

Исследование структуры и свойств

Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-7-25-33>

ВЛИЯНИЕ ЦЕНТРОВ ЗАХВАТА, ВНЕСЕННЫХ ОБЛУЧЕНИЕМ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МэВ, НА ВРЕМЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОБРАТНОГО ТОКА В ДИОДАХ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ Ga₂O₃

© **Иван Васильевич Щемеров^{1*}, Александр Яковлевич Поляков¹,
Пётр Борисович Лагов^{1,2}, Светлана Петровна Кобелева¹,
Анастасия Ильинична Кочкова¹, Юрий Олегович Куланчиков¹,
Александр Сергеевич Дорошкевич³, Виктор Дмитриевич Кирилов¹**

¹ НИТУ «МИСиС», Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-т, д. 4; *e-mail: schemerov.iv@misis.ru

² Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН, Россия, 119071, Москва, Ленинский пр-т, д. 31, к. 4.

³ Объединённый институт ядерных исследований, Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 13.

*Статья поступила 23 ноября 2022 г. Поступила после доработки 29 ноября 2022 г.
Принята к публикации 22 марта 2023 г.*

Время восстановления обратного тока — важная характеристика диодов и транзисторов, определяющая их рабочую частоту и область применения. Дефекты в структуре полупроводника могут существенно затягивать восстановление обратного тока, уменьшая быстродействие прибора и приводя к дополнительному нагреву. В работе представлены результаты определения времени восстановления обратного тока малой величины в диодах Шоттки на основе пленок α - и β -Ga₂O₃. Измерения проводили путем подачи на диод импульсов тока различной полярности и снятия кривой релаксации обратного тока. Показано, что в диодах на основе β -Ga₂O₃ на собственной подложке характерное время обратного восстановления малых токов может достигать 20 нс и ограничено, главным образом, характерным временем спада для RC -цепочки, образуемой структурой. Облучение структуры протонами с энергией 1 МэВ приводит к появлению внутри структуры большого количества дефектов, которые могут «работать» как глубокие центры захвата носителей. В этом случае тепловой выброс носителей из таких центров может затягивать релаксацию восстановления обратного тока, замедляя процесс переключения. В образце α -Ga₂O₃ после облучения характерное время переключения составило 6 мкс, что вдвое превышает время, которое можно было бы ожидать исходя из параметров эквивалентной RC -цепочки. Затягивание релаксации обратного тока определяется не только временем разрядки RC -цепочки, но и большим количеством глубоких центров, которые могут быть внедрены путем облучения или возникать в процессе роста или эксплуатации устройства. Методами адмиттанс-спектроскопии и релаксационной спектроскопии глубоких уровней были получены данные о природе центров захвата, замедляющих процесс переключения диода при комнатной температуре: вероятно, это — межузельные атомы кислорода. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании технологии роста кристаллов для получения диодов Шоттки с высокой граничной частотой.

Ключевые слова: время восстановления обратного тока; диод Шоттки; протонное облучение; глубокие центры.

THE EFFECT OF TRAPPING SITES INTRODUCED BY 1 MeV PROTON IRRADIATION ON THE REVERSE CURRENT RECOVERY TIME IN Ga₂O₃-BASED SCHOTTKY DIODES

© Ivan V. Schemerov^{1*}, Alexander Ya. Polyakov¹, Peter B. Lagov^{1,2},
Svetlana P. Kobeleva¹, Anastasia I. Kochkova¹, Yuri O. Kulanchikov¹,
Alexander S. Doroshkevich³, Viktor D. Kirilov¹

¹ National university of science and technology “MISiS”, 4, Leninsky prosp., Moscow, 119049, Russia;

*e-mail: schemerov.iv@misis.ru

² Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, RAS (IPCE RAS), 31, k. 4, Leninsky prosp., Moscow, 119071, Russia.

³ Joint Institute for Nuclear Research, 13, ul. Jolio-Curie, Dubna, Moskovskaya obl., 141980, Russia.

Received November 23, 2022. Revised November 29, 2022. Accepted March 22, 2023.

The reverse current recovery time is an important parameter of diodes, fast rectifiers and transistors which determined their high-frequency properties and area of application. Defects in the structure may sufficiently reduce the cutoff frequency and lead to overheating. The reverse recovery of the low currents in the α - and β -Ga₂O₃ Schottky diodes was measured and analyzed in this study. The reverse recovery time in the β -Ga₂O₃-based Schottky diode is limited mainly by the relaxation of the RC-circuit formed by the equivalent diode circuit and can be very low (20 nsec in this case). Irradiation can introduce some defects in the structure, which may act as deep levels and prolong the relaxation. We have demonstrated experimentally that increasing serial resistance of the circuit lead to an increase in the reverse recovery time. But we can point an additional part of relaxation that can be attributed to the emission from deep levels in the forbidden gap of the semiconductor. It is shown that prolongation increases with the reverse recovery time but saturates. In the α -Ga₂O₃-based structures the reverse recovery time measured after proton irradiation was 6 μ sec, twice as high than it can be expected from RC-circuit relaxation time. These deep levels can be associated with interstitial oxygen atoms. The results obtained can be used to improve the technology of crystal growth to produce Schottky diodes with a high boundary frequency.

Keywords: reverse recovery time; Schottky diode; proton irradiation; deep levels.

Введение

Время восстановления обратного тока или время обратного восстановления (ОВ) — одна из важнейших динамических характеристик для мощных выпрямительных диодов и биполярных транзисторов, тиристоров, импульсных диодов. Это время, в течение которого через диод при приложении обратного смещения протекает ток большой величины, ограниченный, как правило, только величиной последовательного сопротивления [1–4]. Большое время ОВ приводит к уменьшению КПД стабилизаторов тока, к перегреву приборов. Шумы, возникающие при переключении, могут создавать ненужные автоколебания. Вместе с емкостью p – n -переходов и величиной последовательного сопротивления ОВ — один из основных критериев, влияющих на граничную частоту работы полупроводниковых приборов [2, 3].

