются на поверхности металлизации, а кислород пронизывает всю контактную структуру и в значительном количестве наблюдается в приконтактном слое GaN. Отмечена корреляция удельного переходного сопротивления с радиационно-стимулированным массопереносом кислорода в приконтактный слой GaN.

Введение

Нитрид галлия привлекает разработчиков приборов для экстремальной электроники, работающих в высоких тепловых и радиационных полях, благодаря своим электрофизическим параметрам: большой ширине запрещенной зоны ($E_g \approx 3,45$ eV), высокой предельной рабочей температуре (1250 К) и температуре Дебая (600 К). Однако реализация этих свойств в приборах невозможна без термо- и радиационно-стойких контактов, включающих многослойную металлизацию. Отметим при этом, что если термостойкость омических контактов к GaN изучена довольно подробно, то радиационные эффекты в контактных системах к GaN до настоящего времени практически не исследованы.

В качестве омического контакта к n-GaN чаще всего используют пару Ti-Al, свойства которой хорошо изучены и максимально соответствуют условиям формирования омических контактов к n-GaN [1-4]. Из-за низкой работы выхода титана ($\phi_m = 4,33$ eV) омический контакт может быть получен без вжигания. Слой Al в контакте Ti-Al используется в качестве диффузионного барьера. Если создается многослойный контакт, например, Ti-Al-Ti-Au, то функции диффузионного барьера выполняют следующие после первого, контактообразующего слоя, тонкие пленки Al и Ti. Au выполняет защитные функции и позволяет осуществлять контактирование посредством пайки, термокомпрессии или каким-либо другим способом.

Несмотря на то, что титан формирует омический контакт к n-GaN без вжигания, для создания низкоомных контактов с $\rho_k \leq 10^{-6}$ Ом см² проводят кратковременный высокотемпературный отжиг. Механизм формирования омического контакта в этом случае связан с обогащением приконтактной области GaN вакансиями азота, являющимися в GaN донорами. Кроме этого из-за высокотемпературного разложения GaN может создаваться соединение TiN, работа выхода которого $\sim 3,74$ эВ. Оба фактора способствуют получению низкоомного контакта.

Согласно опубликованным данным, высокотемпературный отжиг приводит к существенным морфологическим изменениям в контактной металлизации, сопровождающимися возникновением пустот и неоднородностями границы раздела металла с GaN [5, 6].

Цель данной работы – изучить межфазные взаимодействия в многослойной металлизации Au-Ti-Al-Ti-n-GaN, стимулированные воздействием больших доз (до $2 \cdot 10^9$ Р) γ -радиации ^{60}Co .

Экспериментальные детали

Многослойная металлизация нитрида галлия создавалась послойным магнетронным распылением металлов на предварительно подвергнутую фотонной очистке поверхность гетерозипитаксимального слоя n-GaN, толщиной ~ 1 мкм, с концентрацией доноров $\sim 10^{17}$ см⁻³, выращенного на сапфире. Толщины слоев металлизации составляли: Ti (20 нм)-Al(50 нм)-Ti(50 нм)-Au(100 нм).

До и после облучения γ -квантами ^{60}Co исследовались образцы двух типов: исходные и отожженные в атмосфере азота при $T = 700^\circ\text{C}$ 30 секунд. Облучение γ -квантами ^{60}Co проводилось до $4 \cdot 10^8$ Р, 10^9 Р и $2 \cdot 10^9$ Р.

До и после обработки измерялись электронные Оже-спектры, из которых рассчитывались профили распределения компонентов металлизации и вольтамперные характеристики омических (ВАХ) контактов, из которых определялось приведенное контактное сопротивление ρ_k . Измерение ВАХ осуществлялось на TLM тестовых структурах.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 а-г приведены профили распределения компонентов в металлизации Au-Ti-Al-Ti-GaN (исходная структура) до (а) и после облучения γ -квантами ^{60}Co до доз $4 \cdot 10^8$ Р, 10^9 Р и $2 \cdot 10^9$ Р (б-г). Видно, что как до, так и после облучения в контактной металлизации сохраняется слоевая структура. Особенностью образца, облученного до дозы $2 \cdot 10^9$ Р является некоторое возрастание процентного содержания титана и азота на границе раздела Ti-GaN, обусловленного радиационно-стимулированным массопереносом.

