

Д. ф.-м. н. Ф. Д. КАСИМОВ, А. Э. ЛЮТФАЛИБЕКОВА

Азербайджан, г. Баку, ОКБ космического приборостроения  
E-mail: anasa.ssddb@azeuro.net

Дата поступления в редакцию  
10.01 2002 г.

Оппонент к. т. н. В. А. ЗАВАДСКИЙ  
(ОНМА, г. Одесса)

## ВЛИЯНИЕ $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКОПЕРЕНОС В АРСЕНИДГАЛЛИЕВОМ ПОЛЕВОМ ТРАНЗИСТОРЕ

*Увеличение тока на несколько порядков в канале арсенидгаллиевого полевого транзистора обусловлено появлением в подложке вторичных токов, сравнимых с токами в пленке.*

Разработка приборов для исследования Земли из космоса, проводившаяся в последние десятилетия в Азербайджанском национальном аэрокосмическом агентстве (бывшем НПО космических исследований Главкосмоса СССР), вызвала необходимость повышения радиационной стойкости аппаратуры. В связи с этим возрос интерес к изучению влияния ионизирующего излучения на электрофизические свойства арсенида галлия и на параметры приборов на его основе, поскольку ИС на GaAs обладают более высокой радиационной стойкостью по сравнению с кремниевыми [1, 2].

Под действием ионизирующих излучений в зависимости от их энергии и вида в полупроводниковом материале возникают радиационные дефекты, вследствие чего изменяются его электрофизические характеристики, такие как концентрация свободных носителей заряда, их подвижность, время жизни носителей, диффузионная длина. Для уменьшения таких нежелательных последствий необходимо иметь представление о механизме радиационных нарушений, к которым в основном относятся смещение атомов из узлов решетки и их ионизация [3].

Однако, как известно, одной из основных тенденций в твердотельной электронике является уменьшение толщины пленок, в которых изготавливаются активные элементы ИС [4], и для тонкопленочных структур, в отличие от объемных, не менее важным являются процессы, связанные с подложкой и переходом "пленка—подложка", поскольку действие излучения на них приводит к возникновению дополнительных токов утечек через подложку и эффектам модуляции толщины канала [5].

В кремниевых эпитаксиальных структурах область пространственного заряда (ОПЗ) располагается, в основном, в подложке вследствие ее более высокого удельного сопротивления, и ее роль сводится к высокоомному шунту. В арсенидгаллиевых же подложках, как было нами показано в [6], наличие глубоких ловушек приводит к образованию на границе раздела "пленка—подложка"

$n-v$ -перехода, распространяющегося в пленку, что делает толщину ОПЗ в ней сравнимой с толщиной самой пленки. Расчет модуляции этой области в зависимости от концентрации глубоких ловушек и ее влияние на процессы токопереноса в тонких пленках на полуизолирующей арсенидгаллиевой подложке изучались нами в [7], где было показано, что ею пренебрегать нельзя. Аналогичные процессы могут иметь место и при воздействии ионизирующего излучения (поскольку оно повышает концентрацию дефектов), поэтому исследование влияния токов в подложке, наводимых ионизацией, на токоперенос в эпитаксиальной пленке также имеет важное значение.

При облучении электронным пучком с энергией  $>15$  кэВ каждый попавший на образец электрон создает большое количество электронно-дырочных пар ( $\sim 3500$ ) [8]. Однако экспериментально наблюдавшееся при этом статическое усиление тока превышало  $10^7$ , что на четыре порядка больше первичного тока, возникающего в структуре за счет генерации электронно-дырочных пар. Следовательно, основной вклад в увеличение тока тонкопленочной структуры при облучении ее электронами вносит вторичный ток.

Следует отметить, что большие вторичные токи, обусловленные модуляцией толщины канала, наблюдаются не только при электронном облучении, но и при воздействии  $\gamma$ -излучения [9].

