

05;06

## **Влияние гидрогенизации на пробивное напряжение стока транзисторов на основе ионно-легированных структур арсенида галлия**

© В.А. Кагадей, Е.В. Нефедцев, Д.И. Проскуровский,  
С.В. Романенко, Л.С. Широкова

ФГУП „Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов“, Томск

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

E-mail: vak@lve.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 26 июня 2002 г.

Установлено, что с помощью гидрогенизации ионно-легированных структур арсенида галлия можно увеличить с 7 до 17 В пробивное напряжение стока мощных сверхвысокочастотных (СВЧ) полевых транзисторов Шоттки (ПТШ) и в 2.4 раза мощность СВЧ интегральных схем (ИС). Приведены данные, характеризующие влияние режимов гидрогенизации на рост пробивного напряжения стока и мощности СВЧ транзисторов и ИС. Обсуждены возможные механизмы влияния гидрогенизации на электрофизические свойства арсенида галлия и параметры полупроводниковых приборов.

Характеристики мощных СВЧ ПТШ и ИС на их основе во многом определяются электрофизическими параметрами активных слоев, свойствами границы раздела канал–подложка и свойствами полуизолирующей подложки GaAs [1]. Большинство СВЧ-приборов с ПТШ формируют на основе ионно-легированного GaAs, что обусловлено простой и высокой производительностью метода ионной имплантации. Однако ионно-легированные структуры имеют неидеальные электрофизические параметры, а ПТШ — низкое пробивное напряжение стока ( $\cong 7-8$  В) и, как следствие, невысокую мощность. Это связано с нерезкостью границы раздела канал–подложка, наличием в приповерхностном слое электрически активных центров (дефектов), отсутствием качественной гальванической развязки между полуизолирующей подложкой и активными слоями [1].

Известно, что гидрогенизация приповерхностных слоев эпитаксиальных и ионно-легированных структур GaAs в атомарном водороде приводит к пассивации целого ряда электрически активных мелких и глубоких центров [2,3]. Известны также эффекты увеличения обратного напряжения диодов Шоттки [4,5], подавления эффекта паразитного обратного управления [6], уменьшения времени релаксации фотопроводимости и улучшения вольт-амперных характеристик ПТШ [7]. Эти факты дают основания полагать, что гидрогенизация ионно-легированных структур GaAs может привести и к увеличению пробивного напряжения стока и, следовательно, к росту мощности СВЧ ПТШ. В связи с этим проведение исследований в данном направлении представляет безусловный интерес.

Исследования были выполнены на структурах  $n^+ - n$ -типа проводимости, полученных имплантацией ионов  $\text{Si}^+$  в подложки полуизолирующего GaAs. Концентрация электронов  $n_e$  в контактном  $n^+$ -слое составляла  $(1.5 - 2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , в активном  $n$ -слое —  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а толщины слоев равнялись 0.1 и 0.2  $\mu\text{m}$  соответственно. Каждая пластина делилась на две части, одна из которых подвергалась гидрогенизации, а другая служила контрольным образцом. С целью предотвращения химического взаимодействия атомарного водорода с GaAs перед гидрогенизацией на поверхность структур методом плазмохимического осаждения наносили пленку  $\text{SiO}_2$  толщиной 5 nm. Гидрогенизация проводилась в потоке атомарного водорода в установке, описанной в [8]. Поток с плотностью  $10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  формировался источником на основе дугового разряда низкого давления [8]. Температура образцов  $T$  при гидрогенизации составляла 100–200°С, длительность обработки  $t$  варьировалась в диапазоне 5–200 min. Давление водорода в вакуумной камере во время гидрогенизации равнялось  $10^{-2}$  Pa.

