

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ИНДИЯ И ГАЛЛИЯ

Е.В. Мараева, Н.В. Пермяков, В.А. Мошников

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

jenymar@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.760

Аннотация: В кратком обзоре рассматриваются основные тенденции применения эвтектических расплавов на основе индия и галлия (*EGaIn*) в настоящее время. Приведены примеры использования *EGaIn* в транзисторах, конденсаторах, электродах, зондовых установках (в том числе с применением четырехзондовых методик). Рассмотрены основные свойства *EGaIn*, особенности растекания капли жидких расплавов *EGaIn*, приведена подробная схема точечно-контактного четырехзондового метода. Выявлены основные вопросы, обсуждаемые при применении *EGaIn* в области получения жидких электродов, включая возникновение оксидов галлия, возможность влияния пространственного окружения на каплю *EGaIn* и манипулирования микрокаплями. Установлено, что среди работ 2022 – 2023 годов большой сегмент занимают публикации в области гибкой электроники, интеллектуальных роботов, а также носимых устройств (например, создание метаткани, обладающей антибактериальным эффектом и способностью нагревания с низким энергопотреблением) и биомедицинских приложений (разработка умных перчаток для манипулирования жестами, измерение сердечного ритма насекомых).

Ключевые слова: эвтектические расплавы, *EGaIn*, жидкие зонды, гибкая электроника.

1. Введение

Жидкометаллические эвтектические сплавы на основе галлия-индия в настоящее время широко используются в различных приложениях, начиная от электроники и заканчивая биомедициной (см. рис. 1). Важной прикладной задачей для проведения исследования пленочных образцов, в том числе проводящих органических пленок, является использование жидких зондов на основе индий-галлиевой эвтектики с возможностью позиционирования [1].

Сейчас использование жидких зондов позволяет снять такие вопросы, возникающие при исследовании, как: насколько сильно зонд давит на образец, может ли он повредить исследуемый слой, как после этого будет протекать ток [2, 3]. Тем не менее, все еще открытыми остаются вопросы, какие факторы влияют на контактное сопротивление, или как часто можно повторно использовать электрод *EGaIn*, как площадь контакта влияет на результаты измерений. Следует отметить, что важными особенностями жидкостных контактов являются возможность пропускания больших токов, образование электрического пробоя и создание фрактальных структур [4].

Целью настоящего краткого обзора является рассмотрение основных

тенденций применения эвтектического расплава $EGaIn$, в том числе в жидких контактах, гибкой электронике, робототехнике, биомедицине.

