

03

Механизм релаксационных колебаний напряжения в халькогенидных стеклообразных полупроводниках

© С.А. Фефелов¹, Л.П. Казакова^{1,2}, Н.А. Богословский^{1,¶}, А.Б. Былев²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

² Государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: nikitabogoslovskiy@gmail.com

Поступила в Редакцию 3 июля 2026 г.

В окончательной редакции 30 июля 2026 г.

Принята к публикации 31 июля 2026 г.

При измерении вольт-амперных характеристик тонкопленочных образцов GeSbTe в режиме генератора тока после переключения наблюдаются релаксационные колебания напряжения. Проанализированы экспериментальные результаты, полученные на различных образцах и предложен механизм, позволяющий объяснить возникновение этих колебаний. Показано, что на контакте GeSbTe с металлическим электродом образуется потенциальный барьер для дырок, при этом барьерная емкость контакта соответствует емкости, определяемой из графика релаксационных колебаний.

Ключевые слова: халькогенидные стеклообразные полупроводники, GeSbTe, релаксационные колебания.

DOI: 10.61011/FTT.2026.08.63670.10314

1. Введение

В последнее время проводятся активные исследования свойств халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) системы GeSbTe, или GST. Главным образом интерес к этим материалам связан с возможностью быстро и обратимо перевести их из аморфного стеклообразного состояния с высоким сопротивлением в кристаллическое состояние с низким сопротивлением. Материалы системы GST считаются наиболее перспективными для создания памяти с изменяемым фазовым состоянием, или фазовой памяти, основанной на обратимом фазовом переходе халькогенидное стекло–кристалл [1,2]. Фазовая память рассматривается не только как альтернатива традиционной памяти, но также может использоваться для вычислений в оперативной памяти [3–5] и нейроморфных вычислений [6,7].

Переход из аморфного в кристаллическое состояние также может быть произведен при помощи лазерного импульса. Значительный оптический контраст между этими состояниями позволяет использовать GeSbTe в качестве активного слоя в перезаписываемых оптических дисках, в настоящее время также активно развивается применение GeSbTe в оптоэлектронике и нанофотонике [2,8].

При электрических измерениях на аморфных ХСП наблюдается S-образная вольт-амперная характеристика (ВАХ). При подаче на образец напряжения выше некоторого порогового значения происходит резкий скачкообразный переход в состояние с низким сопротивлением. Этот переход называют эффектом переключения. Для некоторых составов ХСП состояние с низким сопротивлением поддерживается только пока через образец

протекает ток. Для других составов после переключения происходит кристаллизация активной области и образец сохраняет состояние с низким сопротивлением даже после окончания импульса тока. То есть образец сохраняет, или запоминает состояние с низким сопротивлением. Этот эффект называют эффектом памяти.

В наших предыдущих работах при измерении ВАХ тонкопленочных образцов GeSbTe было обнаружено, что на некоторых образцах после переключения в проводящее состояние происходят осцилляции, или колебания напряжения [9–11]. Эти колебания имеют вид релаксационных колебаний, однако механизм возникновения колебаний долгое время оставался непонятным. Главный вопрос заключается в том, что оценочные значения как емкости самого образца между электродами, так и емкости измерительной цепи на 1–2 порядка меньше емкости, получаемой из графика зависимости напряжения от времени.

О наблюдении релаксационных колебаний на тонкопленочных образцах ХСП системы SiTeAsGe ранее сообщалось в работе [12], позже релаксационные колебания напряжения наблюдались в ячейках памяти с активной областью состава GeSbTe в работах [13–15]. В этих работах количество наблюдаемых периодов колебаний было весьма небольшим, амплитуда колебаний со временем уменьшалась и колебания достаточно быстро затухали. В наших измерениях колебания происходили между практически постоянными значениями напряжения, мы не наблюдали систематического уменьшения амплитуды колебаний со временем. На части экспериментальных точек колебания происходили до конца импульса тока, на части точек колебания срывались, при этом срыв колебаний происходил достаточно резко. Амплитуда колебаний перед срывом была большой.

