

Влияние дозы имплантации водорода на релаксацию электрофизических характеристик структур „кремний-на-изоляторе“ после воздействия рентгеновского излучения

© Н.Д. Абросимова¹, П.А. Юнин^{3,¶}, М.Н. Дроздов³, С.В. Оболенский²

¹ Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова, 603951 Нижний Новгород, Россия

² Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603600 Нижний Новгород, Россия

³ Институт физики микроструктур Российской академии наук, 607680 Нижний Новгород, Россия

¶ E-mail: yunin@ipmras.ru

Поступила в Редакцию 2 марта 2022 г.

В окончательной редакции 25 марта 2022 г.

Принята к публикации 25 марта 2022 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований релаксации электрофизических параметров образцов „кремний-на-изоляторе“ с различной дозой имплантации водорода после воздействия стационарного рентгеновского излучения. Методы измерения высокочастотных вольт-фарадных характеристик и псевдо-МДП транзистора позволили получить информацию о накопленном заряде, плотности поверхностных состояний, подвижности носителей. Примесный состав и профиль водорода определялись методом вторично-ионной масс-спектрометрии, структурное совершенство слоев оценивалось с помощью методов рентгеновской дифрактометрии и малоугловой рентгеновской рефлектометрии. Зафиксирован различный характер релаксационной зависимости и время восстановления электрофизических параметров для структур „кремний-на-изоляторе“ с различными дозами имплантации водорода. Значения подвижности выше, а плотности заряда ниже для структуры с меньшей дозой имплантации водорода, что лучше с точки зрения ее дальнейшего практического применения.

Ключевые слова: ионная имплантация, кремний-на-изоляторе, радиационная стойкость, рентгеновская дифрактометрия, псевдо-МДП транзистор, остаточный водород, вторичная ионная масс-спектрометрия.

DOI: 10.21883/FTP.2022.08.53140.26

1. Введение

Технология изготовления структур „кремний-на-изоляторе“ (КНИ) — исторически первая коммерчески освоенная технология, специально предназначенная для обеспечения производства быстродействующих, а также радиационно стойких интегральных схем (ИС) за счет значительного снижения паразитных емкостей и практически полного исключения токов утечки через подложку между соседними активными элементами ИС [1–3].

Технологии формирования структур КНИ с использованием водородного переноса и прямого сращивания имеют ряд преимуществ по отношению к другим методам [1–3]: а) периоды кристаллических решеток соединяемых материалов могут не совпадать; б) есть возможность изготовления многослойных структур со сверхтонкими слоями; в) есть возможность интеграции цифровых, аналоговых и радиочастотных элементов на одной пластине.

Имплантация водорода является одной из ключевых операций при формировании таких структур, во многом определяющей качество готовой структуры. Диапазон применяемых для расщепления доз составляет от $3 \cdot 10^{16}$ до 10^{17} ион/см². Толщина отщепляемого слоя может отклоняться от требуемого значения на величину

порядка десятка нанометров, при этом расщепление может происходить не только по максимуму концентрации атомов водорода, но и по максимуму имплантационных дефектов. Характер и распределение имплантационных дефектов также зависят от дозы [4], увеличение дозы приводит к повышению плотности дефектов и поврежденного слоя.

Принято считать, что финальный высокотемпературный отжиг структуры КНИ удаляет весь водород и образованные им комплексы, однако измерения методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) показывают, что это не так. Остаточный водород в структуре КНИ может пассивировать оборванные связи, модифицировать электрические свойства точечных дефектов и изменять их энергетические уровни, что будет приводить к заметному изменению электрофизических характеристик вплоть до образования слоев инверсной проводимости [5–7]. При эксплуатации приборов КНИ комплементарной структурой металл-оксид-полупроводник (КМОП) технологии в условиях космического пространства наиболее чувствительны к эффектам поглощенной дозы. Одним из таких эффектов является накопление положительного заряда в SiO₂, обусловленное различием подвижностей электронов и дырок. Накопление заряда также может происходить и на границах раздела SiO₂ с подложкой и приборным

слоем [8,9]. Вследствие этого изменяются функциональные характеристики приборных композиций (пороговые напряжения транзисторных структур, крутизна вольт-амперных характеристик, токи утечек транзисторных структур в закрытом состоянии) и свойства материалов, в частности, подвижность носителей в приборном слое, проводимость, плотность поверхностных состояний на границах раздела, состояние примесно-дефектной системы [10]. Данные эффекты имеют ионизационную природу и проявляются при низких дозах и интенсивностях воздействий. Для моделирования эффектов поглощенной дозы применяется воздействие рентгеновским излучением [10,11]. Влияние дозы имплантации водорода на трансформацию примесно-дефектной системы структур КНИ при воздействии ионизирующих излучений может быть неоднородным и неоднозначным.

