Интегральный субтерагерцовый волноводный реконфигурируемый аттенюатор на основе материала $Ge_2Sb_2Te_5$ с фазовой памятью

© С.В. Селиверстов[1,2,7], А.К. Кожуховский[1], Д.Г. Фудин[1], С.С. Святодух[1,3], П.И. Лазаренко[4], Д.Ю. Терехов[4], А.И. Проходцов[2], А.А. Невзоров[2], В.В. Светухин[5], В.В. Ковалюк[2,3], Г.Н. Гольцман[3,6]

[1] Московский педагогический государственный университет,
119991 Москва, Россия
[2] Лаборатория фотонных газовых сенсоров, Университет науки и технологий „МИСиС“,
115419 Москва, Россия
[3] Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“,
109028 Москва, Россия
[4] Национальный исследовательский университет „Московский институт электронной техники“,
124498 Москва, Россия
[5] Научно-производственный комплекс „Технологический центр“,
124498 Москва, Россия
[6] Российский квантовый центр, Москва, Территория инновационного центра „Сколково“,
143026 Москва, Россия
[7] Научно-исследовательский институт телекоммуникаций, МИЭМ НИУ ВШЭ,
123458 Москва, Россия

E-mail: sv.seliverstov@mpgu.su

Поступила в Редакцию 26 марта 2025 г.
В окончательной редакции 23 июня 2025 г.
Принята к публикации 23 июня 2025 г.

Использование халькогенидных полупроводниковых соединений, в частности материала Ge–Sb–Te с фазовой памятью, имеет важное значение для дальнейшего развития микро- и наноэлектроники, в том числе для создания пространственно-временны́х терагерцовых модуляторов для высокоскоростной беспроводной связи, элементов нейроморфной фотоники, метаматериалов для машинного обучения, а также плазмонных устройств и приложений, обеспечивающих хранение данных с возможностью их дальнейшей реконфигурации. В данной работе исследуется изменение проходящего через терагерцовый волновод сигнала в зависимости от фазового состояния тонкой пленки Ge–Sb–Te, покрывающей волновод. В рамках работы были изготовлены два варианта волноводов: безоболочечные и на основе эффективной среды. Материал фазовой памяти применялся для управления параметрами проходящего сигнала. В ходе экспериментов было установлено, что значение контраста в поглощении между аморфным и кристаллическим состояниями Ge–Sb–Te превышает 10 дБ для случая, когда ориентация вектора напряженности поля, распространяющегося по волноводу, перпендикулярно слою Ge–Sb–Te. Полученные результаты открывают возможность использования разработанных элементов в качестве реконфигурируемых аттенюаторов при создании устройств интегральной терагерцовой фотоники.

Ключевые слова: халькогенидные полупроводники, материал с фазовой памятью GST, терагерцовая фотоника, высокоомный кремний.

DOI: 10.61011/FTP.2025.02.60981.7743

1. Введение

Первая четверть XXI века ознаменовалась растущей потребностью в увеличении скорости беспроводной передачи данных вследствие прогресса в таких областях, как потоковое вещание видео высокого разрешения, интернет вещей, дополненная реальность, а также искусственный интеллект (ИИ). Одним из направлений решения этой задачи является развитие технологий передачи данных нового поколения (6G) в терагерцовом (ТГц) и субтерагерцовом (субТГц) диапазонах. В этом случае увеличение скорости передачи данных будет достигаться за счет увеличения частоты несущего сигнала. Использование возможностей ИИ здесь позволит дополнительно повысить скорость и качество за счет снижения ошибок при передаче, выявления признаков реальных событий из записанных сигналов и перераспределения аппаратных мощностей в реальном времени с целью оптимизации трафика и вычислений. Потенциал использования ИИ для беспроводной связи продемонстрирован на практике [1]. В частности, решение задачи оценки канала позволило повысить эффективность передачи данных в системах связи текущего и предыдущих поколений. Решение этой задачи еще более актуально для систем 6G, поскольку ТГц излучение, которое будет использоваться в этих системах, сильно поглощается в атмосфере водяным паром и поэтому будет иметь высокую направленность. Стоит отметить, что суще-

ствующие детерминированные алгоритмы оценки канала перестают быть эффективными, когда оптимизация проводится по большому количеству нелинейно связанных между собой параметров. В этом случае использование возможностей ИИ более чем оправданно [2].

