

А.С. Логинова, Л.Я. Кучера

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Аннотация. Данная статья посвящена анализу роли редких элементов: криптона, ксенона, сурьмы и палладия в улучшении характеристик микросхем в микроэлектронике. В работе рассматриваются особенности применения каждого из элементов и их влияние на электрические, механические и термические свойства микросхем. Также анализируются различные методы введения редких элементов в материалы микросхем и примеры использования данных элементов в современной электронике. Результаты проведенного анализа могут быть полезны для разработчиков и производителей микросхем, которые стремятся улучшить их характеристики и увеличить эффективность работы.

Ключевые слова: ксенон, криптон, сурьма, палладий, редкие элементы, микросхемы, надежность, характеристики, термическая стойкость, полупроводниковые материалы.

A.S. Loginova, L.Ya. Kuchera

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF RARE ELEMENTS IN MICROELECTRONICS

Abstract: This article is devoted to the analysis of the role of rare elements: krypton, xenon, antimony and palladium in improving the characteristics of microcircuits in microelectronics. The paper discusses the features of the use of each of the elements and their influence on the electrical, mechanical and thermal properties of microcircuits. Various methods of introducing rare elements into microcircuit materials and examples of the use of these elements in modern electronics are also analyzed. The results of the analysis can be useful for developers and manufacturers of microcircuits that seek to improve their performance and increase operational efficiency.

Keywords: xenon, krypton, antimony, palladium, rare elements, microcircuits, reliability, characteristics, thermal stability, semiconductor materials.

Введение

Вопросам повышения надежности технических систем уделяется большое значение в современных условиях производства [1-3].

Надежность микросхем является критически важным фактором для эффективной работы электронных устройств. Неисправность микросхемы может привести к сбоям и отказам в работе всей системы, искажению информации, потере баз данных, выпуску бракованной продукции. В связи с этим, разработка микросхем в настоящее время ведется с использованием новых материалов и технологий, что позволяет повысить их надежность и увеличить срок службы.

Современная микроэлектроника не может обойтись без использования редких элементов [4-5]. Криптон, ксенон, сурьма и палладий имеют очень важные свойства, поэтому они широко используются для улучшения характеристик микросхем. Использование данных элементов является необходимым для достижения максимальной производительности и эффективности современной электроники. В данной статье рассматривается роль каждого из этих элементов и особенности их применения в микроэлектронике.

Микросхемы на сегодняшний день являются основным элементом электронной техники, и их развитие имеет долгую историю, начиная с создания первых электрических ламп и транзисторов.

В 1958 году была разработана первая интегральная микросхема, которая сочетала в себе несколько транзисторов и диодов. Эта технология позволила значительно сократить размеры электронных устройств и повысить их производительность.

Далее, с развитием технологий производства и материаловедения появились новые типы микросхем, такие как MOS (металл-оксид-полевой транзистор), CMOS (комплементарный

MOS), FPGS (полевой программируемый вентилятор), MEMS (микроэлектромеханические системы) и т.д.

С развитием микроэлектромеханики и нанотехнологий, появились более точные и миниатюрные микросхемы, которые позволяют создавать электронные устройства с высокой производительностью и низким энергопотреблением.

Современные микросхемы уже содержат миллионы транзисторов и других компонентов, постоянно идет работа по увеличению их плотности и производительности, а также по разработке новых материалов и методов производства для повышения надежности и долговечности.

Одной из актуальных тенденций развития микросхем является так называемый «мозговой чип» (brain chip), который использует искусственный интеллект для управления электронными системами и создания более эффективных и интеллектуальных устройств.

Микросхема состоит преимущественно из полупроводниковых материалов на основе кремния, галлия, арсенида галлия, арсенида индия и других элементов [6]. Кроме того, микросхемы также могут содержать элементы таких металлов как золото, алюминий, медь, титан и т.д., которые используются в проводниках и контактах между различными слоями микросхемы. Однако, такие элементы как криптон, ксенон, сурьма и палладий, редко присутствуют в микросхемах и используются в качестве примесей и добавок для улучшения свойств полупроводниковых материалов и прочности металлических контактов.