Цель работы заключалась в исследовании влияния дозы имплантации водорода на релаксацию электрофизических характеристик структур КНИ после воздействия рентгеновского излучения.

2. Методика эксперимента

Структуры КНИ имели *p*-тип проводимости. Технологические режимы изготовления исследованных структур были идентичны, за исключением дозы имплантации водорода. Водород имплантировался с дозами в диапазоне от 4.5 до $7 \cdot 10^{16}$ см^{-2} , толщина приборного слоя составляла ~ 60 нм, скрытого диэлектрика — 150 нм, ориентация приборного слоя и подложки — (100). В статье рассмотрены две структуры: #4 с меньшей дозой имплантации водорода и #5 с большей дозой.

Исследования кристаллического качества, толщин слоев и ширины интерфейсов в структурах КНИ оценивались методами рентгеновской дифракции (РД) и малоугловой рентгеновской рефлектометрии (МУР) на рентгеновском дифрактометре BrukerD8 Discover. Измерения профиля водорода проводились методом ВИМС на установке TOF.SIMS-5 фирмы IONTOF с время-пролетным масс-анализатором. Концентрация водорода определялась в соответствии с методикой, изложенной в [12]. Использовалось оборудование ЦКП ИФМ РАН.

Исследования электрофизических свойств проводились с помощью методов высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВЧ ВФХ) и псевдо-МДП транзистора с помощью ртутного зонда [13–16] до и после воздействия стационарного низкоэнергетического рентгеновского излучения. Релаксация отслеживалась в течение двух недель с момента облучения.

Заряд и плотность поверхностных состояний на границе с приборным слоем определялись из анализа ВАХ методом псевдо-МДП транзистора, на границе с подложкой — из анализа ВЧ ВФХ. Метод псевдо-МДП транзистора основан на том, что пластина КНИ может быть представлена в виде модели перевернутого МОП-транзистора: подложка из объемного кремния выступает

в роли затвора, на который подается смещение через металлический контакт для формирования проводящего канала в тонком приборном слое [13–16]. Скрытый окисел играет роль подзатворного диэлектрика, а пленка кремния является „телом“ транзистора. Анализируя сток-затворные характеристики такого транзистора, можно получить данные о плотности поверхностных состояний на границе приборного слоя кремния и скрытого диэлектрика, подвижности носителей в приборном слое кремния и накопленном при воздействии ИИ заряде во встроеном диэлектрике [13].

Неоспоримым преимуществом данного метода является возможность высокоинформативного и экспрессного неразрушающего контроля электрофизических свойств границы срачивания и скрытого диэлектрика.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведен характерный профиль ВИМС распределения по глубине элементов в одной из исследуемых структур.