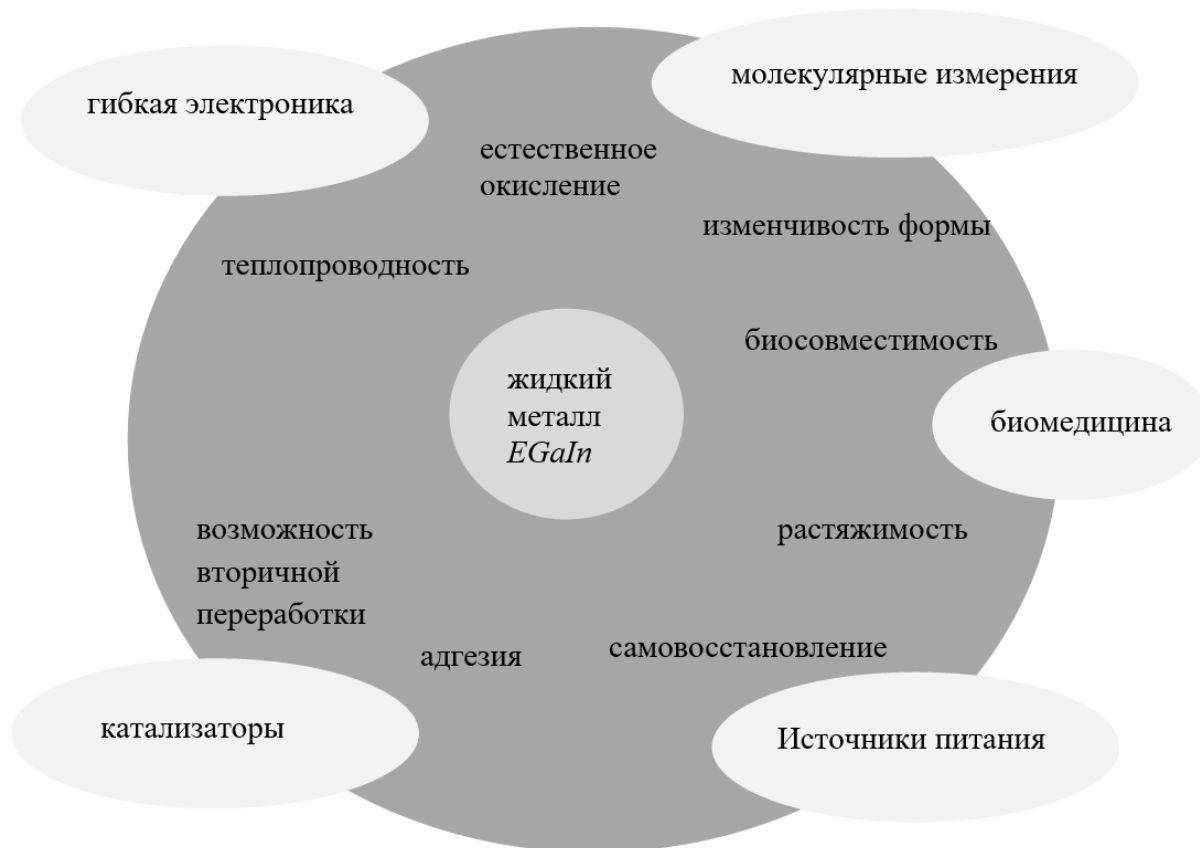


Рис. 1. Краткое описание свойств и связанных с ними применений $EGaIn$ [1].

2. Применение $EGaIn$ в жидких электродах и гибкой электронике: предыстория

В работе [5] были проведены исследования формы капли индий-галлиевого эвтектического расплава. Для острия иглы диаметром 400 мкм авторы смогли получить острое электрода диаметром от 50 до 100 мкм. Даже после того, как игла была резко отведена от капли, эвтектическая капля не превратилась в полусферу. Контактное давление жидкого зонда на исследуемую поверхность уменьшается с увеличением диаметра контактной области. Жидкий эвтектический расплав на воздухе покрывается тонким слоем оксида галлия. Этот слой оксида выступает в качестве мембраны, поверхностное натяжение которой определяет форму капли. При достижении небольшого критического поверхностного натяжения тонкий слой оксида рвется и тотчас же снова образуется в результате взаимодействия с воздухом через микрофлюидные каналы. Получается, что капля эвтектического индий-галлиевого расплава постоянно имеет оксидную мембрану с микрофлюидными каналами на своей поверхности.

На поверхности эвтектического индий-галлиевого расплава находится слой оксида галлия, который является полупроводником n-типа. Температура плавления расплава составляет $15,5^{\circ}\text{C}$, проводимость – $3,4 \cdot 10^4 \text{ См/см}$, работа выхода *EGaIn* составляет 4,1-4,2 эВ [6]. На основании того, что он является хорошим проводником, в работе [7] было предложено использовать 3D структуры сплава *EGaIn* с жидкой фазой, встроенные в эластомер. Это позволяет производить гибкие 3D структуры, которые не теряют своих проводящих свойств при деформации. *EGaIn*, который внедряют в микроканалы, при комнатной температуре является жидкостью, и способен выдерживать существенные механические деформации без разрушения или потери электропроводных свойств, при этом, поскольку расплав находится в капиллярах, он не будет растекаться.

Возможны различные варианты нанесения планарных цепей на основе *EGaIn*: заливка в сформированные каналы [8]; нанесение через трафарет с последующим охлаждением и герметизацией эластомером [9]. Для объемных схем используют метод литья с последующим замораживанием жидкого эвтектического *EGaIn*, либо методом вакуумного литья. После этих операций все структуры находятся в твердом состоянии при температуре ниже комнатной. Однако, поскольку работать они будут при комнатной температуре, составленные цепи необходимо залить эластомером для предотвращения растекания структур из *EGaIn*. Также жидкий эвтектический индий-галлиевый расплав активно применяется в микроконтактной печати [9]. Данный вид создания гибких проводящих каналов широко используется в мягкой литографии [10]. Несмотря на то, что этот способ намного медленнее струйного электрогидродинамического нанесения, он дешевле и может быть осуществлен жидким *EGaIn* прямо в воздухе путем ведения зонда по заданному шаблону. Микроконтактная печать относительно проста при использовании чернил, которые легко смачивают поверхность эластомера. Индий-галлиевый же расплав не обладает таким свойством из-за окисления его поверхности, в результате чего образуется большая капля, силы поверхностного натяжения которой непросто разорвать [11]. Однако при этом данный расплав имеет преимущество в сохранении формы осажденной структуры во время проведения внешней подводки и герметизации. Когда полусферический наконечник отводят от поверхности, часть жидкого сплава переносится на плоскую подложку и образует каплю. Капельки, которые осаждаются с расстоянием, меньшим, чем диаметр капель, сливаются и образуют сплошную линию. После того, как узор напечатан, к нему подводят внешние выводы, жидкий расплав замораживают и покрывают дополнительным слоем эластомера. Можно наносить отдельные капли диаметром 340 мкм с шагом до 13 мкм. Однако в таком мелком шаге нет