Наибольший интерес величина ОВ представляет для мощных кремниевых диодов на основе p – n -перехода и для импульсных диодов Шоттки. При этом основные источники увеличения времени ОВ для этих типов приборов существенно различаются.

Мощные кремниевые выпрямительные диоды часто используются для коммутации схем с большими значениями токов (десятки и сотни ампер). При переключении время ОВ на таких

структурах может достигать десятков и сотен микросекунд [4, 5]. Всплески тока в течение такого времени могут привести к существенному нагреву как самого диода, так и стоящих за ним потребителей, которые могут оказаться чувствительны к обратным токам большой величины. При работе на высокой частоте выпрямляющие свойства такого диода существенно падают.

Источник всплеска обратного тока — большое количество неосновных носителей заряда, которые при протекании прямого тока имеются в диоде. При включении обратного смещения неосновные носители создают избыточный ток. Длительность импульса обратного тока большой величины зависит от времени, которое требуется неосновным носителям заряда покинуть область вблизи перехода за счет диффузии через p – n -переход или за счет рекомбинации. Это значит, что по измерению времени ОВ можно оценить рекомбинационное время жизни [2, 6, 7]. При этом для повышения быстродействия и сокращения длительности рекомбинационных процессов и, соответственно, процесса ОВ в структурах с p – n -переходом на основе непрямозонных (Si, SiC) полупроводников эффективно применяются радиационно-технологические процессы. С их помощью в активных областях диода формируются центры с глубокими уровнями в заданных концентрациях с равномерным или неравномерным профилем

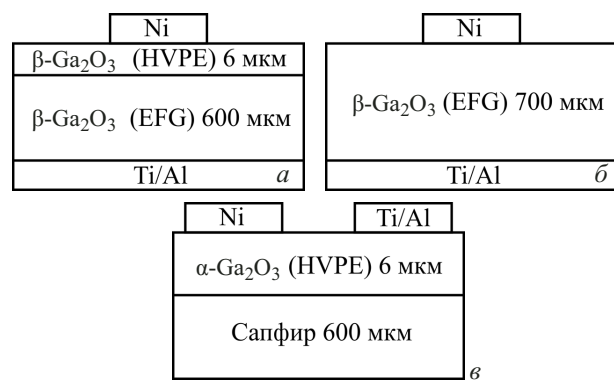


Рис. 1. Образцы 1 – 3 (а – в)

Fig. 1. Samples 1 – 3 (a – c)

распределения по глубине [8 – 10]. Отметим, что при исследовании параметров рекомбинационных центров в таких структурах описаны как способы определения природы и концентрации центров, так и их влияние на качество структур [11, 12].

Считается, что в диодах Шоттки время ОБ отсутствует, так как у них в протекании тока не участвуют неосновные носители заряда. Однако это не совсем точно. При переключении смещения с прямого на обратное в таких диодах также наблюдается кратковременный импульс обратного тока. Его продолжительность в основном определяется временем разряда RLC -цепочки, образованной емкостью диода, последовательным сопротивлением диода, токами утечки и индуктивностью контактов [13, 14]. Кроме того, в материале всегда имеется какое-то количество дефектов, образующих глубокие уровни в запрещенной зоне (находящиеся на расстоянии больше нескольких kT от границы разрешенной зоны, где T — температура, k — постоянная Больцмана). Подобные глубокие центры могут «работать» как центры захвата для основных носителей, и термический выброс из этих центров может создавать дополнительный вклад в продолжительность импульса обратного тока большой величины.

Заметим, что при измерении времени ОБ на диодах Шоттки вклад паразитного тока, связанный с глубокими центрами, тем выше, чем ниже измеряемый обратный ток. Исследуя время восстановления обратного тока малой величины, можно делать выводы о возможной природе дефектов, влияющих на затягивание обратного восстановления.

Цель работы — исследование природы радиационных центров, ухудшающих динамические характеристики диодов Шоттки на базе тонких пленок α - и β - Ga_2O_3 , до и после облучения протонами с энергией 1 МэВ.

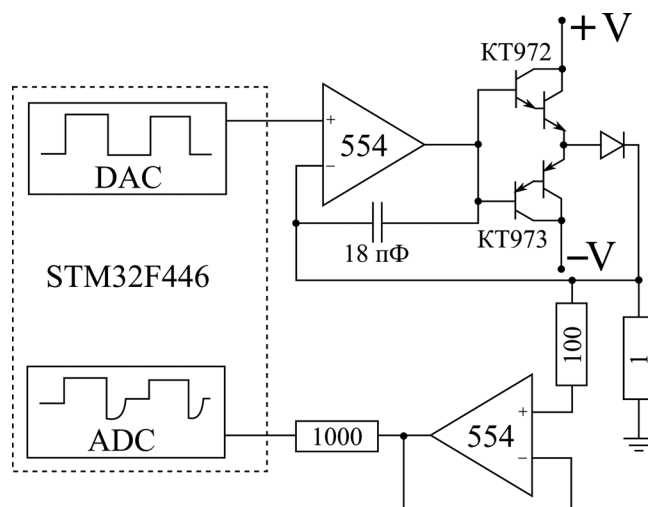


Рис. 2. Схема измерителя времени ОБ

Fig. 2. Measuring circuit

Материалы, методика, оборудование

Оксид галлия (Ga_2O_3) как материал электроники обладает выдающимися характеристиками [15 – 17]. Это, прежде всего, большая ширина запрещенной зоны, составляющая 4,9 эВ для β -полиморфа, — наиболее термодинамически стабильного из всех полиморфов. В этом случае можно говорить о высоких пробивных напряжениях (теоретически предсказанный уровень — 8 МВ/см [15]), превышающих практически все используемые на данный момент полупроводники за исключением нитрида алюминия и алмаза. Большая ширина запрещенной зоны также указывает на высокую радиационную стойкость, намного превышающую таковую для классических материалов электроники, например, кремния [18].