Также отметим, что в упомянутых выше работах других авторов измерения производились на отдельных ячейках памяти с размером порядка 100 nm. В таком случае влияние измерительной схемы очень велико, так осциллограф, используемый для измерения напряжения на образце, вносит в цепь паразитную емкость, которая существенно больше емкости исследуемого образца. Например, в работе [14] емкость системы оценивается в 2–10 pF, при этом используемый для измерений осциллограф имеет входную емкость 10 pF. В работе [12] использовались тонкопленочные образцы с большой площадью контакта, однако, по оценке авторов, емкость системы, главным образом, связана с емкостью измерительного кабеля. Существенное отличие наших измерений заключается в использовании образцов, имеющих структуру типа „сэндвич“ с большой площадью контакта порядка 10^{-4} cm^2 . Поэтому в наших измерениях емкость измерительной системы значительно меньше емкости образца. Так входная емкость использованного осциллографа составляет 30 pF, емкость измерительного кабеля порядка 40 pF, а полная емкость системы может быть порядка 300 pF.

Кроме того, мы проводили измерения на образцах с различными составами активной области и различными материалами нижнего электрода, что позволило сделать выводы о влиянии материала и контакта с электродом на возникновение колебаний. Изучение колебаний позволило глубже понять процессы, происходящие при переключении и записи информации в элементах фазовой памяти.

2. Образцы и методика измерений

Осцилляции напряжения наблюдались на большом числе образцов. В настоящей работе будут приведены экспериментальные данные, полученные на двух образцах, для которых было сделано наибольшее количество измерений. Использовались свеженанпленные образцы с аморфной активной областью и структурой типа „сэндвич“. Первый образец с активной областью состава $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{15}\text{Te}_{70}$ толщиной 700 nm был получен методом термического напыления на подложку из стекла с золотым проводящим покрытием, которое использовалось в качестве нижнего электрода при измерениях. Второй образец состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 130 nm был получен методом магнетронного распыления поликристаллической мишени на кремниевую подложку с проводящим покрытием из Al. В качестве второго, верхнего электрода, использовался прижимной золотой зонд с площадью контакта с пленкой порядка 10^{-4} cm^2 . Подробное описание технологии напыления и характеристика образцов приведены в наших предыдущих работах [9,11].

Так как для ХСП характерна S-образная ВАХ, в наших измерениях в качестве управляемого параметра при электрических измерениях выбрана сила тока. На образец подавались треугольные импульсы тока

и измерялось напряжение на образце. В отличие от обычно применяющейся схемы измерения с генератором напряжения, при использовании генератора тока не происходит скачка тока при переключении. Это позволяет разделить влияние тока и напряжения на происходящие в пленке процессы.

На каждую точку образца подавалась серия треугольных импульсов тока с последовательно возрастающей амплитудой от 6 μA до 8 mA. Длительность каждого импульса составляла примерно 2 ms. Падение напряжения на образце измерялось при помощи электронного осциллографа.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена типичная осциллограмма напряжения и тока на образце $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{15}\text{Te}_{70}$. Для различных точек одного образца величина периода колебаний была достаточно стабильна и зависела, главным образом, от тока через образец. При одном и том же токе период колебаний практически не зависел от скорости нарастания тока.

На рис. 2 показана осциллограмма напряжения и тока на образце $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$. Наблюдаемая хаотичность на зависимости напряжения от времени связана с недостаточным разрешением по времени. Отдельно на рис. 3 и рис. 4 показана часть осциллограммы напряжения с колебаниями в увеличенном масштабе по времени для образцов $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (рис. 3) и образца $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{15}\text{Te}_{70}$ (рис. 4). Из этих рисунков хорошо видно, что колебания напряжения являются периодическими.

