

Повышение радиационной стойкости интегральных схем на основе биполярных транзисторов обработкой в водородной электронно-циклотронно-резонансной плазме и геттерированием Si-пластин

© Е.А. Полушкин^{1,2}, С.В. Нефедьев², О.А. Солтанович¹, А.В. Ковальчук^{1,*}, С.Ю. Шаповал¹

¹ Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Россия

² Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, 124460 Москва, Россия

* E-mail: anatoly-fizmat@mail.ru

Поступила в Редакцию 19 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 4 апреля 2023 г.

Принята к публикации 5 апреля 2023 г.

Продемонстрировано значительное улучшение радиационной стойкости интегральных схем на основе кремниевых биполярных транзисторов. Показано сильное снижение деградации коэффициента усиления по току и значительное улучшение выхода годных после высокоэнергетического γ -облучения. Это было достигнуто благодаря разработке эффективного процесса гидрогенизации объема кремния и поверхностного диэлектрического слоя с использованием плазмы электронного циклотронного резонанса, а также реализации эффективной опции геттерирования Si-пластин.

Ключевые слова: интегральные схемы, биполярные транзисторы, ЭЦР-плазма, гидрогенизация полупроводниковых структур, пассивация ловушечных состояний, геттерирование полупроводниковых пластин, γ -облучение, радиационная стойкость, выход годных транзисторов.

DOI: 10.21883/FTP.2023.03.55633.4467

1. Введение

Биполярные транзисторы широко используются в современных интегральных схемах (ИС) аналоговых и смешанных сигналов из-за их высокого коэффициента усиления по току и низкого тока утечки, а также отличной совместимости с технологией КМОП (комплементарная логика с транзисторами на металл–оксид–полупроводнике). Для некоторых специальных применений биполярные транзисторы должны иметь высокую стойкость к облучению высокоэнергетичными нейтронами, электронами и γ -квантами [1–8]. Ухудшение усиления при облучении в основном вызвано образованием точечных дефектов и их комплексов в решетке полупроводника [9,10]. Эти дефекты действуют как центры рекомбинации и, следовательно, сокращают время жизни неосновных носителей заряда. Другой ключевой причиной ухудшения коэффициента усиления является эффект ионизации в пассивирующем диэлектрическом слое, таком как оксид кремния или нитрид кремния [11]. Вызванные облучением заряды в диэлектрике и на границе раздела с полупроводником, особенно заряды, образованные в пассивирующем диэлектрическом слое, покрывающем область перехода эмиттер-база, вызывают увеличение скорости поверхностной рекомбинации неосновных носителей, что приводит к уменьшению коэффициента усиления [12]. Ухудшение коэффициента усиления тока биполярного транзистора при облучении зависит от дозы, энергии и типа излучения. Это также зависит от типа и структуры транзистора, например,

вертикальные $n-p-n$ -транзисторы демонстрируют существенное уменьшение коэффициента усиления, в то время как $p-n-p$ -транзисторы относительно устойчивы к ионизирующему излучению [13]. В свою очередь тип и концентрация центров рекомбинации в решетке полупроводника сильно зависят от типа и концентрации электрически активных примесей, например, фосфора и бора [14]. Электрически неактивные примеси, такие как кислород и углерод, во время облучения взаимодействуют с образовавшимися вакансиями и междоузлиями с образованием эффективных центров рекомбинации [15]. Кроме того, точечные дефекты, образующиеся при облучении, могут взаимодействовать с металлическими примесями, например, медью [16] и никелем [17]. В результате такого взаимодействия могут образовываться новые дефекты с глубокими уровнями, способствующие уменьшению времени жизни неосновных носителей заряда. Способность атомарного водорода снижать скорость генерации дефектов при облучении и пассивировать радиационные дефекты в решетке кремния широко используется для повышения радиационной стойкости биполярных транзисторов. Предварительная обработка кремния в водородной плазме приводит к значительному увеличению его радиационной стойкости и снижению температуры отжига радиационных дефектов [18]. В то же время введение водорода перед облучением делает устройства более чувствительными к ионизирующему излучению, что приводит к некоторому снижению коэффициента усиления тока [19].

2. Методы исследований

В качестве объекта исследования были выбраны коммерчески доступные ИС с аналоговым компаратором напряжения, которые были изготовлены на Si-пластинах по биполярной технологии.