необходимости, и уже при шаге в 200 мкм отдельные капли сливаются в единую линию [9].

Так, в работе [12] предложен метод оценки полевой подвижности носителей (μFET) для пленок органических полупроводников, играющей ключевую роль в характеристиках полевых транзисторов (см. рис. 2).

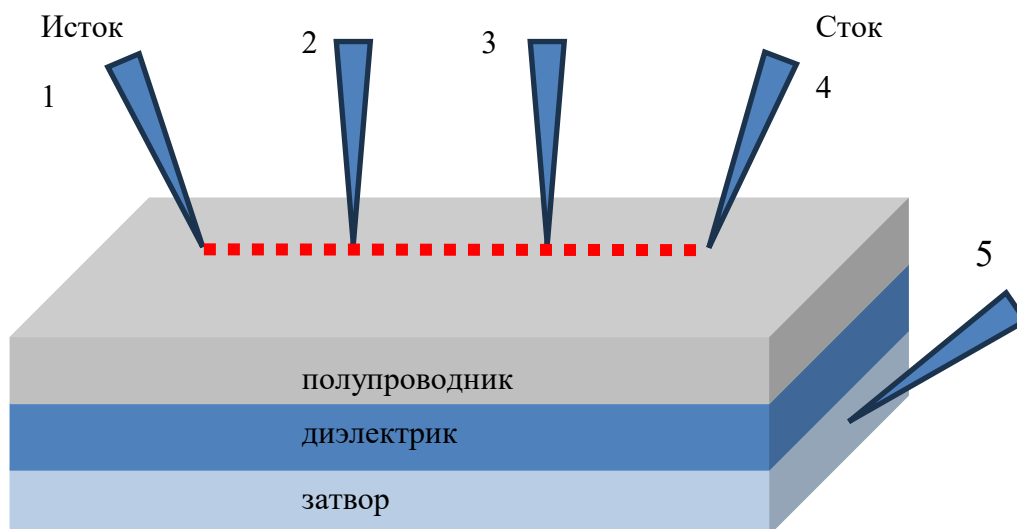


Рис. 2. Схема точечно-контактного четырехзондового метода. Цифрами 1, 2, 3 и 4 обозначены четыре точечных датчика, а цифрой 5 обозначен электрод затвора. Ток подается от 1 к 4, а 2 и 3 используется для измерения потенциала [12].

Интересный подход к созданию зондовой установки демонстрируют работы [12, 13], где используется четырехзондовый метод с жидкими зондами на основе галлия для исследования подвижности носителей в органических пленках.

Предлагается подход к быстрой оценке подвижности с помощью точечного четырехзондового метода для органических полупроводниковых пленок. Четыре зонда контактируют с поверхностью полупроводниковой пленки напрямую, без нанесения обычных электродов истока/стока, для одновременной подачи тока и измерения электрического потенциала. Плотность заряда и, следовательно, проводимость пленки регулируются при сканировании напряжения затвора, из которого извлечение подвижности может быть реализовано за несколько секунд. Этот метод с легко доступной настройкой и численным моделированием существенно ускоряет оценку подвижности и, таким образом, может помочь в отборе материалов и оптимизации морфологии пленки для приложений с органическими полевыми транзисторами.

