

Моделирование характеристик полевого транзистора при инжекции атомов Au затвора в GaAs, стимулированной нейтронным облучением

С.В.Оболенский¹

*Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского
проспект Гагарина 23, Нижний Новгород 603950, Россия*

Теоретически и экспериментально исследовался процесс дефектообразования в слое GaAs трехслойной композиции Au-Ti-GaAs вследствие инжекции атомов золота из первого слоя при облучении быстрыми нейтронами. Особое внимание уделялось таким параметрам композиции, когда расстояния между областями пространственного заряда кластеров радиационных дефектов были сопоставимы с длиной волны электронов в GaAs. Показано, что в случае использования композиции Au-Ti-GaAs в качестве затвора СВЧ квазибаллистического полевого транзистора характеристики последнего улучшаются.

Известно, что эффекты размерного квантования, использующиеся в полевых транзисторах (ПТ), существенно улучшают характеристики прибора. В последнее время усилия исследователей сосредоточились на разработке технологии, позволяющей встраивать в канал ПТ квантовые нити или точки, что позволило бы еще больше увеличить крутизну и предельные частоты прибора [1]. Обычно для этого используют эпитаксиальные структуры с готовыми квантовыми нитями и/или точками, на которых формируют транзистор. Это не всегда удобно с технологической точки зрения. С другой стороны известно [2], что структуры обычных ПТ (и даже целых интегральных схем) могут быть сформированы посредством ионного легирования. Поэтому весьма привлекательным является получение квантовых точек и нитей с помощью радиационных технологических процессов. При этом размеры такого включения (или расстояния между блокирующими поток носителей включениями) должны быть сопоставимы с длиной волны электронов в полупроводнике, т.е. 5–50 нм.

Известно, что при облучении полупроводниковых материалов нейтронным потоком с энергиями порядка 1 МэВ (например, ядерный реактор) образуются кластеры радиационных дефектов (КРД), сердцевина которых состоит из конгломерата большого числа различных радиационных дефектов. Такая область является непрозрачной для электронов, которые вынуждены обтекать подобное включение, причем расстояние взаимодействия электронов с КРД определяется областью пространственного заряда (ОПЗ) последней. В свою очередь размер ОПЗ зависит не только от суммарного заряда дефектов, но и от концентрации донорной примеси в полупроводнике [3], которая может варьироваться в широких пределах по желанию технолога. Малые размеры ОПЗ порядка 10 нм достижимы только в сильно легированных полупроводниках, которые обычно применяются для изготовления ПТ со встроенным каналом. Модификация свойств готового прибора путем его облучения

¹ Тел.: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.ru

быстрыми частицами возможна только в случае высокой радиационной стойкости прибора. Примером такого прибора, обладающего высокими характеристиками в СВЧ диапазоне, является GaAs ПТ с затвором Шоттки (ПТШ).

В качестве исследуемого объекта рассматривался квазибаллистический ПТШ с эффективной длиной затвора 30 нм (радиус закругления 10–15 нм), технология изготовления которого и высокочастотные свойства обсуждались в [4]. V-образная форма затвора (рис.1) обуславливала проявление эффекта самоупорядоченного расположения КРД при нейтронном облучении транзистора. Металлизация затвора представляла собой двухслойную композицию Au-Ti, с толщинами слоев 0,5 и 0,01 мкм, соответственно. Наибольшая концентрация КРД достигалась в канале непосредственно под острием затвора. Это обуславливалось процессами, рассмотренными ниже. В качестве дополнительных образцов (для сравнения) использовались обычные ПТШ с длиной затвора 0,5 мкм.

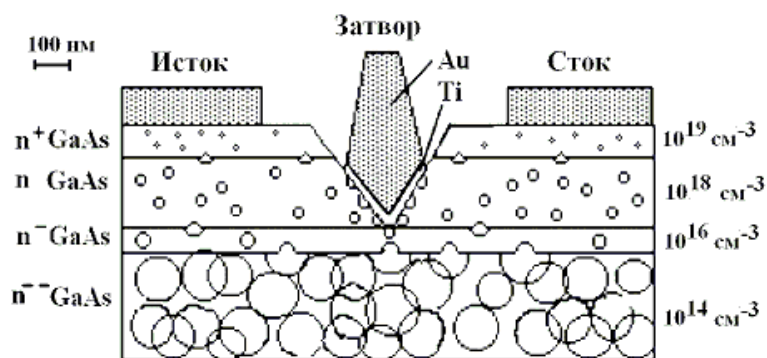


Рис. 1

Поперечное сечение полевого транзистора с V-образным затвором Шоттки. Кружками обозначены кластеры радиационных дефектов. Размер кружков показывает величину ОПЗ кластеров в полупроводниковых слоях с различной степенью легирования. В слое, прилегающем к металлизации затвора, концентрация КРД выше из-за большего сечения взаимодействия нейтронов с Au, чем с GaAs.