Для выяснения механизма возникновения вторичного тока нами было проведено моделирование процессов токопереноса в полевоом транзисторе (ПТ) с учетом избыточных носителей заряда и в предположении, что все доноры ионизированы и в материале отсутствуют глубокие ловушки. Последнее условие достигалось введением между пленкой и подложкой буферного слоя, который широко применяется для устранения влияния подложки, препятствуя попаданию электронов из пленки на глубокие ловушки подложки [10]. Концентрация доноров в пленке принималась равной  $10^{17}$  см<sup>-3</sup>, а в подложке —  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>, т. е. фактически рассматривался переходный слой "пленка—буфер".

Результаты расчета показали, что в подзатворной области происходит расширение канала в подложку, вследствие чего появляется вторичный ток, который и является причиной экспериментально наблюдаемого высокого усиления тока.

При наличии в структуре  $p-n$ -перехода или барьера Шоттки, который служит затвором в ПТ, электронно-дырочные пары, возникающие при облучении, собираются областью объемного заряда перехода, создавая в цепи затвора дополнительный ток:

$$I_g = eq_0 P_v AL_c \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона;

$q_0$  — коэффициент, характеризующий скорость генерации электронно-дырочных пар (для GaAs  $q_0 = 6,63 \cdot 10^{13}$  носитель/(см<sup>3</sup>рад));

$P_v$  — мощность поглощенной дозы;

$A$  — площадь перехода;

$L_c$  — эффективная длина собирания.

Так как вклад в ток ионизации дают носители, которые возникают на расстоянии, не превышающем диффузионную длину от ОПЗ, то для объемного материала имеет место равенство

$$L_c = d_o + L_p + L_n \quad (2)$$

где  $d_o$  — ширина ОПЗ;

$L_p$  и  $L_n$  — соответственно диффузионная длина дырок и электронов.

В тонкопленочных структурах эффективная толщина собирания отличается от значения  $L_c$  в объемном материале в связи с тем, что генерация электронно-дырочных пар происходит не только в активной пленке, но и в подложке. Наличие  $n-v$ -перехода "пленка—подложка" препятствует собиранию дырок — вследствие разделения электронно-дырочных пар. Однако при приложении к затвору такого напряжения, при котором канал становится полностью обедненным, влияние  $n-v$ -перехода ослабевает, генерируемые в подложке дырки также собираются на затворе, и ток в его цепи растет.

Токи утечки, возникающие в полуизолирующей подложке с удельным сопротивлением  $10^7$  Ом·см, экспериментально исследовались при воздействии облучения на ПТ с длиной канала 3 мкм. Результаты измерений, показанные на **рис. 1**, подчинялись полуэмпирической формуле, связывающей ток через подложку с мощностью поглощенной дозы [5]:

$$I_s = kWV_d P_v \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от геометрии контактов;

$W$  — ширина контактов;

$V_d$  — напряжение на стоке.

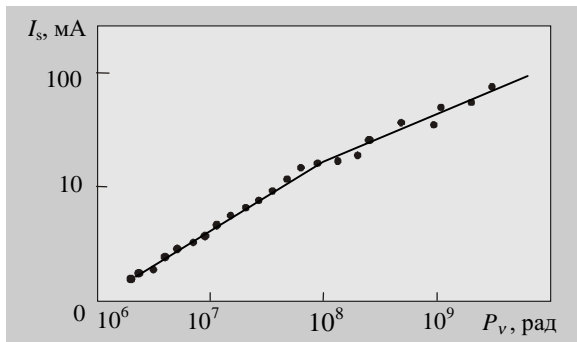


Рис. 1. Зависимость тока, возникающего в полуизолирующей подложке, от мощности поглощенной дозы

Подтверждением того, что измеряемый ток связан с током через подложку, служит тот факт, что зависимость (3) получалась также при расположении контактов на полуизолирующей подложке и в отсутствие проводящего канала — с той лишь разницей, что линейная связь между током и напряжением на контактах имеет место при расстояниях порядка 50 мкм. С этой целью изготавливалась структура, топология которой приведена на **рис. 2**.