Подобные системы на основе ИИ уже демонстрировались ранее [3]. В частности, методы, основанные на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС), уже показали отличную производительность в различных задачах беспроводной связи, таких как активное обнаружение пользователя (AUD), зондирование спектра и распределение ресурсов [4,5]. Кроме того, предпринимаются попытки использовать машинное обучение (МО) для решения задачи поиска и оценки беспроводного канала в миллиметровых (ММ) и ТГц системах с несколькими входами и несколькими выходами (MIMO), а также в системе V2X (Vehicle-to-Everytning — автомобиль, подключенный ко всему) [6]. В ответ на эту тенденцию консорциум, разрабатывающий спецификации для мобильной телефонии 3GPP, включил ИИ в качестве одного из основных компонентов в 5G Advanced системах [7].

Однако ранее предложенные решения основывались на использовании классической компьютерной архитектуры для реализации работы ИНС или на базе фотонных интегральных схем (ФИС) оптического диапазона. В первом случае существуют недостатки, связанные с неэффективностью и высоким энергопотреблением. Вторая реализация связана с необходимостью преобразования ТГц сигнала в оптическое излучение для реализации нейроморфных вычислений, а затем обратного преобразования из оптического в ТГц диапазон. Это существенно усложняет готовое устройство, снижает его работоспособность, а также увеличивает конечную стоимость.

В случае приложений 6G переход в оптический диапазон является излишним, так как возможна работа исключительно в ТГц области. Таким образом, исследование возможностей применения ТГц интегральных схем для физической реализации нейроморфных вычислений в системах 6G коммуникаций является актуальной научной задачей, ведь она связана с исследованием физических механизмов, которые могут быть использованы для аппаратной реализации работы будущих субТГц ИНС на базе интегральных волноводных схем.

Базовой операцией, необходимой для работы ИНС, является скалярное произведение двух векторов. Реализация этой операции с использованием классических электронных устройств (транзисторных микросхем) связана с высоким энергопотреблением. В оптическом диапазоне показано, что фотонный чип, выполняющий операцию скалярного произведения векторов, потребляет минимальное количество энергии. Не менее перспективным кандидатом в этом отношении является ТГц диапазон. Использование ИНС, реализованных в аппаратной части на базе ТГц интегральных фотонных схем, позволит проводить требуемые вычисления „на лету“ практически без потребления энергии, а также без необходимости хранения промежуточных результатов вычислений (так называемые „туманные вычисления“) [8]. При этом вычисления будут производиться внутри ТГц диапазона, без необходимости конвертации в оптический и обратно, что позволит существенно упростить готовое устройство и снизить его конечную стоимость.

Применение систем ИИ на классической компьютерной архитектуре для решения задачи поиска и оценки канала успешно продемонстрировано в текущих и предшествующих поколениях систем беспроводной связи [2]. Реализация нейроморфных вычислений на базе ФИС оптического диапазона также широко представлена в литературе [9].

Скалярное произведение предполагает использование двух арифметических операций: сложения и умножения. Теоретически показано, что реализация этих операций может быть достигнута с использованием двух активных элементов в фотонной схеме, а именно аттенюатора и фазовращателя [10]. При этом аттенюатор может быть реализован за счет использования интерферометра Маха-Цендера, в одно из плеч которого встроен фазовращатель, а фаза сигнала на выходе интерферометра подстраивается другим фазовращателем так, чтобы сигналы на выходе каждой линии вычислительного чипа были синфазными. Подобная когерентная реализация в оптическом диапазоне уже была продемонстрирована ранее [11]. Однако не всегда подобный подход является оправданным, поскольку он усложняет конечную конструкцию. Полезно иметь в арсенале аттенюатор в качестве отдельного базового интегрально-оптического компонента.

Цель данной работы — создание реконфигурируемого волноводного ТГц аттенюатора на основе полностью диэлектрических интегральных волноводных структур, аттенюация в которых осуществляется за счет материала с фазовой памятью $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST).