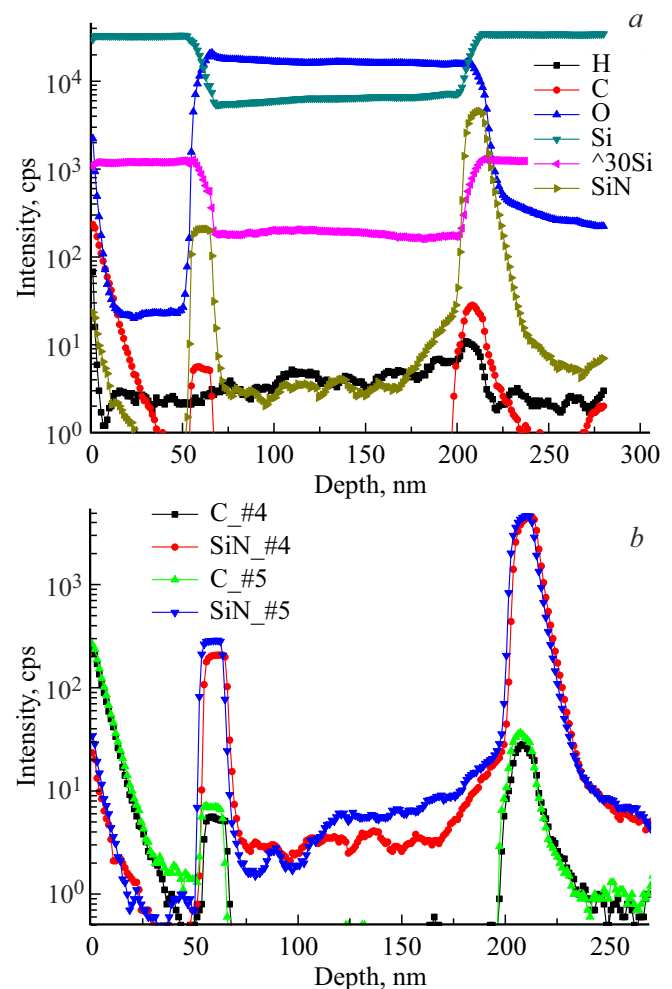


Рис. 1. *a* — профили ВИМС распределения элементов по глубине структуры КНИ #4; *b* — сравнение профилей C и SiN в структурах #4 и #5. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

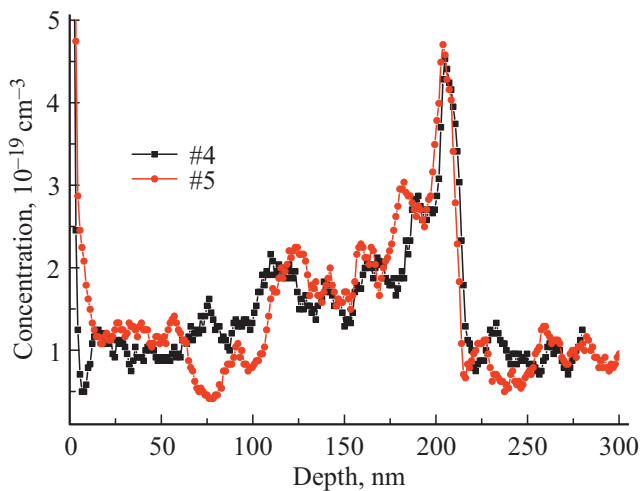


Рис. 2. Профили ВИМС распределения концентрации водорода по глубине структур КНИ с различной дозой имплантации водорода.

дованных структур #4 (с меньшей дозой имплантации водорода). Как видно из рис. 1, в исследуемых структурах КНИ зафиксировано наличие примеси углерода и слоев SiN на границах слоя SiO₂. Наличие SiN связано, по-видимому, с атмосферой окисления. Пики профилей SiN и C расположены у поверхности приборного слоя и на границах скрытого диэлектрика и полупроводника, концентрации SiN и C — выше на границе с подложкой. На рис. 1, *b* приведены в сравнении профили примесей C и SiN для структур #4 и #5. Видно, что в структуре #5 концентрация C и N на границе с приборным слоем в 1.5–2 раза больше, чем в структуре #4. Взаимодействие углерода с точечными дефектами, в частности с А-центрами, приводит к повышению энергии акцепторных уровней и понижению энергии донорных [17]. Водород, пассивируя А-центры, понижает энергии и акцепторного, и донорного уровня. Азот после встраивания в узлы решетки в результате взаимодействия с вакансиями является глубоким донором и уменьшает период решетки вследствие меньшего, чем у кремния, радиуса [17]. Кроме того, согласно [18], при взаимодействии малого количества азота с избыточными связями Si-Si на границе Si-SiO₂ образуются дополнительные дефекты, являющиеся дырочными ловушками.

На рис. 2 приведены в сравнении ВИМС профили распределения по глубине водорода в структурах #4 и #5. Видно, что водород присутствует в слое диэлектрика, в большей степени на границе с подложкой. Различие в профилях водорода для структур с различной дозой имплантации заметно только у границы скрытого диэлектрика с приборным слоем.