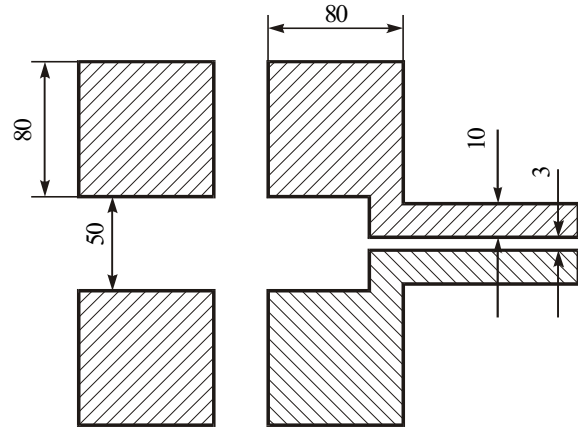


Рис. 2. Топология отдельных и соединенных со стоком и истоком контактных площадок ПТ (размеры в мкм)

Сначала измерялись токи канала на контактах "сток-исток", соединенных с контактными площадками ПТ. Затем проводились измерения на изолированных площадках аналогичной геометрии, расположенных на том же кристалле, не связанных с контактами к областям стока и истока. Путем вычитания этих токов для каждого значения напряжения было получено истинное значение вклада тока, наведенного радиацией в подложке ПТ, на общий ток канала.

Соотношение (3) было справедливо при мощностях поглощенной дозы примерно до  $10^8$  рад, после чего ток  $I_s$  становился пропорциональным  $P_v^{1/2}$ , что, по всей видимости, связано с нелинейной зависимостью скорости рекомбинации от генерированной концентрации электронно-дырочных пар.

Из анализа литературы известно, что причиной уменьшения радиационной стойкости арсенидгаллиевых нормально закрытых ПТ являются следующие физические процессы:

- генерация электронно-дырочных пар в ПТ и возникновение первичного тока в цепи затвора вследствие собирания носителей;

- генерация носителей в полуизолирующей подложке, что приводит к увеличению ее проводимости и появлению шунтирующего тока между контактами при наличии разности потенциалов;

- модуляция толщины канала, обусловленная разделением носителей на  $n-v$ -переходе "пленка—подложка" и захватом дырок на глубокие ловушки в подложке.

Поскольку мы исключили действие глубоких ловушек введением буферного слоя, то специфика

воздействия  $\gamma$ -излучения на тонкопленочные полевые транзисторы в наших экспериментах заключается в появлении вторичных токов через подложку, сравнимых с токами в пленке.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гаджиев Э. М., Исаев А. А., Касимов Ф. Д. Влияние ионизирующего излучения на параметры арсенидгаллиевых полевых транзисторов // Тр. междунар. науч.-практ. конф. "Современные информационные и электронные технологии".— Одесса, 2001.— С. 302.  
 2. Джафарова Э. С., Тапдыгов Э. С. Влияние  $\gamma$ -излучения на кремниевые  $p-n$ -структуры // Fizika (НАН Азербайджана).— 1999.— Т. 5, № 1.— С. 7—9.  
 3. Zuleeg R., Lehovec K. Radiation effects in GaAs junction field-effect transistors // IEEE Trans. Nucl. Sci.— 1980.— Vol. NS-27, N 5.— P. 1343—1354.  
 4. Сеченов Д.А. Нетермическая активация процессов легирования и формирования тонких пленок в технологии ИМС // Тез. докл. Всерос. НТК "Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники". Ч. 2.— Таганрог, 1995.— С. 26.

5. Zuleeg R., Notthoff J. K., Troeger G. L. Channel and substrate current in GaAs FET's due to ionizing radiation // Ibid.— 1983.— Vol. NS-30, N 6.— P. 4151—4156.  
 6. Гусейнов Я. Ю., Касимов Ф. Д., Кемерчев Г. П. Влияние потенциального барьера на границе раздела полупроводящей арсенидгаллиевой подложки с эпитаксиальной пленкой на токоперенос в ней // Fizika (НАН Азербайджана).— 1999.— Т. 5, № 3.— С. 20—22.  
 7. Касимов Ф. Д., Гусейнов Я. Ю., Кемерчев Г. П. Расчет толщины переходного слоя в арсенидгаллиевых  $n-v$ -структурах // Изв. вузов. Электроника.— 2000.— № 3.— С. 100—101.  
 8. Newman D. S, Ferry D. K., Sites J. R. Measurement and simulation of GaAs FET's under electron-beam irradiation // IEEE Trans. Electron Devices.— 1983.— Vol. ED-30, N 7.— P. 849—855.  
 9. Long S. I., Lee F. S., Pellegrini P. Pulsed ionizing radiation recovery characteristics of MSI GaAs integrated circuits // IEEE Trans. Electron Devices Lett.— 1981.— Vol. EDI-2, N 7.— P. 173—176.  
 10. Itoh T., Yanai H. Interface effects on drain current instability in GaAs MESFET's with buffer layer // Jap. J. Appl. Phys.— 1980.— Vol. 19, Suppl. 19-1.— P. 351—355.

