

УДК 681.7.068

А.Н. Качемцев, И.В. Скрипачев, Г.Е. СнопатинИнститут химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых
Российской академии наук**ИК-СВЕТОВОДЫ НА ОСНОВЕ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ
СТЕКЛОЛ: ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПРИМЕНЕНИЕ,
РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ**

Проведен анализ современного состояния технологии, перспектив разработки и применения волоконных световодов, изготовленных из халькогенидных стекол, имеющих минимальное затухание на длинах волн от 2 до 15 мкм (ближний и средний ИК-диапазоны). Рассмотрены литературные данные о влиянии облучения сульфидно-мышьяковых световодов потоками гамма-квантов, электронов, нейтронов на характеристики оптических волокон. Проанализированы области возможного использования халькогенидных световодов в условиях радиационного воздействия.

Ключевые слова: радиационная стойкость, инфракрасное излучение, световод, оптические потери, халькогенид, сульфид мышьяка

A.N. Kachemtsev, I.V. Skripachev, G.E. SnopatinInstitute of Chemistry of High-Purity
Substances named after G.G. Deviatich
of the Russian Academy of Sciences**INFRARED FIBER BASED ON CHALCOGENIDE GLASSES:
CHARACTERISTICS, APPLICATION, RADIATION RESISTANCE**

The analysis of the current state of technology, prospects for the development and application of fiber light guides made of chalcogenide glasses with minimal attenuation at wavelengths from 2 to 15 microns (near and medium IR ranges) is carried out. The literature data on the effect of irradiation of sulfide-arsenic light guides by gamma-quantum, electron, and neutron fluxes on the characteristics of optical fibers are considered. The areas of possible use of chalcogenide light guides in conditions of radiation exposure are analyzed.

Keywords: radiation resistance, infrared radiation, light guide, optical losses, chalcogenide, arsenic sulfide.

Интерес к исследованию материалов, имеющих диапазон оптической прозрачности в области длин волн ИК-излучения более 2 мкм, пригодных для изготовления волоконных световодов, возник в конце 70-х гг. прошлого века, хотя «первые публикации об изготовлении и использовании волоконных ИК-световодов на основе

халькогенидных стекол относятся к 1960 г.» [1]. Именно в это время бурно и успешно развивалась волоконная оптика на основе высокочистого кварцевого стекла. От теоретических работ [2, 3], обосновавших требования к параметрам диэлектрического волновода, которые обеспечивали возможность организации линии связи с применением такого изделия, до промышленного производства оптических кабелей со световодами из чистого кварцевого стекла прошло менее 5 лет [4]. Потери в кварцевых световодах были уменьшены до уровня ~ 20 дБ/км, что привело к огромному прогрессу во всех областях волоконной оптики. В 1980-х годах оптическая связь стала возможной с использованием многомодовых волокон из силикатного стекла в ближнем ИК-диапазоне 0,8...0,9, 1,3 и 1,55 мкм, а также одномодовых волокон, работающих на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм. Были введены в эксплуатацию коммерческие волоконно-оптические системы связи. Как отмечалось в 2010 г., «...скорость передачи информации в коммерческих системах связи, в том числе в трансокеанских подводных системах, составляет величину 1 – 2 Терабит/с по одному волоконному световоду. В экспериментальных системах достигнута скорость передачи информации 25 Терабит/с. Используется спектральное уплотнение каналов с передачей по одному волоконному световоду порядка 100 каналов с отличающимися длинами волн несущего излучения, причем скорость передачи информации одного канала составляет 10 Гбит/с. Полная спектральная область, используемая для передачи информации в таких системах, составляет около 80 нм (1,53–1,61 мкм), что определяется полосой усиления эрбиевого волоконного усилителя. Все континенты связаны подводными волоконно-оптическими кабелями связи, общая длина которых составляет 600 000 км (достаточно, чтобы обмотать земной шар 15 раз). Общая длина волоконных световодов в наземных сетях волоконно-оптической связи составляет 10^9 км. Ожидается, что к 2015 г. эта цифра удвоится. В настоящее время мировое производство волоконных световодов превышает 100 млн км в год.» [5].

Технология изготовления волокон обеспечила достижение потерь в доли дБ/км на длинах волн ближнего инфракрасного диапазона. Потери в этих волокнах при 1,55 мкм составляют около 0,2 дБ/км, что очень близко к пределу собственных потерь стекла из оксидов германия и кремния. Однако снизить оптические потери в таких

волокнах на уровень менее 0,1 дБ/км, а также расширить диапазон спектральной прозрачности кварца в область среднего и дальнего ИК-диапазона невозможно по фундаментальным причинам.

Окно прозрачности диэлектрических материалов, в том числе и халькогенидных стекол, определяется тремя физическими явлениями: электронным поглощением на коротких длинах волн, многофотонном поглощением при увеличении длины волны фотона и рэлеевским рассеянием в середине спектрального диапазона. На рис. 1 из работы [6] представлены обобщенные расчетные данные о характере спектра поглощения в твердых веществах для различной энергии оптического излучения. Для халькогенидных стекол характерно наличие дополнительного механизма поглощения энергии – это так называемый хвост слабого поглощения, который обычно превышает потери от рэлеевского рассеяния, который также показан на рис. 1. Сравнение спектральных зависимостей собственных оптических потерь в материалах для волоконной оптики приведено на рис. 2 [7]. Очевидно, что при увеличении длины волны ИК-излучения выше 2,0 мкм теоретически достижимые потери в волокне из кварцевого стекла не менее единиц дБ/км с последующим резким ростом до сотен децибел. Использование таких световодов для передачи сигнала в диапазоне среднего ИК-излучения практически невозможно.

В середине XX в. был открыт новый класс полупроводниковых материалов – халькогенидных стекол, обладавших широким спектром пропускания излучений [8, 9]. Одновременно с работами по кварцевым стеклам были предприняты попытки создать оптические волокна из материалов, область высокой прозрачности которых лежит в средней ИК-области, поскольку именно здесь могли быть достигнуты еще более низкие оптические потери в световоде – на уровне 0,01 дБ/км и ниже [7]. В данной работе [7] были ретроспективно рассмотрены различные материалы для световодов от ранних работ 1960-х гг. по оксидному стеклу, халькогенидному стеклу и кристаллическим галогенидам, которые привели к появлению современной волоконной оптики до флюоридных многокомпонентных стекол, а также были сформулированы идеи для дальнейших исследований в области среднего ИК-диапазона и стекол дальнего ИК-диапазона, а также световодов с поллой сердцевиной и кристаллических волокон.