В работе [13] изучалась двумерная анизотропия полевой подвижности носителей для обработанного в растворе органического полупроводника 6,13-бис(триизопропилсилилэтинил)пентацена с использованием четырех независимых зондов эвтектики галлия-индия

(*Ga–In*). Отмечается, что жидкометаллические зонды *Ga–In* очень эффективны для воспроизводимых измерений проводимости тонких органических пленок. Высокая анизотропия подвижности была получена с использованием четырехзондового метода и схемы обратной связи для поддержания постоянного потенциала канала. Настоящий метод минимизировал влияние контактного сопротивления и нечувствительности к анизотропии в линейном расположении двумерных полевых транзисторов.

В указанном исследовании использовали вольфрамовые зонды (*W*) с покрытием из жидкометаллического галлия-индия (*Galn*) для воспроизводимых результатов при характеристике анизотропной электропроводности в пленках органических полупроводников в вакууме при комнатной температуре

Покрытые *Galn* иглы *W* были изготовлены по следующей процедуре. Сначала проволоку вольфрама подвергали электрохимическому травлению в растворе КОН. Их выводили из раствора со скоростью 2 мкм/с для создания конусообразных наконечников. Затем на иглы *W* напыляли слой *Au* толщиной несколько нм при давлении 106 Па для улучшения смачиваемости *Galn* на поверхности игл. Наконец, капли *Galn* (75:25 масс.%) диаметром от 100 до 300 мкм прикреплялись к наконечникам *W* путем их погружения в ванну с *Galn* на воздухе.

Поскольку жидкие металлы на основе галлия обладают механической стабильностью, они могут быть преобразованы в различные формы при комнатной температуре с использованием различных приложенных сил [14]. Хан и др. показали, что введенный оксидный слой жидкого металла может формироваться и удаляться низкими напряжениями [15].

Еще один интересный пример применения *EGaln* для создания электродов показан в работе [16], где использовались два типа электродов – вольфрамовые игольчатые зонды и электроды из *Galn* – для наблюдения за особенностями сердечного ритма насекомых. Дело в том, что получение электрокардиограммы (ЭКГ) насекомых затруднены из-за слабых сигналов и ограниченной площади контакта для наложения электродов. С помощью электромагнитно-экранированной системы сбора сигналов сердца, включающей аналоговое усиление и цифровую фильтрацию, были получены сигналы ЭКГ трех фенотипов, имеющих разные функции сердца. Показано, что при длительной записи ЭКГ неинвазивный метод, реализованный *Galn*-электродами, действует относительно стабильно как по амплитуде, так и по периоду.

Два типа электродов, вольфрамовые игольчатые зонды и электроды из *Galn* соответственно, использовались для проведения инвазивных и

неинвазивные записей ЭКГ образцов дрозофилы. Вольфрамовые игольчатые зонды, имевшие длину 76 мм, диаметр 257 мкм и открытые наконечники 0,3 мм, были покрыты биосовместимым париленом-С для шумоизоляции.

Galn представлял собой жидкий металл с низким интерфейсным импедансом при комнатной температуре, что обеспечивало низкий уровень шума и дрейфа базовой линии для регистрации слабых сигналов. *Galn* переносился вольфрамовыми зондами для создания контактных электродов с ограниченным затуханием и искажением сигнала для неинвазивной записи; с помощью этого метода зарегистрированная мощность сердечного сигнала дрозофилы была порядка нановольт до операции усиления.

Отмечается, что эта электродная система *Galn* может стать платформой для исследования электрофизиологических сигналов молекулярного механизма, связанного с сердечной аритмией, а также исследований, связанных со скринингом и разработкой лекарств.

3. Анализ работ 2022 – 2023 годов

Анализ последних публикаций показывает, что жидкие металлы, такие как *EGaln*, обещают огромный потенциал для ускорения разработки гибкой электроники, интеллектуальных роботов, а также носимых и биомедицинских устройств. Хотя сообщается о различных новых методах обработки, они сопряжены с рядом рисков (например, утечка, слабая адгезия и низкая коллоидная и химическая стабильность) из-за их высокой текучести, высокого поверхностного натяжения и быстрого окисления.

В наномасштабе капли жидких металлов одновременно обладают высокой электро- и теплопроводностью, настраиваемой реактивностью и полезными физико-химическими свойствами. Они также предлагают особые условия сплавления и удаления сплавов для формирования многоэлементных наносплавов на основе жидкости или синтеза инженерных твердых наноматериалов [17].