2. Материалы и методы

Использование халькогенидных полупроводниковых соединений, в частности материала GST с фазовой памятью, имеет важное значение для дальнейшего развития ТГц микро- и наноэлектроники, в том числе для создания пространственно-временны́х ТГц модуляторов для высокоскоростной беспроводной связи, элементов нейроморфной фотоники, метаматериалов для машинного обучения, а также плазмонных устройств и приложений, обеспечивающих хранение данных с возможностью их дальнейшей реконфигурации [12]. Материалы с фазовой памятью на основе халькогенидных полупроводниковых соединений, в частности GST, широко используются в интегральной фотонике, работающей в C-диапазоне (~ 1.55 мкм) [13]. Дальнейшее развитие науки и промышленности, обеспечиваемое фотонными

интегральными схемами, связано с прогрессом в понимании физики работы этих материалов и их продвижением в другие части электромагнитного спектра. Это связано с уникальными свойствами материала GST, который способен переключаться между аморфным и кристаллическим состояниями с существенно различными оптическими и электрическими свойствами. В этом случае состояние можно переключать с помощью лазера, простого нагрева или электрического тока [14]. Важно, что приобретенное состояние может сохраняться в течение неопределенно длительного периода при комнатной температуре. Подробно изучены свойства GST в C-диапазоне, который широко используется в телекоммуникационных приложениях.

ТГц диапазон в этом отношении еще более привлекателен. В последнее время этот диапазон привлекает к себе повышенное внимание исследователей и разработчиков по всему миру в связи с необходимостью его использования для разработки приложений, связанных с системами передачи данных следующего поколения в ТГц диапазоне (6G) со сверхвысокой скоростью передачи данных. Следует отметить, что физика работы GST в ТГц диапазоне отличается от таковой в C-диапазоне, поскольку энергия ТГц квантов меньше энергетической щели GTS, которая составляет 0.7 и 0.4 эВ в аморфном и кристаллическом состоянии соответственно [15]. Из-за этого, в частности, контраст в поглощении материала в ТГц диапазоне при изменении фазового состояния GST должен быть более выраженным, чем в оптическом диапазоне, что подтверждают ранее опубликованные работы.

Потенциал использования GST в интегральной ТГц фотонике уже был ранее продемонстрирован на практике [16]. С помощью представленного метаматериала удалось осуществить сверхбыструю оптическую модуляцию ТГц резонансов с настраиваемой скоростью переключения. Поглощающие свойства GST в ТГц диапазоне также были исследованы [13]. В частности, было показано, что действительная и мнимая части показателя преломления, а также диэлектрическая проницаемость увеличиваются с ростом температуры отжига. Существенные различия в поглощении и проводимости материала GST в ТГц диапазоне были обнаружены также при переключении между кубической и гексагональной кристаллическими фазами, тогда как при переключении между аморфной и кубической фазами изменения этих свойств были существенно ниже.

В данной работе охарактеризован интегрированный аттенюатор, включающий в свой состав тонкую (толщиной 170 нм) пленку GST, нанесенную на поверхность полностью диэлектрического ТГц волновода, изготовленного из высокоомной (удельное сопротивление > 3 кОм $\cdot$ см) кремниевой (Si) подложки толщиной 400 мкм.

В рамках работы были изготовлены два варианта волноводов: безоболочечные и на основе эффективной среды. В первом варианте ядро волновода вытравливалось из высокоомной Si-подложки и подвешивалось на штырях толщиной 100 мкм к Si-остову. Во втором варианте ядро волновода было сформировано путем формирования отверстий с обеих сторон от него. Эффективный показатель преломления в области отверстий был меньше показателя преломления Si. Подробнее об этом типе волновода можно прочитать в наших предыдущих публикациях [17,18]. Ширина ядра волновода в обеих конфигурациях составила 585 мкм, что соответствует длине волны излучения в Si. Расстояние между отверстиями и их диаметр составляли 165 и 73 мкм соответственно. Согласование диэлектрического волновода с полым металлическим волноводом осуществлялось с помощью конуса длиной 3.5 мм и шириной вершины в 100 мкм. Чертежи структур обеих конфигураций представлены на рис. 1.

В эксперименте в качестве источника излучения, обеспечивающего работу в диапазоне 126.5–145.5 ГГц, использовалась лампа обратной волны. В качестве детектора использовался диод Шоттки. Состояние GST переводилось из аморфного в кристаллическое с помощью нагрева. Для этого образцы подвергались отжигу при температуре 200 °C в течение 15 мин в потоке аргона на температурном столике Linkam HFS600E-PB4.