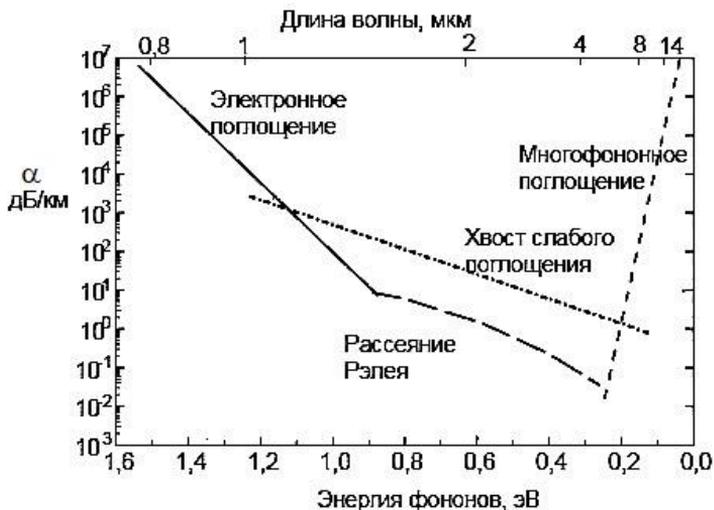


Рис. 1. Предельные значения оптической прозрачности α (дБ/км) твердых материалов в зависимости от энергии фотонов (длины волны излучения) по результатам расчетов [6]

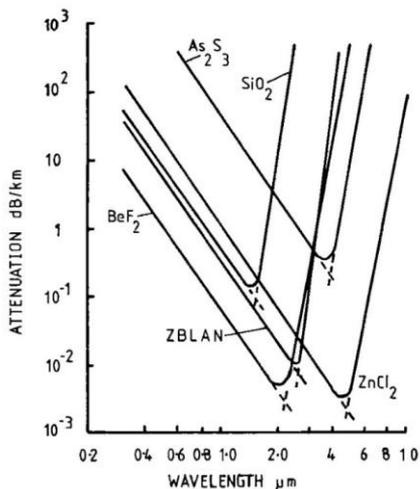


Рис. 2. Собственные оптические потери в различных материалах

На рис. 3 из работы [10] приведены спектры потерь для оптических волокон (сплошные кривые) и полых световодов (пунктирные кривые) из различных материалов, применяемых в ИК-оптике. Данные приведены для образцов длиной 1 м. Уровень оптических потерь для кварца близок к теоретическому пределу, за

исключением пиков затухания, обусловленных наличием примесей в материале заготовок световода. Наличие других химических элементов, являющихся примесями для основного материала, приводит к появлению дополнительных потерь в световоде за счет поглощения оптической энергии в так называемых «центрах окраски». Основной пик затухания в области 1,3 мкм связан с влиянием на поглощение ионов OH^- . Затухание в световодах из халькогенидных стекол (As_2S_3 и GeSeTe) на три порядка больше для своих спектральных диапазонов. Еще большие потери имели кристаллические и полые световоды (сапфир, галогениды серебра). Наилучшие результаты были достигнуты на флюоридных волокнах типа ZBLAN. Однако, если сравнивать рис. 2 и 3, то и они были далеки от теоретически предсказанных значений.

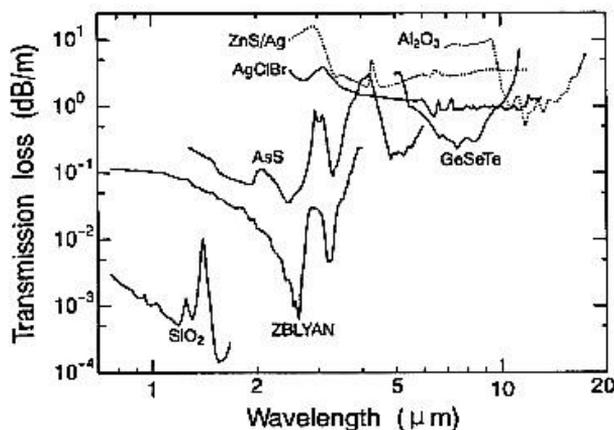


Рис. 3. Типичные спектры потерь, которые были получены в конце XX в. и соответствовали уровню технологии того времени для различных типов световодов [10]

Практически в это же время сотрудниками ИОФ АН (г. Москва) теоретически, а затем и экспериментально была обоснована возможность использования стеклообразных соединений мышьяка: As_2S_3 и As_2Se_3 – для создания световодов с высокой пропускной способностью и низким собственным затуханием [11]. Результаты этой работы представлены на рис. 4. Теоретические ожидаемые потери в сульфиде и селениде мышьяка имеют минимальное значение на уровне $\sim 10^{-2}$ дБ/км. Область прозрачности селенида мышьяка больше, чем у

сульфида мышьяка. Эти данные соответствуют результатам, приведенным на рис. 1 и 2. При этом разница с экспериментальными данными по спектру поглощения образцов халькогенидного световода (см. рис. 4) составляет шесть порядков.

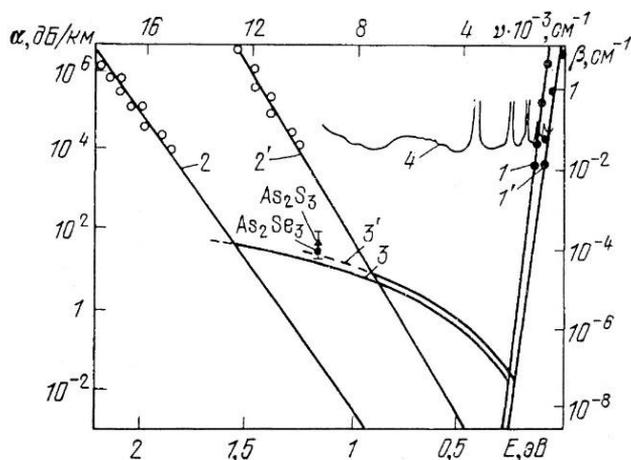


Рис. 4. Собственные оптические потери в халькогенидных стеклах As_2S_3 и As_2Se_3 , расчетные и экспериментальные данные [11]: 1, 1' – край ИК-поглощения; 2, 2' – край коротковолнового поглощения; 3, 3' – потери на релеевское рассеяние; 4 – спектр поглощения световода As_2Se_3 – As_2S_3 ; точки – экспериментальные данные; данные для As_2Se_3 помечены '

Как отмечалось выше, область спектральной прозрачности любого твердого материала определяется тремя физическими явлениями. Однако необходимо отметить значительно большую роль релеевского рассеяния как фактора, ограничивающего пропускание световода из халькогенидных стекол в коротковолновой части спектра, по сравнению со стеклами на основе оксидов кремния и германия.

В работах [12, 13] сообщалось о получении многомодового волоконного световода из сульфида мышьяка с оптическими потерями 12 и 14 дБ/км на длинах волн 3 и 4,8 мкм соответственно, что и на сегодняшний день является лучшим результатом, опубликованным в литературе для оптических волокон из халькогенидного стекла. На рис. 5 представлен спектр оптических потерь волокна из сульфида мышьяка, которое изготавливается в ИХВВ РАН (г. Нижний Новгород). В институте разработана и реализована технология изготовления волоконных световодов вытяжкой расплава из тигля [14],

обеспечивающая стабильное и воспроизводимое получение световодов с рекордными характеристиками. При изготовлении волоконных световодов вытяжкой расплава из тигля формируется структура волокна, параметры которой определяются давлением газов на расплавы стекол и конструктивными характеристиками тигля. Также в процессе вытяжки на боковую поверхность световодов наносится полимерное покрытие, которое защищает волокно от механических повреждений, проникновения агрессивных газов, воды и обеспечивает сохранение его прочности. Для защиты применяют полимерные покрытия: фторопласт Ф-42, полиакрилатный лак, кремний-органический эластомер СИЭЛ 159-254. Данная технология обеспечивает получение многомодовых и одномодовых световодов с различными геометрическими размерами и рекордными характеристиками. Аналогичная технология в настоящее время используется в США, Китае, Корее, Франции, Японии и ряде других стран.