Гидрогенизация Si-пластин проводилась в условиях плазмы электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) на установке лабораторной сборки с управляемой энергией $\varepsilon = 0-160$ эВ ионов H_2^+ и протонов H^+ . ЭЦР-плазма с частотой генерации 2.45 ГГц поддерживалась в смеси водорода и аргона. Газовая смесь напускалась коаксиально-симметрично в камеру диаметром 150 и длиной 160 мм, в которой поддерживались условия ЭЦР. Кремниевая пластина устанавливалась в подложкодержатель, расположенный соосно на расстоянии 120 мм от выхода ЭЦР-камеры. К подложкодержателю относительно корпуса ЭЦР-плазменной установки прикладывалось высокочастотное (ВЧ) напряжение частотой 13.56 МГц. Под действием импульса силы от ВЧ-поля амплитуда смещения облака электронного газа в M_i/m_e раз превышает амплитуду смещения массива ионов. Как следствие, относительно нейтральной плазмы Si-подложка заряжается отрицательным потенциалом смещения U_b , величина которого определяется амплитудой ВЧ-поля. Энергии ионов и протонов, атакующих поверхность образца, фиксировались потенциалом смещения: $U_b = 0 - (-160)$ В. Оптимальные условия обработки ЭЦР-плазмой подбирались путем варьирования температуры подложки $T = 40-300^\circ\text{C}$, микроволновой мощности $W = 50-200$ Вт, давления $P = 0.1-2.5$ мТорр и соотношения $R = 0.2-1.0$ потоков H_2/Ar .

Внешнее геттерирование проводилось методом сошлифовки тыльной поверхности Si-пластины с последующей термообработкой в атмосфере аргона и напылением аморфного кремния. В оптической мастерской фиксировались условия сошлифовки.

В качестве источника γ -излучения использовалась станция „Кобальт-60“. Для накопления необходимой дозы облучения Si-пластины с ИС помещались на калиброванную площадку в бункере станции „Кобальт-60“.

Все электрофизические измерения проводились на автоматической зондовой установке EM-6190A, которая установлена на линии контроля производства ИС.

Для изучения влияния плазменной и радиационной обработки на количество заряда в диэлектрических слоях были сформированы на Si-пластинах тестовые МДП (металл–диэлектрик–полупроводник) структуры Si/SiO₂/Al и Si/Si₃N₄/Al с толщиной 50 нм слоя SiO₂ и 80 нм слоя Si₃N₄. Эти слои были идентичны диэлектрическим слоям, составляющим пассивирующий бислой SiO₂/Si₃N₄ в исследуемых ИС. Тестовые МДП структуры были изготовлены путем нанесения алюминиевых контактов диаметром 500 мкм на поверхность SiO₂ и Si₃N₄ методом термического вакуумного напыления. Фиксированный заряд в диэлектрике и интерфейсный

заряд на границе раздела полупроводник/диэлектрик исследовались методом высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) [20] с помощью измерителя емкости EG&G PAR-410 на тестовой частоте 1 МГц.

3. Результаты исследований

В представленной статье мы демонстрируем значительное улучшение радиационной стойкости кремниевых биполярных транзисторов. Снижение деградации коэффициента усиления по току при γ -облучении было достигнуто за счет разработки эффективного процесса гидрогенизации, направленного на снижение скорости генерации радиационных дефектов в кремнии и на изменение концентрации зарядов в пассивирующем диэлектрическом слое. Кроме того, для снижения концентрации металлических примесей, таких как медь и никель, на ранней стадии изготовления прибора была реализована эффективная опция геттерирования.

Металлические примеси могут быть легко введены либо во время роста кристаллов, либо на различных стадиях обработки пластин (например, полировки) и изготовления приборов [21]. Эти примеси также трудно обнаружить, если они не взаимодействуют с другими дефектами кристаллической решетки, особенно с дефектами, вызванными облучением, и не образуют электрически активные комплексы с глубокими уровнями [16,17]. В работе показано, что сочетание эффективного геттерирования и обработки в водородной плазме является очень надежным решением для повышения выхода годных и функциональности при облучении интегральных схем на основе биполярных транзисторов.

При взаимодействии γ -квантов с материалом полупроводниковой пластины образуются электронно-дырочные пары и комптоновские электроны. Энергии комптоновских электронов сравнимы с энергией γ -квантов. Комптоновские электроны, вероятнее всего, испытывают неупругое рассеяние на электронных оболочках, которое вызывает ионизацию атомов. Другим неупругим процессом является кратковременный (на время нескольких периодов валентных колебаний) разрыв химической связи между парой атомов $\equiv\text{Si}\cdot\cdot\text{Si}\equiv$ в кристаллической решетке. За счет упругого кулоновского взаимодействия с ядрами атомов, для комптоновских электронов также возможен процесс, при котором энергия, переданная атомному ядру, достаточна для разрыва всех химических связей атома-мишени (четыре связи для атома Si). Если после такого „освобождения“ энергия превышает пороговую энергию, этот атом смещается, проникая в междоузлие в качестве внедренного атома. В узле, где атом находился до взаимодействия с комптоновским электроном, образуется вакансия.