В результате гидрогенизации концентрация носителей заряда в контактном слое ионно-легированных структур, согласно  $C - V$  измерениям, уменьшалась до  $n_e \cong (2 - 6) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  на глубине 0.07  $\mu\text{m}$ . Это свидетельствует о том, что атомарный водород, проникнув в ионно-легированный слой, образовал электрически нейтральные комплексы с атомами легирующей примеси. Низкотемпературный отжиг, проведенный в атмосфере азота при 475°С в течение 10 min, приводил к распаду комплексов и к полному восстановлению концентрации носителей до исходной величины  $n_e \cong (1.5 - 2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  на глубине 0.025  $\mu\text{m}$ . Согласно данным, приведенным в [9], концентрация комплексов водорода с глубокими центрами во время отжига не должна сильно измениться

**Таблица 1.** Характеристики тестовых транзисторов с шириной затвора  $100 \mu\text{m}$ , а также характеристики рабочих ИС для негидрогенизированных образцов № 1, 2, 3 и образцов № 1АВ, 2АВ, 3АВ, гидрогенизированных в течение различного времени.

Номер образца	Ток насыщения, мА	Крутизна ВАХ, $\frac{\text{мА}}{\text{V} \cdot \text{mm}}$	Напряжение перекрытия транзистора, V	Напряжение насыщения ВАХ, V	Напряжение пробоя стока, V	Мощность ИС на частоте 1.5 GHz, W
№ 1, 2, 3	8–10	110–130	1–1.1	1.2–1.3	6–7	1.2
№ 1АВ, $t = 30 \text{ min}$	10–14	125–150	1–1.4	1.2–1.5	17.5	4.2
№ 2АВ, $t = 5 \text{ min}$	9–10	120	1	1	9	1.7
№ 3АВ, $t = 200 \text{ min}$	12–14	110	1.2–1.3	1.4	11	2.8

вследствие того, что распад комплексов водорода с глубокими центрами происходит при более высокой температуре, чем использованная температура отжига. Измерения величины паразитного обратного управления по подложке, а также измерения кинетики релаксации фотопроводимости при прикладываемом к структуре смещении методом, описанным в [6,7], подтвердили это. Измерения свидетельствуют, что структуры до гидрогенизации характеризуются исходно низкой величиной обратного управления и быстрой релаксацией фотопроводимости. Гидрогенизация в течение 10–120 min и последующий отжиг приводят к некоторому уменьшению величины обратного управления и времени релаксации фотопроводимости, что свидетельствует о пассивации глубоких центров [6,7].

После измерений электрофизических свойств, на гидрогенизированной и контрольной частях одной пластины по одинаковому технологическому маршруту создавались СВЧ ИС на основе мощных ПТШ с заглубленным затвором.

В табл. 1 приведены параметры тестовых ПТШ и рабочих СВЧ ИС, полученные на контрольных образцах и на образцах, подвергнутых гидрогенизации в течение различного времени. Гидрогенизация не

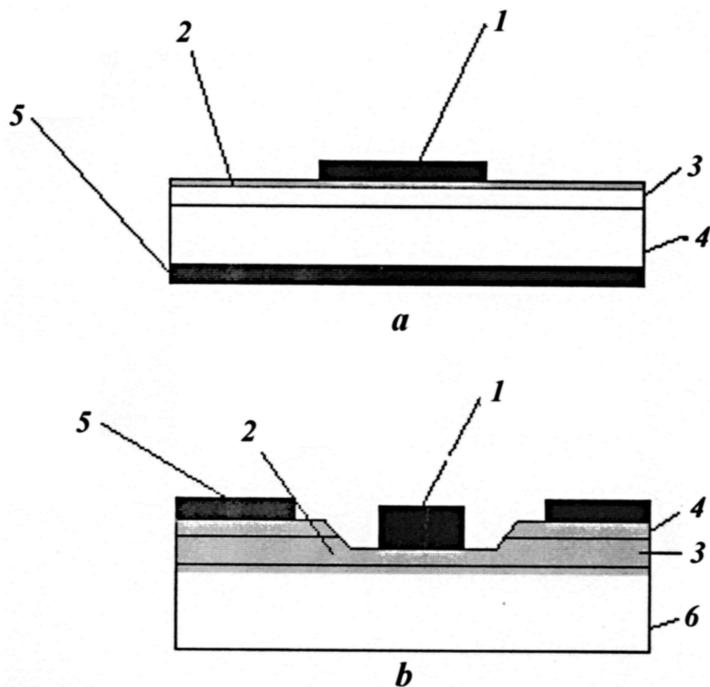
**Таблица 2.** Характеристики тестовых транзисторов с шириной затвора  $100 \mu\text{m}$ , а также характеристики рабочих ИС для негидрогенизированных образцов № 4 и 5 и гидрогенизированных образцов № 4АВ и 5АВ.