в портфеле редакции	в портфеле редакции	в портфеле редакции	в портфеле редакции	в портфеле редакции
в портфеле редакции	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Особенности построения бортовых телеметрических систем малых спутников. <i>К. В. Колесник, В. В. Пискорж (Украина, г. Харьков)</i></li> <li>➤ Некоторые особенности проектирования высоковольтных КМОП БИС. <i>В. Г. Вербицкий, В. И. Золотаревский, Ю. Е. Николаенко, Л. И. Самотовка, Е. С. Товмач (Украина, г. Киев)</i></li> <li>➤ Силовая микросхема для энергоэкономичных блоков управления газоразрядными источниками света. <i>Г. И. Гаврилюк, В. В. Севастьянов, Л. М. Бондарчук, В. В. Чечель (Украина, г. Винница)</i></li> <li>➤ Контролепригодная схема двоичного сумматора на основе 16-разрядной группы секций. <i>А. И. Тимошкин (Украина, г. Днепрпетровск)</i></li> <li>➤ Анизотропный термоэлектрический компаратор. <i>А. А. Ащеулов, И. В. Гуцул (Украина, г. Черновцы)</i></li> <li>➤ Расчет оптимальных размеров квантовых точек InSb в матрице GaSb для термофотовольтаических преобразователей. <i>Е. В. Андропова, Е. А. Баганов, А. Ю. Далечин, А. Ю. Карманний (Украина, г. Херсон)</i></li> <li>➤ Методика определения динамического диапазона полупроводниковых фотоприемников. <i>И. В. Докторович, В. К. Бутенко, В. Н. Годованюк, В. Г. Юрьев (Украина, г. Черновцы)</i></li> <li>➤ Спектральная фоточувствительность Ni—Si:Au-поверхностно-барьерных структур с инжекционным усилением. <i>Ш. Д. Курмашев, И. М. Викулин, С. В. Ленков, В. Г. Сидорец (Украина, г. Одесса)</i></li> <li>➤ Получение кремния электродным восстановлением продуктов пиролиза рисовой лузги. <i>И. Е. Марончук, Б. П. Масенко, М. В. Повстяной, В. А. Завадский, О. В. Соловьев (Украина, гг. Херсон, Одесса)</i></li> <li>➤ Оптимальные схемы лазерных фотоионизационных технологий контроля и очистки вещества на атомном уровне. <i>С. В. Амбросов (Украина, г. Одесса)</i></li> <li>➤ Влияние облучения быстрыми нейтронами на эпитаксиальный арсенид галлия. <i>В. А. Завадский, С. В. Ленков, Д. В. Лукомский, В. А. Мокрицкий (Украина, гг. Одесса, Киев)</i></li> <li>➤ К вопросу о математическом описании кинетики деградации в керамических терморезисторах с отрицательным ТКС. <i>В. А. Балицкая, Н. М. Вакив, О. И. Шпотюк (Украина, г. Львов)</i></li> </ul>	в портфеле редакции	в портфеле редакции	в портфеле редакции
в портфеле редакции	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Микронеоднородности поверхности ионнолегированного слоя кремния. <i>И. М. Викулин, Е. Ф. Храмов, Г. В. Прохоров, А. К. Гнап (Украина, гг. Одесса, Харьков)</i></li> <li>➤ Устройство для проведения электролиза импульсным током. <i>Л. А. Альбота, И. М. Раренко, А. Г. Швец, И. Л. Альбота (Украина, г. Черновцы)</i></li> </ul>	в портфеле редакции	в портфеле редакции	в портфеле редакции