Вакантные узлы, внедренные атомы и кратковременные разрывы химических связей образуют в кристаллическом теле группу первичных (точечных) структурных дефектов, индуцированных действием γ -облучения.

Медь и никель являются сильными донорами валентных электронов. При определенных условиях атомы меди и никеля способны вступать во взаимодействие с атомами кремния с образованием ионной химической связи. Изначально эти атомы растворены в междоузлиях кристаллической решетки и скачкообразной диффузией перемещаются в объеме полупроводниковой пластины.

Мы предполагаем, что в кристаллической структуре полупроводниковой пластины протекают следующие процессы с участием никеля и меди: При внесении ИС в поле радиации включается генерация первичных структурных дефектов. Атом меди или никеля образует ионную химическую связь $\equiv\text{Si}-\text{Cu}$ или $\equiv\text{Si}-\text{Ni}$ с атомом кремния, если такой атом $\equiv\text{Si}\cdot$ с оборванной ковалентной связью (\cdot) оказывается рядом. Как валентность меди, так и наиболее вероятная валентность никеля равна двум. Следовательно, эти атомы способны встроиться между атомами кремния с образованием двух ионных связей $\equiv\text{Si}-\text{Cu}-\text{Si}\equiv$ или $\equiv\text{Si}-\text{Ni}-\text{Si}\equiv$, если кратковременно разорванная связь $\equiv\text{Si}\cdot\cdot\text{Si}\equiv$ оказывается рядом. Таким образом, по мере накопления дозы облучения происходит и накопление новых стабильных дефектов с глубокими уровнями в запрещенной зоне полупроводника. Как следствие, уменьшается время жизни и количество неосновных носителей заряда. Время жизни неосновных носителей заряда определяется не прямой рекомбинацией зона-зона, а через энергетические уровни ловушек, расположенных в запрещенной зоне.

Опция геттерирования была реализована на серии экспериментальных Si-пластин, которые затем обрабатывались до этапа металлизации вместе с контрольными пластинами из той же партии. Перед металлизацией пластины с опцией геттерирования, а также ряд контрольных пластин подвергались обработке в ЭЦП-плазме, целью которой было введение водорода в объем кремниевой пластины и управление концентрацией зарядов в поверхностном пассивирующем бислое $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$. Присутствие ван-дер-ваальсово связанных атомов водорода приводит к пассивации структурных дефектов (например, оборванных $\equiv\text{Si}\cdot\cdot\text{Si}\equiv$ связей) в объеме кремния и на границе раздела диэлектрик/полупроводник [22,23]. Количественное исследование локально стабильных состояний моно атомного водорода, растворенного в кристаллическом кремнии, было проведено в работе [24].

Исследовалось влияние радиационного воздействия на диэлектрические слои и интерфейс диэлектрик/полупроводник. Количество заряда в пассивирующем бислое $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ исследуемых ИС было измерено на тестовых МДП структурах $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Al}$ и $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$ методом высокочастотных ВФХ. Алюминиевые контакты (см. разд. 2) напылялись после обработки слоев Si/SiO_2 и $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4$ в ЭЦП-плазме ($\text{H}_2 + \text{Ar}$).

Было установлено, что обработка тестовых МДП структур в ЭЦП-плазме может вносить как положительный, так и отрицательный заряд в слой диэлектрика, в зависимости от потенциала смещения U_b (см. разд. 2).

Например, обработка при смещении $U_b = 0\text{ В}$ приводит к внедрению положительного заряда в диэлектрик SiO_2 с поверхностной плотностью $N_{qi} \approx 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. В этом случае значительно ухудшается и граница раздела Si/SiO_2 . Однако при обработке со смещением $U_b = -120\text{ В}$ напряжение плоских зон U_{fb} тестовой МДП структуры $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Al}$ смещается в сторону положительных напряжений на $\approx 1.5\text{ В}$, что соответствует введению в диэлектрик отрицательного заряда с поверхностной плотностью $N_{qi} \approx 6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. В этом случае при последующем γ -облучении U_{fb} не изменяется в отличие от „не обработанных в плазме“ тестовых МДП структур, у которых происходит сдвиг U_{fb} в отрицательную область на величину -1 В . После воздействия γ -излучения на МДП структуры, предварительно обработанные в ЭЦП-плазме ($\text{H}_2 + \text{Ar}$) со смещением $U_b = -120\text{ В}$, заметного влияния на границу раздела Si/SiO_2 и заряд в диэлектрике не обнаружено.

Наша недавняя работа [25] продемонстрировала возможность минимизации вносимого заряда при γ -облучении путем предварительной обработки тестовых МДП-структур в водородной ЭЦП-плазме.