Существенно различаются профили распределения компонентов металлизации образца после отжига и облучения до доз $4 \cdot 10^8$ Р, 10^9 Р и $2 \cdot 10^9$ Р (рис. 2 а-г). После отжига (рис. 2а) не сохраняется слоевая структура контакта, значительно увеличивается переходная область в контакте металл-GaN, титан диффундирует на всю толщину металлизации вплоть до выхода на по-

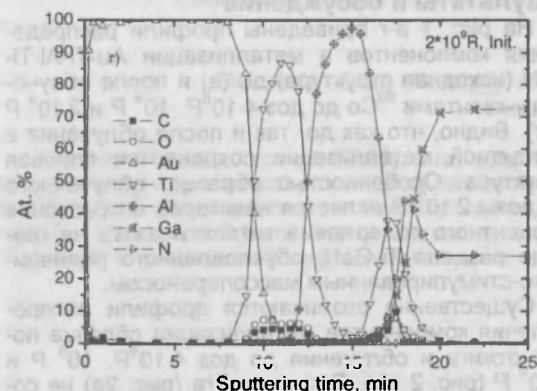
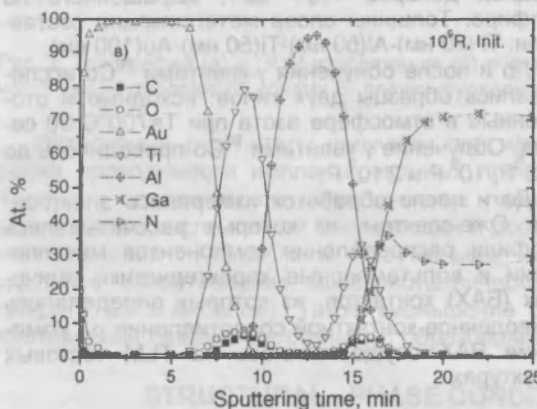
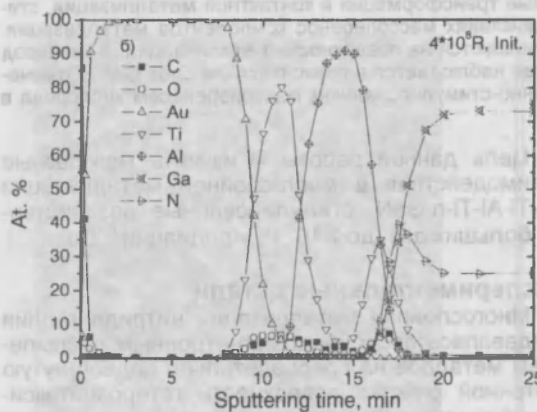
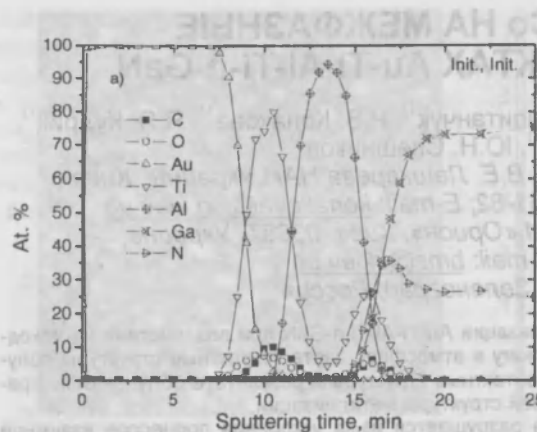


Рис. 1 Профили распределения компонентов в металлизации Au-Ti-Al-Ti-GaN (исходная структура) до (а) и после облучения γ -квантами ^{60}Co до доз $4 \cdot 10^8$, 10^9 Р и $2 \cdot 10^9$ Р (б, в, г).

