

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-911-919

УДК 53.096

Переключение электрических свойств тонкопленочных мемристивных элементов на основе GeTe последовательностями сверхкоротких лазерных импульсов

Николай Николаевич Елисеев¹✉, Алексей Алексеевич Невзоров²,
Владимир Александрович Михалевский³, Алексей Владимирович Киселев⁴,
Антон Андреевич Бурцев⁵, Виталий Вячеславович Ионин⁶, Андрей Анатольевич Лотин⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», Шатура, Московская область, 140700, Российская Федерация

¹ nikolai.eliseev@phystech.edu✉, <https://orcid.org/0000-0002-8864-3961>

² terrapevt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5602-6355>

³ uhr@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6234-1084>

⁴ kiselev.ilit.ras@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0292-9553>

⁵ tonyiplit@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0280-7943>

⁶ IoninVV@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1253-2261>

⁷ lotin_82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9051-7158>

Аннотация

Введение. Представлены результаты исследований особенностей управления состоянием тонкопленочного элемента на основе фазоизменяемого материала теллурида германия (GeTe). Управление свойствами элемента GeTe осуществлено последовательностями сверхкоротких лазерных импульсов. Такое воздействие приводит к быстрому нагреву тонкопленочного элемента и обеспечивает фазовый переход между состояниями с сопротивлением, отличным на несколько порядков. **Метод.** Динамика сопротивления исследована с помощью высокоскоростного осциллографа по схеме, где исследуемый элемент являлся плечом делителя напряжения высокостабильного источника. **Основные результаты.** Для пленок толщиной 100 нм определены три типа переключения удельной проводимости. Для низких энергий лазерного излучения получено несколько различных состояний, при которых пленка материала обладает преимущественно полупроводниковыми свойствами. При увеличении энергии оптических импульсов количество возможных стабильных состояний, определяемых удельной проводимостью материала, уменьшена до двух, в одном из которых (низкоомном) материал проявил исключительно металлические свойства. Во всех случаях время переключения в стабильное состояние не превышает нескольких десятков наносекунд для пленок толщиной до 100 нм. **Обсуждение.** Исследование показало, что описанные структуры можно использовать для реализации мемристивных элементов с оптическим управлением. Кроме того, большое количество возможных допустимых удельных сопротивлений элемента позволит использовать его для увеличения информационной емкости ячеек памяти на основе фазоизменяемого материала или для реализации оптоэлектронных нейроморфных систем.

Ключевые слова

фазоизменяемые материалы, теллурид германия, тонкие пленки, нейроморфные элементы, память с изменением фазового состояния, мемристор, оптоэлектронные мемристоры

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» РАН.

Ссылка для цитирования: Елисеев Н.Н., Невзоров А.А., Михалевский В.А., Киселев А.В., Бурцев А.А., Ионин В.В., Лотин А.А. Переключение электрических свойств тонкопленочных мемристивных элементов на основе GeTe последовательностями сверхкоротких лазерных импульсов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 5. С. 911–919. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-911-919

© Елисеев Н.Н., Невзоров А.А., Михалевский В.А., Киселев А.В., Бурцев А.А., Ионин В.В., Лотин А.А., 2023

Switching the electrical properties of thin-film memristive elements based on GeTe by sequences of ultrashort laser pulses

Nikolai N. Eliseev¹✉, Alexey A. Nevzorov², Vladimir A. Mikhalevsky³,
Alexey V. Kiselev⁴, Anton A. Burtsev⁵, Vitaliy V. Ionin⁶, Andrey A. Lotin⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Institute on Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences — Branch of Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Shatura, Moscow region, 149700, Russian Federation

¹ nikolai.eliseev@phystech.edu✉, <https://orcid.org/0000-0002-8864-3961>

² terrapevt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5602-6355>

³ uhr@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6234-1084>

⁴ kiselev.ilit.ras@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0292-9553>

⁵ tonyiplit@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0280-7943>

⁶ IoninVV@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1253-2261>

⁷ lotin_82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9051-7158>

Abstract

The work is devoted to the study of the characteristics of the state control of a thin-film element based on a phase-change GeTe material. The properties of such an element have been controlled by the action of sequences of ultrashort laser pulses. This action leads to a rapid heating of the thin film element and provides a phase transition between states with a resistance different by several orders of magnitude. The dynamics of the resistance was studied using a high speed oscilloscope according to the scheme where the element under study was the voltage divider arm of a highly stable source. Three different types of conductivity switching were observed for 100 nm thin films. For low energy laser radiation, several distinct states were obtained in which the material film has predominantly semiconducting properties. As the energy of the optical pulses increases, the number of possible stable states determined by the specific conductivity of the material decreases to two, one of which (low resistance) is exclusively metallic properties. In all cases, the time taken to switch to a stable state does not exceed a few tens of nanoseconds for films up to 100 nm thick. The study has demonstrated that the structures described can be used to implement optically controlled memristive elements. In addition, the large number of possible allowable specific resistances of the element will make it possible to use it to increase the information capacity of memory cells based on phase-change materials or to implement optoelectronic neuromorphic systems.

Keywords

phase-change materials, germanium telluride, thin films, neuromorphic elements, phase-change memory, memristors, optoelectronic memristors

Acknowledgements

This work was performed within the State assignment of the Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Eliseev N.N., Nevzorov A.A., Mikhalevsky V.A., Kiselev A.V., Burtsev A.A., Ionin V.V., Lotin A.A. Switching the electrical properties of thin-film memristive elements based on GeTe by sequences of ultrashort laser pulses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 5, pp. 911–919 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-5-911-919

Введение

Энергонезависимый мемристор может одновременно осуществлять хранение данных и вычисления в памяти, т. е. объединить модули хранения и вычислений и устранить узкое место в архитектуре фон Неймана [1, 2]. В настоящее время на основе энергонезависимых мемристоров создают оперативные памяти: на основе фазоизменяемых материалов (PCRAM), ферроэлектрическую (FeRAM), резистивную (ReRAM), магниторезистивную (MRAM) и др. [3]. Среди новых устройств энергонезависимой памяти наиболее развитой и многообещающей на роль энергонезависимой памяти следующего поколения [4] является PCRAM. Работа PCRAM основана на фазовом переходе халькогенидного сплава, который осуществляется с помощью термических/оптических/электрических воздействий [5]. В настоящее время микросхемы PCRAM уже массово производятся такими компаниями, как Micron и Samsung, но их емкость ограничена, поскольку они основываются на хранилище с двухуровневой ячейкой, обеспечивающей переключение между полно-

стью аморфной и кристаллической фазой материала [6]. Много внимания уделено увеличению объема памяти за счет хранения более одного бита информации в каждой многоуровневой ячейке памяти. Несмотря на определенные преимущества, электрическое переключение многоуровневой ячейки обладает известными недостатками: температурный дрейф сопротивления, неоднородность ячеек в массиве, собственный шум материала и шум электрической цепи системы управления [7]. Исходя из этого, важной задачей является реализация стабильного и энергоэффективного оптического переключения многоуровневой ячейки фазоизменяемого материала [8].