Экспериментально установлено, что амплитуда колебаний напряжения при возрастании тока в образце практически не изменялась. Кроме того, измерения в режиме генератора тока позволили нам исследовать зависимость периода колебаний от величины тока. При

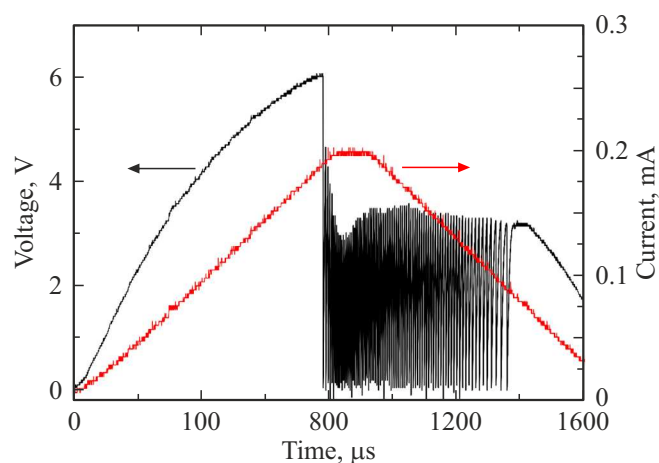


Рис. 1. Осциллограмма напряжения и тока на образце с колебаниями. Образец $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{15}\text{Te}_{70}$ толщиной 700 nm. Нижний электрод Au.

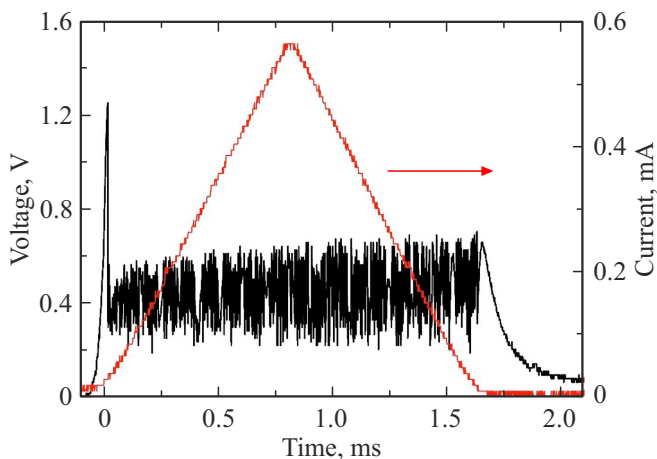


Рис. 2. Осциллограмма напряжения и тока для образца состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 130 nm. Нижний электрод Al.

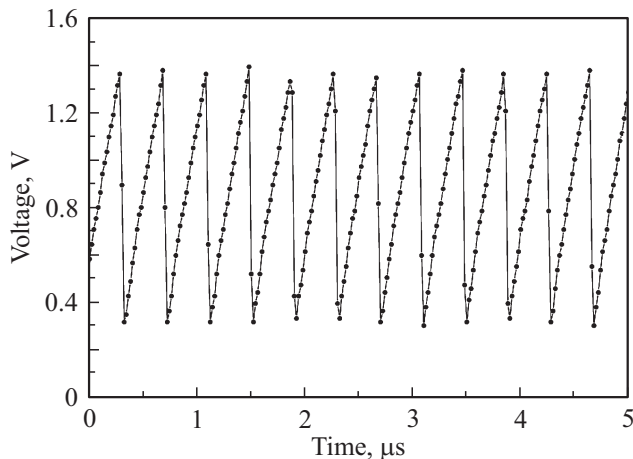


Рис. 3. Осциллограмма напряжения на образце состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 130 nm в увеличенном масштабе по времени. Нижний электрод Al.