В обзоре [1] не только представлены уникальные свойства *EGaln*, но также проиллюстрированы принципы работы устройств на основе *EGaln* и обобщены разработки методов, связанных с *EGaln*. Рассмотрено применение *EGaln* в различных областях, таких как гибкая электроника (датчики, антенны, электронные схемы), молекулярная электроника (молекулярная память, оптоэлектронные переключатели или реконфигурируемые соединения), энергетический катализ (управление теплом, двигатели, генераторы, батареи), биомедицинские науки (доставка лекарств, терапия опухолей, биовизуализация и нейронные интерфейсы, а также проблемы, связанные с разработкой методик на основе *EGaln*).

3.1. Влияние пространственного окружения на форму капли *EGaIn* и манипулирование микрокаплями

В работе [18] продемонстрировано прямое манипулирование микрокаплями *EGaIn* с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) для создания повторяющихся и разрываемых по требованию контактов на самособирающихся монослоях алкантиолов. Наномасштабное позиционное управление и петля обратной связи в АСМ позволяют контролировать контактную силу на уровне наноньютонов и, следовательно, настраивать площади контакта капель в микрометровом масштабе как в воздухе, так и в этаноле. При погружении в этанол капли практически не смачиваются, что приводит к безгистерезисным контактным силам и минимальной адгезии; в результате можно создавать воспроизводимые геометрические площади контакта 0,8-4,5 мкм² с алкантиолатными поверхностно-активными веществами в этаноле. Напротив, для той же капли *EGaIn* в воздухе наблюдается больший гистерезис контактных усилий и большее сцепление, что снижает контроль над площадью контакта (4-12 мкм²). Продемонстрирована полезность метода и полученных данных о контактной механике *EGaIn* путем создания четко определенных молекулярных туннельных переходов на основе алкантиолатных монослоев с небольшими геометрическими контактными площадями от 4 до 12 мкм² в воздухе, что на 1-2 порядка меньше, чем ранее достигнутое.

В работе [19], используя наноиндентирование с измерением глубины на чистых поверхностях *EGaIn* / *GaOx*, авторы показывают, как изменения межфазной энергии *EGaIn*/ подложки регулируют адгезионные и контактные механические свойства, в частности эволюцию капиллярных мостиков *EGaIn* с различной капиллярной геометрией и давлением. Варьируя межфазную энергию, подвергая *EGaIn* воздействию различных химических сред и функционализируя иглу химически отличными самоорганизующимися монослоями, авторы доказали, что силы сцепления между *EGaIn* и твердой подложкой могут быть увеличены до 2 порядков, что приводит к примерно 60-кратному увеличению удлинения капиллярных мостиков. Данные показывают, что при разворачивании молекулярных соединений с самоорганизующимися монослоями различных концевых групп тенденции скорости переноса заряда, сопротивления монослоев и контактных взаимодействий между *EGaIn* и монослоями из электрических характеристик также регулируются межфазными энергиями. Это исследование дает ключевое представление о роли межфазной энергии в геометрических характеристиках капиллярных мостиков *EGaIn*, предлагая информацию о создании переходов *EGaIn* контролируемым образом.

Слой $GaOx$, спонтанно образующийся на $EGaIn$, имеет толщину около 0,7-3 нм; этот тонкий оксидный слой придает $EGaIn$ неньютоновские свойства и является источником неоднозначности. Возможно, эти неоднозначности наиболее распространены не только в приложениях молекулярной электроники, но и в любых других приложениях, где важно понимать, как $EGaIn$ взаимодействует с поверхностями: насколько гладкими являются границы раздела, какие факторы влияют на контактное сопротивление, или как часто можно повторно использовать электрод $EGaIn$? Например, $EGaIn$ обычно формируют в конусовидные острия, которые, в свою очередь, используются для формирования электрических контактов с поверхностями монослоев на металлических электродах для получения переходов металл-монослой- $GaOx/EGaIn$ (ключевой элемент в молекулярной электронике). Здесь слой $GaOx$ обеспечивает стабильность и препятствует сплавлению объемного сплава $Ga-In$ с металлической поверхностью, поддерживающей монослой, а также является источником неопределенности. Поверхности $GaOx/EGaIn$ шероховатые (из-за разрыва $GaOx$ во время формирования наконечников-острий), что приводит к высокому контактному сопротивлению (из-за малой эффективной площади контакта). Авторы также обнаружили, что конусообразные кончики $EGaIn$ оставались неизменными после 6-7 повторных вдавливаний/контактов, но происхождение этого поведения «памяти формы» неясно. В настоящее время остаются дискуссионными вопросы понимания свойств вдавливания $EGaIn$ с его нетронутым слоем $GaOx$ на молекулярных масштабах.