В результате платформа оптоэлектронных устройств нового поколения должна сочетать в себе как достоинства электронного домена (масштабируемость, высокую степень интеграции), так и оптического (низкое энергопотребление, высокую скорость передачи данных и помехоустойчивость) [9]. Стабильные обратимые многоуровневые переходы являются наиболее привлекательными с точки зрения создания оптической памяти нового поколения и реализации нейроморфных

вычислений [10]. Согласно моделям Integrate-Fire (IF) и Leaky-Integrate-Fire (LIF), нейрон должен срабатывать, когда сумма его синаптических входов достигает порога срабатывания. При этом устройства, на основе фазоизменяемых материалов, могут имитировать такую нейроноподобную обработку [11]. Более того, для любой точки перехода история предыдущего состояния также сохраняется. Благодаря этому энергонезависимость и пороговое поведение позволят объединить нейрон-синапсоподобные функции обработки и хранения информации одновременно в одном и том же функциональном элементе [12].

Теллурид германия (GeTe) представляет собой бинарный халькогенидный материал, который является хорошей альтернативой теллуриду германия и сурьмы (GST) благодаря более высокой скорости кристаллизации, большому сопротивлению и более высокой температуре кристаллизации (T_c) [13, 14]. В работе [15] показано, что более высокая температура кристаллизации GeTe по сравнению с GST (185 °C и 145 °C, соответственно) и более высокий контраст электрофизических свойств (выше на порядок) обеспечивают лучшую термическую стабильность состояний в устройствах хранения. На его основе были реализованы сегнетоэлектрические и термоэлектрические устройства хранения информации, а также оптические волноводы инфракрасного диапазона [16].

Кроме того, GeTe стал основой устройств PCRAM благодаря высокой стабильности состояний, большому контрасту физических свойств разных фаз, высокому количеству циклов запись/стирание и высокой скорости переключения [17–21]. В ряде работ продемонстрирована более высокая скорость кристаллизации GeTe (10–30 нс) по сравнению с аналогами, в первую очередь с GST (60–100 нс) [13, 16, 21, 22]. Отметим, что устройства на основе исследуемого материала эффективно

работают при повышенных температурах, например, в автомобильной промышленности [16].

С точки зрения электронных и оптоэлектронных применений, в кристаллическом состоянии GeTe демонстрирует сильно выраженную металлическую проводимость p -типа [23]. Также в последнее время представлены работы по фазоизменяемым материалам, в которых оптические свойства изменяются только в зависимости от отклика носителей заряда, например, посредством импульсного оптического возбуждения или электрического напряжения [24]. Таким образом, изучение динамики изменения структуры, электропроводности и оптических свойств при лазерно-индуцированной кристаллизации тонкой пленки GeTe представляет большой интерес как для фундаментальной науки, так и для прикладных приложений.

Описание эксперимента

В работе исследована серия образцов тонких пленок (100 нм) GeTe, полученная методом термического вакуумного напыления на подложках полированного SiO₂. Каждый образец имел вид матрицы из полосковых сопротивлений на основе GeTe, с предварительно напыленными омическими контактами из 100 нм хрома, на которые далее были нанесены контактные площадки из 100 нм меди [25]. Конфигурация схемы измерения электрического сопротивления образца представлена на рис. 1, *b*.

Выполнено исследование воздействия фемтосекундных лазерных импульсов различной плотности энергии на электрическую проводимость тонких пленок GeTe. Проведен эксперимент, схема которого представлена на рис. 1, *a*. В эксперименте использована лазерная система Astrella (800 нм, 45 фс, 1 кГц). Для генерации одиночных фемтосекундных лазерных импульсов

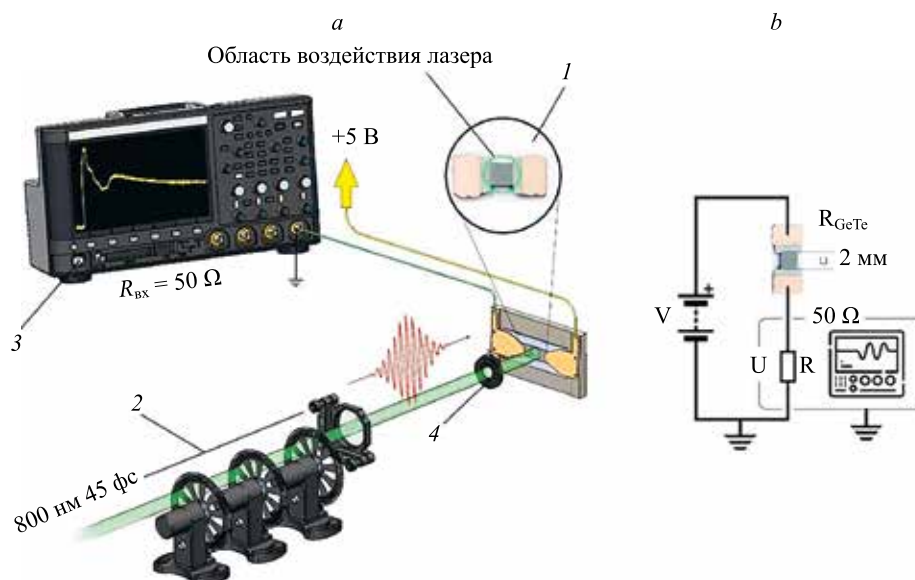


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — общий вид образца; 2 — система чопперов для получения одиночных импульсов; 3 — осциллограф; 4 — диафрагма (а). Конфигурация схемы измерения электрического сопротивления образца (б)

Fig. 1. Scheme of the experiment: 1 — general view of the sample; 2 — system of choppers for obtaining single pulses; 3 — oscilloscope; 4 — aperture (a). Sample electrical resistance measurement circuit configuration (b)

применена система синхронизированных чопперов, позволяющая получать одиночный импульс. Лазерное излучение направлялось на образец через поляризационный аттенуатор (ослабитель), который позволял регулировать интенсивность импульсов. Плотность энергии импульсов изменялась в диапазоне 15–40 мДж/см², количество импульсов в серии находилось в пределе от 1 до 5. Стоит отметить, что площадь пятна лазерного излучения превышала площадь образца фазоизменяемого материала между металлическими контактами. Для регистрации изменения сопротивления образец подключался к источнику напряжения (5 В) в схеме делителя напряжения, где в качестве опорного сопротивления выступало входное сопротивление осциллографа (50 Ом).