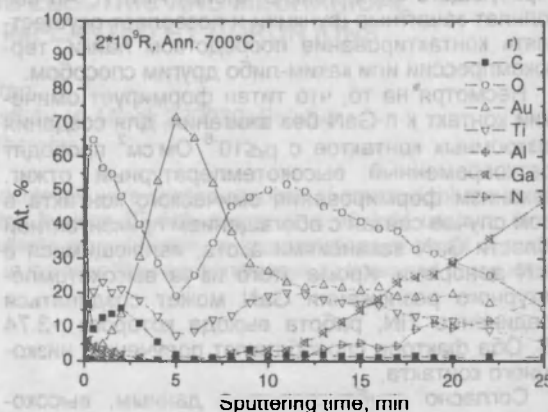
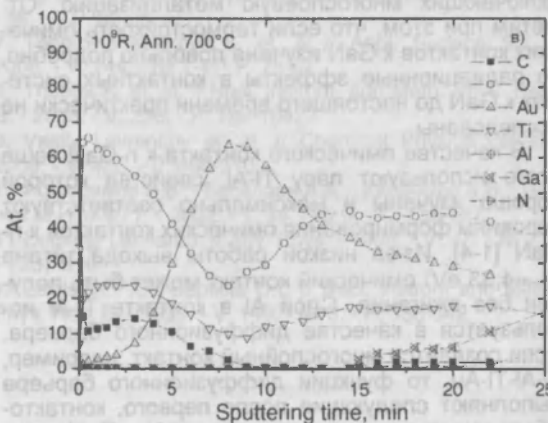
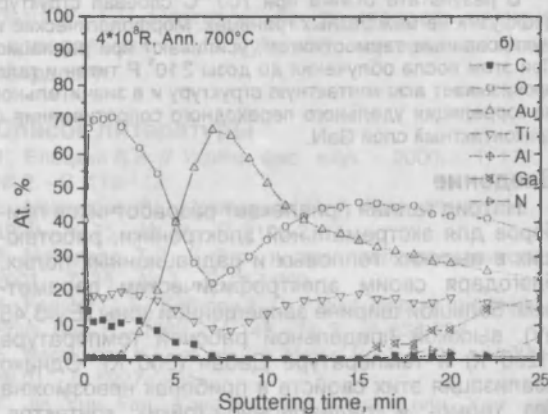
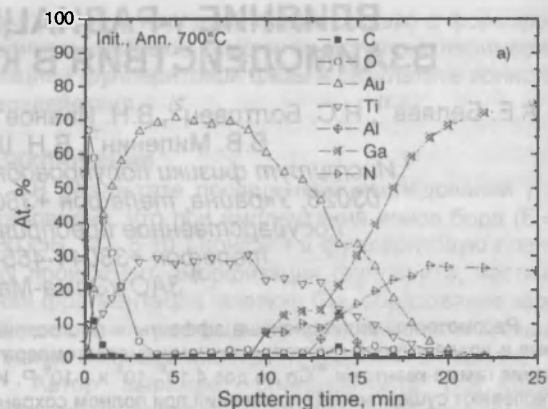


Рис. 2 Профили распределения компонентов в металлизации Au-Ti-Al-Ti-GaN (отжиг 700°C 30 секунд) до (а) и после облучения γ -квантами ^{60}Co до доз $4 \cdot 10^8$, 10^9 Р и $2 \cdot 10^9$ Р (б, в, г).

верхность [7]. Выход титана на поверхность верхнего слоя металлизации способствовал адсорбции кислорода на поверхности вследствие геттерных свойств Ti. В приповерхностном слое отмечается значительное количество углерода. Оказалось также, что из-за формирования в процессе отжига различных фаз, в том числе Al_3Ti , $AlTi_3$, Ti_2AlN , наблюдается неоднородная граница раздела, а образовавшаяся металлическая композиция содержит поры и протяженные включения. Подобные морфологические и структурные особенности отожженных контактов Au-Ti-Al-Ti-GaN наблюдались в работах [1, 3] и отмечались нами в [7]. После облучения до доз $4 \cdot 10^9$ Р, 10^9 Р наблюдается интенсивный радиационно-стимулированный массоперенос титана как в GaN, так и на внешнюю поверхность металлического покрытия, на которой его после облучения до дозы 10^9 Р, обнаруживается до 22%. При этом существенно расширяется переходной слой на границе раздела металл-GaN. Особенностью облученного контакта является также ускоренная диффузия алюминия и проникновение кислорода в значительном количестве на всю толщину металлизации и в приконтактную область GaN. При этом профили распределения углерода, кислорода и титана в приповерхностной области металлизации описываются не сильно различающимися закономерностями. А отношение процентных содержаний кислорода и титана в объеме металлизации соответствует величине порядка 2,5, тогда как после отжига содержание кислорода в объеме металлизации составляло 1,3–1,7%. Поскольку кислород в GaN является донором с растворимостью, по некоторым данным, до 30%, то значительное его наличие в приконтактном слое GaN не могло не проявиться в переходном контактном сопротивлении, которое после облучения существенно уменьшилось по сравнению с отожженным контактом. Отметим при этом, что в отожженном при 700°C образце не наблюдается соединения TiN, возникающего при термическом разложении GaN. Судя по профилям распределения компонентов металлизации облученного образца, TiN не создается и в процессе облучения γ -квантами ^{60}Co . Поэтому более вероятной причиной уменьшения R_k может быть радиационно-стимулированное проникновение кислорода в GaN, как

в атомарном, так и в ионизированном состоянии. В последнем случае ионизированный кислород может активно взаимодействовать с титаном, формируя фазы внедрения переменного состава с преобладанием металлической связи. На возможность такого процесса указывалось в [8].