Для проявления полезного эффекта необходимо, чтобы КРД были расположены *упорядоченно*, что явно не согласуется со случайным характером взаимодействия излучения с твердым телом. На самом деле это условие может быть выполнено для твердотельных многослойных композиций, когда слои имеют существенно различные свойства (плотность и атомный вес). В этом случае тяжелые атомы соседнего слоя получают меньшую энергию от налетающих нейтронов и, инжектируясь в соседний слой, производят нарушения в значительно меньшем объеме, создавая тем самым более плотный КРД с высокой концентрацией дефектов. Разумеется, подоб-

ные условия выполняются не везде, а лишь на границе раздела двух слоев (в нашем случае металл-полупроводник – Au-GaAs). Если размеры металлической полоски на поверхности полупроводника (радиус закругления острия V-образного затвора) по одной из координат сопоставимы с размерами ОПЗ КРД, то возникает ситуация, когда плотные радиационные кластеры, образованные вторичными атомами золота, создают в GaAs упорядоченную цепочку КРД. Отверстия между кластерами, прозрачные для электронов, автоматически будут иметь размер, определяемый уровнем легирования слоя полупроводника, прилегающего к металлу. Таким образом, в структурах ПТШ при их облучении нейтронным потоком, может наблюдаться процесс самосогласованного (и самоупорядоченного) образования квантово-размерных, прозрачных для электронов, отверстий.

Наибольший положительный эффект может быть достигнут в коротких структурах ПТ, когда движение электронов под затвором происходит баллистически, то есть бесстолбовительно. В этом случае точечные дефекты, которые неизбежно возникают при радиационном облучении полупроводника, слабо влияют на движение электронов. Дополнительным преимуществом является наличие сильнолегированных областей полупроводника слева и справа от затвора, которые изготавливались для уменьшения контактного сопротивления металлизации истока и стока, и слабо изменяли свое сопротивление при радиационном облучении. Сопротивление слаболегированного буферного слоя, наоборот, существенно возрастало, что приводило к дополнительному улучшению параметров транзистора.

Для моделирования каскадов столкновений использовалась модель Кинчина-Пиза, а также усложненная модель полного каскада столкновений (аналогичная известной программе TRIM). Задавался реальный энергетический спектр нейтронов (спектр деления) с энергией от 0,1 до 2,5 МэВ. При таких условиях первичные атомы золота получали энергию от 10 до 120 кэВ. В расчет также принимались атомы Ti, Ga и As, которые получали более значительные энергии (до 600 кэВ). Толщина слоя Ti варьировалась в пределах от 10 до 40 нм, что приводило к поглощению золота только в титане или его проникновению в приповерхностный слой GaAs. КРД, создаваемые Au в GaAs, располагались на расстоянии не более 70 нм от границы раздела Ti-GaAs (рис.1,2), а атомы Ti, Ga и As проникали на 250 нм, поэтому, в случае проникновения золота в GaAs, поглощенная в приповерхностном слое доза существенно возрастала. На свободной поверхности зарегистрировано уменьшение концентрации дефектов в слое порядка 50 нм, которое связано с вылетом быстрых атомов Ga и As в воздух. Для сравнения приведены зависимости распределения дефектов на границе с Al и Ge. Для более легкого, чем GaAs, слоя Al наблюдается уменьшение концентрации дефектов на границе раздела металл-полупроводник, а для практически равного Ga и As по плотности и атомному номеру Ge неоднородности на границе малы.

Неоднородности в распределении КРД, а также в их внутренней структуре (рис.3) обуславливали наличие прозрачных для электронов областей, размеры которых (и их количество) зависели от флюенса нейтронного воздействия. При расчетах учитывалось, что часть КРД (образованная высокоэнергичными первичными атомами) распадалась на отдельные субкластеры, по своей внутренней структуре схо-

жими с КРД, образованные низкоэнергетичными первичными атомами. Характерные размеры областей пространственного заряда КРД (или субкластеров КРД) и расстояний между КРД в зависимости от концентрации легирующей примеси приведены в таблице 1.