Результаты

В результате эксперимента (рис. 1) измерено напряжение на резисторе делителя, коэффициент деления которого зависит в каждый момент времени от сопротивления тонкопленочного элемента. Это напряжение легко можно пересчитать в эквивалентное удельное сопротивление пленки. Удельное сопротивление созданных аморфных тонких пленок равно $\rho_{ам} = 40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Эквивалентным же удельным сопротивлением тонкопленочного образца будем считать величину $\rho_{э\text{кв}}(t) = (R_{\text{GeTe}}(t)l)/S = \alpha R_{\text{GeTe}}(t)$, где $R_{\text{GeTe}}(t)$ — сопротивление тонкопленочного элемента; l — расстояние между контактными площадками (длина активной части элемента); S — площадь среза элемента; α — параметр, определяемый геометрией образца. Этот параметр постоянен для каждого образца и не изменяется при воздействии лазерного излучения. Поскольку в эксперименте измерялось напряжение U на резисторе R , то из измерений можно получить эквивалентное удельное сопротивление пленки в каждый момент времени:

$$\rho_{э\text{кв}}(t) = \left(\frac{VR}{U(t)} - R \right) \alpha,$$

где V — постоянное напряжение источника; $U(t)$ — напряжение, измеренное на опорном сопротивлении R .

Для исследования многоимпульсного воздействия на тонкие пленки на каждый образец с контактами последовательно воздействовало пять импульсов, разнесенных по времени на несколько секунд, для того чтобы пленка гарантировано успевала остывать. В каждой серии из пяти импульсов для разных образцов использована разная плотность энергии лазерного фемтосекундного излучения. Диапазон энергий составлял от 15 до 40 мДж/см². Данный диапазон выбран в связи с тем, что значение 15 мДж/см² для исследуемых пленок это нижняя граница, при которой возможна кристаллизация, индуцируемая используемым источником излучения, а при плотностях энергии выше 40 мДж/см² начинается абляция материала. Зависимость сопротивления пленки GeTe после воздействия от количества импульсов для разных энергий приведена на рис. 2.

Из полученной зависимости видно, что на низких энергиях (до 20 мДж/см²) пленка кристаллизуется плав-

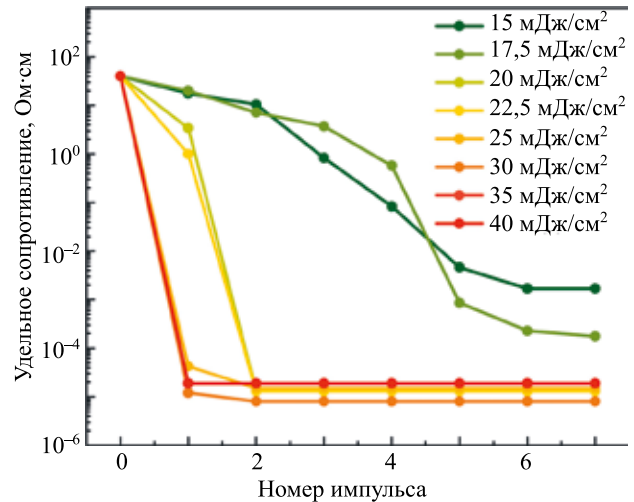


Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления тонких пленок GeTe от количества индуцирующих фазовый переход сверхкоротких лазерных импульсов

Fig. 2. Dependence of the resistivity of GeTe thin films vs. the number of ultrashort laser pulses used to initiate a phase transition

но от импульса к импульсу и даже при значительном количестве импульсов не происходит полной кристаллизации [26]. При энергиях в диапазоне 20–25 мДж/см² значительная кристаллизация происходит только после второго импульса. Это связано с тем, что при таких энергиях большой объем пленки нагревается до температуры кристаллизации, однако быстрое остывание приводит к тому, что кристаллизуется незначительная часть материала, и в ее аморфном объеме образуется много кристаллических зародышей, которые вырастают при следующем импульсе [27]. При плотностях энергии выше 25 мДж/см² пленка прогревается достаточно для того, чтобы большой объем кристалла вырос сразу же после первого импульса [21, 28].

Таким образом, по характеру воздействия фемтосекундных импульсов плотность их энергии можно разбить на три диапазона:

- 1) 15–20 мДж/см² — слабая кристаллизация с преобладанием в пленке аморфной фазы, даже после множества импульсов;
- 2) 20–25 мДж/см² — интенсивный процесс зародышеобразования и значительная кристаллизация только после второго импульса;
- 3) 25–40 мДж/см² — образование значительного объема кристаллической фазы сразу же после первого импульса.

Наибольший интерес представляет динамика эквивалентного сопротивления сразу после воздействия на образец лазерного импульса. Исследование этой динамики позволит судить о времени переключения состояния тонкопленочного элемента, а также даст представление о характере кристаллизации после каждого из импульсов в многоимпульсных экспериментах.