Характерные результаты МУР и РД анализа структуры #5 приведены на рис. 3, *a* и *b* соответственно. Обработка данных проводилась методом совместной подгонки экспериментальных данных по единой модели структуры [19]. Результаты моделирования приведены

в табл. 1. Совместный анализ методами МУР и РД показал наличие дополнительного слоя с отличной от Si и SiO₂ плотностью на границе слоя диэлектрика и подложки. В соответствии с данными ВИМС он был интерпретирован как слой SiN. Также косвенно можно судить о наличии более тонкого и менее выраженного переходного слоя на границе диэлектрика с приборным слоем Si на основании расхождения толщины приборного слоя Si, определенной методом МУР и РД. В силу особенностей методов МУР определяет толщину слоя по контрасту плотностей, в то время как РД — по осцилляциям толщинного контраста монокристаллического слоя. То, что метод МУР диагностирует большую толщину, чем РД, можно интерпретировать как наличие переходного слоя на границе с низким кристаллическим качеством, но недостаточным скачком плотности, чтобы зарегистрировать связанные с ним осцилляции

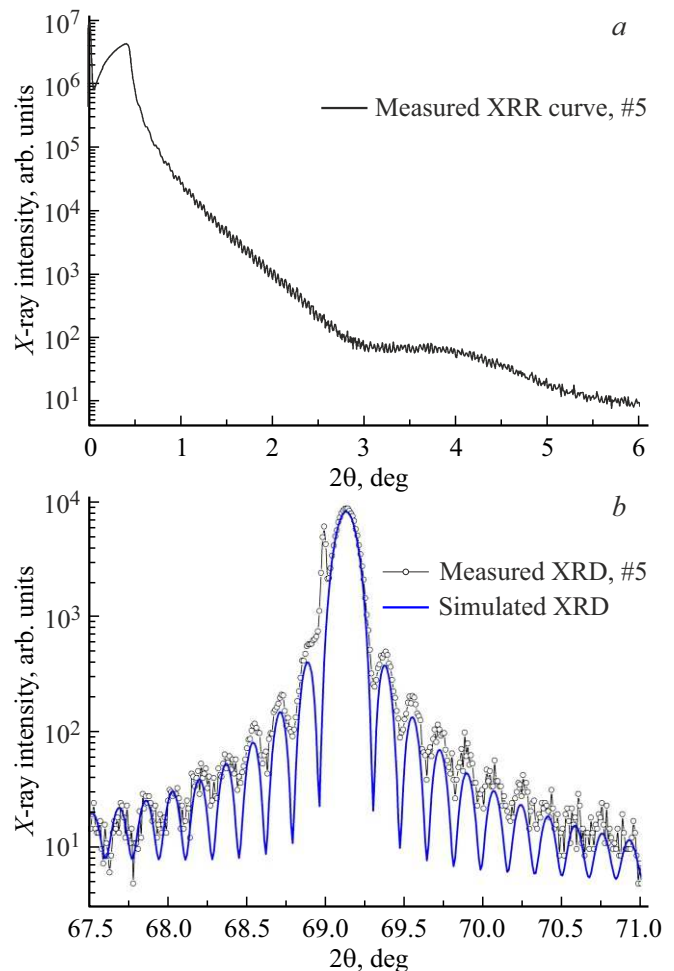


Рис. 3. *a* — кривая малоугловой рефлектометрии для структуры #5. Видны осцилляции Киссига с тремя различными угловыми периодами, соответствующие трем различным толщинам: приборного слоя Si, слоя диэлектрика и дополнительного слоя на границе с подложкой. Результаты моделирования не приведены, чтобы избежать путаницы; *b* — кривая дифракционного отражения (004) монокристаллического приборного слоя Si в структуре #5: эксперимент (точки) и моделирование (линия).

на кривой МУР в явном виде. Этот результат также подтверждается данными ВИМС. В пределах погрешности измерений можно сделать вывод, что структурное качество образцов #4 и #5, исследованное методами МУР и РД, одинаковое, а различия электрофизических характеристик должны определяться дозой имплантации водорода и примесным составом.

Из рис. 4 видно, что вольт-амперные характеристики структур КНИ до облучения, полученные методом псевдо-МДП транзистора, не имеют различий в области дырочного тока, но существенно отличаются в области электронной проводимости. Доза водорода для структуры #5 примерно в 2 раза больше дозы для структуры #4. Меньшая величина электронного тока в приборном слое структуры #5, возможно, обусловлена большим количеством акцепторных центров на границе диэлектрика и приборного слоя. Это подтверждается данными профилей ВИМС, приведенными на рис. 1, b и показывающими большее количество углерода и азота на границе приборного слоя и скрытого диэлектрика со стороны кремния.