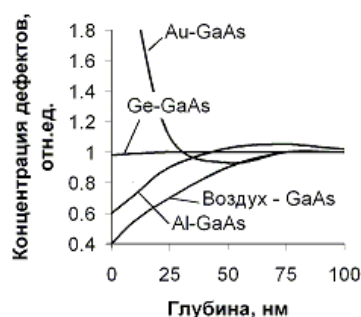


Рис.2

Усиление (ослабление) дозы на границе раздела различных сред с арсенидом галлия. Сплошными линиями показано усредненное распределение дефектов, а пунктиром - распределение концентрации дефектов в кластере.

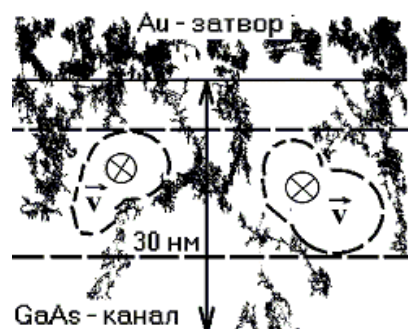


Рис.3

Рассчитанная с помощью программы TRIM структура кластеров радиационных дефектов, возникающая в канале полевого транзистора под затвором. Отчетливо видны прозрачные для электронов области не разрушенного GaAs. Пунктиром показаны области пространственного заряда затвора, границы раздела канал-буферный слой.

Для эксперимента использовались GaAs полевые транзисторы с затвором Шоттки. Измерялись вольт-амперные, вольт-фарадные и высокочастотные характеристики. Благодаря высокому уровню легирования канала, размер области пространственного заряда затвора изменялся в пределах 150–1500 Å. Таким образом, варьируя напряжение на затворе, можно было зондировать слой GaAs, содержащий КРД, рожденные атомами Au. Подбирая флюенс нейтронного воздействия так, что расстояния между КРД были сравнимы с длиной волны электронов в GaAs, получено более чем двукратное увеличение крутизны и коэффициента усиления ПТШ на частоте 37 ГГц (рис.4,5).

В экспериментах сопоставлялись транзисторы с различной длиной затвора и различными уровнями легирования в канале. Увеличение коэффициента усиления реализовалось только в случае, когда изначально изготовленный транзистор имел завышенную концентрацию легирующей примеси в канале (кривые 1 и 2 против 1' и 2'). В этом случае радиационное облучение уменьшало концентрацию электронов до оптимальной, что приводило к увеличению коэффициента усиления (кривые 1' и 2'). В случае короткого канала, когда реализовывалось квазибаллистическое движе-

ние электронов в отверстиях между КРД, увеличение коэффициента усиления было больше 1, т.е. больше, чем у оптимального ПТШ до облучения.

Моделирование процессов в полевом транзисторе проводилось согласно квази-гидродинамической модели, представленной в [5], и модели, основанной на процедуре Монте-Карло [6]. Сопоставлялись два типа полевых транзисторов – с V-образным затвором и с обычным затвором длиной 0,5 мкм. Теоретически рассчитанная ВАХ (рис.4) с точностью 10–20% совпадала с экспериментально измеренной ВАХ. На сток-затворной характеристике выявлены три характерные области проводимости канала транзистора. В первой области проводимость описывается классическими зависимостями, вторая область является переходной, а в третьей области проводимость имела очень сильную зависимость от напряжения на затворе