На рис. 3 приведена динамика эквивалентного удельного сопротивления исследуемых образцов после каждого из нескольких импульсов для плотности энергии в первом диапазоне (17 мДж/см²), для двух

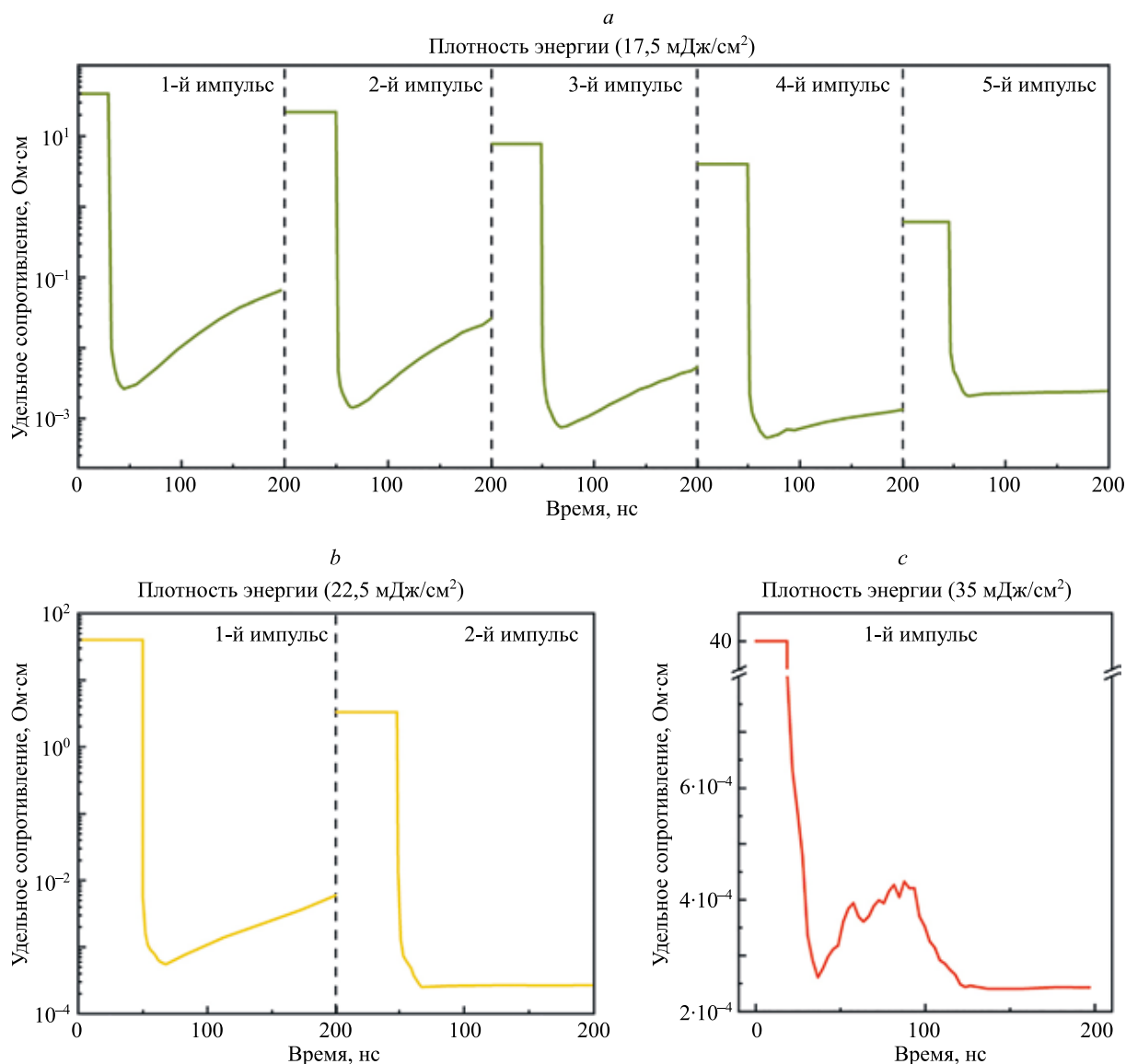


Рис. 3. Динамика эквивалентного удельного сопротивления в многоимпульсном эксперименте при плотностях энергии: 17 мДж/см² (а), 22,5 мДж/см² (b) и 35 мДж/см² (с)

Fig. 3. Dynamics of the equivalent resistivity in the multipulse experiment at energy densities of 17 mJ/cm² (a), 22.5 mJ/cm² (b) and 35 mJ/cm² (c)

импульсов во втором диапазоне и для одного импульса в третьем диапазоне. Такое представление выбрано исходя из того, что на рис. 2 хорошо видно, что в третьем и втором диапазонах изменение состояний не происходит после одного и двух импульсов соответственно.

Медленное изменение удельного сопротивления на рис. 3, а вызвано остыванием образца. Причем температурный коэффициент сопротивления, очевидно, отрицателен. Это свидетельствует о том, что наибольший вклад в проводимость материала вносит концентрация носителей заряда [29]. Таким образом, в рассмотренном диапазоне плотностей энергии воздействующих оптических импульсов, даже после нескольких импульсов материал обладает преимущественно полупроводниковыми свойствами [30, 31]. При этом видно, что с каждым импульсом сопротивление образца падает из-за увеличения доли кристаллической области в объеме пленки. В этом диапазоне энергий можно добиться

формирования множества состояний различающихся долей кристаллической фазы, однако воспроизводимость подобных режимов управления гибридными оптоэлектронными структурами еще нужно исследовать. Кроме того, полная аморфизация образца электрическими импульсами затруднена из-за большого сопротивления и, как следствие, большей необходимой мощности импульсов.

На рис. 3, b показана динамика удельного сопротивления тонкопленочного образца при воздействии импульса с плотностью энергии из второго диапазона (22,5 мДж/см²). Видно, что поведение удельного сопротивления образца после первого импульса с энергией из второго диапазона аналогично такому же поведению после импульса из первого диапазона. Однако резкое уменьшение удельного сопротивления после второго импульса позволяет судить о значительном количестве кристаллических зародышей, образовавшихся после

первого импульса. Кроме того, характерный температурный дрейф сопротивления после второго импульса практически отсутствует из-за того, что температурная зависимость сопротивления GeTe в кристаллической фазе существенно меньше, чем в аморфной. Также температурный коэффициент сопротивления через несколько десятков наносекунд меняет свой знак. Это означает, что к этому времени в пленке начинают преобладать металлические свойства, характерные для кристаллической фазы GeTe [23]. Аналогичный эффект смены знака температурного коэффициента сопротивления гораздо лучше виден на рис. 3, *с*, где показана динамика удельного сопротивления при воздействии высокоэнергичных импульсов из третьего диапазона.

При воздействии фемтосекундных импульсов из третьего диапазона плотностей энергий, рост большого объема кристаллической фазы происходит сразу после первого импульса. Это вызвано очень высокой температурой пленки после таких воздействий и ее относительно медленным остыванием. GeTe обладает как высокой скоростью роста, так и высокой скоростью зародышеобразования [32, 33]. При этом дальнейшее воздействие на пленку импульсами такой же энергии практически не приводят к изменениям удельного сопротивления. На рис. 3, *б*, *с* видно, что стабильное состояние при переключении достигается на временах до 80 нс. Данное значение ниже, чем для ячейки PCRAM на основе GST (100 нс) [34]. Для импульсов низкой энергии изменение фазового состава, очевидно, происходит за схожие времена порядка нескольких десятков наносекунд, но температурный дрейф удельного сопротивления аморфной части пленки не позволяет говорить о стабильном считываемом электрическими методами состоянии.

