

РАДИОФИЗИКА

УДК 621.382.33

ВЛИЯНИЕ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА GaN-ТРАНЗИСТОРЫ С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ

© 2013 г.

*Н.В. Басаргина¹, И.В. Ворожцова¹, С.М. Дубровских¹,
О.В. Ткачёв¹, В.П. Шукайло¹, Е.А. Тарасова², А.Ю. Чурин², С.В. Оболенский²*

¹РФЯЦ–ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск²Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

obolensk@rf.unn.ru

Поступила в редакцию 26.12.2012

Представлены результаты исследования влияния импульсного гамма-нейтронного облучения на выходные характеристики НЕМТ на основе GaN (CGH40010 производства компании Cree (США)). Исследования характеристик транзистора производили как непосредственно в момент воздействия гамма-нейтронного излучения экспресс-методом, так и спустя некоторое время более детально в лабораторных условиях. Обнаружено, что в отличие от традиционных СВЧ-транзисторов со встроенным каналом изменения напряжения смещения транзистора обусловлены не столько изменением концентрации электрически активных доноров, а накоплением радиационно-индуцированных зарядов в диэлектрических слоях и на границах полупроводниковых слоев. Последнее характерно для кремниевых МДП-транзисторов.

Ключевые слова: НЕМТ, двумерный электронный газ, кванты высоких энергий.

Введение

Нитриды III группы находят всё более широкое применение в твердотельной электронике благодаря уникальному сочетанию таких физических характеристик, как большая ширина запрещённой зоны и высокая теплопроводность. Высокие значения концентрации электронов в канале в сочетании со значительными пробивными напряжениями позволяют обеспечить выходную мощность GaN полевых транзисторов ~ 10 Вт в диапазоне до 10 ГГц, что важно при практическом использовании.

В литературе практически отсутствует информация о радиационной стойкости GaN/AlGaN-транзисторов с двумерным электронным газом (High Electron Mobility Transistor – НЕМТ). Работа посвящена исследованию влияния импульсного гамма-нейтронного облучения на характеристики указанных транзисторов.

Образцы

В работе исследовали НЕМТ на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN CGH40010 производства компании Cree (США). Мощность транзистора 10 Вт, рабочая частота до 6 ГГц. На ри-

сунке 1 представлена конструкция транзистора и его зонная диаграмма [1].

В НЕМТ высокая подвижность электронов достигается за счёт пространственного разделения области, содержащей легирующие примеси, и канала, в котором движутся носители заряда. Это оказывается возможным за счёт поляризационных явлений (решётка GaN является полярной) и пьезоэлектрических полей, возникающих в механически напряжённом слое вблизи гетерограницы GaN/AlGaIn.

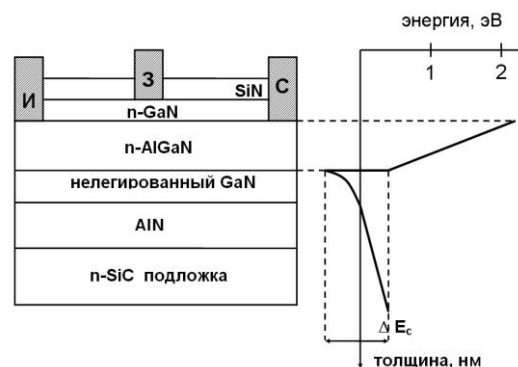


Рис.1. Конструкция AlGaIn/GaN НЕМТ и его зонная диаграмма: И – исток, З – затвор, С – сток

Методика измерений

Облучение проводили на импульсном реакторе ЭБР-Л [2]. Средняя энергия нейтронов имела величину ~ 1 МэВ. Экспозиционную дозу гамма-излучения измеряли по методике СГД-8, погрешность измерений не более 20% [3]. Флюенс нейтронов регистрировали по методике РИД-Н, погрешность измерений не более 20% [4]. Форму импульса излучения реактора регистрировали с помощью фотоэлемента ФЭК-11. Импульс имел характерный симметричный колоколообразный вид, его длительность на уровне 0.5 от максимума составляла 100 мкс.

Непосредственно в ходе облучения проводили измерения сток-затворных вольт-амперных характеристик полевых транзисторов. Характеристики снимали с помощью генератора пилообразных импульсов напряжения. При этом генератор подключался к затвору, а на сток подавалось постоянное напряжение. Для исследования температурной зависимости образец охлаждали парами азота, температура контролировалась термопарой.