Изготовление структур осуществлялось в несколько этапов. На первом этапе на пластины монокристаллического высокоомного Si наносился фоторезист для создания меток совмещения. В качестве позитивного фоторезиста был выбран ФП-2514. На следующем этапе процесс фотолитографии проводился на установке масочной фотолитографии MJB4 или безмасочной фотолитографии MLA100 в зависимости от наличия необходимого фотошаблона. После этого подложки погружались в слабощелочной раствор гидроксида калия (KOH 0.8 %) для проявления экспонированного фоторезиста. Затем подложка с проявленным фоторезистом исследовалась на наличие дефектов с помощью оптической микроскопии. При отсутствии дефектов подложка помещалась в установку электронно-лучевого испарения (Evatec BAK 501/800), где на нее в окна в фоторезисте наносился тонкий слой золота. Этап нанесения меток на подложку завершался смывкой фоторезиста в теплом ацетоне. Далее проводилось формирование волноводных структур. Для этого на поверхность Si наносилась маска из хрома, после чего с помощью фотолитографии задавалась топология волноводной структуры. Маска из Cr вытравливалась в окнах фоторезиста, обнажая поверхность Si. Наконец, Si вытравливался по всей толщине подложки с помощью глубокого реактивного ионного травления (процесс Bosch). Остатки маски из Cr удалялись в жидком травителе Cr.

Эксперименты с прямыми волноводными секциями проводились в двух вариантах: с возбуждением волновых мод с направлением вектора напряженности электрического поля вдоль $\parallel$ и перпендикулярно $\perp$ плоскости подложки. Возбуждение нужной моды в волноводе

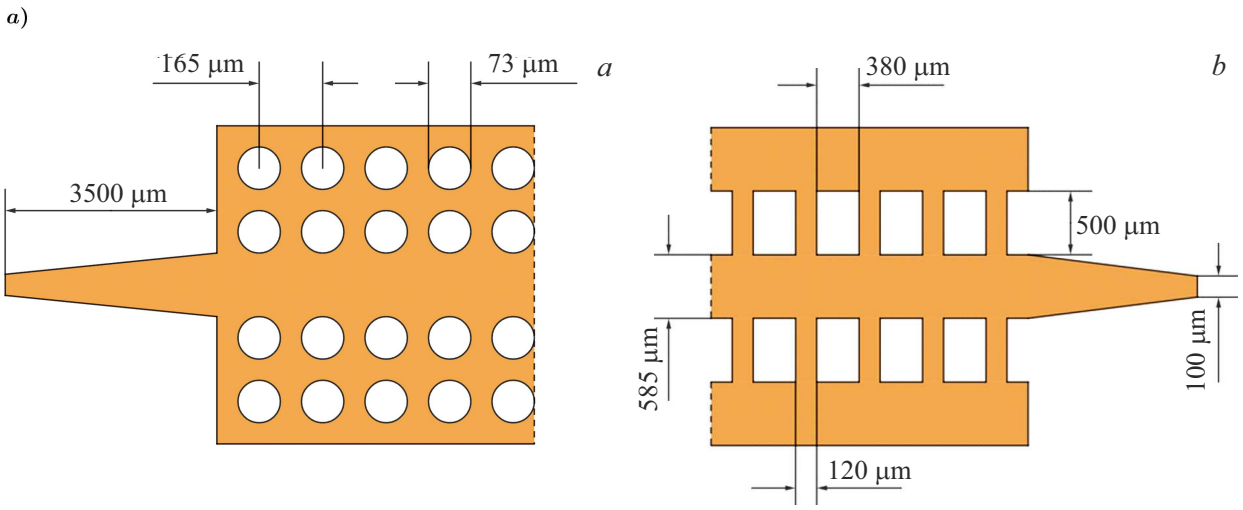

Рис. 1. Геометрия изготовленных интегральных волноводных структур: *a* — волноводы с эффективной средой; *b* — безоболочечные волноводы, подвешенные на перемычках.