Очень важным остается вопрос полной реаморфизации образца. Это необходимо для перезаписи состояния тонкопленочного элемента или выставления состояния с большим сопротивлением. Для описанных образцов такое выставление начального состояния благодаря низкому сопротивлению в кристаллической фазе можно осуществлять мощными электрическими импульсами.

Заключение

Исследованные в настоящей работе образцы можно использовать в качестве прототипов гибридных опто-электронных мемристивных элементов, в которых определенные состояния точно задаются оптическими импульсами, а сброс состояния может осуществляться под воздействием электрических импульсов. При этом выбирая диапазон энергий воздействующих оптических импульсов можно выбрать один из режимов работы мемристивного элемента. На энергиях в диапазоне 15–20 мДж/см² возможно осуществить переключение между множеством состояний мемристора. На средних энергиях (20–25 мДж/см²) количество доступных считываемых состояний мемристора невелико, а практически полное переключение происходит за два импульса. На высоких энергиях (25–40 мДж/см²) пленка допускает только бинарное переключение, а кристаллизация значительной части образца происходит всего за один импульс. При этом во всех случаях время переключения в стабильное состояние составляет не более 80 нс. Отметим, что это время можно уменьшить, используя подложку с более высокой теплопроводностью или более тонкие пленки, но это, в свою очередь, приведет к изменению значений диапазонов энергий, характерных для плавной и скачкообразной перестройки состояний.

Литература

1. Le Gallo M., Sebastian A. An overview of phase-change memory device physics // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020. V. 53. N 21. P. 213002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab7794>
2. Wright C.D., Hosseini P., Diosdado J.A.V. Beyond von-neumann computing with nanoscale phase-change memory devices // *Advanced Functional Materials*. 2013. V. 23. N 18. P. 2248–2254. <https://doi.org/10.1002/adfm.201202383>
3. Burr G.W., Kurdi B.N., Scott J.C., Lam C.H., Gopalakrishnan K., Shenoy R.S. Overview of candidate device technologies for storage-class memory // *IBM Journal of Research and Development*. 2008. V. 52. N 4.5. P. 449–464. <https://doi.org/10.1147/rd.524.0449>
4. Liu B., Wei T., Hu J., Li W., Ling Y., Liu Q., Cheng M., Song Z. Universal memory based on phase-change materials: From phase-change random access memory to optoelectronic hybrid storage // *Chinese Physics B*. 2021. V. 30. N 5. P. 058504. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/abedf>
5. Wuttig M., Yamada N. Phase-change materials for rewriteable data storage // *Nature Materials*. 2007. V. 6. N 11. P. 824–832. <https://doi.org/10.1038/nmat2009>
6. Song Z., Song S., Zhu M., Wu L., Ren K., Song W., Feng S. From octahedral structure motif to sub-nanosecond phase transitions in phase change materials for data storage // *Science China Information Sciences*. 2018. V. 61. N 8. P. 081302. <https://doi.org/10.1007/s11432-018-9404-2>
7. Pozidis H., Papandreou N., Sebastian A., Mittelholzer T., BrightSky M., Lam C., Eleftheriou E. A framework for reliability assessment in multilevel phase-change memory // *Proc. of the 4th*

References

1. Le Gallo M., Sebastian A. An overview of phase-change memory device physics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, vol. 53, no. 21, pp. 213002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab7794>
2. Wright C.D., Hosseini P., Diosdado J.A.V. Beyond von-neumann computing with nanoscale phase-change memory devices. *Advanced Functional Materials*, 2013, vol. 23, no. 18, pp. 2248–2254. <https://doi.org/10.1002/adfm.201202383>
3. Burr G.W., Kurdi B.N., Scott J.C., Lam C.H., Gopalakrishnan K., Shenoy R.S. Overview of candidate device technologies for storage-class memory. *IBM Journal of Research and Development*, 2008, vol. 52, no. 4.5, pp. 449–464. <https://doi.org/10.1147/rd.524.0449>
4. Liu B., Wei T., Hu J., Li W., Ling Y., Liu Q., Cheng M., Song Z. Universal memory based on phase-change materials: From phase-change random access memory to optoelectronic hybrid storage. *Chinese Physics B*, 2021, vol. 30, no. 5, pp. 058504. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/abedf>
5. Wuttig M., Yamada N. Phase-change materials for rewriteable data storage. *Nature Materials*, 2007, vol. 6, no. 11, pp. 824–832. <https://doi.org/10.1038/nmat2009>
6. Song Z., Song S., Zhu M., Wu L., Ren K., Song W., Feng S. From octahedral structure motif to sub-nanosecond phase transitions in phase change materials for data storage. *Science China Information Sciences*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 081302. <https://doi.org/10.1007/s11432-018-9404-2>
7. Pozidis H., Papandreou N., Sebastian A., Mittelholzer T., BrightSky M., Lam C., Eleftheriou E. A framework for reliability assessment in multilevel phase-change memory. *Proc. of the 4th IEEE*