Так же измерялись вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики транзисторов до и после облучения в лабораторных условиях на специализированном оборудовании. По результатам измерений определялась величина изменения концентрации электронов в канале после радиационного воздействия. Измерительный стенд состоял из измерителей вольт-фарадных (Е7-20) и вольт-амперных (Л2-56) характеристик и зондового устройства для контактирования с образцами. При измерениях на Е7-20 амплитуда измерительного сигнала составляла 100 мВ, частота 1 МГц. Прибор управлялся компьютером. Благодаря использованию усреднения по 100 отсчетам для каждого постоянного напряжения смещения затвора погрешность измерения емкости составляла 2%, а проводимости – 6%. Погрешность измерения токов составляла 10%. Для обработки результатов измерений и определения профилей легирования использовалась методика, описанная в [5].

Ход и результаты эксперимента

Проводились измерения сток-затворных характеристик транзистора в момент воздействия n - γ -импульса с параметрами: флюенс нейтронов $1 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$, мощность экспозиционной дозы в максимуме импульса $3 \cdot 10^8$ Р/с. Измерения проводили при напряжении сток-исток $U_{си} = 8.8$ В и температуре образца 80 и 300 К.

При воздействии n - γ -импульса при фиксированных напряжениях затвора и стока наблюда-

лось увеличение тока стока транзистора примерно на 10%. Происходил параллельный сдвиг сток-затворной характеристики в область больших отрицательных напряжений. Максимальный сдвиг наблюдался в максимуме импульса излучения и составлял ≈ 0.5 В.

На рис. 2 представлен временной ход изменения порогового напряжения ΔU исследуемого НЕМТ, вызванного импульсом излучения, флюенс нейтронов был равен $1 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$, экспозиционная доза – 25 кР. Облучение производили при температурах 80 К и 300 К. Измерения, проведенные через минуту после каждого воздействия, показали, что пороговое напряжение транзистора возвращается к первоначальному значению. После воздействия релаксация ΔU имеет быструю и медленную составляющие спада. При охлаждении образца медленная составляющая спада релаксирует в течение десятков миллисекунд.

В лабораторных условиях проводилось сравнение вольт-фарадных характеристик, а также зависимостей радиочастотной проводимости затвора транзистора до и после облучения 12 импульсами нейтронного излучения с общим флюенсом нейтронов $1.3 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$ и экспозиционной дозой 300 кР. Интервал между импульсами облучения составлял несколько суток, измерения проводились спустя месяц после облучения, после снижения уровня наведенной активности. Результаты измерений приведены на рис. 3.

Как следует из рисунков, пороговое напряжение затвора уменьшилось на 0.2 В, т.е. относительно исходного значения сдвинуто в другую сторону по сравнению с наблюдаемым в момент облучения. Величины изменений емкостей составляли 30%, а проводимости – 75% и надежно регистрировались измерительной аппаратурой.

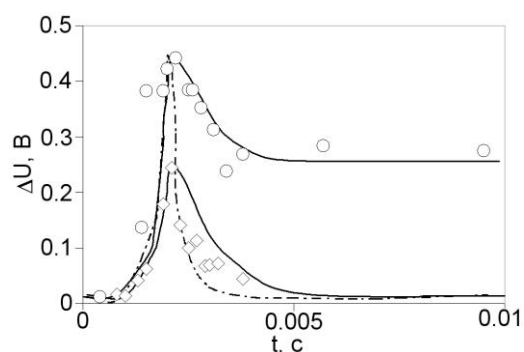


Рис. 2. Изменение порогового напряжения НЕМТ при воздействии n - γ -импульса: эксперимент: \diamond – 80 К; \circ – 300 К; (—) – расчет, (- - -) – форма импульса излучения реактора