Исследования, которые мы провели с тестовой МДП структурой $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$, на данном этапе не позволяют построить какие-либо логические закономерности. Это обусловлено существенным отличием химической формулы Si_3N_4 от атомарного состава $\text{H}_x\text{Si}_r\text{N}_z\text{H}_y$ реального материала слоя, который в микроэлектронной технологии принято называть „нитрид кремния“. Запись химической формулы $\text{H}_x\text{Si}_r\text{N}_z\text{H}_y$ была предложена в работе [26]. В этой записи x, r, z, y — атомарные проценты: $x + r + z + y = 100\%$; $x = \text{C}(\text{Si}-\text{H})$, $r = \text{C}(\text{Si})$, $z = \text{C}(\text{N})$, $y = \text{C}(\text{N}-\text{H})$. Проценты атомов водорода x и y зависят от процесса и температуры нанесения слоя „нитрид кремния“. Минимальное количество $x + y = 5\%$ может быть достигнуто при высокотемпературном ($T > 1200\text{ К}$) пиролитическом осаждении слоя. При низкотемпературном ($T < 600\text{ К}$) плазмохимическом осаждении слоя суммарный процент атомов водорода может достичь 38% [27].

Таким образом, слой „нитрид кремния“ $\text{H}_x\text{Si}_r\text{N}_z\text{H}_y$ является полимероподобным материалом, и тестовая МДП структура $\text{Si}/\text{H}_x\text{Si}_r\text{N}_z\text{H}_y/\text{Al}$ изначально содержит химически связанные ($\equiv\text{Si}-\text{H}$, $=\text{N}-\text{H}$) атомы водорода. При обработке в ЭЦП-плазме ($\text{H}_2 + \text{Ar}$) на слой $\text{Si}/\text{H}_x\text{Si}_r\text{N}_z\text{H}_y$ падает поток плазменного ультрафиолетового излучения. Это излучение „насквозь“ проникает в слой толщиной 80 нм и при энергиях $> 5\text{ эВ}$ кванты взаимодействуют с концевыми связями ($\equiv\text{Si}-\text{H}$, $=\text{N}-\text{H}$) атомов водорода. Химические связи разрываются и атомы водорода переходят в ван-дер-ваальсово связанные состояния. Соответственно образуются радикальные центры $\equiv\text{Si}\cdot$ и $=\text{N}\cdot$. С течением времени выполнения запланированных экспериментов, по причине скачкообразной диффузии, идет обратный процесс и ван-дер-ваальсово связанные атомы водорода рекомбинируют с

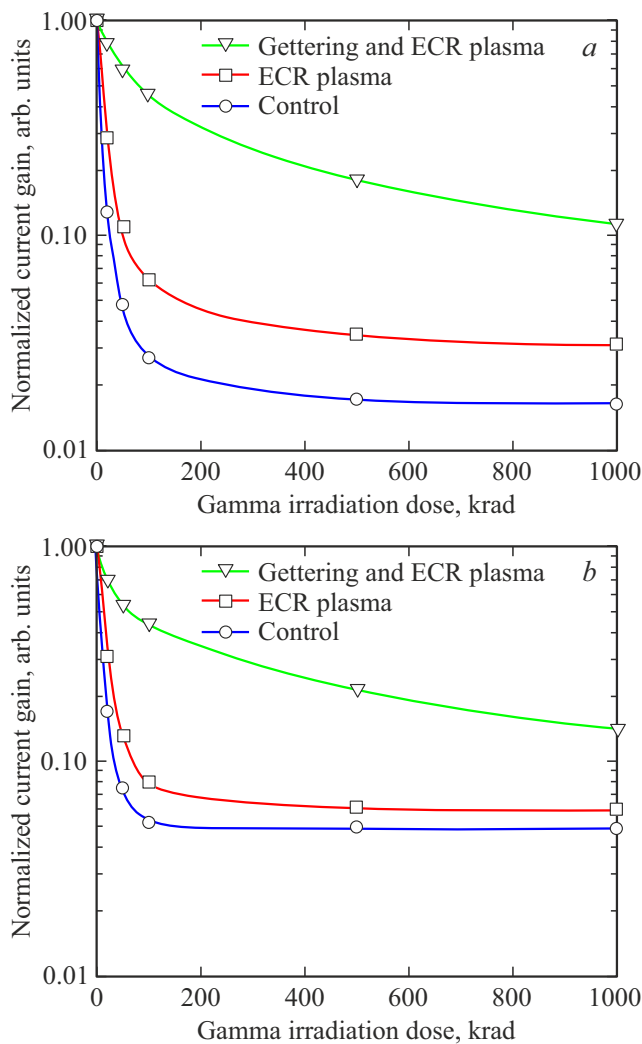


Рис. 1. Дозовые зависимости нормированного коэффициента усиления тока транзистора. Все зависимости нормированы на значение до облучения. Для контрольных пластин (кривая, помеченная символом O), для гидрогенизированных пластин (кривая, помеченная символом □) и для гидрогенизированных пластин с опцией геттерирования (кривая, помеченная символом ▽). Зависимости представлены для $p-n-p$ (a) и для $n-p-n$ (b) транзисторов. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

радикальными центрами $\equiv Si\cdot$, $=N\cdot$ и также рекомбинируют между собой с образованием водорода H_2 внутри слоя.