- IEEE International Memory Workshop. 2012. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IMW.2012.6213671>
8. Panin G.N. Optoelectronic dynamic memristor systems based on two-dimensional crystals // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2021. V. 142. P. 110523. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110523>
9. Emboras A., Alabastri A., Lehmann P., Portner K., Weilenmann Ch., Ma P., Cheng B., Lewerenz M., Passerini E., Koch U., Aeschlimann J., Ducry F., Leuthold J., Luisier M. Opto-electronic memristors: Prospects and challenges in neuromorphic computing // *Applied Physics Letters*. 2020. V. 117. N 23. P. 230502. <https://doi.org/10.1063/5.0028539>
10. Photo-Electroactive Nonvolatile Memories for Data Storage and Neuromorphic Computing / ed. by S. Han, Y. Zhou. Woodhead Publishing, 2020. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00530-4>
11. Advances in Neuromorphic Memristor Science and Applications / ed. by R. Kozma, R.E. Pino, G.E. Puzienza. Springer Science & Business Media Dordrecht, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4491-2>
12. Shastri B.J., Tait A.N., Ferreira de Lima T., Pernice W.H.P., Bhaskaran H., Wright C.D., Prucnal P.R. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing // *Nature Photonics*. 2021. V. 15. N 2. P. 102–114. <https://doi.org/10.1038/s41566-020-00754-y>
13. Bruns G., Merkelbach P., Schlockermann C., Salinga M., Wuttig M., Happ T.D., Philipp J.B., Kund M. Nanosecond switching in GeTe phase change memory cells // *Applied Physics Letters*. 2009. V. 95. N 4. P. 043108. <https://doi.org/10.1063/1.3191670>
14. Onodera A., Sakamoto I., Fujii Y., Mo-ri N., Sugai S. Structural and electrical properties of GeSe and GeTe at high pressure // *Physical Review B*. 1997. V. 56. N 13. P. 7935–7941. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.56.7935>
15. Fantini A., Perniola L., Armand M., Nodin J.F., Sousa V., Persico A., Cluzel J., Jahan C., Maitrejean S., Lhostis S., Roule A., Dressler C., Reimbold G., De Salvo B., Mazoyer P., Bensahel D., Boulanger F. Comparative assessment of GST and GeTe materials for application to embedded phase-change memory devices // *Proc. of the 2009 IEEE International Memory Workshop*. 2009. P. 1–2. <https://doi.org/10.1109/IMW.2009.5090585>
16. Singh K., Kumari S., Singh H., Bala N., Singh P., Kumar A., Thakur A. A review on GeTe thin film-based phase-change materials // *Applied Nanoscience*. 2023. V. 13. N 1. P. 95–110. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01911-7>
17. Perniola L., Sousa V., Fantini A., Arbaoui E., Bastard A., Armand M., Fargeix A., Jahan C., Nodin J.-F., Persico A., Blachier D., Toffoli A., Loubriat S., Gourvest E., Beneventi G.B., Feldis H., Maitrejean S., Lhostis S., Roule A., Cueto O., Reimbold G., Poupinet L., Billon T., De Salvo B., Bensahel D., Mazoyer P., Annunziata R., Zuliani P., Boulanger F. Electrical behavior of phase-change memory cells based on GeTe // *IEEE Electron Device Letters*. 2010. V. 31. N 5. P. 488–490. <https://doi.org/10.1109/LED.2010.2044136>
18. Eliseev N.N., Kiselev A.V., Ionin V.V., Mikhalevsky V.A., Burtsev A.A., Pankov M.A., Karimov D.N., Lotin A.A. Wide range optical and electrical contrast modulation by laser-induced phase transitions in GeTe thin films // *Results in Physics*. 2020. V. 19. P. 103466. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103466>
19. Gallard M., Amara M.S., Putero M., Burle N., Guichet Ch., Escoubas S., Richard M.-I., Mocuta C., Chahine R.R., Bernard M., Kowalczyk P., Noé P., Thomas O. New insights into thermomechanical behavior of GeTe thin films during crystallization // *Acta Materialia*. 2020. V. 191. P. 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.001>
20. Berthier R., Cooper D., Sabbione C., Hippert F., Noé P. In situ observation of the impact of surface oxidation on the crystallization mechanism of GeTe phase-change thin films by scanning transmission electron microscopy // *Journal of Applied Physics*. 2017. V. 122. N 11. P. 115304. <https://doi.org/10.1063/1.5002637>
21. Coombs J.H., Jongenelis A.P.J.M., van Es-Spiekman W., Jacobs B.A.J. Laser-induced crystallization phenomena in GeTe-based alloys. I. Characterization of nucleation and growth // *Journal of Applied Physics*. 1995. V. 78. N 8. P. 4906–4917. <https://doi.org/10.1063/1.359779>
22. Wang W.J., Shi L.P., Zhao R., Lim K.G., Lee H.K., Chong T.C., Wu Y.H. Fast phase transitions induced by picosecond electrical pulses on phase change memory cells // *Applied Physics Letters*. 2008. V. 93. N 4. P. 043121. <https://doi.org/10.1063/1.2963196>
23. Edwards A.H., Pineda A.C., Schultz P.A., Martin M.G., Thompson A.P., Hjalmarson H.P. Theory of persistent, p-type, metallic conduction in c-GeTe // *Journal of Physics: Condensed International Memory Workshop*, 2012, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IMW.2012.6213671>
8. Panin G.N. Optoelectronic dynamic memristor systems based on two-dimensional crystals. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2021, vol. 142, pp. 110523. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110523>
9. Emboras A., Alabastri A., Lehmann P., Portner K., Weilenmann Ch., Ma P., Cheng B., Lewerenz M., Passerini E., Koch U., Aeschlimann J., Ducry F., Leuthold J., Luisier M. Opto-electronic memristors: Prospects and challenges in neuromorphic computing. *Applied Physics Letters*, 2020, vol. 117, no. 23, pp. 230502. <https://doi.org/10.1063/5.0028539>
10. *Photo-Electroactive Nonvolatile Memories for Data Storage and Neuromorphic Computing*. Ed. by S. Han, Y. Zhou. Woodhead Publishing, 2020. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00530-4>
11. *Advances in Neuromorphic Memristor Science and Applications*. Ed. by R. Kozma, R.E. Pino, G.E. Puzienza. Springer Science & Business Media Dordrecht, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4491-2>
12. Shastri B.J., Tait A.N., Ferreira de Lima T., Pernice W.H.P., Bhaskaran H., Wright C.D., Prucnal P.R. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing. *Nature Photonics*, 2021, vol. 15, no. 2, pp. 102–114. <https://doi.org/10.1038/s41566-020-00754-y>
13. Bruns G., Merkelbach P., Schlockermann C., Salinga M., Wuttig M., Happ T.D., Philipp J.B., Kund M. Nanosecond switching in GeTe phase change memory cells. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 95, no. 4, pp. 043108. <https://doi.org/10.1063/1.3191670>
14. Onodera A., Sakamoto I., Fujii Y., Mo-ri N., Sugai S. Structural and electrical properties of GeSe and GeTe at high pressure. *Physical Review B*, 1997, vol. 56, no. 13, pp. 7935–7941. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.56.7935>
15. Fantini A., Perniola L., Armand M., Nodin J.F., Sousa V., Persico A., Cluzel J., Jahan C., Maitrejean S., Lhostis S., Roule A., Dressler C., Reimbold G., De Salvo B., Mazoyer P., Bensahel D., Boulanger F. Comparative assessment of GST and GeTe materials for application to embedded phase-change memory devices. *Proc. of the 2009 IEEE International Memory Workshop*, 2009, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/IMW.2009.5090585>
16. Singh K., Kumari S., Singh H., Bala N., Singh P., Kumar A., Thakur A. A review on GeTe thin film-based phase-change materials. *Applied Nanoscience*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 95–110. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01911-7>
17. Perniola L., Sousa V., Fantini A., Arbaoui E., Bastard A., Armand M., Fargeix A., Jahan C., Nodin J.-F., Persico A., Blachier D., Toffoli A., Loubriat S., Gourvest E., Beneventi G.B., Feldis H., Maitrejean S., Lhostis S., Roule A., Cueto O., Reimbold G., Poupinet L., Billon T., De Salvo B., Bensahel D., Mazoyer P., Annunziata R., Zuliani P., Boulanger F. Electrical behavior of phase-change memory cells based on GeTe. *IEEE Electron Device Letters*, 2010, vol. 31, no. 5, pp. 488–490. <https://doi.org/10.1109/LED.2010.2044136>
18. Eliseev N.N., Kiselev A.V., Ionin V.V., Mikhalevsky V.A., Burtsev A.A., Pankov M.A., Karimov D.N., Lotin A.A. Wide range optical and electrical contrast modulation by laser-induced phase transitions in GeTe thin films. *Results in Physics*, 2020, vol. 19, pp. 103466. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103466>
19. Gallard M., Amara M.S., Putero M., Burle N., Guichet Ch., Escoubas S., Richard M.-I., Mocuta C., Chahine R.R., Bernard M., Kowalczyk P., Noé P., Thomas O. New insights into thermomechanical behavior of GeTe thin films during crystallization. *Acta Materialia*, 2020, vol. 191, pp. 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.04.001>
20. Berthier R., Cooper D., Sabbione C., Hippert F., Noé P. In situ observation of the impact of surface oxidation on the crystallization mechanism of GeTe phase-change thin films by scanning transmission electron microscopy. *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 122, no. 11, pp. 115304. <https://doi.org/10.1063/1.5002637>
21. Coombs J.H., Jongenelis A.P.J.M., van Es-Spiekman W., Jacobs B.A.J. Laser-induced crystallization phenomena in GeTe-based alloys. I. Characterization of nucleation and growth. *Journal of Applied Physics*, 1995, vol. 78, no. 8, pp. 4906–4917. <https://doi.org/10.1063/1.359779>
22. Wang W.J., Shi L.P., Zhao R., Lim K.G., Lee H.K., Chong T.C., Wu Y.H. Fast phase transitions induced by picosecond electrical pulses on phase change memory cells. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 93, no. 4, pp. 043121. <https://doi.org/10.1063/1.2963196>
23. Edwards A.H., Pineda A.C., Schultz P.A., Martin M.G., Thompson A.P., Hjalmarson H.P. Theory of persistent, p-type,