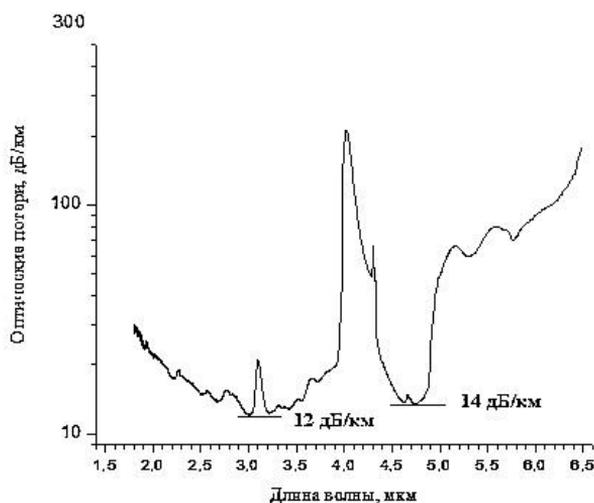


Рис. 5. Типичные спектральные зависимости оптических потерь в сульфидно-мышьяковых световодах ИХВВ РАН в настоящее время

Очевидно, что современная технология позволяет снизить собственные потери световода на три порядка по сравнению с результатами, показанными на рис. 4. К сожалению, приблизиться к значениям, предсказываемым расчетами, на сегодняшний день не удастся ни одной из исследовательских групп и коммерческих организаций в мире.

Уменьшение потерь в световодах стимулировало разработку с начала 80-х гг. изделий на основе различных материалов: фторидных (фторцирконатных), халькогенидных и оксидных стёкол, моно- и поликристаллических материалов. Как отмечается в [1]: «Активные научные и технологические разработки по волоконным световодам для среднего ИК-диапазона проводились с 80-х гг. в Японии, Франции, США, Чехии. В нашей стране работы в этом направлении были начаты по инициативе Е.М. Дианова в конце 1970-х гг. после первых успехов по волоконной оптике на основе особо чистого кварцевого стекла. Объектом разработок были световоды из халькогенидных стекол, стекол на основе фторидов и оксидов тяжелых металлов. Наибольшее развитие получили исследования по световодам из халькогенидных стекол, выполнявшиеся в Институте общей физики РАН и в Институте химии АН СССР. Общий итог проведенных исследований состоит в развитии новых разделов оптического материаловедения и волоконной оптики, в получении новых знаний о свойствах неоксидных стекол, в изготовлении функциональных волоконно-оптических устройств с рекордными техническими характеристиками.»

Стёкла на основе халькогенидов (сульфидов, селенидов и теллуридов) начали получать значительно раньше фторидных, однако работы в области халькогенидных оптических волокон получили значительное развитие только в новом тысячелетии, что связано с интенсивным освоением среднего и дальнего ИК-диапазонов. Теллуридные световоды перспективны для дальнего ИК-диапазона. Например, для излучения в диапазоне 6,5–7,0 мкм минимальные потери в них составляют ~ 40 дБ/км [15].

Фторидные световоды (ZBLAN) имеют сложный химический состав. Основным компонентом является фторид циркония (ZrF_4). Компонентом для формирования стекла является фторид бария (BaF_2). Фториды лантана, алюминия и натрия обеспечивают стабильность материала и препятствуют его кристаллизации в процессе вытяжки световода. Теоретические минимальные оптические потери во фторидных волокнах составляют до 10^{-2} дБ/км. Достичь таких результатов в мире никому пока не удалось из-за сильной склонности этих стекол к кристаллизации и значительному концентрационному рассеянию, а также из-за сложности очистки исходных компонентов. Минимальное значение оптических потерь, полученное в таких

световодах на настоящее время, составляет 0,45 дБ/км. Фторидные световоды состава $ZrF_4-BaF_2-LaF_3-AlF_3-NaF$, имеют окно высокой прозрачности в диапазоне 2,2...2,6 мкм. Типичные значения оптических потерь в коммерческих ZBLAN-световодах составляют от 10 до 30 дБ/км. Эти изделия широко используются в качестве волоконно-оптических усилителей на длину волны 1,55 мкм [16].

Монокристаллические волокна из сапфира характеризуются высоким порогом лазерного пробоя, механической прочностью, тепловой и химической устойчивостью. Однако как минимальные, так и типичные потери в этих световодах пока значительно превышают теоретически предсказываемые значения (0,01...0,1 дБ/км). Сапфировые волокна находят применение в медицине для передачи излучения Er: YAG-лазера на длине волны 2,94 мкм [17].

Поликристаллические материалы имеют уникально широкое окно прозрачности в области среднего и дальнего ИК. Среди них наименьшими потерями в рабочем диапазоне CO_2 лазеров (10,6 мкм) и приемлемыми эксплуатационными свойствами обладают галиды серебра и таллия. Волокна из этих материалов находят применение в датчиках теплового мониторинга и системах теплового видения. Световод с областью прозрачности до 19 мкм может эффективно передавать излучение чёрного тела с температурой около 150 К [18].

Полые волоконные световоды из кварцевого стекла находят свое применение при передаче большой мощности или ультракоротких световых импульсов без искажений. Уникальная возможность полого световода – возможность заполнения его различными газами – позволяет создавать на их основе источники излучения большой интенсивности в широком спектральном диапазоне: от ультрафиолета до среднего ИК. Полые световоды используют при создании датчиков физических величин, генерации суперконтинуума. Подробно данные изделия рассмотрены в [19].

Первоначальный интерес к волокнам, прозрачным в области среднего ИК-диапазона, как к альтернативе кварцевого волокна для линий связи был утрачен из-за слабого прогресса при получении световодов с предельно низкими потерями. Как следствие, исследовательский интерес в настоящее время направлен на другие области применения таких изделий, основные из которых были понятны в самом начале работ по их созданию [10, 20].

Во многих системах их технические характеристики улучшаются при использовании диапазона длин волн ближнего и среднего ИК. Например, радиационная термометрия ниже 200 °С затруднена. В спектроскопии, например, при анализе состава пробы и при обнаружении утечек опасных газов чувствительность заметно повышается, если измерения проводить в диапазоне 2...15 мкм, где молекулы имеют сильные полосы поглощения. В области длин волн 2...20 мкм разнообразие материалов обеспечивает возможность выбора световода с наилучшими для конкретной области применения техническими характеристиками оптимального для условий эксплуатации и спектрального диапазона.