Номер образца	Ток насыщения, мА	Крутизна ВАХ, $\frac{\text{мА}}{\text{В} \cdot \text{мм}}$	Напряжение перекрытия транзистора, В	Напряжение насыщения ВАХ, В	Напряжение пробоя стока, В	Мощность ИС на частоте 1.5 GHz, W
№ 4	8–10	115–135	0.9–1.1	1.2–1.3	6–7	1.2
№ 5	8–9	100	1	1	8	1.4
№ 4АВ, $t = 40 \text{ min}$	11–14	130–150	1–1.2	1.3–1.5	17.5	4.2
№ 5АВ, $t = 40 \text{ min}$	9–12	100–125	1.2–1.4	1.3–1.5	18	3.8

приводит к существенным изменениям большинства параметров транзисторов, однако оказывает сильное влияние на пробивное напряжение стока  $U_b$ . При длительности обработки 30 min наблюдается некоторый рост крутизны вольт-амперной характеристики, резкое увеличение напряжения пробоя стока от  $U_b = 6\text{--}7 \text{ V}$  до  $U_b = 17.5 \text{ V}$  и увеличение мощности ИС от 1.2 до 4.2 W. При малых ( $t = 5 \text{ min}$ ) и больших ( $t = 200 \text{ min}$ ) длительностях гидрогенизации рост пробивного напряжения не столь значителен, величина  $U_b$  после гидрогенизации составляет 9–11 V. Эксперименты показали, что двукратный рост величины  $U_b$  реализуется в диапазоне времен  $t = 20\text{--}120 \text{ min}$ .

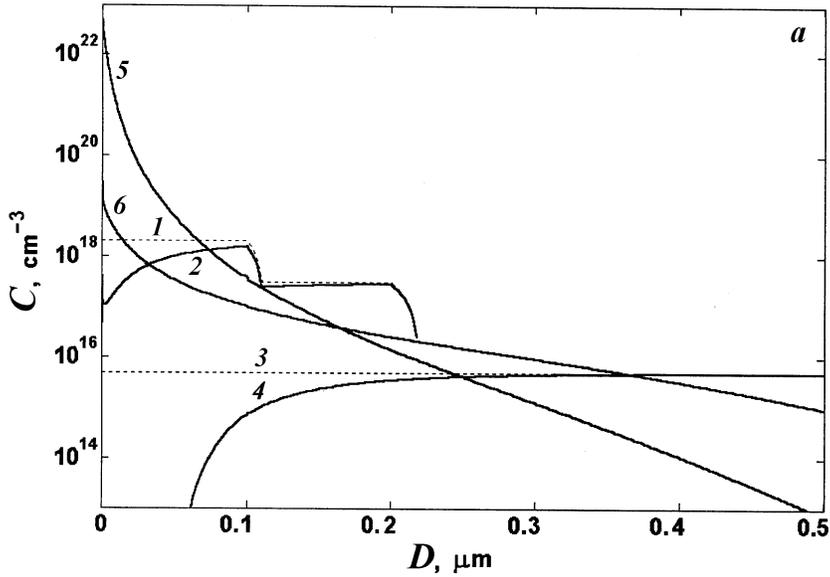
Данные измерений для тестовых ПТШ и рабочих СВЧ ИС, изготовленных на структурах, гидрогенизированных в течение времени  $t = 40 \text{ min}$ , приведены в табл. 2. Видно, что ПТШ имеют повышенное в 2–2.5 раза напряжение пробоя стока и соответственно более высокую рабочую мощность. В результате гидрогенизации также происходит небольшое увеличение крутизны вольт-амперной характеристики и тока насыщения транзистора.

Экспериментально обнаруженные зависимости величины  $U_b$  от времени гидрогенизации определяются количеством атомарного водорода, растворенного в GaAs, а также его концентрацией в  $n^+$ - $n$ -слое, на границе раздела легированный слой — подложка и/или в полуизоли-



**Рис. 1.** Поперечное сечение гидрогенизированной эпитаксиальной диодной структуры с барьером Шоттки, расположенным на поверхности GaAs (*a*) и гидрогенизированной ионно-легированной транзисторной структуры GaAs с заглубленным затвором Шоттки (*b*); серым цветом показана область проникновения атомарного водорода. 1 — барьер Шоттки, 2 — гидрогенизированный слой, 3 —  $n$ -структура, 4 —  $n^+$ -структура, 5 — омический контакт, 6 —  $i$ -GaAs.