Влияние γ -облучения на характеристики ИС определялось по изменению коэффициента усиления β биполярных $p-n-p$ - и $n-p-n$ -транзисторов, расположенных на одной пластине, а также по значениям входного и выходного токов ИС. Эти параметры наиболее чувствительны к накопленной дозе облучения. На рис. 1, a представлена деградация коэффициента усиления тока, нормированного к его исходному значению, для биполярных $p-n-p$ -транзисторов после их γ -облучения с различными дозами. До облучения значение коэффици-

ента усиления на контрольных пластин составляло около 1000, а после облучения дозой 100 кРад коэффициент усиления деградировал в 37 раз. Как видно из рис. 1, a, гидрогенизация пластин в ЭЦР-плазме привела к снижению усиления при дозе 100 кРад примерно в ~ 16 раз (вместо 37 раз), что заметно улучшило устойчивость $p-n-p$ -транзисторов к γ -облучению.

Сочетание гидрогенизации пластин с реализованной опцией геттерирования продемонстрировало значительное улучшение радиационной стойкости приборов даже после облучения высокой дозой — значение коэффициента усиления остается > 180 при дозе 500 кРад. По сравнению с $p-n-p$ -транзисторами, демонстрирующими сильную деградацию усиления на контрольной пластине, $n-p-n$ -транзисторы продемонстрирова-

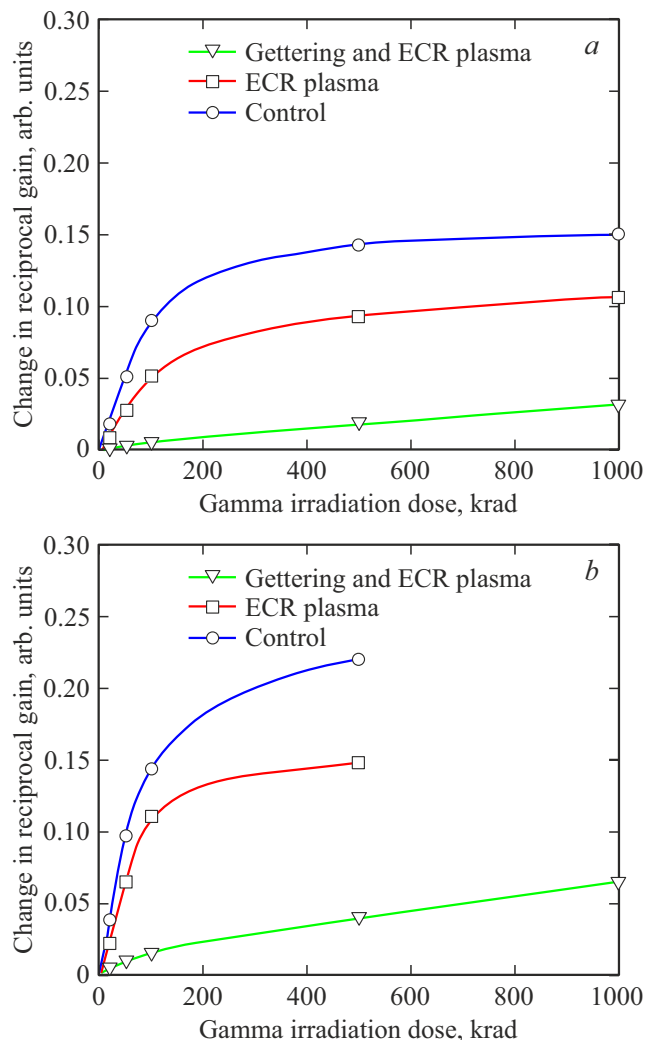


Рис. 2. Дозовые зависимости изменения обратного коэффициента усиления тока. Зависимости представлены для контрольных пластин (кривая, помеченная символом O), для гидрогенизированных пластин (кривая, помеченная символом □) и для гидрогенизированных пластин с опцией геттерирования (кривая, помеченная символом ▽). Зависимости представлены для $p-n-p$ (a) и для $n-p-n$ (b) транзисторов.