Ga_2O_3 можно выращивать множеством способов, начиная с хлорид-гидридной эпитаксии (Hydride vapour phase epitaxy, HVPE) и осаждения из тумана (Chemical vapor deposition from mist, mist-CVD) и заканчивая ростом из расплава (Edge-defined film-fed growth, EFG). В данном эксперименте использовали пленки оксида галлия, выращенные методом HVPE.

Исследовали образцы диодов Шоттки на основе оксида галлия (рис. 1).

Образец 1 — пленка β - Ga_2O_3 (толщина — 6 мкм), выращена методом HVPE на подложке β - Ga_2O_3 легированного оловом. Подложка (толщина — 650 мкм) выращена методом EFG в направлении [100]. Контакт Шоттки выполнен из Ni (площадь контакта — 1,1 мм²). Со стороны подложки нанесен омический контакт Ti/Al.

Образец 2 — диод Шоттки на слабо легированной подложке β - Ga_2O_3 n -типа, выращенной

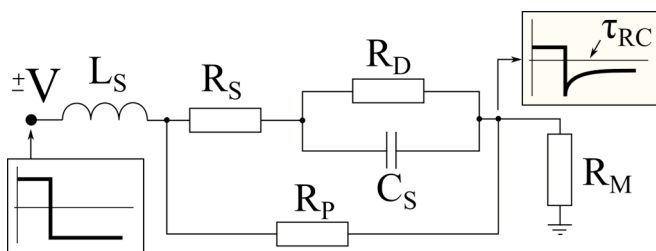


Рис. 3. Эквивалентная схема диода: L_S — индуктивность выводов; R_S — последовательное сопротивление диода; R_D — дифференциальное сопротивление $p-n$ -перехода; C_S — емкость $p-n$ -перехода; R_P — сопротивление току утечки; R_M — сопротивление измерительного токоограничивающего резистора; τ_{RC} — характерное время релаксации RLC -цепочки

Fig. 3. Equivalent diode circuit: L_S — inductance of contacts; R_S — serial resistance of the diode; R_D — resistance of the $p-n$ -junction; C_S — $p-n$ -junction capacitance; R_P — substrate resistance for leakage current; R_M — measuring current-limiting resistor; τ_{RC} — characteristic time of the RLC -circuit relaxation

методом EFG (ориентация [010]). Далее проводился отжиг в атмосфере водорода [18].

Образец 3 — пленка $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (толщина — 6 мкм), выращена методом HVPE на подложке из сапфира [19]. Верхний слой пленки (1 мкм) легирован оловом до уровня $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Легирование проводилось введением паров олова в осаждаемую смесь. Омический контакт и контакт Шоттки нанесены на пленку методом магнетронного распыления. Материалы контакта Шоттки (площадь контакта — $1,1 \text{ мм}^2$) и омического контакта — Ni и Ti/Al соответственно. После изготовления образец облучался высокоэнергетическими протонами (энергия — 1 МэВ, поток — 10^{16} см^{-2}).

Для измерения времени ОВ использовали измерительную систему, основанную на двунаправленном генераторе тока. Упрощенная схема измерителя приведена на рис. 2.

Генератор импульсов построен на основе двухтактного каскада с использованием быстродействующих транзисторов (сборках Дарлингтона) КТ972А и КТ973А ($n-p-n$ и $p-n-p$ соответственно). Граничная частота усиления по току — 200 МГц. Транзисторный каскад управляется быстродействующим операционным усилителем КР544УД2А, сравнивающим сигнал на опорном резисторе (1 Ом) и сигнал управляющего ЦАП, с которого подаются импульсы задающего напряжения.

Блок измерения/управления выполнен на микроконтроллере STM32F446ZE, включающем быстродействующие АЦП (до 2,4 миллионов измерений в секунду), набор управляющих выходов и интерфейсы для связи с компьютером. Падение напряжения на опорном резисторе очищается от синфазного шума буферным усилителем

КР544УД2А, после чего сигнал поступает на вход АЦП. Выходная характеристика преобразуется в цифровой вид и анализируется.

Как правило, для знания времени ОВ достаточно зафиксировать момент максимального обратного тока t_{MAX} (I_{RR}) и моменты, когда ток составляет 10 % от максимума (t_1 , t_2) (обычно, для большинства применений t_1 и t_{MAX} отличаются незначительно и не различаются). Но для более качественного анализа можно взять всю кривую релаксации обратного тока. Это позволяет оценить не только длительность «ступеньки» обратного тока, но и характерное время релаксационного процесса, что важно для быстрых диодов. В данном случае фиксировалась полная релаксационная кривая.

Для анализа релаксационных процессов необходимо иметь возможность различать сигнал, образованный паразитной RLC -цепочкой, и ток, формируемый термически выброшенными из ловушек носителями в случае диодов Шоттки или неосновными носителями зарядов для $p-n$ -переходных диодов. Диод, включенный в обратном направлении, позволяет пропускать значительный ток лишь в течение короткого промежутка времени, но чем меньше величина обратного тока, тем дольше будет наблюдаться ток, обусловленный захваченным зарядом. Поэтому измерения проводили при низких токах, чтобы измеряемые эффекты были заметнее.

Для учета постоянной спада RLC -цепочки проводили моделирование в среде NI Multisim. Эквивалентную схему диода моделировали с учетом величин резисторов, конденсаторов и индуктивностей, представляющих области квазинейтральности, пространственного заряда (ОПЗ) и контакты соответственно. Эквивалентная схема диода, для которой проводилось моделирование, представлена на рис. 3.

Обсуждение результатов

Перед экспериментом измеряли вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики (ВФХ). Результаты измерений для образца 1 приведены на рис. 4, для образцов 2–3 — в табл. 1.