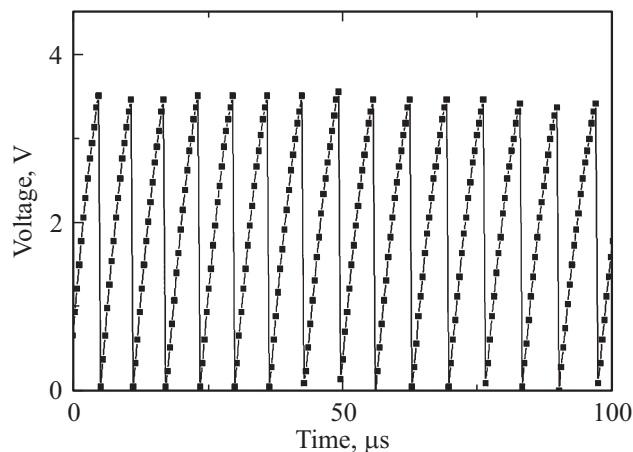


Рис. 4. Осциллограмма напряжения на образце $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{15}\text{Te}_{70}$ толщиной 700 nm в увеличенном масштабе по времени. Нижний электрод Au.

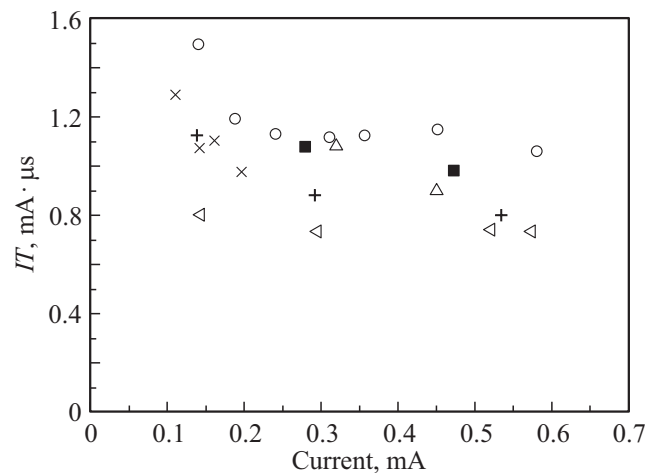


Рис. 5. Произведение периода колебаний и силы тока в зависимости от величины тока для образца состава $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{15}\text{Te}_{70}$ толщиной 700 nm. Разными символами отмечены измерения, полученные в различных точках на поверхности одного образца.

увеличении тока период колебаний уменьшается таким образом, что произведение периода на силу тока с хорошей точностью сохраняется. Для примера на рис. 5 показаны экспериментальные данные, полученные на образцах состава $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{15}\text{Te}_{70}$. Аналогичные результаты были получены и для других образцов. На рис. 5 различными символами показаны экспериментальные результаты, полученные в различных точках одного образца. Некоторый разброс значений для различных точек, вероятно, связан с неоднородностью образца.

Хорошо известно, что в GeSbTe имеется высокая концентрация собственных дефектов ($\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) [16–18]. Собственные дефекты могут приводить к появлению поверхностных потенциальных барьеров блокирующего типа [19]. В таком случае падение напряжения на пленке происходит преимущественно в области контакта и связано с возникновением вблизи контакта области объемного заряда из ионизованных собственных дефектов.

В работах [20–22] показано, что на контакте аморфного $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с металлами образуется барьер типа Шоттки, для большинства металлов этот барьер является запирающим для дырок. В случае золотого электрода, используемого в нашей установке в качестве верхнего контакта, высота барьера для дырок составляет порядка 0.2 eV [21]. О влиянии контактов на колебания может свидетельствовать и то, что в образцах $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с различными контактами, нижним электродом из TiN и золотым верхним электродом колебания наблюдались при приложении импульсов прямой полярности („плюс“ на золотом электроде) и не наблюдались при приложении импульсов обратной полярности (на верхнем электроде „минус“) [11]. В силу дырочной проводимости $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, при прямой полярности контакт с золотым электродом является обратно включенным и с увеличением подаваемого напряжения область пространственного заряда, возникающая на контакте GST-Au, главным

образом со стороны пленки, и обедненная носителями тока, расширяется.