Анализ применения редких элементов в производстве микросхем

Криптон (Kr) - это химический элемент в таблице Менделеева, относящийся к группе инертных газов. Криптон является бесцветным, безвкусным, без запаха и негативно влияет на здоровье людей при нормальных условиях температуры и давления.

Криптон имеет несколько интересных свойств, которые делают его полезным в некоторых технологиях. Он используется в качестве инертного газа в осветительных приборах для заполнения ламп накаливания, светочувствительных, в качестве активной среды для лазеров и других устройств. Криптон может служить источником ионов при окислении поверхности материалов, применяемых в микроэлектронике. Кроме того, криптон служит основой для создания светоизлучающих диодов и уменьшения теплопотерь в окнах. В научных исследованиях криптон является средой для экспериментов в области физики и химии (например, в криогенных установках). Криптон применяется в медицинских исследованиях дыхательной терапии для изучения функций легких, а также для производства аэрозольных препаратов. Криптон используется в качестве защитной газовой среды при производстве полупроводниковых материалов.

Хотя криптон не имеет широкого применения на производстве, его свойства и способность не взаимодействовать с другими элементами делают его необходимым в некоторых важных областях.

Анализ применения криптона в вопросах обеспечения и повышения надежности микросхем выявляет несколько аспектов.

Во-первых, криптон играет важную роль в обеспечении стабильности полупроводниковых материалов, используемых в производстве микросхем. Добавление криптона в процессе изготовления позволяет усилить связь между атомами материала и насытить его электронами, что повышает надежность и долговечность микросхем.

Во-вторых, криптон используется в качестве инертного газа при сборке и запаивании микросхем. Это обеспечивает надежную защиту микросхем от воздействия окружающей среды, например, от кислорода, влаги, пыли и других примесей. Такая защита позволяет уменьшить риск повреждения микросхем при длительном хранении и использовании.

В-третьих, криптон применяется в процессах лазерной обработки микросхем. Лазерная обработка используется для удаления слоя напыления, отверстий в печатных платах и других подобных операций, которые могут повредить микросхему. Криптон улучшает качество

финишной обработки, что уменьшает вероятность повреждения микросхем в процессе работы устройств.

Таким образом, применение криптона позволяет повысить качество и надежность работы микросхем, а также уменьшить риск брака при их производстве.

Криптон - инертный газ, который не образует химических соединений с другими веществами, широко используется в микроэлектронике, включая производстве микросхем, где его использование улучшает надежность и стабильность произведенных изделий.

Одно из наиболее популярных применений криптона в производстве микрочипов заключается в использовании его для создания атмосферы в трехмерных микроэлектромеханических системах (3D MEMS-устройствах). Криптон обладает хорошей диффузионной способностью, что позволяет использовать его для заполнения микроскопических зазоров и пустот, создавая, таким образом, равномерное распределение давления и уменьшая риск механического разрушения устройства.

Однако, наиболее важное применение криптона в микросхемах заключается в использовании его в качестве газа защитной атмосферы около электрических контактов и подключений в микросхемах. Криптон создает защитную среду, предотвращая окисление и коррозию электрических контактов и способствует увеличению надежности и стабильности работы микросхем.

В процессе обработки кремния и других полупроводниковых материалов, используемых в производстве микросхем, криптон создает экранирующую атмосферу, которая помогает защитить материалы от неблагоприятного воздействия окружающей среды, также повышая надежность и стабильность микросхем.

В целом, криптон используется в микросхемах для повышения надежности, стабильности и долговечности электронных изделий. Он помогает создавать защитные атмосферы, уменьшает риск механических повреждений устройств, снижает вероятность окисления и коррозии контактов и электронных компонентов, и, тем самым, повышает качество и надежность производимых микросхем [7].

Криптон используется в производстве микросхем в качестве газового азотида, добавляемого в полупроводниковые материалы, такие как кремний. Это позволяет увеличить прочность полупроводниковых материалов, улучшить их характеристики и уменьшить вероятность возникновения мелких дефектов в структуре микросхем. Кроме того, криптон используется в процессе лазерной обработки поверхности микросхем, что улучшает качество финишной обработки и повышает надежность работы микросхем.