осуществлялось за счет необходимой ориентации прямоугольного волновода относительно диэлектрического волновода (широкая сторона пóлого металлического волновода была параллельна плоскости подложки при перпендикулярном возбуждении и наоборот).

3. Моделирование и эксперимент

В первую очередь нами была определена длина перемычки, обеспечивающая минимальные потери на распространение для подвешенных волноводов при одной и той же ширине в 100 мкм с помощью соответствующего электромагнитного моделирования методом конечных элементов. Полученные результаты показаны на рис. 2.

Из графиков видно, что при всех длинах перемычек коэффициент пропускания волноводов увеличивается с ростом частоты, но для волноводов с короткими перемычками наблюдается более резкое падение коэффициента пропускания на низких частотах. На самой высокой частоте пропускание обоих типов волноводов становится примерно одинаковым. Мы связываем это с тем, что с ростом частоты мода излучения, распространяющаяся по волноводу, становится более локализованной в его сердцевине. Поэтому затухающая мода перестает перетекать в Si-берега, как это происходит в волноводах с короткими перемычками на низких частотах, для которых эти берега близки к сердцевине волновода.

После определения длины перемычек (500 мкм) для конструкции волноводов без оболочки мы исследовали спектры пропускания волноводов, покрытых тонкими пленками материала GST. Пленки GST наносились на поверхность волноводных структур методом магнетронного распыления поликристаллической мишени в вакуумной камере. Технологические детали процесса изготовления пленок GST можно найти в нашей предыдущей

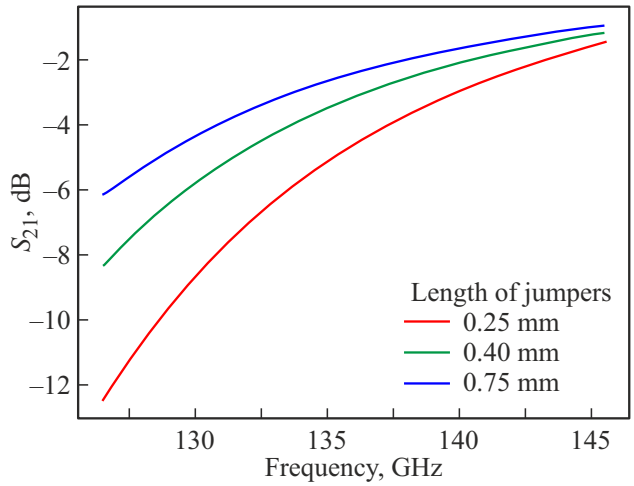

Рис. 2. Результаты моделирования коэффициентов проводимости безоболочечных интегральных волноводов при различных значениях длины перемычек, подвешивающих ядро волновода к кремниевому остову.

публикации [19]. Согласно данным рамановской спектроскопии и рентгеновской дифракции, исходные пленки GST были аморфными. Толщина и шероховатость поверхности осажденных пленок GST составляли ~ 170 нм и < 1 нм соответственно.

Измерения проводились для двух фаз GST (аморфной и кристаллической) и для двух поляризаций. В первом случае вектор напряженности электрического поля в возбуждающем прямоугольном волноводе был направлен перпендикулярно плоскости диэлектрической подложки волновода, а во втором — параллельно.

Результаты, нормированные на пропускание Si-волновода без нанесенного на него слоя GST, показаны на рис. 3. Полученное значение контраста пропускания