Из измерений ВАХ и ВФХ были получены значения последовательного сопротивления диода R_S , емкость ОПЗ при прямом и обратном включении (C_S^+ и C_S^- соответственно). Индуктивность проводов L_S составляла 0,25 мкГн для всей цепи. Величина утечки для диодов была незначительна (от 10^{-9} (для образца 1) до 10^{-6} А/см^2 (для образца 3)). В эквивалентной схеме (см. рис. 3) она представлена резистором R_P большой величины, включенным параллельно всей цепи. Ток измеряли по падению напряжения на последовательном сопротивлении R_M , выбранном таким

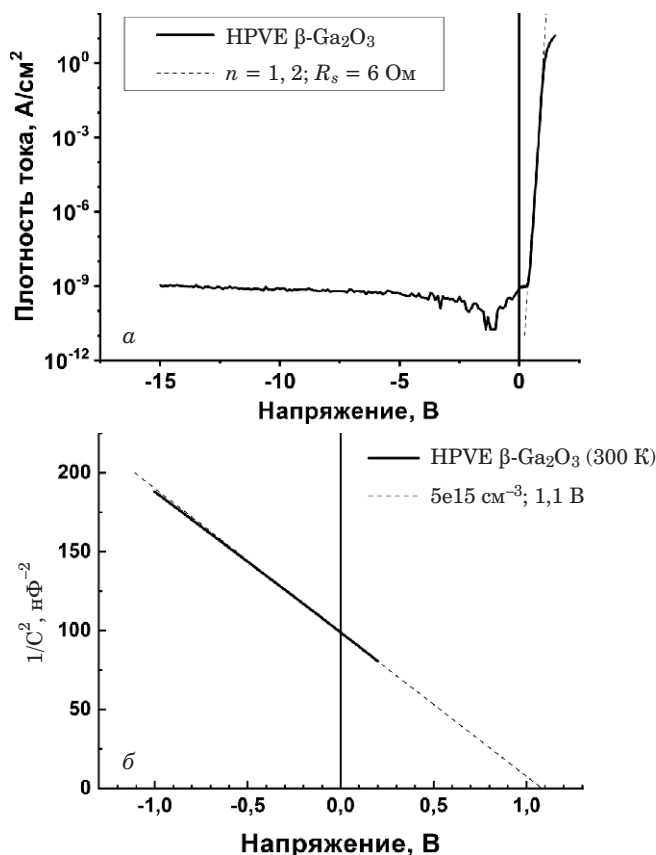


Рис. 4. ВАХ (а) и ВФХ (б) образца 1 (n — коэффициент идеальности; R_s — последовательное сопротивление диода)

Fig. 4. Current-voltage (a) and capacitance-voltage (b) curves for sample 1 (n — the ideality factor; R_s — serial resistance of the diode)

образом, чтобы общее последовательное сопротивление незначительно отличалось от 100 Ом. Дифференциальное сопротивление p – n -перехода R_D при малом обратном смещении превышало 10 кОм для всех образцов (см. табл. 1).

Ток в цепи определяли после подачи на структуру переключающего импульса. Характерное время релаксации RLC -цепочки определяли как время, за которое амплитуда всплеска обратного тока спадала в 2,718 раза. Для всех измерений результат с точностью на уровне долей процента совпадал с характерным временем релаксации простой RC -цепочки, образованной емкостью p – n -перехода (C_S) и суммой последовательных сопротивлений ($R_S + R_M$).

Таблица 1. Электрические параметры эквивалентных схем для образцов 1 – 3

Table 1. Electrical parameters of the equivalent circuits for samples 1 – 3

Образец	R_S , Ом	C_S^+ , Ф	C_S^- , Ф	L_S , нГн	R_P , Ом	R_M , Ом
1	6	$61 \cdot 10^{-12}$	$56 \cdot 10^{-12}$	250	$1 \cdot 10^{10}$	100
2	6	$373 \cdot 10^{-12}$	$273 \cdot 10^{-12}$	250	$1 \cdot 10^7$	91
3	84	$15 \cdot 10^{-9}$	$14 \cdot 10^{-9}$	250	$1 \cdot 10^7$	20

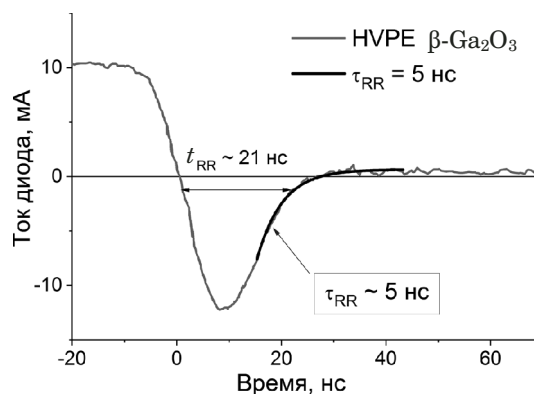


Рис. 5. Релаксационная кривая ОВ для образца 1
Fig. 5. Relaxation curve for reverse recovery in sample 1

Результаты моделирования позволили определить время релаксации RLC -цепочки, которое можно было бы ожидать для данной структуры. Характерное время спада τ_{RC} для конфигурации диода 1 составило 6 нс, для диода 2 — 37 нс, для диода 3 — 1,5 мкс.

Результаты моделирования для необлученного образца 1 хорошо сходятся с результатами измерений (рис. 5). Ток 10 мА был выбран для уменьшения величины паразитных всплесков после переключения. Измеренное характерное время спада составило приблизительно 5 нс, что подтверждает корректность модели.

Вместе с тем измерения для облученных образцов 2 и 3 показывают значительное отличие от модели, образованной одной RLC -цепочкой. Источником данного отличия могут служить глубокие центры, образованные дефектами в данных структурах [20]. В процессе переключения часть ловушек, заполненных носителями, может оказаться над уровнем Ферми. Пока диод находился под приложенным прямым смещением, ловушки с энергией E_T были заполнены электронами. Процессы захвата и термического выброса были уравновешены. При приложении обратного смещения изгиб зон приводит к тому, что часть центров оказывается над уровнем Ферми, и для них термический выброс более не уравновешен захватом новых носителей. Высвобождаемые носители участвуют в проводимости и создают незначительный ток. Можно ожидать, что в течение разряда RC -цепочки происходит выброс оп-