Также стоит отметить, что криптон не обладает агрессивными свойствами и не взаимодействует со многими материалами, что уменьшает риск повреждения микросхем при длительном хранении и использовании. В целом, использование криптона в производстве микросхем позволяет повысить надежность работы устройств, снизить расходы на их обслуживание и уменьшить количество брака при производстве.

Ксенон (Xe) - инертный газ, который не образует химических соединений с другими веществами, находит широкое применение в различных областях науки и техники [8].

Одно из наиболее известных применений ксенона - это использование его в лампах высокого давления для освещения спортивных сооружений, аэродромов, дорог и других объектов [9].

Ксенон нашел широкое применение в производстве микросхем, где надежность и стабильность являются критически важными факторами.

Ксенон используется в производстве микросхем для создания экранирующей атмосферы, которая защищает чувствительные электронные компоненты от неблагоприятного воздействия внешних факторов, таких как воздействие кислорода и водорода. Кроме того, ксенон используется для охлаждения материалов, что помогает снизить тепловые нагрузки и предотвращает их разрушение.

Ксенон также используется в электронных лазерах, которые используются для точной обработки материалов, таких как кремний или стекло, применяемых в производстве

микросхем. Ксенон в лазерах обеспечивает более точный лазерный пучок и точечное действие на материалы, что помогает увеличить качество производимых микросхем.

Кроме того, ксенон также используется в процессе тестирования микросхем на надежность и стабильность. В процессе тестирования ксенон используют для создания условий, которые могут повредить микросхему, таких как колебания температуры, воздействие влаги или ультрафиолетовых лучей. Это позволяет определить надежность и стабильность произведенных микросхем.

Итак, ксенон широко используется в производстве микросхем для увеличения надежности и стабильности конечного продукта. Он используется для создания экранирующей атмосферы, защиты от воздействия внешних факторов, охлаждения материалов и тестирования их на надежность. Все это позволяет создавать более надежные и стабильные микросхемы, которые используются в различных сферах, таких как информационные технологии, автомобильная промышленность, аэрокосмическая отрасль и многие другие.

Преимущества ксенона заключаются в его широком использовании в электронных микросхемах с целью обеспечения надежности и устойчивости их функционирования.

Ксеноновая микросхема обладает высокой стойкостью к воздействию различных факторов, таких как радиация, перепады температур и электрические сбои.

Кроме того, ксеноновая микросхема имеет очень длительный срок службы, который обеспечивается высокой устойчивостью материалов, используемых при ее изготовлении, и низкими температурами, при которых она работает.

Следует отметить, что ксенон в микросхемах не является токсичным и поэтому не представляет угрозы для здоровья человека.

Ксеноновая микросхема обладает высоким коэффициентом эффективности, что означает, что она потребляет много меньше энергии, чем другие типы микросхем, что в свою очередь означает, что она меньше нагревается и дольше сохраняет свои электрические свойства.

Таким образом, использование ксенона в микросхемах обеспечивает высокую надежность и стабильную работу, что делает их особенно важными для применения в критических системах, которые должны работать круглосуточно без перерывов и сбоев.

Сурьма (Sb) - это металл, относящийся к группе похожих элементов, называемых металлоидами, свойства которых аналогичны свойствам металлов, которые легко проводят электричество, и неметаллов, которые слабо проводят электрический ток.

Сурьма широко применяется в микросхемах, так как обладает некоторыми уникальными характеристиками, которые делают ее подходящим материалом для производства полупроводниковых устройств [10-11]. В частности, сурьма при определенных условиях обладает либо хорошей проводимостью электрического тока, либо низкой электропроводностью, что позволяет использовать ее для создания различных элементов микросхем.

Сурьма используется в качестве материала для изготовления контактов, переходов и диффузионных слоев в полупроводниковых устройствах. Он также используется в качестве материала для создания электрических проводов на поверхности микросхем.

Надежность микросхем из сурьмы связана с тем, что сурьма не подвержена окислению при высоких температурах, что особенно важно для производства микроэлектроники. Это позволяет использовать элементы из сурьмы при высоких температурах в процессе микрообработки.

Однако, использование сурьмы также имеет свои недостатки, например, она может создавать дефекты на границах зерен при кристаллизации и при процессе упаковки. Поэтому, для повышения надежности микросхем из сурьмы, специалисты производят оксидацию поверхности материала, используют добавки, повышающие точку плавления, а также добавляют другие элементы для устранения дефектов, связанных с использованием чистой сурьмы.