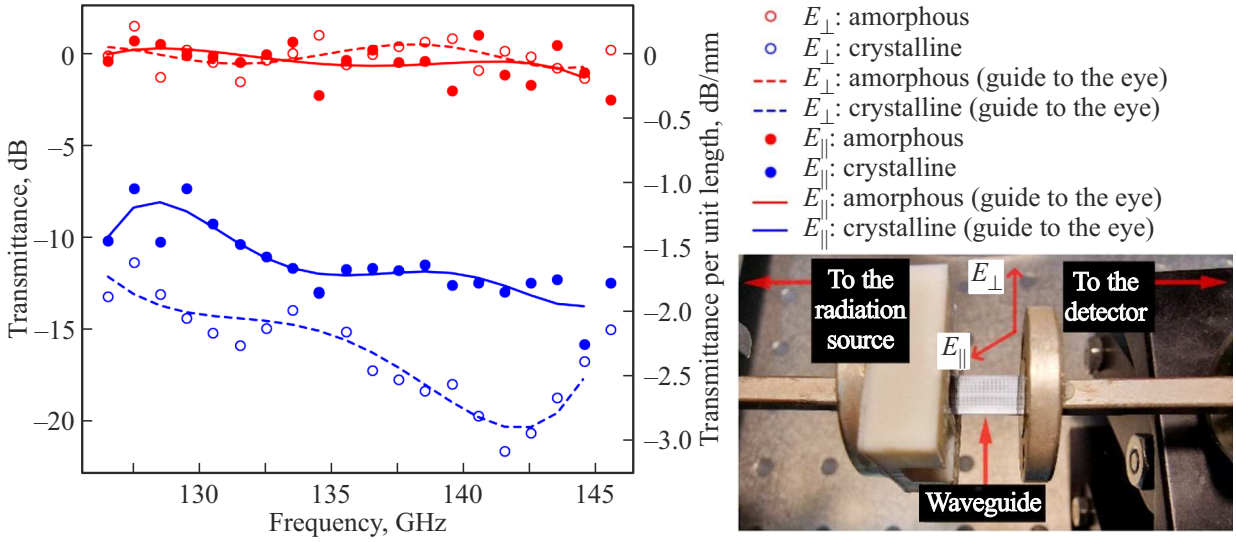

Рис. 3. Спектры пропускания кремниевого волновода при различных фазовых состояниях поверхностного слоя GST и различных поляризациях излучения.

между двумя состояниями GST превышает 10 дБ для случая ориентации вектора электрического поля, распространяющегося вдоль волновода, перпендикулярно слою GST. Измеренное значение возвратных потерь волноводных структур с нанесенным на их поверхность слоем GST, находящимся в кристаллическом состоянии, составило 10.7 дБ на частоте излучения 145.5 ГГц. Полученный результат позволяет утверждать, что уменьшение коэффициента пропускания при переходе состояния GST из аморфного в кристаллическое определяется преимущественно поглощением, а не отражением. Это поглощение ТГц излучения происходит на свободных носителях, концентрация которых существенно зависит от фазового состояния GST [12]. Из рисунка видно, что разница в поглощении для двух взаимно перпендикулярных ориентаций вектора E в волне, распространяющейся по волноводу, значительна и составляет 7.3 дБ на частоте излучения 140 ГГц.

Этот результат в целом согласуется с результатами, полученными в оптическом диапазоне для аналогичных структур. Например, ранее было показано, что эффективный показатель преломления диэлектрического волновода, оптимизированного для длины волны 1.55 мкм с тонким слоем GST на поверхности волновода, зависит от фазового состояния материала [20]. При этом наблюдается и существенное различие в пространственном распределении поля волны для двух взаимно перпендикулярных поляризаций. Так, для поляризации E-вектора перпендикулярно поверхности волновода ($E_\perp$ в наших обозначениях) при кристаллическом состоянии GST поле сильнее концентрируется вблизи поверхности волновода, что и объясняет более сильное поглощение в этом случае. Такое резкое „втягивание“ волновой моды на длине волны 1.55 мкм в слой GST объясняется высоким значением показателя преломления в кристаллическом состоянии.

В ТГц диапазоне ситуация существенно иная, так как длина волны более чем на 3 порядка выше, а слой GST, по сути, двумерен. Стоит отметить, что заявленный в предыдущих публикациях механизм поглощения GST сводится к увеличению концентрации свободных носителей заряда при переходе из аморфного состояния в кристаллическое [12]. При этом разница в коэффициенте поглощения для двух взаимно перпендикулярных поляризаций проходящего через волновод излучения объясняется особенностями пространственного распределения волновой моды с поляризацией вектора E перпендикулярно слою GST (мода TM), которая в большей степени сосредоточена на верхней и нижней краях волновода, чем для случая колебаний вектора E в плоскости, коллинеарной плоскости слоя GST (мода TE), которая в большей степени сосредоточена на боковых поверхностях волновода, где отсутствует слой GST.