В работе [10] были подробно исследованы технические характеристики и конструктивные особенности различных волоконно-оптических систем среднего и дальнего ИК. В основном рассматривались задачи измерения температуры (пирометрия, термометрия) и обнаружения веществ (спектроскопия, датчики). За последние годы области применения разрабатываемых ИК-световодов значительно расширились. Среди них: 1) интегральная оптика; 2) ИК-мониторинг: низкотемпературная пирометрия; 3) аналитическая дистанционная ИК-спектроскопия, включая химические сенсоры для определения состава жидких и твердых веществ в биологии, медицине, фармакологии, пищевой и химической промышленности; мониторинг окружающей среды; мониторинг выхлопных газов двигателей; определение загрязнения воды и почвы; 4) медицина: хирургия, стоматология, онкологические заболевания; 5) передача энергии, в том числе силовая волоконная оптика; передача мощного излучения СО- (5,3–6,2 мкм) и СО₂- (9,2–10,6 мкм) лазеров; 6) системы для телекоммуникаций и нелинейной оптики: ИК-волоконно-оптические лазеры и усилители, высокоскоростные переключатели, рамановские лазеры, конверторы частот, генераторы суперконтинуума, сенсоры различных физических полей; 7) оборонная промышленность; 8) дистанционный подрыв (оптический детонатор); 9) атомная промышленность (энергетика, экология): дозиметрия; 10) научное приборостроение (оптика для космических и иных применений).

Например, в работе [21] предложен метод дистанционного определения углекислого газа и обоснована конструкция полностью оптического волоконного ИК-датчика. Этот полностью оптический

датчик для мониторинга с чувствительностью в несколько сотен миллионных долей CO_2 может проводить измерения на дальности до километра и пригоден для полевых условий.

Как отмечается в [22], в результате достижения значительных успехов в снижении оптических потерь в халькогенидных световодах за счет повышения чистоты исходных материалов и оптимизации технологии изготовления световодов появилась возможность их практического применения. в том числе в системах защиты от средств поражения переносными зенитно-ракетными комплексами. В США были изготовлены оптоволоконные кабели, которые успешно использовались в полевых испытаниях аппаратуры противоракетной обороны.

В монографии [23] отдельная глава посвящена применению сенсоров на базе различных световодов для дозиметрии ионизирующих излучений. Эти дозиметры могут быть использованы для мониторинга радиационной обстановки в промышленности и медицине. Следует отметить, что значительно раньше, в работе [24] были предложены концепции не только волоконно-оптических дозиметров, но и глобальных систем удаленного мониторинга ядерно-опасных объектов, распределенного дозиметрического контроля при радиотерапии. Очевидно, что подобные системы могут быть реализованы с использованием световодов на базе халькогенидных стекол.

Разработаны оптические системы дистанционного подрыва взрывчатых веществ, которые имеют существенное преимущество перед традиционными – безопасность проведения взрывных работ, особенно, в условиях промышленных или естественных электромагнитных помех. Основные области применения таких изделий: горнодобывающая промышленность; нефтегазовый комплекс; геофизические разведочные исследования; управляемые системы для разрушения, синтеза и направленного изменения свойств горных пород; системы инициирования взрывной и пиротехнической автоматики; лазерный детонатор [25].

Широкую известность получил международный проект DARWIN, разработанный для поиска похожих на Землю планет, вращающихся вокруг других звезд, и анализа их атмосферы на наличие химических признаков жизни. Проект предназначался для обнаружения планет земного типа вокруг звезд в окрестностях Солнца и определения

химического состава их потенциальной атмосферы путем спектрального анализа излучения от самой планеты (прямое обнаружение). Проект DARWIN был предложен в [26]. Группа из нескольких свободно летающих космических аппаратов формировала космический интерферометр, работающий в режиме обнуления в тепловом инфракрасном диапазоне. Оборудование проекта DARWIN работало бы как один большой телескоп диаметром до нескольких сотен метров, обеспечивая детальное изображение многих типов небесных объектов. Наблюдения за звездами по проекту DARWIN предполагалось проводить в инфракрасном диапазоне (средневолновой диапазон с длиной волны от 2,5 до 50 мкм), так как жизнь на Земле оставляет некоторые следы на этих длинах волн.

Отдельный интерес представляет проблема влияния ионизирующих излучений различной природы на характеристики халькогенидных световодов. Световоды на основе окиси кремния исследовались на предмет определения их работоспособности в различных, в том числе экстремальных условиях эксплуатации, включая радиационное воздействие, начиная с 70-х гг. прошлого века. Были проведены многочисленные экспериментальные и теоретические исследования для выявления причин радиационных изменений оптических свойств различных типов кремниевых световодов. Исследования проводились и проводятся до сих пор различными группами во многих странах, например [27].

Подробный обзор современного состояния и полученных за это время результатов приведен в [28]. Данный интерес связан в первую очередь с критическим воздействием радиации на возможность применения кварцевых световодов в таких ключевых областях применения, как космос, установки, связанные с термоядерным синтезом и делением, или установки физики высоких энергий, атомная энергетика, хранение радиоактивных отходов, военная техника. Уровень радиационной стойкости специализированных радиационно-стойких оптических волокон и кабелей в настоящее время обеспечивает для лучших мировых образцов прирост затухания оптического сигнала на длине волны 1,31 мкм $\sim 3 \dots 5$ дБ/км при поглощенной дозе 100 крад и сохранением этого значения до дозы 800 крад [29].

Сводная таблица по результатам испытаний световодов на основе халькогенидного стекла
(литературные данные)

№ п/п	Тип световода	Технология изготовления	Состав	Параметры световода	Измеренный диапазон спектра	Источник воздействия	Тип воздействия	Уровень воздействия	Реакция на воздействие	Литература
1	Многомодовый без облочки	Не приведена	As ₂ S ₃	Диаметр 140 мкм	Измерения от 0,8 до 1,6 мкм	–	Нейтроны	Нейтронное облучение флюенс до 10 ¹⁷ см ⁻²	Существенное увеличение потерь в ближней ИК-области спектра, особенно в коротковолновой части (0,7–0,8 мкм)	[30]
2	Многомодовый	Вытягивание в вакууме из расплава	As ₂ S ₃	Диаметр сердцевины 15...800 мкм; n = 2,28 (для сердцевины)	Измерения от 0,6 до 1,6 мкм	Реактор (канал)	Гамма-нейтронное	Флюенс 10 ¹³ ...10 ¹⁹ н/см ² , доза не приведена ~ 10 ⁴ ...10 ¹⁰ рад (оценка)	Измерения после облучения через 1...8 месяца. Увеличение затухания, сдвиг максимума потерь на 0,63 мкм, перекристаллизация (см. рис. 3)	[31]
3	Многомодовый без облочки	Вытягивание из расплава в оптимальном режиме	As ₂₉ S ₇₁	–	Измерения от 0,8 до 1,6 мкм	Реактор	Гамма-нейтронное (нейтроны 0,1...3 МэВ сопутствующее гамма-излучение)	Флюенс 10 ¹⁷ н/см ² , доза не приведена ~ 10 ⁶ рад (оценка)	Измерения после облучения. Увеличение затухания, максимум затухания 0,75...0,8 мкм, уменьшение поверхностной концентрации мышьяка (от 29 до 26%)	[32]