На рис. 5 показано, что плотность заряда максимальна в первые сутки после облучения. В течение двух недель

Таблица 1. Сравнение геометрических параметров и плотности слоев структур КНИ с разными дозами имплантации водорода, определенные методами РД и МУР

Свойства	Толщина слоев, ±0.5 нм		Шероховатость межслоевого, ±0.3 нм		Плотность, ±0.05 г/см ³	
	#4	#5	#4	#5	#4	#5
Обозначение структуры	#4	#5	#4	#5	#4	#5
Si МУР (РД)	66.0 (64.0)	65.5 (64.0)	1.2	1.3	2.33	2.33
SiO ₂ МУР	140.0	144.0	0.9	1.0	2.40	2.40
SiN МУР	3.2	3.2	0.3	0.4	2.50	2.50
Si (подложка)			0.3	0.6	2.33	2.33

Таблица 2. Релаксация плотности поверхностных состояний на границах скрытого диэлектрика с приборным слоем и с подложкой структур КНИ с разными дозами имплантации водорода: 1 — граница с приборным слоем, 2 — граница с подложкой

t, сут	$D_{it}, \text{эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$			
	Структура #4		Структура #5	
	1	2	1	2
0	$2.60 \cdot 10^{12}$	$3.60 \cdot 10^{12}$	$6.30 \cdot 10^{12}$	$3.00 \cdot 10^{13}$
1	$7.00 \cdot 10^{12}$	$8.00 \cdot 10^{12}$	$2.00 \cdot 10^{13}$	$8.00 \cdot 10^{12}$
3	$7.00 \cdot 10^{11}$	$6.00 \cdot 10^{12}$	$5.00 \cdot 10^{12}$	$6.00 \cdot 10^{12}$
7	$7.00 \cdot 10^{11}$	$4.00 \cdot 10^{12}$	$2.00 \cdot 10^{12}$	$4.00 \cdot 10^{12}$
10	$6.00 \cdot 10^{11}$	$8.00 \cdot 10^{11}$	$6.00 \cdot 10^{11}$	$2.00 \cdot 10^{12}$
14	$5.00 \cdot 10^{11}$	$8.00 \cdot 10^{11}$	$8.00 \cdot 10^{11}$	$1.00 \cdot 10^{12}$

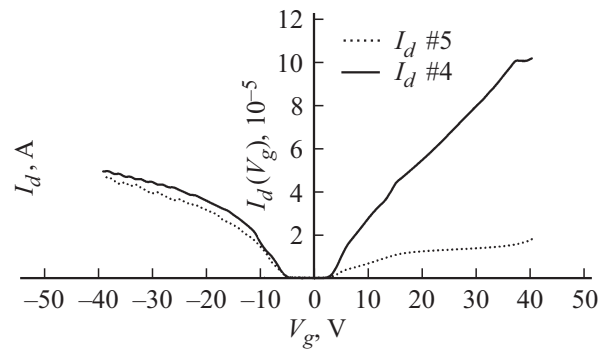


Рис. 4. Сток-затворные ВАХ структур КНИ с разными дозами имплантации водорода, полученные методом псевдо-МДП транзистора.

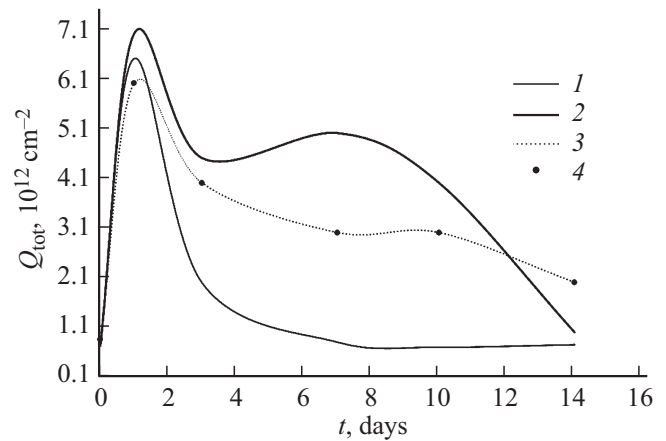


Рис. 5. Релаксация заряда в структурах КНИ с различной дозой имплантации водорода. 1 — плотность заряда на границе с приборным слоем для структуры #4, 2 — плотность заряда на границе с приборным слоем для структуры #5, 3 — плотность заряда на границе с подложкой для структуры #4, 4 — плотность заряда на границе с подложкой для структуры #5.