Полученные результаты подтверждают возможность использования исследованных структур в приложениях, связанных с нейроморфной ТГц фотоникой. Стоит отметить, что существует множество других материалов с фазовой памятью, помимо GST. В качестве материалов фазовой памяти могут использоваться различные халькогенидные материалы, например, Sb_2Se_3, Sb_2S_3, GeTe, Ge–Sb–Se–Te и т. д. Однако по сравнению с ними материал GST имеет ряд преимуществ, среди которых высокая скорость записи и чтения [21], высокое количество циклов переключения фазы без деградации характеристик материала [22], хорошая масштабируемость и низкое энергопотребление [23], а также возможность многоуровневого хранения данных [24]. Эти свойства делают GST особенно подходящим для приложений энергонезависимой памяти.

4. Заключение

В заключение отметим, что в ходе работы был разработан и изготовлен волноводный реконфигурируемый аттенюатор с тонким слоем GST, нанесенным на поверхность сердечника волновода. Исследованы поглощающие свойства материала с фазовой памятью в ТГц диапазоне в аморфном и кристаллическом состояниях. Выявлены различия в коэффициенте поглощения для двух различных поляризаций ТГц излучения, распространяющегося по волноводу. Полученные результаты позволяют значительно расширить возможности создаваемых в настоящий момент устройств, относящихся к будущим системам ТГц связи, нейроморфным вычислениям на ТГц интегральных схемах, а также плазмонным устройствам и устройствам хранения данных.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-79-10322, https://rscf.ru/project/20-79-10322/ (напыление пленок GST и их экспериментальное исследование), Министерства образования и науки, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSME-2025-0002) (изготовление ФИС), а также в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ (экспериментальное исследование спектров пропускания интегральных волноводов).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] T. Erpek, T.J. O'Shea, Y.E. Sagduyu, Y. Shi, T.C. Clancy. *Development and Analysis of Deep Learning Architectures*, 223 (2020).
[2] W. Kim, Y. Ahn, J. Kim, B. Shim. B. J. Commun. Networks, **25** (1), 61 (2023).
[3] W. Xia, S. Rangan, M. Mezzavilla, A. Lozano, G. Geraci, V. Semkin, G. Loianno. IEEE Trans. Wireless Commun., **21** (11), 9417 (2022).
[4] H. Ju, S. Kim, Y. Kim, B. Shim. IEEE Trans. Wireless Commun., **21** (8), 6539 (2022).
[5] K. Suh, S. Kim, Y. Ahn, S. Kim, H. Ju, B. Shim. IEEE Access, **10**, 7384 (2022).
[6] X. Ma, Z. Gao, F. Gao, M. Di Renzo. IEEE J. Select. Areas Commun., **39** (8), 2388 (2021).
[7] A. Manoj, A.P. Kannu. IEEE Trans. Commun., **66** (11), 5678 (2018).
[8] Resul Das, Muhammad Inuwa. Telematics and Informatics Rep., **10**, 100049 (2023).
[9] B.J. Shastri, A.N. Tait, T. Ferreira de Lima, W.H. Pernice, H. Bhaskaran, C.D. Wright, P.R. Prucnal. Nature Photonics, **15** (2), 102 (2021).
[10] D.A. Miller. Optica, **2** (8), 747 (2015).
[11] S. Xu, J. Wang, H. Shu, Z. Zhang, S. Yi, B. Bai, X. Wang, J. Liu, W. Zou. Light: Sci. Appl., **10** (1), 221 (2021).
[12] K. Makino, K. Kato, Y. Saito, P. Fons, A.V. Kolobov, J. Tominaga, T. Nakano, M. Nakajima. J. Mater. Chem. C, **7** (27), 8209 (2019).
[13] C. Ríos, M. Stegmaier, P. Hosseini, D. Wang, T. Scherer, C.D. Wright, H. Bhaskaran, W. Pernice. Nature Photonics, **9** (11), 725 (2015).
[14] Y.G. Jeong, Y.M. Bahk, D.S. Kim. Adv. Optical Mater., **8 P.I.**(3), 1900548 (2020).
[15] P.I. Lazarenko, Y.V. Vorobyov, M.E. Fedyanina, A.A. Sherchenkov, S.A. Kozyukhin, A.O. Yakubov, A.V. Kukin, Yu.S. Sybina, I.V. Sagunova. Inorganic Mater.: Appl. Res., **11**, 330 (2020).
[16] P. Pitchappa, A. Kumar, S. Prakash, H. Jani, T. Venkatesan, R. Singh. Advanced Mater., **31** (12), 1808157 (2019).
[17] S. Seliverstov, S. Svyatodukh, G. Goltsman. Appl. Phys. Lett., **123** (9), 090501 (2023).
[18] S. Seliverstov, A. Kozhukhovsky, S. Svyatodukh, G. Goltsman. Appl. Phys. Lett., **124** (12), 121106 (2024).
[19] P. Lazarenko, V. Kovalyuk, P. An, A. Prokhodtsov, A. Golikov, A. Sherchenkov, S. Kozyukhin, I. Fradkin, G. Chulkova, G. Goltsman. APL Materials, **9** (12), 121104 (2021).
[20] E. Menshikov, P. Lazarenko, V. Kovalyuk, S. Dubkov, N. Maslova, A. Prokhodtsov, A. Vorobyov, S. Kozyukhin, G. Goltsman, I.S. Sinev. ACS Appl. Mater. Interfaces, **16** (29), 38345 (2024).
[21] P. Guo, A.M. Sarangan, I. Agha. Appl. Sci., **9** (3), 530 (2019).
[22] D. Lawson, S. Blundell, M. Ebert, O.L. Muskens, I. Zeimpekis. Optical Mater. Express, **14** (1), 22 (2023).
[23] W. Zhou, Z. Zhang, Q. Zhang, D. Qi, T. Xu, S. Dai, X. Shen. Micromachines, **12** (6), 616 (2021).
[24] C. Zhang, M. Wei, J. Zheng, S. Liu, H. Cao, Y. Huang, Y. Tan, M. Zhang, Y. Xie, Z. Yu, J. Li, H. Ye, L. Li, H. Lin, H. Li, Y. Shi, L. Liu, D. Dai. Adv. Optical Mater., **11** (8), 2202748 (2023).