Облучение образца до дозы $2 \cdot 10^9$ Р наряду с выше описанными изменениями в атомном составе приповерхностного слоя контакта способствует проникновению на поверхность атомов галлия (до 6%). В этих условиях смещение пика кислорода к поверхности связано по-видимому с возрастанием вероятности образования окислов Ti и Ga.

Выводы

Таким образом, полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о высокой радиационной стойкости контактной металлизации Au-Ti-Al-Ti-n-GaN, обладающей слоевой структурой в исходном состоянии. Радиационно-стимулированная деградация контактной металлизации Au-Ti-Al-Ti-n-GaN наблюдается при высокотемпературном отжиге и обусловлена структурно-фазовой перестройкой металлизированного слоя сопровождающейся разрушением слоевой структуры контакта и усилением его диффузионной проницаемости, в т. ч. и для атомов кислорода.

Список литературы

1. Kwak Joon Seop, Mohny S.E., Je-Yi lin, Kern R.S. // *Semicond. Sci. Technol.* 200. v.15. - p.756.
2. Pidun M., Karduck P., Mayer J. et al // *Appl. Surf. Sci.* 2001. v.179. p.213-221.
3. Papanicolaou N.A., Zekentes K. // *Sol.-Stat. Electron.* 2002. v.46. - p.1975.
4. Mohammad Noor. // *J. Appl. Phys.* - 2004. - v.95. - p.7940.
5. Данилин В.Н., Докучаев Ю.П., Жукова Т.А., Комаров М.А. Мощные высокотемпературные и радиационно-стойкие СВЧ приборы нового поколения в широкозонных гетеропереходных структурах AlGaIn/GaN. // *Обзоры по электронной технике. Сер. 1. СВЧ техника.* 2001. выпуск 1. 137 с.
6. Шретер Ю.Г., Ребане Ю.Т., Зыков В.А., Сидоров В.Г. Широкозонные полупроводники. Санкт-Петербург: Наука. 2001. 125 с.
7. Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Иванов В.Н. и др. // *Письма в ЖТФ.* 2005. т.31. с.88-94.
8. Корнилов И.И., Глазова В.В. Взаимодействие тугоплавких металлов переходных групп с кислородом. М.: Наука. 1967. 256 с.

EFFECT OF ^{60}Co γ -RADIATION ON INTERACTIONS BETWEEN PHASES IN THE Au-Ti-Al-Ti-n-GaN CONTACTS

A.E. Belyaev¹, N.S. Boltovets², V.N. Ivanov², L.M. Kapitanchuk¹, R.V. Konakova¹,
Ya.Ya. Kudryk¹, V.V. Milenin¹, V.N. Sheremet¹, Yu.N. Sveshnikov³

¹V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NASU, Kyiv, Tel.: 525-61-82; E-mail: konakova@isp.kiev.ua

²State Enterprise Research Institute "Orion" Kyiv, Ukraine; Tel.: +(380-44) 456-05-48; E-mail: bms@i.kiev.ua

³Close Corporation "Elma-Malakhit", Zelenograd, Russia

We consider radiation effects in the Au-Ti-Al-Ti-n-GaN multilayer metallization when the contact structures, both initial and after rapid high-temperature annealing in the nitrogen atmosphere, are exposed to ^{60}Co γ -irradiation up to doses of $4 \cdot 10^9$ Р, 10^9 and $2 \cdot 10^9$ Р. The initial contact structures do not change substantially under irradiation, and the layered structure of metallization remains unchanged.

Thermal annealing at 700°C damages the contact layered structure due to enhancement of interdiffusion at the interfaces between phases. The morphological and structural transformations in the contact metallization which were induced by thermal annealing enhance mass transfer of metallization components under radiation action. In this case, after γ -irradiation up to a dose of $2 \cdot 10^9$ Р, titanium and gallium appear at the metallization surface, while oxygen penetrates into the whole contact structure, and big amounts of it are observed in the GaN near-surface layer. A correlation was found between the contact resistivity and radiation-enhanced mass transfer of oxygen into the GaN near-surface layer.