Оценим емкость контакта GeSbTe с металлом. Для GeSbTe характерна дырочная проводимость. В таком случае на контакте собственные дефекты будут заряжаться отрицательно, создавая потенциальный барьер для дырок. Концентрация дефектов в объеме может быть порядка $n = 10^{19} \text{ см}^{-3}$, при этом вблизи границы концентрация собственных дефектов может быть и больше. Обозначим d толщину приконтактной области, в которой все оборванные связи будем считать заряженными отрицательно. Тогда контактная разность потенциалов $U = \frac{ned^2}{2\epsilon\epsilon_0}$. Здесь ϵ_0 — электрическая постоянная, ϵ — статическая диэлектрическая проницаемость. Для оценки можно взять значение диэлектрической проницаемости аморфного $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, равное $\epsilon = 34$ [23]. Если считать, что напряжение U на контакте равно 3.5 В, как на рис. 4, получаем оценку для толщины области пространственного заряда $d = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 U}{ne}} = 36 \text{ nm}$.

Тогда суммарный заряд в приконтактной области можно оценить как $q = nedS = \frac{2\epsilon\epsilon_0 SU}{d} = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0 U ne} S \approx 0.6 \text{ nC}$. Здесь S — площадь контакта верхнего электрода с пленкой, которая в нашей установке составляет порядка $10^{-4} \text{ см}^2 = 10^{-8} \text{ м}^2$.

Из графика, представленного на рис. 2, получаем, что характерное значение заряда, протекающего через образец за один период колебаний, составляет $\sim 1 \text{ nC}$. Таким образом, приведенная оценка для заряда на границе GeSbTe с металлом по порядку величины соответствует заряду, протекающему через образец за один период колебаний. Численное расхождение приблизительно в 2 раза может быть связано с заниженной оценкой площади верхнего прижимного электрода или с более высокой концентрацией собственных дефектов вблизи контакта.

Для образцов $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ толщиной 130 nm напряжение в процессе колебаний достигает 1.4 В, так что оценка заряда в приконтактной области дает значение $\sim 0.4 \text{ nC}$. При этом характерное значение заряда, протекающего через образец за один период колебаний, составляет для различных точек от 0.2 до 0.4 nC, что согласуется с приведенной выше оценкой величины заряда, накапливаемого на контактной емкости.

4. Механизм релаксационных колебаний

На основании проведенного анализа экспериментальных результатов и численных оценок предложен следующий механизм возникновения колебаний напряжения. Вначале образец находится в аморфном состоянии с большим сопротивлением. Главным образом сопротивление связано с высокой концентрацией собственных дефектов, которые являются ловушками для свободных носителей заряда. В сильном электрическом поле увеличивается вероятность ионизации собственных

дефектов и происходит переключение в состояние с низким сопротивлением. Модель, описывающая процесс переключения, подробно изложена в нашей предыдущей работе [24]. После переключения образец остается аморфным, но его сопротивление мало вследствие высокой концентрации свободных носителей. Напряжение на образце падает до напряжения поддержки, которое достаточно мало.

При этом на контакте GeSbTe с электродом имеется потенциальный барьер, связанный с разными работами выхода из материалов электрода и пленки [20–22,25]. Барьер выступает в качестве запирающего контакта для дырок и ограничивает протекание тока. Так как измерительная цепь поддерживает заданный ток в образце, а ток неосновных носителей через барьер мал, происходит накопление заряда на контакте. Собственные дефекты вблизи контакта заряжаются отрицательно. Это приводит к расширению области объемного заряда и увеличению контактной разности потенциалов. При этом через образец продолжает протекать ток, поэтому пленка остается в проводящем состоянии с низким сопротивлением.

При достижении электрическим полем вблизи контакта некоторой критической величины, поле начинает вырывать избыточные электроны с отрицательно заряженных дефектов. Электроны переходят через контакт и захватываются положительно заряженными ионами в области электрода. Одновременно выделяется накопленная на контактной емкости энергия, которая приводит к нагреву контактной области. Простые оценки показывают, что нагрев приконтактной области может составлять от нескольких десятков до сотни градусов. Нагрев дополнительно увеличивает вероятность ионизации собственных дефектов, что создает положительную обратную связь. В результате напряжение на образце резко уменьшается.