происходит восстановление плотности заряда на границе с приборным слоем, но не происходит восстановления плотности заряда на границе с подложкой. Характер восстановления плотности заряда — монотонный для структуры #4 (с меньшей дозой) и осциллирующий для структуры #5 (с большей дозой). Фиксированный заряд и плотность поверхностных состояний на границе с приборным слоем зависят от дозы имплантации водорода, а на границе с подложкой — нет.

Плотность поверхностных состояний, как видно из табл. 2, увеличивается после облучения, уменьшается впоследствии и спустя две недели ее значения становятся ниже, чем до облучения.

Подвижность электронов и дырок, как видно из данных, приведенных в табл. 3, уменьшается сразу после облучения, через две недели после облучения восстановления подвижности носителей не происходит. Характер восстановления подвижности дырок — монотонный,

Таблица 3. Релаксация подвижности электронов и дырок структур КНИ с разными дозами имплантации водорода

$t, \text{сут}$	Структура #4		Структура #5	
	$\mu_n, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$\mu_p, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$\mu_n, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	$\mu_p, \text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$
0	675	210	323	210
1	60	20	30	20
3		50		50
7		100		40
10		110	70	
14	400	150	300	100

значения подвижности и электронов, и дырок выше для структуры #4 (с меньшей дозой имплантации водорода).

Немонотонность характера релаксации обусловлена конкурирующими процессами накопления центров захвата и рассеяния носителей при облучении и образования центров генерации электронов в приборном слое и, возможно, на границе раздела приборного слоя и скрытого диэлектрика. Водород, взаимодействуя с типичными дефектами системы Si-SiO₂, такими, как, например, А-центры, К-центры и др., а также примесными атомами, может модифицировать их энергетические уровни и, следовательно, изменять их электрическую активность. Возникновение донорных комплексов может происходить также по механизму „допорогового“ дефектообразования [20]. Трансформация примесно-дефектной системы усиливается статическими и динамическими полями упругих напряжений, присущими системе Si-SiO₂. В присутствии таких примесей, как водород и углерод, типичные для системы Si-SiO₂ дефекты могут становиться многозарядными, могут изменяться энергии диссоциации, и эти факторы могут приводить к изменению интенсивности упругих волн, возникающих при воздействии излучений „допороговых“ энергий. Следствием этого является различие характера релаксации структур КНИ.

Различие характера релаксации электрофизических параметров связано в большей степени с разницей концентрации водорода на границе приборного слоя и диэлектрика для структур с разными дозами имплантации водорода. Кроме того, водород может изменять характеристики диффузии других примесей, в данном случае азота и углерода, что также может изменять соотношение донорных и акцепторных ловушек. В пользу данного вывода свидетельствует также тот факт, что релаксация заряда на границе с подложкой проходит одинаково для разных доз имплантации водорода, при этом распределения азота и углерода на границе скрытого диэлектрика и подложки также не отличаются.

4. Заключение

Зафиксирован различный характер релаксационной зависимости и время восстановления электрофизических параметров для структур КНИ с различными дозами

имплантации водорода. Структура с меньшей дозой имплантации водорода показывает лучшие результаты, чем структура с большей дозой: значения подвижности носителей в структуре #4 выше, а плотность заряда на границе с приборным слоем ниже. Различия электрофизических характеристик для структур КНИ с различными дозами имплантации водорода связаны в большей степени с распределением водорода и ионизационными эффектами, чем структурными и морфологическими нарушениями. Релаксация электрофизических характеристик обусловлена механизмами „допорогового“ дефектообразования. Различие концентраций углерода и азота на границе Si-SiO₂ со стороны приборного слоя также изменяет соотношение акцепторных и донорных ловушек и, следовательно, вносит вклад в различие релаксации структур КНИ.