рующей подложке. Похожий эффект увеличения обратного напряжения диодов с барьером Шоттки, сформированных непосредственно на поверхности эпитаксиальных структур GaAs (рис. 1, *a*), ранее наблюдался нами при меньшем времени гидрогенизации ( $t = 5 \text{ min}$ ) [5]. При формировании СВЧ ПТШ с заглубленным затвором (рис. 1, *b*) для достижения эффекта потребовалась более длительная обработка ( $t = 20\text{--}120 \text{ min}$ ), что связано с необходимостью проникновения атомарного водорода на большие глубины.



**Рис. 2.** Расчетные профили распределения концентрации атомарного и молекулярного водорода, а также электрически активных мелких и глубоких центров по глубине GaAs для времени гидрогенизации 5 min (*a*) и 40 min (*b*); исходные профили распределения мелких (1) и глубоких центров (3), профили распределения частиц после гидрогенизации: мелких центров (2), глубоких центров (4), молекул водорода (5) и атомов водорода (6).

Расчет глубины проникновения водорода в  $n^+ - n$ -структуру, выполненный по модели, описанной в [10–12] и усовершенствованной нами в [13], позволил подтвердить это предположение. В расчетах учитывались процессы диффузии атомарного водорода, образования и распада молекул водорода, а также комплексов водород — мелкий центр и водород — глубокий центр. Кроме того, производился учет уменьшения вероятности проникновения атомов водорода в глубь GaAs за счет образования в приповерхностном слое диффузионного барьера из междоузельных неподвижных молекул водорода. Профили распределения атомарного и молекулярного водорода, а также активных мелких и глубоких центров (EL2) по глубине GaAs приведены на рис. 2.

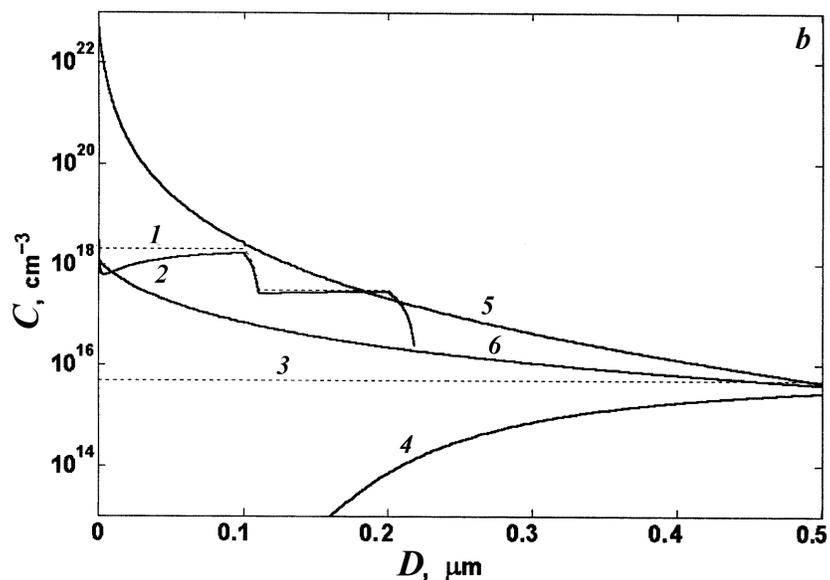


Рис. 2 (продолжение).

В результате гидрогенизации в течение 5 min ощутимая пассивация EL2 центров наблюдается до глубины 0.1–0.15  $\mu\text{m}$ . Концентрация глубоких центров в активном  $n$ -слое уменьшается незначительно, а на границе раздела канал-подложка и в полуизолирующей подложке GaAs не уменьшается вообще. Гидрогенизация в течение 40 min приводит к диффузии водорода на большие глубины. В результате этого как в легированных  $n^+$ - $n$ -слоях, так и в нижележащих слоях полуизолирующего GaAs, вплоть до глубины 0.4  $\mu\text{m}$ , происходит существенное уменьшение концентрации активных глубоких центров.