Заметим, что значительный нагрев происходит в узкой приконтактной области толщиной порядка d . Это также согласуется с известными из литературы результатами о значительном нагреве пленок ХСП вблизи контактов. После уменьшения напряжения на образце, сопротивление, главным образом, связано с сопротивлением растекания нижнего электрода [25]. Электрическая мощность, выделяющаяся в пленке, становится пренебрежимо малой, в результате пленка охлаждается. Из проведенного ранее численного моделирования нагрева пленки при протекании тока следует, что характерное время тепловой релаксации пленки значительно меньше $1 \mu\text{s}$ [26], главным образом происходит теплообмен с металлическим электродом. Таким образом, достаточно быстро после разрядки контактной емкости происходит охлаждение области контакта. После этого сопротивление контакта вновь возрастает и начинается следующий цикл зарядки контактной емкости.

На большинстве экспериментальных точек колебания происходили до окончания импульса тока, однако на некоторых точках мы наблюдали срыв колебаний. Если срыв происходил при возрастании тока через образец,

то напряжение на образце после срыва колебаний оставалось низким. Это можно объяснить тем, что происходит постепенная перестройка структуры с образованием проводящего канала между металлическим электродом и пленкой GeSbTe. Если срыв колебаний происходил при убывании тока, как на рис. 1, напряжение на образце оставалось высоким. Это может происходить из-за того, что ток становится равен дрейфовому току неосновных носителей через контакт, для которых контакт является открытым. В этом случае напряжение на образце постепенно уменьшается по мере уменьшения тока в цепи и разрядки контактной емкости.

Также заметим, что в работах [13–15] подчеркивается, что первый максимум напряжения всегда больше по амплитуде, чем последующие. В наших измерениях это также наблюдалось. При этом, согласно описанной выше модели, первый максимум напряжения соответствует эффекту переключения, напряжение падает на всей толщине пленки. В то же время для всех последующих максимумов напряжение сосредоточено, главным образом, вблизи контакта. Падение напряжения на остальной части пленки мало. Таким образом, разные амплитуды первого и последующих максимумов объясняются разными механизмами их возникновения.

5. Заключение

В большинстве работ, посвященных исследованию электрических свойств ХСП, не уделяется большого внимания контактам ХСП с электродами. В настоящей работе показано, что контакты оказывают значительное влияние на ВАХ тонкопленочных образцов GeSbTe. В наших измерениях контакт с золотым электродом является запирающим для дырок, которые являются основными носителями заряда. При протекании тока происходит зарядка контактной емкости и накопление объемного заряда вблизи контакта. Вследствие увеличения толщины области объемного заряда на контакте ХСП с металлическим электродом происходит увеличение напряжения на контакте. Таким образом, наблюдаемые в наших измерениях релаксационные колебания напряжения после переключения, можно объяснить процессами зарядки–разрядки контактной емкости. Приведенные в работе оценки величины контактной емкости совпадают с емкостями, полученными исходя из периода и амплитуды релаксационных колебаний.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России.