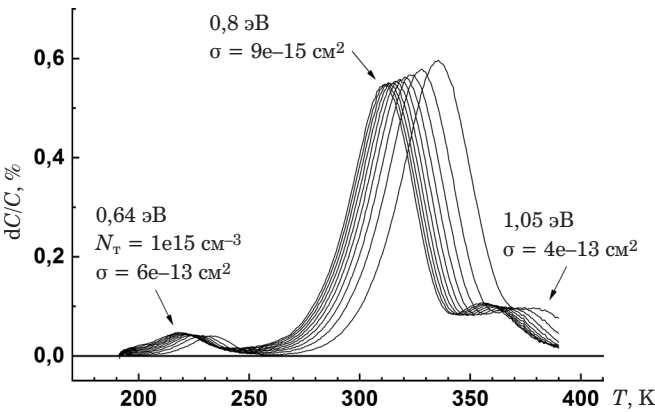


Рис. 6. Спектр РСГУ для образца 2
Fig. 6. DLTS spectra for sample 2

ределенного количества носителей, которые могут поддерживать высокий ток в течение короткого промежутка времени, что выглядит как затягивание профиля релаксации. Как только весь накопленный заряд оказывается вытянут из диода, ток падает до незначительной величины, ограниченной током утечки.

Для диодов Шоттки на основе Ga₂O₃ можно считать, что кратковременный всплеск обратного тока при переключении состоит главным образом из трех составляющих: незначительного тока утечки; разряда RLC-цепочки, образованной последовательным сопротивлением диода, его емкостью и индуктивностью контактов; термического выброса носителей из ловушек, оказавшихся в области пространственного заряда.

Считая индуктивность контактов незначительной, время релаксации RC-цепочки можно легко рассчитать. Сравнивая скорость спада реальной структуры и скорость разряда RC-цепочки, можно найти разницу, обусловленную термическим выбросом из ловушек.

Так как величина концентрации глубоких центров ограничена, то с увеличением продолжительности импульса ОБ величина затягивания релаксации $\Delta t = (\tau_{RR} - \tau_{RC})$ будет увеличиваться линейно, пока время ОБ t_{RR} не превысит харак-

Таблица 2. Время восстановления обратного тока и величина последовательного сопротивления в образце 2
Table 2. Reverse recovery time and serial resistance in sample 2

Параметр	Испытание		
	1	2	3
R_S , Ом	20	91	570
t_{RR} , нс	84	170	560
τ_{RR} , нс	22	57	266
τ_{RC} , нс	10	37	215
Δt , нс	12	20	50

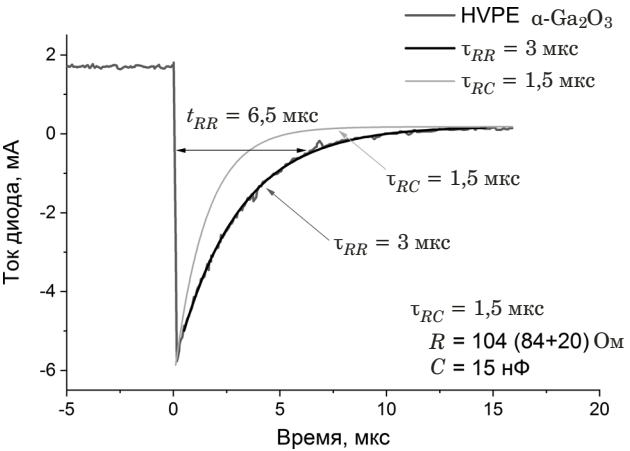


Рис. 7. Осциллограмма восстановления обратного тока для образца 3
Fig. 7. Relaxation curve for the reverse recovery in sample 3

терное время эмиссии с глубокого центра (e_T^{-1}), после чего рост Δt прекратится.

Для проверки этого провели серию измерений времени ОБ образца 2. Измеряли время ОБ и характерное время релаксации при различных величинах последовательного сопротивления, что существенным образом меняло скорость релаксации RC-цепочки. Результаты приведены в табл. 2.

Видно, что увеличение последовательного сопротивления и соответствующий рост времени релаксации RC-цепочки приводят к увеличению времени восстановления обратного тока. Теория [1] предсказывает квадратичную зависимость τ_{RR} от t_{RR} , что близко к полученным значениям ($t_{RR} \sim \tau_{RR}^{0,6}$). В то же время увеличение t_{RR} и, соответственно, τ_{RC} не приводит к кратному росту Δt . Это может означать, что Δt , а значит и концентрация термически выброшенных носителей, со временем выходит на насыщение.

Природу центров захвата можно определить, например, при помощи релаксационной спектроскопии глубоких уровней (РСГУ). На рис. 6 приведен спектр РСГУ для данной структуры. Измерения проводили в криостате Cryotrade (Россия) при помощи измерителя RLC Keysight E4980A (измерительная частота — 100 кГц). Образец удерживался при отрицательном смещении –1 В. Периодически смещение импульсом менялось до уровня 0 В (длительность импульсов — 50 мс).

На спектре виден низкотемпературный пик с энергией 0,6 эВ и концентрацией 10^{15} см^{-3} (в принятой нотации [21 – 23] его можно ассоциировать с центром E1, который обычно связывают с атомами переходных металлов в кристаллической решетке $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$).

Для образца 3, облученного высокоэнергетическими протонами, импульс обратного тока большой величины оказался еще более затянут.

Пленка $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ была выращена на подложке R -сапфира методом хлорид-гидридной эпитаксии (HVPE). В ходе роста пленку легировали большим количеством олова. Концентрация свободных электронов, которую можно рассчитать из CV -характеристики, составляла $8,4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. После выращивания над структурой провели серию облучений высокоэнергетическими протонами в вакууме (энергия — 1,1 МэВ, интегральный поток протонов — $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, плотность потока — $6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$). Облучение проводили на линейном ускорителе ЭГ-5 типа электростатический генератор. Осциллограмма восстановления обратного тока для образца 3 приведена на рис. 7.

Время восстановления обратного тока составило 6, характерное время экспоненциального спада — 3 мкс. Характерное время релаксации RC -цепочки для данного образца — 1,5 мкс, что существенно меньше измеренного времени. Это означает практически вдвое меньшую граничную частоту работы прибора. Такое затягивание может быть обусловлено большой концентрацией дефектов, обусловленных облучением.