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект „Ядерная и радиационная физика“). РД и ВИМС исследования образцов SOI выполнялись в лаборатории диагностики радиационных дефектов в твердотельных наноструктурах ИФМ РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (г/з № 0030-2021-0030).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] P. Hemmet, V.S. Lysenko, A.N. Nazarov. *Perspective Science and Technologies for Novel Silicon on Insulator Devices* (Dordrecht, Springer Science and Business Media, 2012).
- [2] А.И. Белоус, В.А. Солодуха, С.В. Шведов. *Космическая электроника* (М., Техносфера, 2015) т. 2.
- [3] J.P. Colinge. *Silicon-on-Insulator Technology: Materials to VLSI* (N.Y., Kluwer Academic Publishers, 1997).
- [4] Н. Tobias. *On the Mechanisms of Hydrogen Implantation Induced Silicon Surface Layer Cleavage* (Doctoral Dissertation, Marburg/Lahn, 2001).
- [5] М.Д. Варенцов, Г.П. Гайдар, А.П. Долголенко, П.Г. Литовченко. *Вопр. атомной науки и техн.*, **96** (5), 27 (2010).

- [6] N.M. Johnson, C. Herring, C.G. Van de Walle. *Phys. Rev. Lett.*, **73** (1), 130 (1994).
- [7] O. Feklisova, N. Yarykin, E.B. Yakimov, J. Weber. *Physica B: Condens. Matter*, **308–310**, 210 (2001).
- [8] В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. *Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем* (М., Энергоатомиздат, 1988).
- [9] Н.Д. Абросимова, В.К. Смолин. *Нано- и микросистемная техн.*, **20** (8), 456 (2018).
- [10] К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов. *Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения* (М., БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012).
- [11] А.Ю. Никифоров, В.А. Телец, А.И. Чумаков. *Радиационные эффекты в КМОП ИС* (М., Радио и связь, 1994).
- [12] Н.Д. Абросимова, М.Н. Дроздов, С.В. Оболенский. *ЖТФ*, **90** (11), 1850 (2020).
- [13] S. Cristoloveanu, S.S. Li. *Electrical Characterization of Silicon-on-Insulator Materials and Devices* (N.Y., Springer, 1995).
- [14] D.K. Schroder. *Semiconductor Material and Device Characterization* (N.J., John Wiley & Sons Inc., 1990).
- [15] H.J. Hovel. *Solid-State Electron.*, **47**, 1311 (2003).
- [16] S.S. Cristoloveanu, S. Williams. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **13** (2), 102 (1992).
- [17] А.Р. Челябинский, В.Ю. Явид, П. Венгерэк. *Тр. 5-й Международной конф. „Взаимодействие излучений с твердым телом“* (Минск, Беларусь, 2003) с. 206.
- [18] В.А. Гриценко. *УФН*, **178**, 727 (2008).
- [19] П.А. Юнин, Ю.Н. Дроздов, М.Н. Дроздов, С.А. Королев, Д.Н. Лобанов. *ФТП*, **47** (12), 1580 (2013).
- [20] В.М. Воротынецев, В.А. Перевошиков, В.Д. Скупов. *Базовые процессы микро- и нанозлектроники* (Н.Новгород, 2006).

Редактор Г.А. Оганесян

Effect of Hydrogen Implantation Dose on the Relaxation of Electrophysical Characteristics of Silicon-on-Insulator Structures after Exposure to X-rays

N.D. Abrosimova^{1,2}, P.A. Yunin³, M.N. Drozdov³, S.V. Obolensky²

¹ RFNC-VNIIEF Branch „Measuring Systems Research Institute named after Yu.E. Sedakov“, 603951 Nizhny Novgorod, Russia

² National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 603600 Nizhny Novgorod, Russia

³ Institute of Physics of Microstructures of the Russian Academy of Sciences, 607680 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Experimental studies of the relaxation of electrophysical parameters of SOI structures with different doses of hydrogen implantation after exposure to stationary X-ray radiation are presented. Investigation of high-frequency CV characteristics and pseudo-MOS transistors made it possible to obtain information about the accumulated charge, the density of surface states, mobility of carriers. The impurity composition and depth profile of hydrogen concentration were determined by the SIMS method. Structural perfection of the layers and interfaces was evaluated using the XRR and XRD methods. A different nature of the relaxation dependence and the recovery time of the electrophysical parameters for SOI structures with different doses of hydrogen implantation are recorded. The values of mobility and charge density are higher for the structure with a lower hydrogen implantation dose.