Особенно это касается вопросов, как поверхности $GaOx/EGaIn$ взаимодействуют и текут по другим поверхностям (например, монослоям, органическим тонким пленкам и растяжимым материалам), как взаимодействие зависит от поверхностного натяжения этих поверхностей и окружающей среды $EGaIn$ (которое в свою очередь влияет на формирование слоя $GaOx$). Например, хорошо известно, что физадсорбированную воду важно учитывать на границах раздела, но то, как контактная механика $EGaIn$ в воздухе сравнивается с таковой в воде, не изучено. Для электронных приложений важно понимание поведения смачивания, как $EGaIn$ влияет на функцию смачивающих свойств целевого материала или поверхности. Например, в молекулярной электронике известно, что взаимодействие молекула-электрод играет отрицательную роль в проводимости переходов металл-молекула-металл. Так, контактное сопротивление $EGaIn$ с алифатическими монослоями с $GaOx$ в 6 раз выше, чем без слоя $GaOx$. Эти исследования подчеркивают важность улучшения понимания различий в адгезионных и смачивающих свойствах $EGaIn$ с различными типами монослоев и, в более широком смысле, с другими типами поверхностей. Также важно учитывать механическую реакцию

оксидной оболочки/капель жидкого металла как при сжимающей, так и при растягивающей нагрузке, соответствующей режимам наложенного напряжения во время изготовления электрода.

В работе [19] были изучены физические и механические взаимодействия *EGaIn* со слоем собственного оксида *GaOx* с помощью наноиндентирования с измерением глубины. Этот метод позволяет точно измерять контактные силы и исследовать деформацию и преобразование *GaOx* при сжимающей и растягивающей нагрузке. Авторы вдавливали *EGaIn* при различных скоростях деформации с помощью шаровидных наконечников, покрытых функционализированным золотом с $S(CH_2)_{11}X$, демонстрирующих совершенно разные межфазные энергии (где X представляет собой концы CH_3 , NO_2 , NH_2 или OH) в различных средах (воздух и различные водные среды). Этот подход дал следующее понимание: (1) капиллярные мосты развивают либо положительное, либо отрицательное капиллярное давление в зависимости от сил межфазного сцепления (важно понимать для изготовления наконечников *EGaIn* или в 3D-печати); (2) определенные химические группы и окружающая среда сильно влияют на адгезионную реакцию *EGaIn*; и (3) оксидный слой неоднократно трескается и восстанавливается во время течения (объясняя поведение *EGaIn* с памятью формы) в зависимости от скорости деформации и окружающей среды. Установлено, что увеличение силы сцепления на границе раздела *EGaIn*/монослой приводит к снижению контактного сопротивления (и сопутствующему увеличению скорости квантово-механического туннелирования через эти контакты). Эти новые взгляды на механическую реакцию оксидной оболочки определяют, как *EGaIn* взаимодействует с различными типами поверхностей и как эти взаимодействия влияют на электрический отклик не только молекулярных соединений, но и других типов электронных устройств на основе жидких металлов, особенно при повторяющихся воздействиях.

При разработке способов создания зондов из эвтектики *EGaIn*, а также для анализа адгезионной прочности могут быть полезны данные, изложенные в работах [20-22].

Особого внимания заслуживают результаты работы [23] по межфазному поведению эвтектических капель жидкого металла галлия-индия (*EGaIn*) со специальным применением различных растворителей. Существенной разницы в краевых углах *EGaIn* не наблюдается независимо от типа растворителя. Однако наличие или отсутствие конического наконечника на каплях *EGaIn* после дозирования может косвенно свидетельствовать об относительно низкой межфазной энергии *EGaIn* в неполярных растворителях. Кроме того, в динамических экспериментах (с простукиванием) капля *EGaIn* отскакивает в полярных растворителях воды

и диметилсульфоксида (ДМСО), тогда как в неполярных растворителях гексана и бензола она растекается и прилипает к подложке. Можно утверждать, что различное поведение при ударе в зависимости от типа растворителя тесно связано с межфазной энергией $EGaIn$ в каждом растворителе. Наконец, сравниваются краевые углы (см. рис. 3) и формы капель $EGaIn$ в водных буферных растворах с разными значениями pH (4, 7 и 10). В буферном растворе с pH 10 капля $EGaIn$ принимает сферическую форму без конического кончика, что свидетельствует о высокой поверхностной энергии. Это связано с растворением «пограничного энергоснижающего» поверхностного слоя на $EGaIn$, чему способствует повышенная концентрация ионов галлия, высвобождаемых из $EGaIn$ в буферном растворе.