Центры анализировали методами адмиттанс-спектроскопии [20]. В данном случае сложно сопоставить затягивание с одним конкретным центром, поскольку результаты адмиттанс-спектроскопии для образца 3 показывают два близко расположенных уровня. Спектр для образца 3 приведен на рис. 8. В координатах $G/\omega(T)$ на относительно низких частотах видно два близко расположенных пика, из которых более высокотемпературный имеет заметно большую амплитуду. В аррениусовских координатах положения пиков позволяют определить энергию данных уровней (для высокотемпературного пика — $E_C - E_T = 0,45 \text{ эВ}$, для более низкотемпературного — $E_C - E_T = 0,4 \text{ эВ}$). Можно ожидать, что именно они ответственны за существенное затягивание релаксации тока ОБ.

Измерение образца 3 методом РСГУ показало похожую энергию активации данного уровня ($0,7 \pm 0,3 \text{ эВ}$) и концентрацию $1,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Зная положение уровня, можно сделать предположение о возможной природе дефектов. По результатам моделирования поведения точечных дефектов в структуре $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ [24] и полученным данным можно сделать вывод, что центр, влияющий на частоту переключения диода ($E_C - 0,45 \text{ эВ}$), — межузельный кислород O_{i2} .

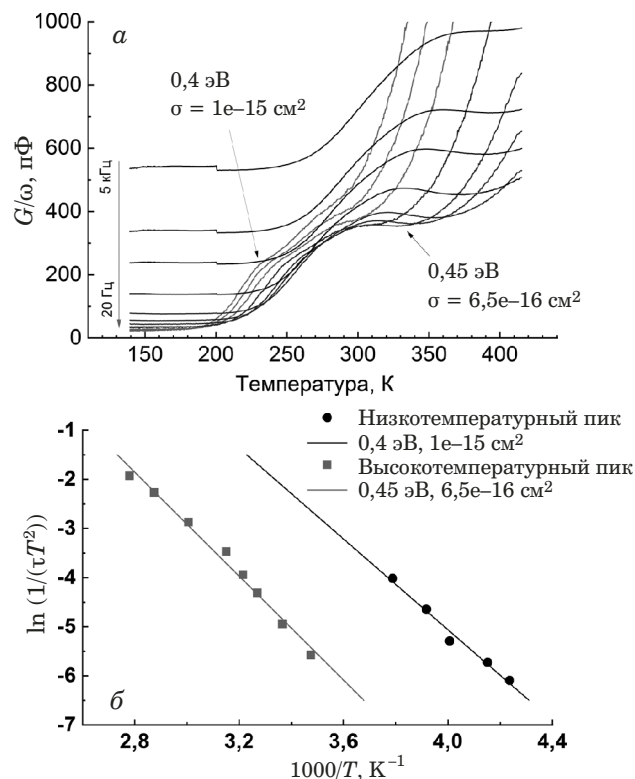


Рис. 8. Спектр адмиттанса для облученного образца 3 (а), положение высоко- и низкотемпературного пиков в аррениусовских координатах (б)

Fig. 8. Admittance spectra for sample 3 (a), Arrhenius coordinates for high and low temperature peaks (b)

Закключение

Проведенные исследования показали, что время восстановления обратного тока в диодах Шоттки может быть существенно затянуто по сравнению со временем релаксации RLC -цепочки, образованной структурой диода. Источником такого затягивания может служить термический выброс носителей с глубоких уровней в области пространственного заряда. Значительная концентрация глубоких уровней может привести к увеличению времени переключения и существенно снизить рабочую частоту устройства.

В необработанных пленках Ga_2O_3 , выращенных методом HVPE на сапфире, время восстановления обратного тока сравнимо с ожидаемым исходя из характерного времени релаксации RLC -цепочки и составляет 20 нс. В то же время в образцах Ga_2O_3 , подвергшихся облучению протонами, характерное время релаксации всплеска обратного тока значительно затянуто и составляет 6 мкс, что вдвое превышает ожидаемое.

Методами релаксационной спектроскопии глубоких уровней и спектроскопии адмиттанса были определены концентрация и положение глубоких уровней, влияющих на затягивание процесса переключения. В объемных образцах

β -Ga₂O₃, выращенных методами EFG и подвергнутых отжигу в атмосфере водорода, концентрация глубоких уровней с энергией $E_C = 0,6$ эВ составила порядка 10^{15} см⁻³. Данный уровень можно ассоциировать с центром E1, который связывают с атомами переходных металлов в кристаллической решетке β -Ga₂O₃. В пленках α -Ga₂O₃ после облучения протонами можно различить два уровня (с энергиями E_C , равными 0,4 и 0,45 эВ) и общей концентрацией $1,3 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Эти центры можно ассоциировать с межузельным кислородом.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (соглашение № 075-15-2022-581).