Табл.1

Флюенс нейтронов, см ⁻²		10 ¹²	10 ¹³	10 ¹⁴	10 ¹⁵	3·10 ¹⁵	6·10 ¹⁵
Концентрация КРД, см ⁻³		2·10 ¹¹	2·10 ¹²	2·10 ¹³	2·10 ¹⁴	6·10 ¹⁴	1.2·10 ¹⁵
Расстояние между центрами КРД, нм		1710	794	368	171	119	94
Концентрация легирующей примеси, см ⁻³	Диаметр КРД, нм	Расстояние между границами ОПЗ кластеров, нм Концентрация точечных дефектов, см ⁻³					
7,6·10 ¹⁴	255	1455 5·10 ¹³	538 5·10 ¹⁴	113 5·10 ¹⁵	-84* 5·10 ¹⁶	-137 1,5·10 ¹⁷	-161 3·10 ¹⁷
2,4·10 ¹⁵	171	1539 3·10 ¹³	623 3·10 ¹⁴	197 3·10 ¹⁵	0 3·10 ¹⁶	-52 9·10 ¹⁶	-77 1,8·10 ¹⁷
6,8·10 ¹⁵	119	1591 10 ¹³	675 10 ¹⁴	250 10 ¹⁵	52 10 ¹⁶	0 3·10 ¹⁶	-24 6·10 ¹⁶
1,3·10 ¹⁶	94	1616 6·10 ¹²	700 6·10 ¹³	274 6·10 ¹⁴	77 6·10 ¹⁵	24 2·10 ¹⁶	0 4·10 ¹⁶
3·10 ¹⁶	71	1639 5·10 ¹²	723 5·10 ¹³	298 5·10 ¹⁴	100 5·10 ¹⁵	48 1,5·10 ¹⁶	23 3·10 ¹⁶
10 ¹⁷	46	1663 5·10 ¹²	747 5·10 ¹³	322 5·10 ¹⁴	125 5·10 ¹⁵	72 1,5·10 ¹⁶	48 2,7·10 ¹⁶
5·10 ¹⁷	27	1683 4·10 ¹²	767 4·10 ¹³	342 4·10 ¹⁴	144 4·10 ¹⁵	92 1,2·10 ¹⁶	68 2,4·10 ¹⁶

* отрицательное значение означает перекрытие ОПЗ

Как показано в [7], вброс электронов в канал транзистора осуществляется через барьер “инжектора”, образованный ОПЗ затвора и ОПЗ границы раздела канал–буферный слой. Возникновение отверстий в канале транзистора приводит к про-

странственному перераспределению плотности тока. Поскольку инжекция электронов в канал достигается за счет уменьшения барьера инжектора продольным полем канала, то вброс электронов будет автоматически происходить напротив квантово-размерных отверстий, то есть там, где продольное поле канала не блокировано областью КРД. Поэтому распределение тока в канале ПТШ станет трехмерным, а вероятность баллистического пролета электрона через отверстие возрастет. Разброс в размере отверстий, их сопротивлении, а, значит, и количество вбрасываемых в отверстие электронов будет определять величину изменений параметров ПТШ. Подобный эффект аналогичен островковому эффекту в вакуумном триоде. По аналогии на рис.6 выделены “нулевые” эквипотенциали вокруг областей КРД и области инжекции электронов в канал.

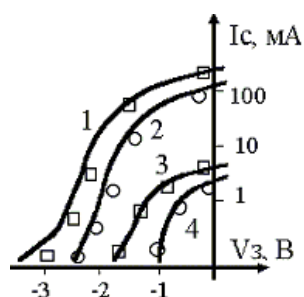


Рис.4

Экспериментально измеренная проходная ВАХ исследуемых ПТШ.

1,3 – ВАХ до облучения; 2,4 – ВАХ после облучения. 1,2 – ВАХ ПТШ с длиной затвора 0,5 мкм; 3,4 – ВАХ ПТШ с V-образным затвором. Значками отмечены экспериментальные данные.

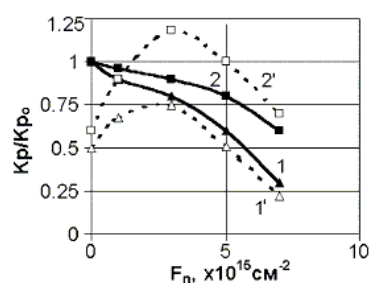


Рис.5

Экспериментальная зависимость коэффициента усиления (37 ГГц) от флюенса нейтронов для ПТШ с длиной затвора 0,5 мкм (1 и 1') и с V-образным затвором (2 и 2'), с исходно оптимальным (1 и 2) и не оптимальным (1' и 2') уровнем легирования канала.

Улучшение параметров ПТШ возможно за счет охвата токопроводящих отверстий управляющим полем затвора со всех сторон, аналогичного процессам в ПТШ с гофрированным затвором [2]. Поскольку размеры отверстий имеют величину порядка длины волны электрона, то, по крайней мере, в некоторых из них происходит квантово-размерное движение носителей заряда, которое дополнительно увеличивает крутизну транзистора. Согласно расчетам, наличие отверстий приводит к увеличению крутизны транзистора в 1,5–2 раза, что соответствует значению, полученному в эксперименте.