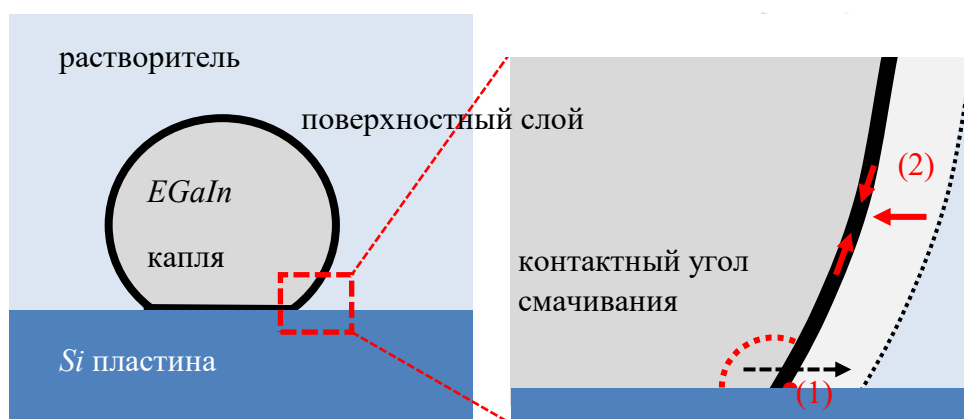


Рис. 3. Схема краевого угла капли $EGaIn$, размещенной на кремниевой пластине. Вязкоупругий поверхностный слой (1) прикрепляет металл к подложке и (2) выдерживает растягивающее напряжение [23].

В случае полярных растворителей авторами работы [23] были выбраны вода, диметилсульфоксид и этанол. Значения их относительной полярности составляют 1, 0,444 и 0,654 соответственно. В качестве неполярных растворителей были выбраны бензол, гексан и силиконовое масло. Бензол и гексан имеют относительную полярность 0,111 и 0,009 соответственно, а силиконовое масло имеет низкую полярность. На основе уравнения Юнга краевой угол на идеально плоской твердой поверхности определяется межфазным натяжением трех несмешивающихся фаз. Поэтому предполагалось, что краевые углы капель $EGaIn$ будут варьироваться в зависимости от полярности растворителей из-за разных значений межфазной энергии между растворителями и $EGaIn$.

Вопреки ожиданиям, все капли $EGaIn$ демонстрируют высокие краевые углы при $160^{\circ}C$ с незначительной разницей независимо от типа растворителя. Этот результат может быть связан с новообразованием

вязкоупругого тонкого слоя на капле *EGaln* в растворителях. Но примечательно, что боковые изображения капель *EGaln* в неполярных растворителях отличаются от изображений в полярных растворителях. В полярных растворителях, за исключением этанола, капли *EGaln* имеют сферическую форму, тогда как в неполярных растворителях капли *EGaln* имеют конические кончики наверху. Конический кончик формируется, когда *EGaln* раздваивается и отделяется на конце иглы из-за нестабильности Плато-Рэля при втягивании иглы шприца. Наличие или отсутствие конического наконечника позволяет косвенно оценить межфазную энергию.

В работе [24] порошки жидких металлов изготавливаются на основе универсального метода путем энергичного перемешивания *EGaln* с неметаллическими или органическими частицами посредством межфазных взаимодействий. В процессе перемешивания микрокапли *EGaln* заворачиваются в неметаллическую или органическую оболочку за счет электростатической адсорбции, при этом постоянно образуется более липкий оксидный слой, который затем разрушается за счет сдвигового трения. Эти порошки демонстрируют превосходную стабильность в экстремальных условиях (например, в воде и при высокой температуре), способны восстанавливать электропроводность и сильную адгезию на различных подложках при механическом спекании. Гибкое, прочное и токопроводящее покрытие может быть создано методом пропитки со встроенным джоулевым нагревательным эффектом и отличными характеристиками экранирования электромагнитных помех, и оно применимо в гибкой носимой электронике, микросхемах и системах беспроводной передачи энергии.