Окончание таблицы

№ п/п	Тип световода	Технология изготовления	Состав	Параметры световода	Измеренный диапазон спектра	Источник возбуждения	Тип возбуждения	Уровень воздействия	Реакция на воздействие	Литература
4	Многомодовый без оболочечки	Вытягивание из расплава в атмосфере аргона	As ₂ S ₃ As ₄₀ S ₅₂ Se ₈	Диаметр 120 мкм	Измерения от 0,6 до 2,0 мкм (см. рис. 3)	Реактор ИРТ2000 (МИФИ)	Гамма-нейтронное (нейтроны 0,1–3 МэВ, сопутствующее гамма-излучение)	Флюенс 10 ¹⁵ –10 ¹⁸ н/см ² , Интенсивность флюенса 3·10 ¹¹ н/см ² ·с доза не приведена ~10 ⁶ ...10 ⁹ рад (оценка)	Измерения после облучения через 3...8 мес. (см. рис. 5). До 10 ¹⁵ н/см ² возрастания потеря нет, после 10 ¹⁶ н/см ² поверхностные повреждения. Измерения после облучения через 20 минут (см. рис. 6). До 10 ⁷ рад возрастания потеря нет, после 10 ¹⁰ рад поверхностные повреждения.	[33]
5	Многомодовый с полимерным покрытием	Вытягивание методом двойного тигля	Сердцевина As ₄₀ S ₆₀ . Оболочка As ₃₅ S ₆₅	Диаметр сердцевины 180 мкм; диаметр оболочки 550 мкм; фторопласт 42 10 мкм; ПВХ 500 мкм; ПА до 50 мкм.	Измерения от 1,0 до 5,0 мкм	Линейный ускоритель. Режим периодический	Электронны 3,5 (4,5) МэВ Плотность потока 5·10 ¹¹ част·см ⁻² ·с ⁻¹ . Длительность 3 мкс, частота 400 Гц.	Флюенс 10 ¹² – 5·10 ¹⁶ эл/см ² , доза не приведена	Измерения после облучения 1 мес. Рост затухания: 1,25 мкм–0,6 дБ/м, 1,65 мкм–0,4 дБ/м, 2,2 мкм–0,2 дБ/м, 3 мкм и выше – без изменений. (см. рис. 7).	[34]

В то же время исследованиям влияния радиации на свойства халькогенидных световодов в открытой печати посвящено всего пять работ, выполненных в 80-е гг. XX в., практически одновременно с первыми попытками создания оптических волокон для среднего ИК-диапазона. Обобщенные данные об объектах исследований и результатах испытаний из этих пяти работ представлены в таблице.

Оценка уровня дозовой нагрузки (если данные в первоисточнике отсутствовали) проведена авторами. Следует заметить, что вопросам влияния облучения на свойства, включая оптическую прозрачность, халькогенидных стекол (сульфида мышьяка и других) как полупроводниковых материалов посвящено значительное количество работ, но в данном случае эти результаты не рассматриваются.

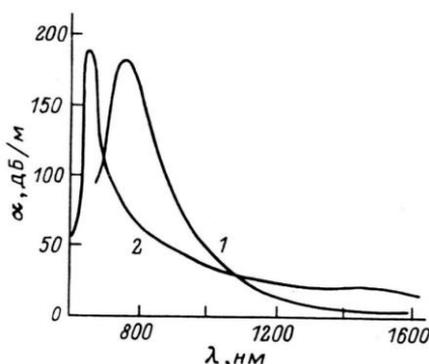


Рис. 6. Спектральная зависимость затухания ИК сигнала в световоде As_2S_3 до и после облучения: 1 – необлученный световод; 2 – облучение нейтронами флюенсом 10^{19} н/см²

На рис. 6–10 приведены результаты облучения световодов преимущественно из сульфида мышьяка [31, 33, 34]. Авторы [31] отмечают, что до уровня 10^{14} н/см² никаких заметных изменений в спектре поглощения зарегистрировано не было. На уровне 10^{15} н/см² наблюдалось увеличение затухания на длине волны 0,63 мкм – 404 %, и на длине волны 1,15 мкм – 7,15 %.

Как видно из рис. 6, при максимальном уровне воздействия 10^{19} н/см² максимум полосы поглощения сдвигается в коротковолновую область и значительно сужается. Необходимо обратить внимание на эту особенность в радиационной реакции халькогенидного световода, так как у кварцевых волокон наблюдается отно-

сительно равномерный рост затухания во всем спектральном диапазоне до 2 мкм.

Аналогичный результат был получен в работе [33]. На рис. 7 хорошо видно, как с увеличением уровня воздействия происходит сдвиг края поглощения в красную область спектра. Край поглощения в [33] определяли путем линейной экстраполяции «хвоста Урбаха» до уровня оптических потерь 80 дБ/м. Причем с ростом дозы отмечалось уменьшение наклона «хвоста Урбаха», влияние химического состава стекла и источника излучения на результат. Облучение нейтронами приводит к большему сдвигу, чем облучение электронами.

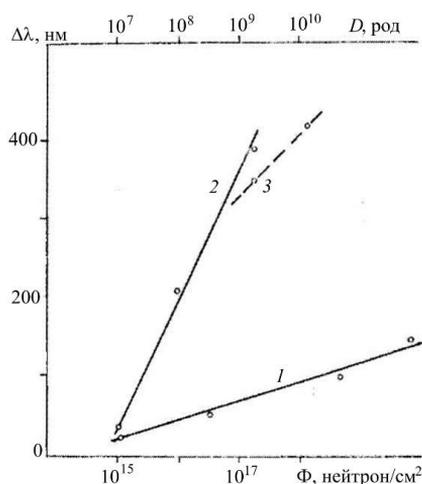


Рис. 7. Сдвиг края поглощения в облученных световодах 1 – волокно $As_{40}S_{60}$, облучение электронами; 2 – волокно $As_{40}S_{60}$, облучение нейтронами; 3 – волокно $As_{40}S_{52}Se_8$, облучение нейтронами

На рис. 8 и 9 показаны спектральные зависимости наведенных излучением потерь из работы [33], в которой указано, что наведенные оптические потери пренебрежимо малы при облучении электронами дозой до 10^7 рад и потоком нейтронов до 10^{15} нейтрон/см² во всем спектральном диапазоне.

Увеличение воздействия ионизирующих излучений приводит к пропорциональному росту наведенных оптических потерь в световодах (при увеличении воздействия на порядок затухание возрастает в 2–3 раза при облучении, и нейтронами, и электронами). Резкий рост наведенных потерь при максимальном воздействии авторы связывают с разрушением поверхности образцов. Воздействие электронов приво-

дило к возрастанию плотности поверхностных дефектов, а поток нейтронов на уровне 10^{18} н/см² к образованию эрозионных кратеров [33].