- Matter, 2005, vol. 17, no. 32, pp. L329–L335. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/32/L01>
24. Wuttig M., Bhaskaran H., Taubner T. Phase-change materials for non-volatile photonic applications // *Nature Photonics*. 2017, vol. 11, no. 8, pp. 465–476. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.126>
 25. Nevzorov A.A., Mikhalevsky V.A., Eliseev N.N., Kiselev A.V., Burtsev A.A., Ionin V.V., Maliutin A.M., Khmelenin D.N., Glebov V.N., Lotin A.A. Two-stage conductivity switching of GST thin films induced by femtosecond laser radiation // *Optics & Laser Technology*. 2023, vol. 157, p. 108773. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108773>
 26. Ovshinsky S.R. Optical cognitive information processing — a new field // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2004, vol. 43, no. 7S, p. 4695. <https://doi.org/10.1143/JJAP.43.4695>
 27. Huber E., Marinero E.E. Laser-induced crystallization of amorphous GeTe: A time-resolved study // *Physical Review B*. 1987, vol. 36, no. 3, pp. 1595–1604. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.36.1595>
 28. Kiselev A.V., Mikhalevsky V.A., Burtsev A.A., Ionin V.V., Eliseev N.N., Lotin A.A. Transmissivity to reflectivity change delay phenomenon observed in GeTe thin films at laser-induced reamorphization // *Optics & Laser Technology*. 2021, vol. 143, p. 107305. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107305>
 29. Hase M., Mizoguchi K., Nakashima S. Generation of coherent THz phonons in GeTe ferroelectrics // *Journal of Luminescence*. 2000, vol. 87–89, pp. 836–839. [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(99\)00433-0](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(99)00433-0)
 30. Nath P., Chopra K.L. Thermal conductivity of amorphous and crystalline Ge and GeTe films // *Physical Review B*. 1974, vol. 10, no. 8, pp. 3412–3418. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.3412>
 31. Andrikopoulos K.S., Yannopoulos S.N., Voyiatzis G.A., Kolobov A.V., Ribes M., Tominaga J. Raman scattering study of the a-GeTe structure and possible mechanism for the amorphous to crystal transition // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2006, vol. 18, no. 3, pp. 965–979. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/18/3/014>
 32. Burtsev A.A., Ionin V.V., Kiselev A.V., Eliseev N.N., Mikhalevsky V.A., Lotin A.A. Laser-induced crystallization kinetics of GeTe and Ge₂Sb₂Te₅ thin films // *Advanced Laser Technologies: Book of abstracts the 28th International Conference*. 2021, p. 81. <https://doi.org/10.24412/cl-35039-2021-21-81-81>
 33. Lu Q.M., Libera M. Microstructural measurements of amorphous GeTe crystallization by hot-stage optical microscopy // *Journal of Applied Physics*. 1995, vol. 77, no. 2, pp. 517–521. <https://doi.org/10.1063/1.359034>
 34. Orava J., Greer A.L. Classical-nucleation-theory analysis of priming in chalcogenide phase-change memory // *Acta Materialia*. 2017, vol. 139, pp. 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.08.013>
 - metallic conduction in c-GeTe. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2005, vol. 17, no. 32, pp. L329–L335. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/32/L01>
 24. Wuttig M., Bhaskaran H., Taubner T. Phase-change materials for non-volatile photonic applications. *Nature Photonics*, 2017, vol. 11, no. 8, pp. 465–476. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.126>
 25. Nevzorov A.A., Mikhalevsky V.A., Eliseev N.N., Kiselev A.V., Burtsev A.A., Ionin V.V., Maliutin A.M., Khmelenin D.N., Glebov V.N., Lotin A.A. Two-stage conductivity switching of GST thin films induced by femtosecond laser radiation. *Optics & Laser Technology*, 2023, vol. 157, p. 108773. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108773>
 26. Ovshinsky S.R. Optical cognitive information processing — a new field. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 43, no. 7S, pp. 4695. <https://doi.org/10.1143/JJAP.43.4695>
 27. Huber E., Marinero E.E. Laser-induced crystallization of amorphous GeTe: A time-resolved study. *Physical Review B*, 1987, vol. 36, no. 3, pp. 1595–1604. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.36.1595>
 28. Kiselev A.V., Mikhalevsky V.A., Burtsev A.A., Ionin V.V., Eliseev N.N., Lotin A.A. Transmissivity to reflectivity change delay phenomenon observed in GeTe thin films at laser-induced reamorphization. *Optics & Laser Technology*, 2021, vol. 143, pp. 107305. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107305>
 29. Hase M., Mizoguchi K., Nakashima S. Generation of coherent THz phonons in GeTe ferroelectrics. *Journal of Luminescence*, 2000, vol. 87–89, pp. 836–839. [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(99\)00433-0](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(99)00433-0)
 30. Nath P., Chopra K.L. Thermal conductivity of amorphous and crystalline Ge and GeTe films. *Physical Review B*, 1974, vol. 10, no. 8, pp. 3412–3418. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.3412>
 31. Andrikopoulos K.S., Yannopoulos S.N., Voyiatzis G.A., Kolobov A.V., Ribes M., Tominaga J. Raman scattering study of the a-GeTe structure and possible mechanism for the amorphous to crystal transition. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2006, vol. 18, no. 3, pp. 965–979. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/18/3/014>
 32. Burtsev A.A., Ionin V.V., Kiselev A.V., Eliseev N.N., Mikhalevsky V.A., Lotin A.A. Laser-induced crystallization kinetics of GeTe and Ge₂Sb₂Te₅ thin films. *Advanced Laser Technologies: Book of abstracts the 28th International Conference*, 2021, p. 81. <https://doi.org/10.24412/cl-35039-2021-21-81-81>
 33. Lu Q.M., Libera M. Microstructural measurements of amorphous GeTe crystallization by hot-stage optical microscopy. *Journal of Applied Physics*, 1995, vol. 77, no. 2, pp. 517–521. <https://doi.org/10.1063/1.359034>
 34. Orava J., Greer A.L. Classical-nucleation-theory analysis of priming in chalcogenide phase-change memory. *Acta Materialia*, 2017, vol. 139, pp. 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.08.013>