Таким образом, для обеспечения надежности микросхем, включающих сурьму, используются специальные методы, направленные на повышение качества материала и процессов производства, что в свою очередь обеспечивает надежность работы микросхем.

Сурьма имеет несколько преимуществ в микросхемах, связанных с обеспечением их надежности.

В первую очередь, это отсутствие окисления: сурьма не подвержена окислению, что позволяет использовать ее в контактах и проводах микросхем без риска потери электрической проводимости.

Сурьма обладает высокой термической стабильностью и не пострадает при высоких температурах, что особенно важно для производства микроэлектроники.

Процесс обработки сурьмы на производстве обеспечивает высокую точность изготовления элементов микросхем, что несомненно повышает надежность их работы.

Хорошее соотношение между свойствами и стоимостью позволяет сурьме являться довольно доступным материалом, который при этом обладает необходимыми свойствами для создания полупроводниковых устройств и элементов микросхем.

Выявленная устойчивость к воздействию внешних факторов показывает, что сурьма не реагирует на многие химические вещества, в том числе на большинство кислот и щелочей. Это обеспечивает дополнительную надежность работы микросхем, особенно в условиях повышенной влажности или агрессивной среды.

Таким образом, использование сурьмы в микросхемах имеет ряд преимуществ, связанных с обеспечением их надежности, что делает этот материал одним из наиболее востребованных в производстве полупроводниковых устройств.

Палладий (Pd) – это серебристо-белый металл, который относится к группе платиновых металлов. Он обладает высокой коррозионной стойкостью, химической инертностью, высокой термической устойчивостью и проводимостью электрического тока. Палладий обычно добывается вместе с другими металлами, такими как платина, иридий, родий и др. Его главными производителями являются Россия, Канада и Южная Африка.

Палладий широко используется в различных отраслях, включая микроэлектронику и изготовление микросхем [12]. Наиболее распространенное применение палладия в полупроводниковой промышленности связано с его использованием в качестве контактной площадки или провода для соединения элементов микросхем. Также палладий может использоваться в качестве проводника в электронных компонентах, где требуется высокая термическая стойкость и электрическая проводимость.

Преимущества использования палладия в микросхемах состоит, прежде всего, в его высокой коррозионной стойкости: палладий не подвержен коррозии, что делает его особенно ценным материалом для использования в экстремальных условиях, таких как высокая влажность или высокие температуры.

Палладий образует прочные контакты с другими материалами, что делает его подходящим материалом для изготовления контактных площадок микросхем, повышая контактную надежность.

Высокая термическая стойкость и электрическая проводимость палладия позволяет использовать его для создания проводников и контактов в микросхемах.

Устойчивость палладия к окислению при высоких температурах обеспечивает надежность при производстве микросхем.

Палладий относится к металлам, которые являются довольно дорогими, что делает его ценным материалом для использования в высокотехнологичных отраслях, таких как микроэлектроника.

Палладий применяется в микросхемах для повышения их надежности и стабильности работы. Он используется как покрытие для контактов микросхемы, что позволяет увеличить их стойкость к коррозии и окислению, а также обеспечить надежное электрическое соединение.

Палладий может быть использован как покрытие для проводников в микросхемах, что позволяет увеличить их электрическую проводимость и надежность.

Поскольку палладий обладает высокой устойчивостью к окислению, он может быть использован в качестве контактных площадок для питания микросхемы, что позволяет улучшить электрическую стабильность в повышенных температурных условиях.

Палладий также может быть использован для создания антистатических элементов в микросхемах. Антистатические элементы служат для защиты микросхем от статического электричества, оказывающего вредное воздействие.

Для улучшения стойкости к коррозии и другим внешним воздействиям корпус микросхемы также может быть покрыт слоем палладия.

Таким образом, палладий используется в микросхемах для создания надежных и долговечных элементов, которые будут работать без сбоев даже в экстремальных условиях. Это улучшает надежность и стабильность работы микросхем, что особенно важно в сферах, где необходимо обеспечить высокую степень безопасности и надежности, например, в авиационной и космической промышленности.