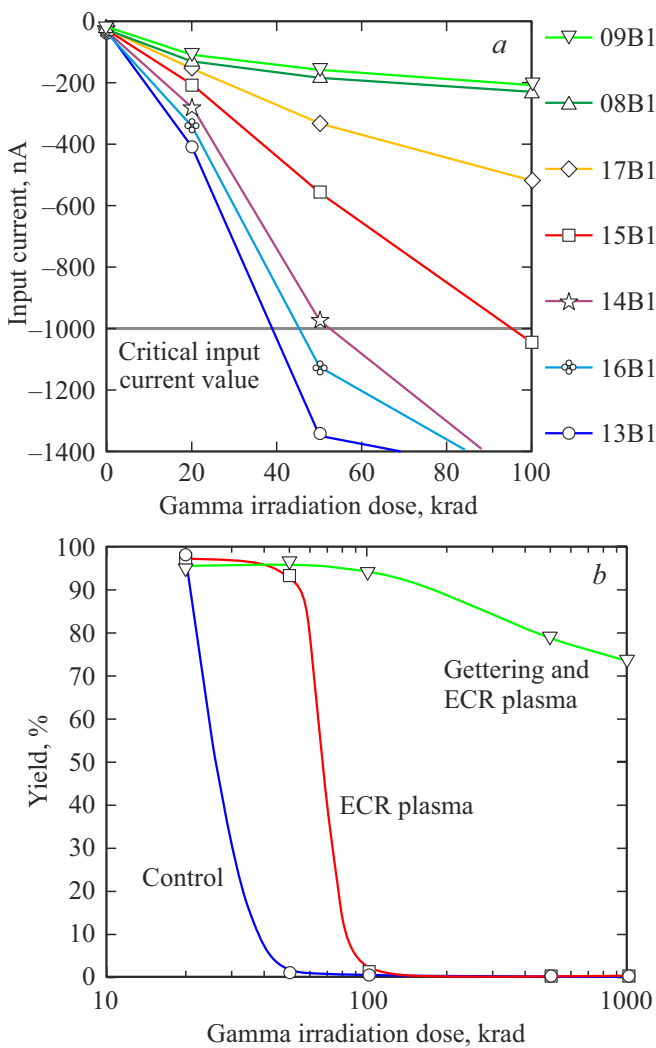


Рис. 3. Дозовые зависимости входного тока ИС (а) и выхода годных (б). а — зависимости представлены для контрольных пластин (13В1, 16В1, 14В1), для гидрогенизированной пластины (15В1), для пластины с опцией геттерирования (17В1) и для гидрогенизированной пластины с опцией геттерирования (08В1, 09В1). б — зависимости представлены для контрольных пластин (кривая, помеченная символом О), для гидрогенизированных пластин (кривая, помеченная символом □) и для гидрогенизированных пластин с опцией геттерирования (кривая, помеченная символом ∇).

ли несколько лучшую устойчивость к γ -облучению (рис. 1, б). Также хорошо видно влияние гидрогенизации на устойчивость усиления к облучению (рис. 1, б), при этом пластины с опциями гидрогенизации и геттерирования продемонстрировали более высокие характеристики.

Изменение обратной величины коэффициента усиления по току, которое также называют „показателем повреждения усиления“ [28], показано на рис. 2 для $p-n-p$ - и $n-p-n$ -транзисторов. Гидрогенизация пластин в ЭЦР-плазме привела к уменьшению наклона кривых „показателя повреждения усиления“. Для $p-n-p$ -

транзисторов наклон уменьшился в 2 раза, а для $n-p-n$ -транзисторов на 30% по сравнению с приборами на контрольных пластинах. Комбинация гидрогенизации и реализованного варианта геттерирования привела к 10-кратному снижению наклона кривых для обоих типов биполярных транзисторов по сравнению с приборами на контрольных пластинах.

Входной ток изготовленной ИС служит метрикой ее производительности и выхода годных. На рис. 3, а показаны дозовые зависимости входного тока ИС, измеренные на контрольных пластинах и на пластинах с вариантами гидрогенизации, геттерирования и гидрогенизации + геттерирования. ИС на контрольных пластинах (13В1, 16В1, 14В1) вышли из строя после облучения дозой 40–50 кРад, а на гидрогенизированных пластинах (15В1) критическая доза может достигать 100 кРад. ИС на пластинах с опцией геттерирования (17В1) продемонстрировали значительное улучшение радиационной стойкости, в то время как гидрогенизированные пластины с опцией геттерирования (08В1, 09В1) показали превосходную стабильность входного тока при облучении.

Данные по выходу годных обобщены на рис. 3, б. Впечатляющее улучшение выхода годных вплоть до высоких доз облучения демонстрируют гидрогенизированные пластины с опцией геттерирования.