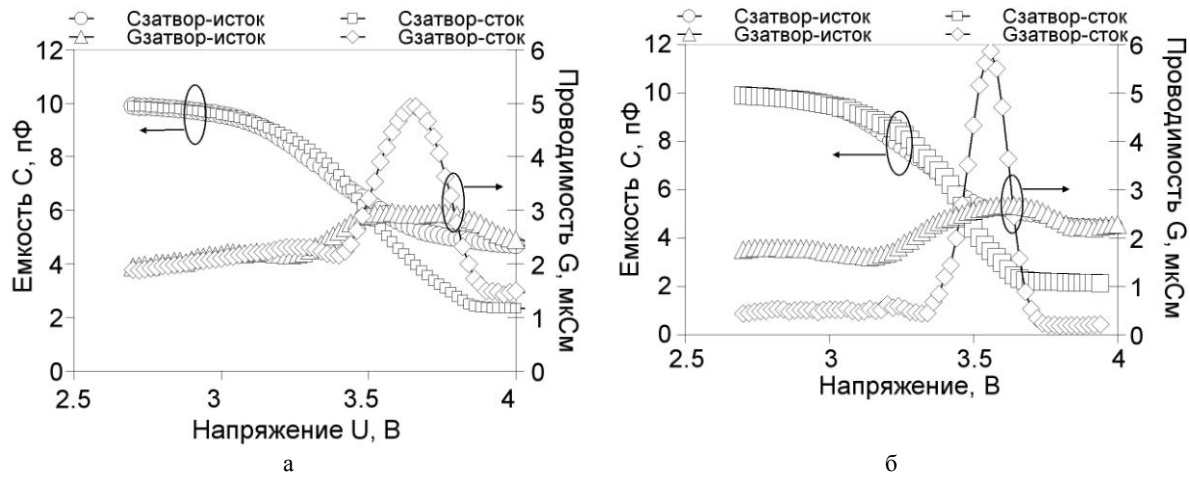


Рис. 3. Сравнение зависимостей емкости и проводимости затвора транзистора до (а) и после (б) гамма-нейтронного облучения. Частота измерительного сигнала 1 МГц. Флюенс нейтронов $1.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, экспозиционная доза 300 кР

Анализ результатов эксперимента

Дифференциальный анализ вольт-фарадных характеристик по методике [5] позволил получить концентрацию электронов в канале транзистора. Расчеты показывают, что после облучения концентрация электронов в канале уменьшилась незначительно – менее 5%, т.е. в пределах погрешности эксперимента. Причиной такого изменения концентрации являются радиационные дефекты, образованные в полупроводнике быстрыми нейтронами и захватывающие электроны канала, как это происходит в СВЧ GaAs-транзисторах с затвором Шоттки [6]. Это отчасти объясняет уменьшение порогового напряжения после облучения (рис. 3). Вместе с тем указанного изменения недостаточно для сдвига порогового напряжения затвора транзистора на 0.2 В, которые обнаружены в эксперименте.

Как постоянный, так и зависящий от времени сдвиг сток-затворной характеристики может быть обусловлен различными эффектами: перезарядкой поверхностных состояний на границах раздела барьерный слой/канал, канал/буферный слой либо накоплением положительного заряда в барьерном слое AlGaIn (рис.1). Такой характер изменения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик свойственен скорее кремниевым МДП-транзисторам [7], а не СВЧ GaAs-транзисторам со встроенным каналом и затвором Шоттки, которые значительно ближе по своей конструкции к исследуемым GaN-транзисторам.

Для первоначального анализа будем считать, что 1) сдвиг порогового напряжения обусловлен положительным зарядом, захваченным на ловушках в барьерном слое; 2) за быструю и медленную релаксацию порогового напряжения ответственны ловушки с различной энергией

активации Ψ_1, Ψ_2 ; 3) насыщение зависимости порогового напряжения от мощности дозы обусловлено насыщением ловушечных уровней.

В случае если нейтрализация накопленного положительного заряда обусловлена термоэмиссией электронов из валентной зоны на ловушечные уровни, вероятность перехода электрона в единицу времени из валентной зоны на ловушку определяется как $p = AT^2 e^{-\psi/kT}$, T – температура, ψ – разность между энергетическим уровнем ловушки и потолком валентной зоны, A – константа [7].

Уравнение кинетики захваченного на ловушках заряда Q_i можно представить как

$$\frac{dQ_i}{dt} = \alpha_i (M_i - Q_i) \times P(t) - \beta_i \times Q_i \times T^2 e^{-\psi_i/kT},$$

где M_i – количество дефектных уровней, Q_i – количество заряда, захваченного данными ловушками, $P(t)$ – мощность поглощенного излучения, ψ_i – глубина ловушечного уровня, T – температура образца, α_i, β_i – эмпирические коэффициенты. Так как смещение сток-затворной характеристики пропорционально накопленному заряду, то уравнения можно составить относительно изменения порогового напряжения. В этом случае изменение порогового напряжения, вызванного зарядом, захваченным на ловушках, dU_i/dt , можно определить как

$$\frac{dU_i}{dt} = \alpha_i (U_{mi} - U_i) \times P(t) - \beta_i \times U_i \times T^2 e^{-\psi_i/kT},$$

где U_{mi} – изменение порогового напряжения при полном заполнении данного уровня. Это уравнение необходимо рассмотреть для каждого типа ловушек Ψ_1 и Ψ_2 , при этом полное из-

менение порогового напряжения ΔU будет равно сумме решений для Ψ_1 и Ψ_2 .

На рис. 2 представлены оценки изменения порогового напряжения, выполненные по изложенному выше алгоритму.