Приведенные экспериментальные и расчетные данные свидетельствуют о том, что эффект роста  $U_b$  обусловлен проникновением атомарного водорода в активный  $n$ -слой, а также в нижележащие слои полуизолирующего GaAs и эффективной пассивацией электрически активных центров, расположенных там. Относительно невысокое напряжение пробоя стока ( $U_b = 11 \text{ V}$ ) у образца № 3, подвергнутого длительной гидрогенизации ( $t = 200 \text{ min}$ ), скорее всего, связано с

избытком водорода, введенного в GaAs, и образованием новых дефектов. В пользу этого предположения свидетельствует тот факт, что только у данного образца обнаружено существенное влияние прикладываемого к структуре смещения на величину фотопроводимости, что не наблюдалось на структурах, гидрогенизированных при меньшем времени.

Доказательство того, что улучшение электрических параметров ПТШ связано с пассивацией дефектов, присущих именно ионно-легированной структуре, было получено в специальном эксперименте. Тестовые ПТШ и рабочие СВЧ ИС были изготовлены по аналогичному технологическому маршруту, но с использованием  $n^+ - n$ -структуры с буферным слоем на основе низкотемпературного GaAs, полученной методом молекулярной лучевой эпитаксии. В качестве подложки использовался тот же полуизолирующий GaAs, что и для получения ионно-легированных структур. Высокое качество эпитаксиальных слоев и низкая концентрация дефектов в структуре обеспечили напряжение пробоя стока на уровне  $U_b = 16 - 18 \text{ В}$  и мощность на уровне  $4 \text{ Вт}$ . Гидрогенизация эпитаксиальных структур, выполненная в различных режимах, не привела к дальнейшему улучшению параметров ПТШ.

Таким образом, в данной работе впервые обнаружено, что гидрогенизация в атомарном водороде  $n^+ - n$  ионно-легированных структур GaAs приводит более чем к двукратному увеличению напряжения пробоя стока ПТШ и соответственному росту мощности СВЧ ИС.

Авторы благодарны А.В. Голикову за полезные дискуссии и изменение параметров СВЧ ИС, Л.М. Ромась за помощь в проведении экспериментов.

## Список литературы

- [1] *Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления* / Под ред. Д.В. Ди Лоренцо, Д.Д. Канделуола. М.: Радио и связь, 1988. С. 495.
- [2] *Myers S.M., Baskes M.I., Birnbaum H.K. et al. // Reviews of Modern Physics. 1992. V. 64. P. 559–617.*
- [3] *Corbett J.W., Pearton S.J., Stavola M. // Defect control in semiconductors / Ed. Sumino K. Elsevier Science Publishers B.V. North-Holland, 1990. P. 53–63.*
- [4] *Chakrabarti U.K., Pearton S.J., Hobson W.S., Lopata J., Swaminathan V. // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. P. 887–889.*
- [5] *Божков В.Г., Кагадей В.А., Торхов Н.А. // ФТП. 1998. Т. 32 (2). С. 1343–1348.*

- [6] Кагадей В.А., Лиленко Ю.В., Широкова Л.С., Проскуровский Д.И. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25 (13). С. 37–41.
- [7] Кагадей В.А., Лиленко Ю.В., Широкова Л.С., Проскуровский Д.И. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. (7). С. 1–7.
- [8] Kagadei V.A., Proskurovsky D.I. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1998. V. 16 (4). P. 2556–2561.
- [9] Омеляновский Э.М., Пахомов В.Ф., Поляков Ф.Я. // Физика и техника полупроводников. 1987. Т. 21. № 5. С. 842–847.
- [10] Morrow R. // J. Appl. Phys. 1989. V. 66 (7). P. 2973–2979.
- [11] Рытова Н.С. // ФТП. 1991. Т. 25 (6). С. 990–996.
- [12] Рытова Н.С. // ФТП. 1991. Т. 25 (6). С. 1078–1080.
- [13] Kagadei V.A., Nefyodtsev E.V., Proskurovsky D.I. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. V. 19 (4). P. 1871–1877.