4. Заключение

Таким образом, сочетание геттерирования и обработки в водородной ЭЦР-плазме оказалось очень эффективным решением для повышения выхода годных и функциональности при γ -облучении интегральных схем на основе биполярных транзисторов. Мы продемонстрировали, что обработка в ЭЦР-плазме действительно влияет на радиационную стойкость биполярных транзисторов. Тестовые МДП-структуры с SiO_2 -диэлектриком показали уменьшение фиксированных положительных зарядов после обработки в ЭЦР-плазме со смещением $U_b = -120$ В. После воздействия γ -излучения на МДП структуры, предварительно обработанные в ЭЦР-плазме со смещением $U_b = -120$ В, заметного влияния на границу раздела Si/SiO_2 и заряд в диэлектрике не обнаружено.

Следовательно, процесс пассивации водородом в ЭЦР-плазме обеспечивает двойной эффект, а именно уменьшение концентрации первичных радикальных центров ($\equiv\text{Si}\cdot + \cdot\text{H} \rightarrow \equiv\text{Si-H}$), вызванных облучением в объеме пластины, и уменьшение положительного заряда, накопленного в $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ бислое ИС под действием γ -излучения. Наиболее существенное улучшение радиационной стойкости как для $p-n-p$ -, так и для $n-p-n$ -транзисторов было достигнуто за счет реализации геттерирования. Мы полагаем, что геттерирующий слой с обратной стороны пластины обеспечивает эффективный сток для подвижных металлических примесей, таких как медь и никель. Использование метода нестационарной

емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ) будет полезно для обнаружения этих примесей после их взаимодействия с дефектами, вызванными облучением, и образования стабильных дефектов с глубокими уровнями. Это также позволит количественно оценить влияние введенного водорода на скорость генерации радиационных дефектов и их концентрацию с целью дальнейшего повышения радиационной стойкости биполярных транзисторов.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИПТМ РАН № 075-01304-23-00.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.R. Kulkarni, M. Ravindra, G.R. Joshi, R. Damle. Nucl. Instrum. Meth. B, **251**, 157 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2006.05.028>
- [2] Sanaa A. Kamh, F.A.S. Soliman. Nucl. Instrum. Meth. A, **564** (1), 463 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.03.048>
- [3] J.P. Raymond, E.L. Petersen. IEEE Trans. Nucl. Sci., **34** (6), 1621 (1987). <https://doi.org/10.1109/TNS.1987.4337526>
- [4] A.H. Johnston, G.M. Swift, B.G. Rax. IEEE Trans. Nucl. Sci., **41** (6), 2427 (1994). <https://doi.org/10.1109/23.340598>
- [5] M. Manghisoni, L. Ratti, V. Re, V. Speziali, G. Traversi, G. Fallica. Nucl. Instrum. Meth. A, **518** (1–2), 477 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.11.062>
- [6] A. Al-Mohamad, M. Chahoud. Nucl. Instrum. Meth. A, **538** (1–3), 703 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.08.108>
- [7] Xingji Li, Jingdong Xiao, Chaoming Liu, Zhiming Zhao, Hongbin Geng, Mujie Lan, Dezhuang Yang, Shiyu He. Nucl. Instrum. Meth. A, **621** (1–3), 707 (2010). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.04.068>
- [8] Yu. M. Kobzev, D.P. Frolov, A.V. Enns, V.I. Enns, S.A. Osokin. *Trudy FGUP NPTSAP. Sistemy i pribory upravleniya* [Proc. of the Federal State Unitary Enterprise, Control systems and device, in Russian, **4**, 17 (2010)].
- [9] Cor Claeys, Eddy Simoen. *Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices* [Part of the Springer Series in Materials Science book series (SSMATERIALS, 57)], pp. 1–350, (Berlin, Germany: Springer Verlag, 2002). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04974-7>
- [10] G.P. Summers, E.A. Burke, C.J. Dale, E.A. Wolicki, P.W. Marshall, M.A. Gehlhausen. IEEE Trans. Nucl. Sci., **34** (6), 1133 (1987). <https://doi.org/10.1109/TNS.1987.4337442>
- [11] J. Assaf. Chinese Physics B, **27**(1), 016103 (2018). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-1056/27/1/016103>
- [12] S.L. Kosier, R.D. Schrimpf, R.N. Nowlin, D.M. Fleetwood, M. DeLaus, R.L. Pease, W.E. Combs, A. Wei, F. Chai. IEEE Trans. Nucl. Sci., **40** (6), 1276 (1993). <https://doi.org/10.1109/23.273541>
- [13] R.N. Nowlin, E.W. Enlow, R.D. Schrimpf, W.E. Combs. IEEE Trans. Nucl. Sci., **39** (6), 2026 (1992). <https://doi.org/10.1109/23.211400>
- [14] A.S. Zubrilov, S.V. Koveshnikov. Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov, in Russian, **25**(8), 1332 (1991). Online Available: <https://www.mathnet.ru/links/e0b6e70878a8187d85a5437dd757bd41/phts4394.pdf>
- [15] J.W. Corbett, G. D. Watkins, R. S. McDonald. Phys. Rev., **135** (5A), 1381 (1964). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.135.A1381>
- [16] N.A. Yarykin, J. Weber. Semiconductors, **44** (8), 983 (2010). <https://doi.org/10.1134/S1063782610080038>
- [17] N. Yarykin, S. Lastovskii, J. Weber. Phys. Status Solidi, **13** (5), 1800651 (2019). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pssr.201800651>
- [18] N.V. Shlopak, Yu.A. Bumai, A.G. Ulyashin. Phys. Status Solidi A, **137** (1), 165 (1993). <https://doi.org/10.1002/pssa.2211370113>
- [19] I.G. Batyrev, D. Hughart, R. Durand, M. Bounasser, B.R. Tuttle, D.M. Fleetwood, R.D. Schrimpf, S.N. Rashkeev, G.W. Dunham, M. Law, S.T. Pantelides. IEEE Trans. Nucl. Sci., **55** (6), 3039 (2008). <https://doi.org/10.1109/TNS.2008.2009353>
- [20] S.M. Sze, Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd edn. (John Wiley & Sons, Hoboken–N.J., 2007) chap. 4, p. 197.
- [21] L. Fabry, R. Hoelzl, A. Andrukhiy, K. Matsumoto, J. Qiu, S. Koveshnikov, M. Goldstein, A. Grabau, H. Horie, R. Takeda. J. Electrochem. Soc., **153** (6), g566 (2006). <https://doi.org/10.1149/1.2186799>
- [22] C. Herring, N.M. Johnson. *Semiconductors and Semimetals* [ed. by J.I. Pankove, N.M. Johnson; v. 34: *Hydrogen in Semiconductors: Hydrogen in Silicon*, ed. by Robert K. Willardson and Albert C. Beer (Treatise eds); Chap. 10, *Hydrogen Migration and Solubility in Silicon*, pp. 225–347, (Academic Press, Inc., San Diego, 1991)].
- [23] J.I. Pankove, D.E. Carlson, J.E. Berkeyheiser, R.O. Wance. Phys. Rev. Lett., **51** (24), 2224 (1983). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.51.2224>
- [24] Conyers Herring, N.M. Johnson, Chris G. Van de Walle. Phys. Rev. B, **64** (12), 125209 (2001). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.125209>
- [25] E.A. Polushkin, S.V. Nefediev, A.V. Kovalchuk, O.A. Soltanovich, S.Yu. Shapoval. *International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2021*, Proc. of SPIE 0277-786X, **12157**, 1215711 (2022). <https://doi.org/10.1117/12.2624184>
- [26] A. Kovalchuk, G. Beshkov, S. Shapoval. J. Res. Phys., **31** (1), 37 (2007). <https://www.researchgate.net/publication/277125029>
- [27] A.V. Kovalchuk, S.U. Shapoval, S.S. Lebedev, S.A. Steblin, A.V. Volosov, N.I. Kargin. Vestnik Natsionalnogo issledovatel'skogo jadernogo universiteta „MIFI“, in Russian, **3** (2), 189 (2014). <https://doi.org/10.1134/S2304487X14020126>
- [28] R.R. Brown. *Proton and Electron Permanent Damage in Silicon Semiconductor Devices* [Boeing Corp., Boeing Rep. D2–90570 (Chicago HQ, IL 60606, USA, 1964)].

Редактор Г.А. Оганесян

Radiation hardness of bipolar transistor based integrated circuits improved by ECR hydrogen plasma treatment and Si-plates gettering

*E.A. Polushkin^{1,2}, S.V. Nefediev², O.A. Soltanovich¹,
A.V. Kovalchuk¹, S.Yu. Shapoval¹*

¹ Institute of Microelectronics
Technology Russian academy of Science,
142432 Chernogolovka, Russia

² Molecular Electronics Research Institute,
124460 Moscow, Russia

Abstract We demonstrate significant improvement of the radiation immunity of the integrated circuits based on silicon bipolar transistors. Strong decrease of the current gain degradation and significant yield improvement after high-energy gamma irradiation are both shown. This was achieved by development of efficient hydrogenation process for the silicon bulk and the surface dielectric layer using electron cyclotron resonance (ECR) plasma, as well as implementation of effective Si-plate gettering option.