Оценки выполнены при следующих значениях параметров:

– глубина ловушечного уровня Ψ_1 , отвечающего за быструю составляющую, равна 0.01 эВ, за медленную составляющую отвечают ловушки Ψ_2 с энергией 0.12 эВ;

– максимальные U_{mi} – изменения порогового напряжения, обусловленные заполнением ловушек, отвечающих за медленные и быстрые составляющие, как видно из эксперимента, примерно равны, т.е. $U_{m1} = U_{m2} = 0.25$ В;

– коэффициенты $\alpha_1 = 2 \cdot 10^{-4}$ рад⁻¹, $\beta_1 = 2$ с⁻¹·К⁻², $\alpha_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ рад⁻¹, $\beta_2 = 4$ с⁻¹·К⁻².

Из представленных на рис. 2 зависимостей видно, что предположение о наличии двух типов ловушек с различной энергией активации Ψ_1 , Ψ_2 позволяет качественно описать основные экспериментальные результаты. Наблюдаемые в эксперименте отклонения напряжения смещения в сторону его уменьшения говорят, по всей видимости, о наличии в структуре стабильных дефектов третьего типа, имеющих отрицательный заряд, приводящий к уменьшению концентрации электронов в канале. Для определения параметров и скорости накопления указанных дефектов следует продолжить экспериментальные исследования.

Заключение

В ходе проведённых исследований получены следующие результаты.

1) Воздействие излучения ядерного реактора ЭБР-Л приводит к сдвигу сток-затворной характеристики в область больших напряжений. При комнатной температуре приращение порогового напряжения составило 6%, при температуре 80 К – 20%.

2) Рассмотрена модель, описывающая основные экспериментальные результаты, основанная на предположении, что изменения характеристик транзистора вызваны накоплением положительного заряда на ловушках в барьерном слое. Экспериментальным данным удовлетворяет наличие двух ловушек с энергией активации ~0.01 эВ и ~0.12 эВ.

3) Необратимые изменения характеристик транзистора при облучении нейтронами до уровня $3 \cdot 10^{14}$ см⁻² не выявлены. При уровне облучения $1.3 \cdot 10^{15}$ см⁻² зафиксирован уход порогового значения напряжения на 0.2 В в меньшую сторону. Возможная причина указанного отклонения – уменьшение концентрации электрически активных доноров и накопление отрицательно заряженных дефектов в активной области транзистора.

Список литературы

1. Экспериментальная база установок РФЯЦ-ВНИИТФ для радиационных исследований и испытаний изделий электронной техники // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2008. Вып. 2. С.121–125.
2. Крыжановский В.А., Магда Э.П., Бочков А.В. ЭБР-Л – экспериментальная установка для исследования лазеров с ядерной накачкой // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2003. Вып. 1, 2. С. 28–30.
3. Бакулин А.П., Ноздрачев С.Ю. Методика выполнения измерений экспозиционной дозы гамма-излучения с помощью детекторов СГД-8 // НИИП, инв. № М–158. 2003.
4. Афанасьев В.Н., Бычков В.Б., Кедров А.В. и др. Способ регистрации набора флюенса нейтронов на импульсных реакторах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2001. Вып. 3–4. С.119–121.
5. Тарасова Е.А., Демидова Д.С., Оболенский С.В. и др. InAlAs/InGaAs HEMT при облучении квантами высоких энергий // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 12. С. 1587–1592.
6. Аствацатурьян Е.Р., Громов Д.В., Ломако В.М. Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия. Минск: Университетское изд-во, 1992.
7. Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.
8. Гуртов В.А. Твердотельная электроника: Учеб. пособие. 3-е изд., доп. М.: Техносфера, 2008. 512 с.
9. Беляев А.Е., Клюй Н.И., Конакова Р.В. и др. Исследование методом электроотражения влияния γ -облучения на оптические свойства эпитаксиальных пленок GaN // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 3. С. 317–319.

THE INFLUENCE OF GAMMA-NEUTRON RADIATION ON GaN-BASED TWO-DIMENSIONAL ELECTRON GAS TRANSISTORS

*N.V. Basargina, I.V. Vorozhtsova, S.M. Dubrovskikh, O.V. Tkachev, V.P. Shukailo,
E.A. Tarasova, A.Yu. Churin, S.V. Obolensky*

The results are presented on the influence of pulsed gamma-neutron radiation on the output characteristics of a GaN-based HEMT (CGH40010, manufactured by Cree Inc. (USA)). The study of the output characteristic has been carried out directly at the moment of gamma-neutron radiation by the rapid method and some time later in greater detail under laboratory conditions. It has been found that unlike conventional built-in microwave transistors the changes in transistor bias voltage are not so much due to the changes in the concentration of electrically active donors, but to the accumulation of radiation-induced charges in the dielectric layers and on the borders of semiconductor layers. The latter is typical of silicon MIS transistors.

Keywords: high electron mobility transistor (HEMT), two-dimensional electron gas, high-energy quanta.