Редактор Г.А. Оганесян

Integrated sub-terahertz waveguide reconfigurable attenuator based on $Ge_2Sb_2Te_5$ phase-change material

S.V. Seliverstov[1,2,7], *A.K. Kozhukhovsky*[1], *D.G. Fudin*[1], *S.S. Svyatodukh*[1,3], *P.I. Lazarenko*[4], *D.Yu. Terekhov*[4], *A.I. Prokhodtsov*[2], *A.A. Nevzorov*[2], *V.V. Svetukhin*[5], *V.V. Kovalyuk*[2,3], *G.N. Goltsman*[3,6]

[1] Moscow State Pedagogical University,
119991 Moscow, Russia
[2] Laboratory of Photonic Gas Sensors,
University of Science and Technology MISIS,
115419 Moscow, Russia
[3] National Research University Higher School of Economics, 109028 Moscow, Russia
[4] National Research University of Electronic Technology, 124498 Moscow, Russia
[5] Scientific Manufacturing Complex „Technological Center“, 124498 Moscow, Russia
[6] Quantum Photonic Integrated Circuits Group,
Russian Quantum Center Skolkovo,
143026 Moscow, Russia
[7] Telecommunications R&D Institute, MIEM,
Tallinskaya str. 34, HSE University,
123458 Moscow, Russia

Abstract The use of chalcogenide semiconductor compounds, in particular the Ge–Sb–Te material with phase memory, is of great importance for the further development of terahertz micro- and nanoelectronics, including the creation of spatiotemporal terahertz modulators for high-speed wireless communications, elements of neuromorphic photonics, metamaterials for machine learning, as well as plasmonic devices and applications that provide data storage with the possibility of their subsequent reconfiguration. In this paper, we study the change in the signal passing through the terahertz waveguide depending on the phase state of the Ge–Sb–Te thin film covering the waveguide. In this work, two versions of waveguides were manufactured: unclad and based on an effective medium. The phase memory material was used to control the parameters of the transmitted signal. During the experiments it was found that the value of the absorption contrast between the amorphous and crystalline states of Ge–Sb–Te exceeds 10 dB for the case when the orientation of the electric field vector of the wave propagating along the waveguide is perpendicular to the Ge–Sb–Te layer. The obtained results open up the possibility of using the developed elements as reconfigurable attenuators in the creation of integrated terahertz photonics devices.