Максимально положительный эффект, связанный с квантованием, может быть достигнут только в случае идентичности отверстий. Только в этом случае измене-

ние размера отверстия, приводящее к изменению положения энергетического уровня в потенциальной яме, соответствующей отверстию, позволяет эффективно управлять потоком электронов. Разброс размеров отверстий обуславливает снижение эффективности вплоть до перекрытия соседних уровней. Дальнейшая задача состоит в поиске технологии, позволяющей модифицировать отверстия таким образом, чтобы стандартизовать размеры прозрачных для электронов отверстий.

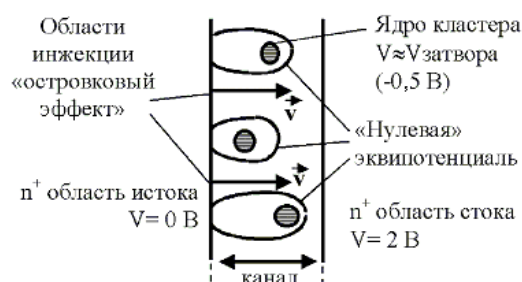


Рис.6
Распределение потенциала и тока электронов в канале транзистора. На рисунке представлен вид на канал сверху, как будто металлизация затвора прозрачная для наблюдателя.

Автор выражает благодарность Китаеву М.А., Скупову В.Д., Киселеву В.К., Качемцеву А.Н, Козлову В.А за обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Отделения НАТО “Наука для Мира” SfP-973799 Semiconductors и гранта МНТП “Физика твердотельных наноструктур” (№99-1142).

Литература

- [1] Jung S.W., Wang H., Ahn D., Park J.H., Yong Kim, Kim E.K. Fabrication of quantum dot transistors incorporating a single self-assembled quantum dot //Physica E 7. 2000. P.430-434.
- [2] Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия. –М.: Мир, 1991, 631с.
- [3] Кладько В.П., Пляцко С.В. О влиянии легирующей примеси на процесс формирования //ФТП. 1998. Т.32,№3. С.261-263.
- [4] Оболенский С.В., Китаев М.А. Полевой транзистор с 30-nm затвором //Письма в ЖТФ. 2000. Т.26,№10. С.13-16.
- [5] Оболенский С.В., Павлов Г.П. Влияние нейтронного и космического излучения на характеристики полевого транзистора с затвором Шоттки //ФТП. 1995. №.3. С.413-420.
- [6] Демарина Н.В., Оболенский С.В. Электронный транспорт в нанометровых GaAs структурах при радиационном воздействии //ЖТФ. 2002. №1. С.66–71.
- [7] Оболенский С.В., Китаев М.А. Отрицательная дифференциальная проводимость квазибаллистического полевого транзистора //Микроэлектроника. 2001. №3. С.23–29.

Simulation of characteristics of field-effect transistor subject to stimulated by neutron irradiation injection of Au atoms from a gate to GaAs ^{*)}

S.V.Obolensky¹⁾

Nizhni Novgorod State University, Gagarin Avenue 23, Nizhni Novgorod 603950, Russia

Defect formation process in GaAs layer in three-layered composition Au-Ti-GaAs was studied theoretically and experimentally. Defect formation process causes due to the Au atoms injection from the first layer under high-energy neutron irradiation. An attention was especially concentrated on such composition parameters when distance between space charge regions of clusters is about electron wavelength in GaAs. It was shown that use of Au-Ti-GaAs composition for V-shaped gate of high-frequency quasiballistic transistor allows improving device characteristics. The reason of improvement is ballistic transport of electrons through well-ordered holes between clusters of radiation-induced defects. Average size of holes is about nanometer. Increase of transistor transconductance and amplification coefficient is due to the envelopment of conducting holes by electric field of gate.

In the paper the method of self-creation of nanometer well-ordered conducting holes in a channel of field-effect transistor with V-shaped gate is represented. The method can be realized either by neutron or by more convenient and safe ion irradiation with the help of technological accelerators, which use high-energy ions (about 1 MeV).

This work was supported by NATO Science Division, Program "Science for Peace", Project SfP-973799 Semiconductors.

^{*)} Proc. NATO Project SfP-973799 Semiconductors 2nd Workshop. Nizhni Novgorod, 2002

¹⁾ Phone: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.ru