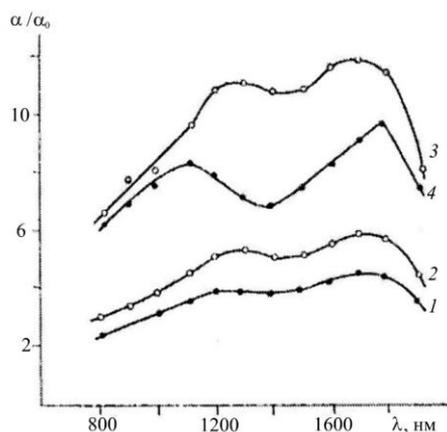


Рис. 8. Относительные наведенные потери в световодах, облученных нейтронами $\text{As}_{40}\text{S}_{52}\text{Se}_8$: 1 – 10^{15} н/см², 2 – 10^{16} н/см², 3 – 10^{17} н/см²; $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$: 4 – 10^{17} н/см²

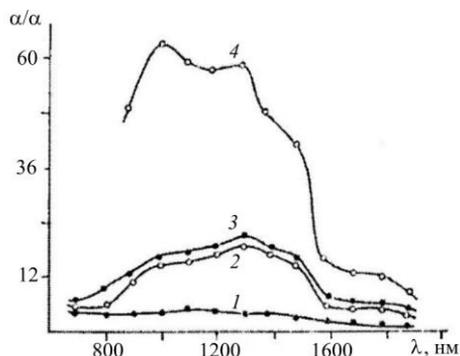


Рис. 9. Относительные наведенные потери в световодах $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$, облученных электронами; доза: 1 – 10^8 рад, 2 – 10^{10} рад, 3 – 10^{11} рад, 4 – $5 \cdot 10^{11}$ рад

На рис. 10 представлены результаты исследований [34], проведенных на наиболее совершенных для того времени образцах световодов из сульфида мышьяка, изготовленных из высокочистых исходных материалов. По приведенным в [34] данным при облучении электронами с флюенсами вплоть до 10^{14} эл/см² не было зафиксировано изменения оптических потерь. Величина наведенного затухания уменьшалась с увеличением длины волны. При максимальном уровне

воздействия прирост оптических потерь составил: 0,6 дБ/м на длине волны 1,25 мкм; 0,4 дБ/м на длине волны 1,65 мкм; 0,2 дБ/м на длине волны 2,2 мкм.

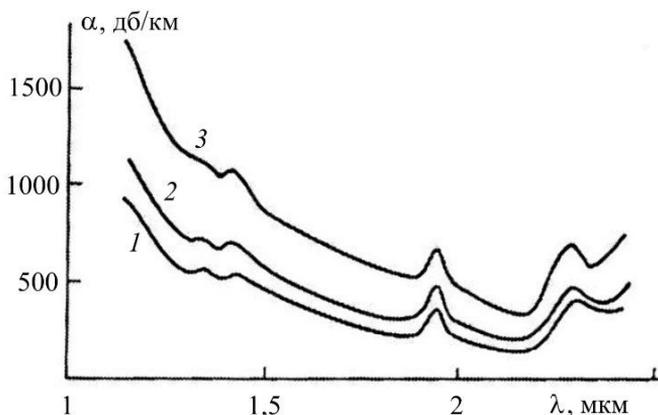


Рис. 10. Спектр оптических потерь до и после облучения электронами; флюенс электронов: 1 — 0 ч/см², 2 — $5 \cdot 10^{15}$ ч/см², 3 — $5 \cdot 10^{16}$ ч/см²

На длинах волн более 3 мкм увеличения оптических потерь не обнаружено. При сравнении результатов, полученных в двух разных работах [33] и [34], можно сделать вывод, что при эквивалентных дозах облучения измеренные наведенные оптические потери отличаются на два порядка в сравнимом спектральном диапазоне. Это может быть связано со степенью чистоты исходных материалов и степенью чистоты халькогенидных стекол, из которых были изготовлены световоды.

Резюмируя вышеизложенное, можно утверждать, что в настоящее время радиационная стойкость световодов на основе халькогенидных стекол практически не исследована, хотя по представленным данным можно предположить их значительно более высокую радиационную стойкость в сравнении с кварцевыми световодами. Прогресс в разработке халькогенидных световодов с минимальными в настоящее время оптическими потерями и расширение областей их применения делают актуальными постановку и проведение систематических исследований радиационной стойкости различных типов оптических волокон для среднего и дальнего ИК-излучения.

Список литературы

1. Плотниченко В.Г., Чурбанов М.Ф. Совместные разработки ИХВВ РАН и НЦВО РАН по халькогенидным волоконным световодам для среднего ИК диапазона // ВКВО-2019 Всероссийская конференция по волоконной оптике; Пермь, Россия, 2019 // Фотон-экспресс-наука 2019: спецвыпуск. – 2019. – № 6 (158). – С. 142.
2. Као К.С., Hockham G.A. Dielectric-Fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies // Proceeding IEE. – 1966. – Vol. 113. – №7. – P. 1151–1158.
3. Williams D., Као К.С. Pulse communication along glass fibers // Proceeding. IEEE. – 1968. – Vol. 56. – № 2. – P. 197–198.
4. Kapron F.P., Keck D.B., Maurer R.D. Radiation Losses in Glass Optical Waveguides // Applied Physics Letters. – 1970. – Vol. 17. – P. 423–425.
5. Дианов Е.М. Волоконная оптика: сорок лет, которые изменили мир» // Фотон-Экспресс. – 2010. – № 8 (81). – С. 27–30.
6. Lines M.E. Scattering losses in optic fiber materials. II. Numerical estimates // Journal of Applied Physics. – 1984. – Vol. 55. – №11. – P. 4058–4063.
7. Savage J.A. Materials for Infrared Fibre Optics // Materials Science Reports. – 1987. – №. 2. – P. 99–138.
8. Горюнова Н.А., Коломиец Б.Т. Свойства и структура тройных полупроводниковых систем // Журнал технической физики. – 1955. – Вып. 25. – № 6. – С. 984–994.
9. Горюнова Н.А., Коломиец Б.Т. // Изв. АН СССР. Сер. физич. – 1956. – Т. 20, № 12. – С. 1496–1500.
10. Saito M., Kikuchi K. Infrared Optical Fiber Sensors // Optical Review. – 1997. – Vol. 4. – № 5. – P. 527–538.
11. Оценка минимальных оптических потерь в халькогенидных стеклах / Е.М. Дианов, М.Ю. Петров, В.Г. Плотниченко, В.К. Сысоев // Квантовая электроника. – 1982. – Т. 9, № 4. – С. 798–800.
12. High purity arsenic-sulfide glasses and fibers with minimum attenuation of 12 dB/km // G.E. Sнопатин, M.F. Churbanov, A.A. Pushkin, V.V. Gerasimenko, E.M. Dianov, V.G. Plotnichenko // Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications. – 2009. – Vol. 3, № 7. – P. 669–671.

13. Recent advances in preparation of high-purity glasses based on arsenic chalcogenides for fiber optics / M.F. Churbanov, G.E. Snopatin, V.S. Shiryaev, V.G. Plotnichenko, E.M. Dianov // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2010. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.11.057.

14. Снопатин Г.Е. Физико-химические основы расплавного получения высокочистых халькогенидных стекол и волоконных световодов: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – Н. Новгород, 2013.

15. Высокочистые стекла систем As-S-Se- и As-Se-Te и световоды на их основе / М.Ф. Чурбанов, В.С. Ширяев, А.И. Сучков, А.А. Пушкин, В.В. Герасименко, Р.М. Шапошников, Е.М. Дианов, В.Г. Плотниченко, В.В. Колташев, Ю.Н. Пырков, Ж. Люка, Ж.-Л. Адам // *Неорганические материалы*. – 2007. – Т. 43. – № 4. – С. 506–512.

16. Xiushan Zhu, Peyghambarian N. High-power ZBLAN glass fiber lasers: Review and prospect // *Advances in OptoElectronics*. – 2010. – Article ID 501956. DOI:10.1155/2010/501956.