Благодарности

Авторы выражают признательность коллективу ЛНФ ОИЯИ за помощь в проведении работ по облучению экспериментальных образцов: А. С. Дорошкевичу, Р. Ш. Исаеву, Ж. В. Мезенцевой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lax B., Neustadter S. Transient Response of a $p-n$ Junction / J. Appl. Phys. 1954. Vol. 25. Issue 9. P. 1148 – 1154. DOI: 10.1063/1.1721830
2. Zhang M. A modified finite difference model to the reverse recovery of silicon PIN diodes / Solid-State Electronics. 2020. Vol. 171. P. 107893(1 – 13). DOI: 10.1016/j.sse.2020.107839
3. Kingston R. H. Switching Time in Junction Diodes and Junction Transistors / Proc. IRE. 1954. Vol. 42. N 5. P. 829 – 834. DOI: 10.1109/jrproc.1954.274521
4. Тогатов В. В., Гнатюк П. А. Метод измерения времени жизни носителей заряда в базовых областях быстродействующих диодных структур / Силовая электроника. 2005. Т. 29. Вып. 3. С. 378 – 381. DOI: 10.1134/1.1882802
5. Tien B., Hu C. Determination of carrier lifetime from rectifier ramp recovery waveform / IEEE Electron Device Lett. 1988. Vol. 9. N 10. P. 553 – 555. DOI: 10.1109/55.17842
6. Dean R. H., Nuese C. J. A refined step-recovery technique for measuring minority carrier lifetimes and related parameters in asymmetric $p-n$ junction diodes / IEEE Transactions on Electron Devices. 1971. Vol. 18. N 3. P. 151 – 158. DOI: 10.1109/t-ed.1971.17167
7. Григорьев Б. И., Рудской В. А., Тогатов В. В. Разностный метод измерения времени жизни неосновных носителей заряда в силовых транзисторах / Приборы и техника эксперимента. 1981. № 4. С. 226 – 228.
8. Lagov P. B., Drenin A. S., Zinoviev M. A. Proton-irradiation technology for high-frequency high-current silicon welding diode manufacturing / J. Phys. Conf. Ser. 2017. Vol. 830. N 1. P. 012152(1 – 4). DOI: 10.1088/1742-6596/830/1/012152
9. Pavlov Y. S., Surma A. M., Lagov P. B., et al. Accelerator-based electron beam technologies for modification of bipolar semiconductor devices / J. Phys. Conf. Ser. 2016. Vol. 747. N 1. P. 012085(1 – 7). DOI: 10.1088/1742-6596/747/1/012085
10. Kulevoy T. V., Losev A. A., Alekseev P. N., et al. Laser ion source for semiconductor applications / J. Phys. Conf. Ser. 2022. Vol. 2244. P. 012096(1 – 5). DOI: 10.1088/1742-6596/2244/1/012096
11. Анфимов И. М., Кобелева С. П., Щемеров И. В. Измерение времени жизни неравновесных носителей заряда в монокристаллическом кремнии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 1. С. 41 – 45. DOI: 10.1134/S0020168515150029

12. Булярский С. В., Жуков А. В., Ермаков М. С. и др. Определение параметров центров рекомбинации в силовых полупроводниковых приборах / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 4. С. 26 – 30.
13. Veher O., Sleptsuk N., Toompuu J., et al. The dependence of reverse recovery time on barrier capacitance and series on-resistance in Schottky diodes / WIT Transactions on Engineering Sciences. 2017. Vol. 116. P. 15 – 22. DOI: 10.2495/MC170021
14. Winterhalter C., Pendharkar S., Shenai K. A novel circuit for accurate characterization and modeling of the reverse recovery of high-power high-speed rectifiers / IEEE Transactions on Power Electronics. 1998. Vol. 13. N 5. P. 924 – 931. DOI: 10.1109/63.712311
15. Pearton S., Yang J., Cary IV P., et al. A review of Ga₂O₃ materials, processing, and devices / Appl. Phys. Rev. 2018. Vol. 5. P. 011301(1 – 57). DOI: 10.1063/1.5006941
16. Pearton S., Ren F., Tadjer M., Kim J. Perspective: Ga₂O₃ for ultra-high power rectifiers and MOSFETS featured / J. Appl. Phys. 2018. Vol. 124. P. 220901(1 – 19). DOI: 10.1063/1.5062841
17. Zhang J., Shi J., Qi D.-C., et al. Recent progress on the electronic structure, defect, and doping properties of Ga₂O₃ featured / APL Materials. 2020. Vol. 8. P. 020906(1 – 35). DOI: 10.1063/1.5142999
18. Langørgen A., Zimmermann C., Frodason Y., et al. Influence of heat treatments in H₂ and Ar on the E1 center in β -Ga₂O₃ / J. Appl. Phys. 2022. Vol. 131. P. 115702(1 – 7). DOI: 10.1063/5.0083861
19. Polyakov A. Y., Smirnov N. B., Shchemerov I. V., et al. Deep trap spectra of Sn-doped α -Ga₂O₃ grown by halide vapor phase epitaxy on sapphire / APL Materials. 2019. Vol. 7. P. 051103(1 – 7). DOI: 10.1063/1.5094787
20. Кучерова О. В., Зубков В. И., Цвелев Е. О. и др. Неразрушающая диагностика наногетероструктур с множественными квантовыми ямами InGa_N/Ga_N методом температурной спектроскопии адмиттанса / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 3. С. 24 – 28.
21. Irmischer K., Galazka Z., Pietsch M., et al. Electrical properties of β -Ga₂O₃ single crystals grown by the Czochralski method / J. Appl. Phys. 2011. Vol. 110. P. 063720(1 – 7). DOI: 10.1063/1.3642962
22. Zhang Z., Farzana E., Arehart A., Ringel S. Deep level defects throughout the bandgap of (010) β -Ga₂O₃ detected by optically and thermally stimulated defect spectroscopy / Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 108. Issue 5. P. 052105(1 – 6). DOI: 10.1063/1.4941429
23. Polyakov A. Y., Smirnov N. B., Shchemerov I. V., et al. Point defect induced degradation of electrical properties of Ga₂O₃ by 10 MeV proton damage / Appl. Phys. Lett. 2018. Vol. 112. Issue 3. P. 032107(1 – 7). DOI: 10.1063/1.5012993
24. Kobayashi T., Gake T., Kumagai Yu., et al. Energetics and electronic structure of native point defects in α -Ga₂O₃ / Applied Physics Express. 2019. Vol. 12. N 9. P. 091001(1 – 6). DOI: 10.7567/1882-0786/ab3763

REFERENCES

1. Lax B., Neustadter S. Transient Response of a $p-n$ Junction / J. Appl. Phys. 1954. Vol. 25. Issue 9. P. 1148 – 1154. DOI: 10.1063/1.1721830
2. Zhang M. A modified finite difference model to the reverse recovery of silicon PIN diodes / Solid-State Electronics. 2020. Vol. 171. P. 107893(1 – 13). DOI: 10.1016/j.sse.2020.107839
3. Kingston R. H. Switching Time in Junction Diodes and Junction Transistors / Proc. IRE. 1954. Vol. 42. N 5. P. 829 – 834. DOI: 10.1109/jrproc.1954.274521
4. Togatov V. V., Gnatyuk P. A. A method for measuring the lifetime of charge carriers in the base regions of high-speed diode structures / Semiconductors. 2005. Vol. 39. Issue 3. P. 360 – 363. DOI: 10.1134/1.1882802