В сравнении с золотом и серебром, ксенон, криптон, сурьма и палладий не используются так широко в микросхемах [13-14]. Золото и серебро имеют высокую проводимость и коррозионную стойкость, что делает их идеальным выбором для использования в промышленных микросхемах, например, в микропроцессорах и элементах памяти. Золото также используется для связывания проводников и других элементов микросхем.

С другой стороны, ксенон, криптон, сурьма и палладий используются в более специфических приложениях, таких как лазерная обработка материалов. Ксенон и криптон можно использовать для производства оптических масок в качестве фоторезиста, а палладий и сурьма могут использоваться в качестве катализаторов для производства электроники с высокой производительностью.

Однако, ксенон, криптон, сурьма и палладий имеют свои уникальные характеристики и способности, которые могут быть полезны для производства определенных типов микросхем. Например, криптон может быть использован в лазерах, которые применяются при производстве микросхем, а палладий - для создания сенсоров давления в медицинских приборах.

Несмотря на широкую область применения данных элементов в микроэлектронике, существуют некоторые проблемы, связанные с их использованием.

Редкие элементы, такие как ксенон, сурьма и палладий, являются дорогими, что может значительно повлиять на стоимость производства полупроводниковых устройств.

Несмотря на то, что криптон, ксенон, сурьма и палладий не являются самыми редкими элементами в природе, их добыча и производство может быть сложным процессом, особенно в большом масштабе.

Некоторые элементы, такие как сурьма, могут быть опасными при работе с ними. Это может создавать проблемы для производственного персонала и потребителей.

Добыча и производство редких элементов могут создавать экологические проблемы, такие как загрязнение почвы и воды.

С появлением новых технологий могут существовать более дешевые и экологически безопасные способы создания микроэлектроники без использования редких элементов [15].

В целом, несмотря на проблемы, связанные с использованием криптона, ксенона, сурьмы и палладия в микроэлектронике, они играют важную роль в создании полупроводниковых устройств и других приборов.

Заключение

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что редкие элементы, такие как криптон, ксенон, сурьма и палладий, имеют большое значение для создания и улучшения характеристик микросхем в микроэлектронике. Они играют важную роль в создании полупроводниковых устройств, лазеров, светоизлучающих диодов, ламп накаливания,

светофильтров и других приборов. Однако существуют проблемы, связанные с их использованием, такие как высокая стоимость, ограниченная доступность, токсичность и экологические проблемы. Необходимо продолжать исследования и развивать альтернативные технологии, чтобы улучшить производственный процесс изготовления микросхем с использованием редких элементов и минимизировать негативное экологическое воздействие. В целом, редкие элементы остаются важными компонентами микроэлектроники и при правильном их использовании могут значительно улучшить качество и эффективность работы микросхем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кучера Л.Я. Оценка надежности функционирования технических систем в аспекте развития инфраструктуры жизнеобеспечения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование – Иркутск, 2007. – 3 (15), С. 101-103.
2. Кучера Л.Я., Копанев М.В., Федорова Н.В. Моделирование показателей надежности технических систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование – Иркутск, 2010. – 2 (26), С. 204-208.
3. Копанев М.В., Кучера Л.Я. Математическая модель формирования надежности стрелочного электропривода // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: сборник статей всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск, 2016. – Т. 1, С. 244-249.
4. Надежность микроэлектронных систем: учебное пособие / В. И. Халимов и др. М.: Новосибирский государственный технический университет, 2017. - 344 с.
5. Интегральные микросхемы и их применение: учебное пособие / под ред. М. Е. Захарова. СПб.: Питер, 2016. - 448 с.
6. Смирнов, В. И. Технология полупроводниковых материалов: учебное пособие для вузов. М.: Бином, 2020. - 584 с.
7. Фролов, Д. Г., Шипилова, О. А. Влияние криптона и ксенона на работу микросхем. Электроника: наука, технология, бизнес, 2012, № 2, с. 102-109.
8. Ксеноны и редкие газы: учебное пособие / под ред. А. И. Дудина, Л. И. Моисеева. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. - 152 с.
9. Кузьменков Ю. Р. Редкие элементы в электронике. https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/28841/1/978-5-7996-1186-6_2014.pdf
10. Данилов, Д. В., Шамов, С. А., Комкин, А. И. Сурьма и её соединения в технологии создания интегральных схем. Современная электроника, 2014, № 5, с. 34-39.
11. Карпов Ф. Г., Карташов В. И. Сурьма и ее сплавы в электронике // Труды XXIII международной научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника». 2013. С. 166-169.
12. Айверсон Дж. Х. и др. Диффузионные барьеры из палладия для медных микроэлектронных соединений // Журнал вакуумной науки и техники В: Микроэлектроника и обработка нанометровых структур, измерения и явления, 2001.
13. Азарова, Е. И., Джуан, Х. А. Сравнительный анализ свойств золота, серебра, ксенона, криптона, сурьмы и палладия. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2017. - Т. 17, № 6. - С. 1137-1142.
14. Мангасарян, П. А., Аракелов, Л. А. Особенности свойств и применения редких металлов: золота, серебра, ксенона, криптона, сурьмы и палладия. Материалы и технологии. - 2019. - Т. 7, № 1. - С. 15-22.
15. Гальперин М. В. Электротехника и электроника : учебник / М. В. Гальперин. — 2-е изд. — Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2022. — 480 с.