17. Kurlov V.N., Belenko S.V. Growth of Sapphire Shaped Crystals with Continuously Modulated Dopants // *Journal of Crystal Growth*. – 1998. – Vol. 191. – № 4. – P. 779–782.

18. Шмыгалев А.С. Экспериментальное исследование теплопереноса инфракрасными галогенидсеребряными световодами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2018.

19. Колядин А.Н. Полые волоконные световоды // *Прикладная фотоника*. – 2021. – Т. 8. – № 4. – С. 36–92.

20. Дианов Е.М., Плотниченко В.Г. Инфракрасные волоконные световоды. – М.: Знание, 1991.

21. All-optical carbon dioxide remote sensing using rare earth doped chalcogenide fibers / F. Starecki, A. Brauda, J.-L. Doualana, J. Ari, C. Boussard-Plédel, K. Michel, V. Nazabal, P. Camy // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2019. – Vol. 122. – P. 328–334.

22. Infrared fibers for defense against MANPAD systems / J.S. Sanghera, L.E. Busse, I.D. Aggarwal, F. Chenard // *Proceedings «Defense and Security»*. – 2005. – Vol. 5781: Optics and Photonics in Global Homeland Security. – Orlando, Florida, United States.

23. Sporea D. Optical Fiber Sensors in Ionizing Radiation Environments. – Handbook of Optical Fiber edited Peng G.-D. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019.

24. Томашук А.Л. Волоконно-оптические дозиметры // Фотон-Экспресс. – 2005. – №7. – С. 53–55.

25. Bowden M. The Development of a Laser Detonator System / // PhD Thesis. – 2014. – Cranfield University Defense College of Management and Technology Department of Materials and Applied Sciences. – P. 259.

26. Ollivier M. Towards the spectroscopic analysis of Earthlike planets: the DARWIN/TPF project // C.R. Physique. – 2007. – Vol. 8. – P. 408–414.

27. Оптические материалы и волоконные световоды в экспериментах на импульсных ядерных реакторах / В.В. Горбунов, Л.Е. Довбыш, С.П. Мельников, А.В. Сеницын // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 2017. – № 4. – С. 86–100.

28. Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers / S. Girard, A. Alessi, N. Richard [et al.] // Reviews in Physics. – 2019. – №4. – 100032. – P. 1–18.

29. Получение радиационно-стойких волоконных световодов на основе высококачественного кварцевого стекла / А.Н. Гурьянов, П.Ф. Кашайкин, М.Ю. Салганский, А.Л. Томашук // Ядерные технологии: от исследований к внедрению – 2019: сб. материалов науч.-практ. конф. – Н. Новгород, 2019.

30. Оптические свойства волокон на основе As_2S_3 в диапазоне длин волн 0,8–8 мкм / А.М. Андриеш, О.В. Большаков, И.П. Куляк [и др.] // Аморфные полупроводники-84: тр. междунар. конф. Т. 2. – Габрово, 1984. – С. 244–246.

31. Стабильность ОВ на основе ХСП в условиях большими дозами нейтронов / А.М. Андриеш, Ю.А. Быковский, Ю.В. Бородакий, А.Ф. Кожин, А.В. Миронос, В.Л. Смирнов, В.В. Пономарь // Письма в ЖТФ. – 1984. – Т. 10, № 9. – С. 547–549.

32. Оптические потери в волокнах из $As - S$ в области 0,8–1,6 мкм / А.М. Андриеш, Е.В. Кулаков, И.П. Куляк, В.В. Пономарь, А.С. Смирнова // Квантовая электроника. – 1985. – Т. 12, №9. – С. 1981–1983.

33. Влияние радиационного воздействия на оптические свойства ХСП-волокон / А.Я. Винокуров, А.Я. Гаркавенко, Л.И. Литинская, А.В. Миронос, А.М. Родин // Автометрия. – 1988. – № 5. – С. 28–31.

34. Влияние электронного облучения на оптические потери волоконных световодов из халькогенидных стекол / Л.И. Литинская, Н.В. Радыгина, И.В. Скрипачев, В.А. Шипунов // *Высокочистые вещества*. – 1990. – № 4. – С. 215–216.

References

1. Plotnichenko V.G., Churbanov M.F. Sovmestnye razrabotki IKhVV RAN I NTsVO RAN po khal'kogenidnym volokonnyim svetovodam dlia srednego IK diapazona [Joint developments of IHV RAS and NCVO RAS on chalcogenide fiber light guides for the mid-IR range]. *VKVO-2019 Vserossiiskaia konferentsiia po volokonnoi optike, Perm', Rossiia, 2019. Spetsvypusk "Foton-ekspress-nauka 2019"*, 2019, no. 6 (158), 142 p.

2. Kao K.C., Hockham G.A. Dielectric-Fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies. *Proceeding IEE*, 1966, vol. 113, no. 7, pp. 1151-1158.

3. Williams D., Kao K.C. Pulse communication along glass fibers. *Proceeding. IEEE*, 1968, vol. 56, no. 2, pp. 197-198.

4. Kapron F.P., Keck D.B., Maurer R.D. Radiation Losses in Glass Optical Waveguides. *Applied Physics Letters*, 1970, vol. 17, pp. 423-425.

5. Dianov E.M. Volokonnaia optika: sorok let, kotorye izmenili mir [Fiber optics: forty years that changed the world]. *Foton-Ekspress*, 2010, no. 8 (81), pp. 27-30.

6. Lines M.E. Scattering losses in optic fiber materials. II. Numerical estimates. *Journal of Applied Physics*, 1984, vol. 55, no. 11, pp. 4058-4063.

7. Savage J.A. Materials for Infrared Fibre Optics. *Materials Science Reports*, 1987, no. 2, pp. 99-138.

8. Goriunova N.A., Kolomiets B.T. Svoistva i struktura troinykh poluprovodnikovykh sistem [Properties and structure of triple semiconductor systems]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1955, iss. 25, no. 6, pp. 984-994.

9. Goriunova N.A., Kolomiets B.T. Novye stekloobraznye poluprovodniki [New glassy semiconductors]. *Izvestiia AN SSSR. Fizicheskaiia*, 1956, vol. 20, no. 12, pp. 1496-1500.

10. Saito M., Kikuchi K. Infrared Optical Fiber Sensors. *Optical Review*, 1997, vol. 4, no. 5, pp. 527-538.

11. Dianov E.M., Petrov M.Iu., Plotnichenko V.G., Sysoev V.K. Otsenka minimal'nykh opticheskikh poter' v khal'kogenidnykh steklakh [Es-

mination of minimum optical losses in chalcogenide glasses]. *Kvantovaya elektronika*, 1982, vol. 9, no. 4, pp. 798-800.

12. Snopatin G.E., Churbanov M.F., Pushkin A.A., Gerasimenko V.V., Dianov E.M., Plotnichenko V.G. High purity arsenic-sulfide glasses and fibers with minimum attenuation of 12 dB/km []. *Optoelectronics and Advanced Materials - Rapid Communications*, 2009, vol. 3, no. 7, pp. 669-671.