Конфликт интересов

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Raoux, F. Xiong, M. Wuttig, E. Pop. *MRS bulletin*, **39**, 703 (2014).
- [2] S.A. Kozyukhin, P.I. Lazarenko, A.I. Popov, I.L. Eremenko. *Rus. Chem. Rev.*, **91**, 9, RCR5033 (2022).
- [3] N. Li, C. Mackin, A. Chen, K. Brew, T. Philip, A. Simon, I. Saraf, J.-P. Han, S.G. Sarwat, G.W. Burr, M. Rasch, A. Sebastian, V. Narayanan, N. Saulnier. *Adv. Electron. Mater.*, **9**, 6, 2370030 (2023).
- [4] G.S. Syed, M. Le Gallo, A. Sebastian. *Chem. Rev.*, **125**, 11, 5163 (2025).
- [5] A. Antolini, F. Zavalloni, A. Lico, S. Quqa, L. Greco, M. Mangia, F. Pareschi, M. Pasotti, E.F. Scarselli. *Sensors*, **25**, 12, 3618 (2025).
- [6] P. Fantini. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53**, 283002 (2020).
- [7] F. Brücknerhoff-Plückelmann, J. Feldmann, C.D. Wright, H. Bhaskaran, W.H.P. Pernice. *J. Appl. Phys.*, **129**, 151103 (2021).
- [8] B. Gholipour, S.R. Elliott, M.J. Müller, M. Wuttig, D.W. Hewak, B.E. Hayden, Y. Li, S.S. Jo, R. Jaramillo, R.E. Simpson, J. Tominaga, Y. Cui, A. Mandal, B.J. Eggleton, M. Rochette, M. Rezaei, I. Alamgir, H.M. Shamim, R. Kormokar, A. Anjum, G.T. Zeweldi, T.S. Karnik, J. Hu, S.O. Kasap, G. Belev, A. Reznik. *J. Phys. Photonics*, **5**, 012501 (2023).
- [9] С.А. Фефелов, Л.П. Казакова, Д. Арсова, С.А. Козюхин, К.Д. Цэндин, О.Ю. Приходько. *ФТП*, **50**, 7, 958 (2016).
- [10] С.А. Фефелов, Л.П. Казакова, Н.А. Богословский, К.Д. Цэндин. *ФТП*, **52**, 12, 1503 (2018).
- [11] С.А. Фефелов, Л.П. Казакова, Н.А. Богословский, А.Б. Былев, Е.В. Гушина, Ж.К. Толепов, А.С. Жакыпов, О.Ю. Приходько. *ФТП*, **58**, 8, 443 (2024).
- [12] P.E. Schmidt, R.C. Callarotti. *Thin Solid Films*, **42**, 277 (1977).
- [13] D. Ielmini, D. Mantegazza, A.L. Lacaita. *IEEE Electron Dev. Lett.*, **29**, 6, 568 (2008).
- [14] M. Nardone, V.G. Karpov, I.V. Karpov. *J. Appl. Phys.*, **107**, 054519 (2010).
- [15] Y.-Y. Lu, D. Cai, Y.-F. Chen, Y.-Q. Wang, H.-Y. Wei, R.-R. Huo, Z.-T. Song. *Chinese Phys. Lett.*, **33**, 038503 (2016).
- [16] J.K. Olson, Heng Li, T. Ju, J.M. Viner, P.C. Taylor. *J. Appl. Phys.*, **99**, 103508 (2006).
- [17] X. Yu, J. Robertson. *Can. J. Phys.*, **92**, 671 (2014).
- [18] B. Huang, J. Robertson. *J. Non-Cryst. Sol.*, **358**, 2393 (2012).
- [19] А.С. Глебов, И.М. Петров. *Физика и применение токовой неустойчивости в стеклообразных полупроводниках. Узорочье, Рязань* (2000).
- [20] L.W.-W. Fang, Z. Zhang, R. Zhao, J. Pan, M. Li, L. Shi, T.-C. Chong, Y.-C. Yeo. *J. Appl. Phys.*, **108**, 053708 (2010).
- [21] Z. Zhang, Y. Guo, J. Robertson. *J. Appl. Phys.*, **127**, 155301 (2020).
- [22] K. A. Cooley, H. M. Aldosari, K. Yang, S. E. Mohny. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **38**, 050805 (2020).
- [23] E. Prokhorov, J.J. Gervacio-Arciniega, G. Luna-Bárcenas, Y. Kovalenko, F.J. Espinoza-Beltrán, G. Trapaga. *J. Appl. Phys.*, **113**, 113705 (2013).
- [24] Н.А. Богословский, К.Д. Цэндин. *ФТП*, **46**, 5, 577 (2012).
- [25] С.А. Фефелов, Л.П. Казакова, Н.А. Богословский, А.Б. Былев. *ФТП*, **58**, 12, 662 (2024).
- [26] N. Bogoslovskiy, K. Tsendin. *Solid State Electron.*, **129**, 10 (2017).

Редактор А.Н. Смирнов