Авторы

Елисеев Николай Николаевич — младший научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», Шатура, Московская область, 140700, Российская Федерация, sc 57201774880, <https://orcid.org/0000-0002-8864-3961>, nikolai.eliseev@phystech.edu

Невзоров Алексей Алексеевич — научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», Шатура, Московская область, 140700, Российская Федерация, sc 57196274290, <https://orcid.org/0000-0001-5602-6355>, terrapevt@mail.ru

Михалевский Владимир Александрович — научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», Шатура, Московская область, 140700, Российская Федерация, sc 56623059300, <https://orcid.org/0000-0002-6234-1084>, uhr@inbox.ru

Киселев Алексей Владимирович — научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный

Authors

Nikolai N. Eliseev — Junior Researcher, Institute on Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences — Branch of Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Shatura, Moscow region, 149700, Russian Federation, sc 57201774880, <https://orcid.org/0000-0002-8864-3961>, nikolai.eliseev@phystech.edu

Alexey A. Nevzorov — Scientific Researcher, Institute on Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences — Branch of Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Shatura, Moscow region, 149700, Russian Federation, sc 57196274290, <https://orcid.org/0000-0001-5602-6355>, terrapevt@mail.ru

Vladimir A. Mikhalevsky — Scientific Researcher, Institute on Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences — Branch of Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Shatura, Moscow region, 149700, Russian Federation, sc 56623059300, <https://orcid.org/0000-0002-6234-1084>, uhr@inbox.ru

Alexey V. Kiselev — Scientific Researcher, Institute on Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences — Branch of Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics”

научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», Шатура, Московская область, 140700, Российская Федерация, [sc 57197540858](https://orcid.org/0000-0003-0292-9553), <https://orcid.org/0000-0003-0292-9553>, kiselev.ilit.ras@gmail.com

Бурцев Антон Андреевич — научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», Шатура, Московская область, 140700, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-0280-7943>, tonyiplit@gmail.com

Ионин Виталий Вячеславович — научный сотрудник, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», Шатура, Московская область, 140700, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-1253-2261>, IoninVV@gmail.com

Лотин Андрей Анатольевич — кандидат физико-математических наук, заместитель руководителя, Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН — филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук», Шатура, Московская область, 140700, Российская Федерация, [sc 26635531400](https://orcid.org/0000-0001-9051-7158), <https://orcid.org/0000-0001-9051-7158>, lotin_82@mail.ru

of the Russian Academy of Sciences, Shatura, Moscow region, 149700, Russian Federation, [sc 57197540858](https://orcid.org/0000-0003-0292-9553), <https://orcid.org/0000-0003-0292-9553>, kiselev.ilit.ras@gmail.com

Anton A. Burtsev — Scientific Researcher, Institute on Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences – Branch of Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Shatura, Moscow region, 149700, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0280-7943>, tonyiplit@gmail.com

Vitaliy V. Ionin — Scientific Researcher, Institute on Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences – Branch of Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Shatura, Moscow region, 149700, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1253-2261>, IoninVV@gmail.com

Andrey A. Lotin — PhD (Physics & Mathematics), Deputy Director for Science, Institute on Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences – Branch of Federal Scientific Research Center “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, Shatura, Moscow region, 149700, Russian Federation, [sc 26635531400](https://orcid.org/0000-0001-9051-7158), <https://orcid.org/0000-0001-9051-7158>, lotin_82@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31.05.2023
Одобрена после рецензирования 23.06.2023
Принята к печати 15.09.2023

Received 31.05.2023
Approved after reviewing 23.06.2023
Accepted 15.09.2023



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»