REFERENCES

1. Kuchera L.YA. Otsenka nadezhnosti funktsionirovaniya tekhnicheskikh sistem v aspekte razvitiya infrastruktury zhizneobespecheniya // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye* – Irkutsk, 2007. – 3 (15), S. 101-103
2. Kuchera L.YA., Kopanov M.V., Fedorova N.V. Modelirovaniye pokazateley nadezhnosti tekhnicheskikh sistem // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye* – Irkutsk, 2010. – 2 (26), S. 204-208.
3. Kopanov M.V., Kuchera L.YA. Matematicheskaya model' formirovaniya nadezhnosti strelochnogo elektroprivoda // *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: sbornik statey vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. – Irkutsk, 2016. – T. 1, S. 244-249.
4. Reliability of microelectronic systems: textbook / V. I. Khalimov et al. M.: Novosibirsk State Technical University, 2017. - 344 p.
5. Integrated circuits and their application: a textbook / edited by M. E. Zakharov. St. Petersburg: St. Petersburg, 2016. - 448 p.
6. Smirnov, V. I. Technology of semiconductor materials: a textbook for universities. M.: Binom, 2020. - 584 p.
7. Frolov, D. G., Shipilova, O. A. The influence of krypton and xenon on the operation of microcircuits. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2012, No. 2, pp. 102-109.
8. Xenon and rare gases: textbook / edited by A. I. Dudin, L. I. Moiseev. M.: Bauman Moscow State Technical University, 2015. - 152 p.
9. Kuzmenkov Yu. R. Rare elements in electronics. https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/28841/1/978-5-7996-1186-6_2014.pdf
11. Karpov F. G., Kartashov V. I. Sur'ma i yeye splavy v elektronike // *Trudy KHKHIII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektronika i mikroelektronika»*. 2013. S. 166-169.
12. Iverson J.H. et al. Palladium diffusion barriers for copper microelectronic compounds. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2001.
13. Azarova, E. I., Juan, H. A. Comparative analysis of the properties of gold, silver, xenon, krypton, antimony and palladium. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*. - 2017. - Vol. 17, No. 6. - pp. 1137-1142.
14. Mangasaryan, P. A., Arakelov, L. A. Features of properties and applications of rare metals: gold, silver, xenon, krypton, antimony and palladium. *Materials and technologies*. - 2019. - Vol. 7, No. 1. - pp. 15-22.
15. Galperin M. V. Electrical engineering and electronics: textbook / M. V. Galperin. - 2nd ed. - Moscow: FORUM: INFRA-M, 2022. - 480 p.

Информация об авторах

Логина Анастасия Сергеевна – студент 3 курса, факультет «Строительство железных дорог», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: login12_an@mail.ru

Кучера Людмила Ярославовна – старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: k-64@rambler.ru

Information about the authors

Loginova Anastasia Sergeevna – 3rd year student, Department of Railway construction, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: login12_an@mail.ru

Kuchera Lyudmila Yaroslavovna – Senior Lecturer of the Department of Technospheric Safety, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: k-64@rambler.ru