5. **Tien B., Hu C.** Determination of carrier lifetime from rectifier ramp recovery waveform / *IEEE Electron Device Lett.* 1988. Vol. 9. N 10. P. 553 – 555. DOI: 10.1109/55.17842
6. **Dean R. H., Nuese C. J.** A refined step-recovery technique for measuring minority carrier lifetimes and related parameters in asymmetric $p-n$ junction diodes / *IEEE Transactions on Electron Devices.* 1971. Vol. 18. N 3. P. 151 – 158. DOI: 10.1109/t-ed.1971.17167
7. **Grigoriev B. I., Rudskoi V. A., Togatov V. V.** Differential method of minority carrier lifetime measurement in the power transistors / *Prib. Tekh. Éksp.* 1981. N 4. P. 226 – 228 [in Russian].
8. **Lagov P. B., Drenin A. S., Zinoviev M. A.** Proton-irradiation technology for high-frequency high-current silicon welding diode manufacturing / *J. Phys. Conf. Ser.* 2017. Vol. 830. N 1. P. 012152(1 – 4). DOI: 10.1088/1742-6596/830/1/012152
9. **Pavlov Y. S., Surma A. M., Lagov P. B., et al.** Accelerator-based electron beam technologies for modification of bipolar semiconductor devices / *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. Vol. 747. N 1. P. 012085(1 – 7). DOI: 10.1088/1742-6596/747/1/012085
10. **Kulevoy T. V., Losev A. A., Alekseev P. N., et al.** Laser ion source for semiconductor applications / *J. Phys. Conf. Ser.* 2022. Vol. 2244. P. 012096(1 – 5). DOI: 10.1088/1742-6596/2244/1/012096
11. **Anfimov I. M., Kobeleva S. P., Shchemerov I. V.** Measurement of lifetime of nonequilibrium charge carriers in single-crystal silicon / *Inorganic materials.* 2015. Vol. 51. N 15. P. 1447 – 1451. DOI: 10.1134/S0020168515150029
12. **Bulyarsky S. V., Zhukov A. V., Ermakov M. S., et al.** Determination of the Recombination Center Parameters in Power Semiconductor Devices / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2015. Vol. 81. N 4. P. 26 – 30 [in Russian].
13. **Veher O., Sleptsuk N., Toompuu J., et al.** The dependence of reverse recovery time on barrier capacitance and series on-resistance in Schottky diodes / *WIT Transactions on Engineering Sciences.* 2017. Vol. 116. P. 15 – 22. DOI: 10.2495/MC170021
14. **Winterhalter C., Pendharkar S., Shenai K.** A novel circuit for accurate characterization and modeling of the reverse recovery of high-power high-speed rectifiers / *IEEE Transactions on Power Electronics.* 1998. Vol. 13. N 5. P. 924 – 931. DOI: 10.1109/63.712311
15. **Pearton S., Yang J., Cary IV P., et al.** A review of Ga_2O_3 materials, processing, and devices / *Appl. Phys. Rev.* 2018. Vol. 5. P. 011301(1 – 57). DOI: 10.1063/1.5006941
16. **Pearton S., Ren F., Tadjer M., Kim J.** Perspective: Ga_2O_3 for ultra-high power rectifiers and MOSFETS featured / *J. Appl. Phys.* 2018. Vol. 124. P. 220901(1 – 19). DOI: 10.1063/1.5062841
17. **Zhang J., Shi J., Qi D.-C., et al.** Recent progress on the electronic structure, defect, and doping properties of Ga_2O_3 featured / *APL Materials.* 2020. Vol. 8. P. 020906(1 – 35). DOI: 10.1063/1.5142999
18. **Langørgen A., Zimmermann C., Frodason Y., et al.** Influence of heat treatments in H_2 and Ar on the E1 center in $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ / *J. Appl. Phys.* 2022. Vol. 131. P. 115702(1 – 7). DOI: 10.1063/5.0083861
19. **Polyakov A. Y., Smirnov N. B., Shchemerov I. V., et al.** Deep trap spectra of Sn-doped $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ grown by halide vapor phase epitaxy on sapphire / *APL Materials.* 2019. Vol. 7. P. 051103(1 – 7). DOI: 10.1063/1.5094787
20. **Kucherova O. V., Zubkov V. I., Tsvelev E. O., et al.** Non-destructive control of nanoheterostructures with multiple quantum wells InGaN/GaN using thermal spectroscopy of the admittance / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2010. Vol. 76. N 3. P. 24 – 28 [in Russian].
21. **Irmscher K., Galazka Z., Pietsch M., et al.** Electrical properties of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystals grown by the Czochralski method / *J. Appl. Phys.* 2011. Vol. 110. P. 063720(1 – 7). DOI: 10.1063/1.3642962
22. **Zhang Z., Farzana E., Arehart A., Ringel S.** Deep level defects throughout the bandgap of (010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ detected by optically and thermally stimulated defect spectroscopy / *Appl. Phys. Lett.* 2016. Vol. 108. Issue 5. P. 052105(1 – 6). DOI: 10.1063/1.4941429
23. **Polyakov A. Y., Smirnov N. B., Shchemerov I. V., et al.** Point defect induced degradation of electrical properties of Ga_2O_3 by 10 MeV proton damage / *Appl. Phys. Lett.* 2018. Vol. 112. Issue 3. P. 032107(1 – 7). DOI: 10.1063/1.5012993
24. **Kobayashi T., Gake T., Kumagai Yu., et al.** Energetics and electronic structure of native point defects in $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ / *Applied Physics Express.* 2019. Vol. 12. N 9. P. 091001(1 – 6). DOI: 10.7567/1882-0786/ab3763