13. Churbanov M.F., Snopatin G.E., Shiryayev V.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. Recent advances in preparation of high-purity glasses based on arsenic chalcogenides for fiber optics. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2010. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.11.057

14. Snopatin G.E. Fiziko-khimicheskie osnovy rasplavnogo polucheniia vysokochistyykh khal'kogenidnykh stekol i volokonnykh svetovodov [Physico-chemical bases of melt production of high-purity chalcogenide glasses and fiber light guides]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Nizhnii Novgorod, 2013.

15. Churbanov M.F., Shiriaev V.S., Suchkov A.I., Pushkin A.A., Gerasimenko V.V., Shaposhnikov R.M., Dianov E.M. Plotnichenko, V.G., Koltashev V.V., Pyrkov Iu.N., Liuka Zh., Adam Zh.-L. Vysokochistye stekla sistem As-S-Se- i As-Se-Te i svetovody na ikh osnove [High-purity glasses of As-S-Se- and As-Se-Te systems and light guides based on them]. *Neorganicheskie materialy*, 2007, vol. 43, no. 4, pp. 506-512.

16. Xiushan Zhu, Peyghambarian N. High-power ZBLAN glass fiber lasers: Review and prospect. *Advances in OptoElectronics*, 2010, Article ID 501956. DOI:10.1155/2010/501956

17. Kurlov V.N., Belenko S.V. Growth of Sapphire Shaped Crystals with Continuously Modulated Dopants. *Journal of Crystal Growth*, 1998, vol. 191, no. 4, pp. 779-782.

18. Shmygalev A.S. Eksperimental'noe issledovanie teploperenosa infrakrasnymi galogenidserebrianyimi svetovodami [Shmygalev A.S. Experimental study of heat transfer by infrared halide-silver light guides]. Abstract of Ph. D. thesis. Ekaterinburg, 2018.

19. Koliadin A.N. Polye volokonnye svetovody [Hollow fiber light guides]. *Prikladnaia fotonika*, 2021, vol. 8, no. 4, pp. 36-92.

20. Dianov E.M., Plotnichenko V.G. Infrakrasnye volokonnye svetovody [Infrared fiber light guides]. Moscow: Znanie, 1991.

21. Starecki F., Brauda A., Doualana J.-L., Ari J., Boussard-Plédel C., Michel K., Nazabal V., Camy P. All-optical carbon dioxide remote sensing using rare earth doped chalcogenide fibers. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, vol. 122, pp. 328-334.

22. Sanghera J.S., Busse L.E., Aggarwal I.D., Chenard F. Infrared fibers for defense against MANPAD systems. *Proceedings "Defense and Security"*, 2005, vol. 5781: Optics and Photonics in Global Homeland Security. Orlando, Florida, United States.

23. Sporea D. Optical Fiber Sensors in Ionizing Radiation Environments. Handbook of Optical Fiber edited Peng G.-D. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019.

24. Tomashuk A.L. Volokonno-opticheskie dozimetriy [Fiber-optic dosimeters]. *Foton-Ekspress*, 2005, no. 7, pp. 53-55.

25. Bowden M. The Development of a Laser Detonator System. Ph. D. Thesis, 2014, Cranfield University Defense College of Management and Technology Department of Materials and Applied Sciences, 259 p.

26. Ollivier M. Towards the spectroscopic analysis of Earthlike planets: the DARWIN/TPF project. *C.R. Physique*, 2007, vol. 8, pp. 408-414.

27. Gorbunov V.V., Dovbysh L.E., Mel'nikov S.P., Sinitsyn A.V. Opticheskie materialy i volokonnye svetovody v eksperimentakh na impul'snykh iadernykh reaktorakh [Optical materials and fiber light guides in experiments on pulsed nuclear reactors]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Fizika iadernykh reaktorov*, 2017, no. 4, pp. 86-100.

28. Girard S., Alessi A., Richard N. et al. Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers. *Reviews in Physics*, 2019, no. 4, 100032, pp. 1-18.

29. Gur'ianov A.N., Kashaikin P.F., Salganskii M.Iu., Tomashuk A.L. Poluchenie radiatsionno-stoikikh volokonnykh svetovodov na osnove vysokochistogo kvartseвого стекла [Obtaining radiation-resistant fiber light guides based on high-purity quartz glass]. *Iadernye tekhnologii: ot issledovaniy k vnedreniiu - 2019. Sbornik materialov nauchno-prakticheskoi konferentsii*. N. Novgorod, 2019.

30. Andriesh A.M., Bol'shakov O.V., Kuliak I.P. et al. Opticheskie svoystva volokon na osnove As₂S₃ v diapazone dlin voln 0,8-8 mkm [Optical properties of fibers based on As₂S₃ in the wavelength range of 0.8-8

microns]. *Amorfnye poluprovodniki-84. Trudy mezhdunarodnoi konferentsii. Tom 2. Gabrovo*, 1984, pp. 244-246.

31. Andriesh A.M., Bykovskii Iu.A., Borodakii Iu.V., Kozhin A.F., Mironos A.V., Smirnov V.L., Ponomar' V.V. Stabil'nost' OV na osnove KhSP v usloviakh bol'shimi dozami neutronov [Stability of chemical agents based on CSP in conditions with large doses of neutrons]. *Pis'ma v ZhTF*, 1984, vol. 10, no. 9, pp. 547-549.

32. Andriesh A.M., Kulakov E.V., Kuliak I.P., Ponomar' V.V., Smirnova A.S. Opticheskie poteri v voloknakh iz As - S v oblasti 0,8-1,6 mkm [Optical losses in As - S fibers in the range of 0,8-1,6 microns]. *Kvantovaya elektronika*, 1985, vol. 12, no. 9, pp. 1981-1983.

33. Vinokurov A.Ia., Garkavenko A.Ia., Litinskaia L.I., Mironos A.V., Rodin A.M. Vliianie radiatsionnogo vozdeistviia na opticheskie svoistva KhSP-vozkon [The influence of radiation exposure on the optical properties of HSP fibers]. *Avtometriia*, 1988, no. 5, pp. 28-31.

34. Litinskaia L.I., Radygina N.V., Skripachev I.V., Shipunov V.A. Vliianie elektronnoho oblucheniia na opticheskie poteri volokonnykh svetovodov iz khal'kogenidnykh stekol [The effect of electron irradiation on optical losses of fiber light guides made of chalcogenide glasses]. *Vysokochistye veshchestva*, 1990, no. 4, pp. 215-216.

Финансирование: исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант РФФ № 22-13-00226.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 12.01.2022

Одобрена: 22.03.2022

Принята к публикации: 01.09.2022

Funding: the study was supported by the Russian Science Foundation, RSF grant no. 22-13-00226.

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 12/01/2022

Approved: 22/03/2022

Accepted for publication: 01/09/2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Качемцев, А.Н. ИК-световоды на основе халькогенидных стекол: характеристики, применение, радиационная стойкость / А.Н. Качемцев, И.В. Скрипачев, Г.Е. Снопатин // Прикладная фотоника. – 2022. – Т. 9, № 1. – С. 87–112.

Please cite this article in English as: Kachemtsev A.N., Skripachev I.V., Shopatin G.E. Infrared fiber based on chalcogenide glasses: characteristics, application, radiation resistance // Applied photonics, 2022, no. 1, pp. 87-112.