3.2. Основные тенденции применения *EGaln* в гибкой электронике, производстве интеллектуальных роботов и носимых устройств

В работе [25], доступной в форме препринта, представлена новая перспективная стратегия изготовления, которая превращает непроводящие композиты жидких металлов с высокодеформируемыми эластомерами в проводящие с использованием небольшого количества магнитопроводящих наполнителей (например, частиц никеля и капель *EGaln*). Активно манипулируя проводящими наполнителями с помощью внешнего магнитного поля, новый композит может устойчиво создавать электропроводящие дорожки в любых желаемых местах. Экспериментальные результаты показывают, что новый композит может достигать высокой проводимости $2,55 \cdot 10^5$ См/м, высокой растяжимости более 450%, хорошей устойчивой к деформации проводимости ($R/R_0 \sim 1,56$ при деформации 250%) и особенно модуля упругости при растяжении.

Бесконтактное магнитное производство также позволяет создавать разнообразные конфигурации в 1D, 2D и 3D формах, предлагая широкий спектр потенциальных приложений от гибкой электроники, носимых устройств, умной одежды до биомедицинских систем.

Приготовление композита начинается со смеси Ni и $EGaIn$. Микрочастицы никеля, покрытые серебром, со средним диаметром 31 мкм были диспергированы в объемном объеме $EGaIn$. $EGaIn$ был выбран в качестве жидкого наполнителя из-за его высокой электропроводности и жидкой фазы при комнатной температуре с низкой вязкостью. Для облегчения диспергирования микрочастиц Ni в $EGaIn$ их обе переносили в банку и энергично перемешивали пестиком в течение 3 минут. После непрерывного перемешивания микрочастицы никеля постепенно проникали в объем $EGaIn$, образуя магнитную смесь. После образования внешне гомогенной смеси добавляли эластомер Ecoflex 00-30 так, чтобы объемная доля микрочастиц $EGaIn$ и Ni составляла 9,1% и 0,6% соответственно (массовая доля 35,7% мас. $EGaIn$ и 3,6 мас.% Ni), и композит перемешивали на магнитной мешалке. Во время микширования смесь была разбита в микромасштабные магнитные капли, которые состоят из микрочастиц Ni , покрытых тонким слоем $EGaIn$. Эти частицы взвешены в эластомерной матрице из-за спонтанного образования пассивирующих оксидных оболочек, в результате чего получается магнитный композит.

Авторы [26] подчеркивают, что накожные электронные системы представляют собой развивающуюся технологию, которая разрабатывает носимые устройства, способные адаптироваться к динамическим поверхностям человеческого тела. Удобный и антибактериальный эпидермальный электрод иерархически спроектирован на ультрарастяжимой метаткани. Посредством послойной сборки трехслойных эластомерных волокон разного размера и различного состава асимметрия пористости и смачиваемости устанавливается по всему нетканому материалу, придавая ему однонаправленную проводимость жидкости и характеристики самооткачки пота. Успешная печать растяжимых цепей из жидкого металла ($EGaIn$) на закрепленных микроволокнах ZnO одновременно наделяет трехслойную метаткань надежной антибактериальной способностью, способностью нагревания с низким энергопотреблением и высокой точностью обнаружения сигналов поверхностной электромиографии различных физических нагрузок. Кроме того, включение термохромных микрокапсул в крайние волокна также позволяет использовать тканевый нагреватель Джоуля с возможностью визуальной индикации посредством обратимого переключения цвета. Таким образом, этот иерархически сконструированный эпидермальный

электрод с тепло-влажным комфортом и антибактериальной способностью имеет большие перспективы в повседневном применении в области здравоохранения и электроники для мониторинга спорта.

В статье [27] резистивный гибкий датчик использует жидкий металл на основе галлия (эвтектический сплав галлия и индия, $EGaIn$) и поли(диметилсилоксан) и изготавливается с использованием метода впрыскивания тонкой линии, основанного на мягкой литографии. Сочетание масштабируемого производственного процесса и уникальной конструкции из жидкого металла в форме проволоки обеспечивает точные многофункциональные измерения при нагрузках на растяжение и изгиб. Кроме того, гибкий датчик комбинируется с перчаткой, чтобы продемонстрировать применение носимой сенсорной перчатки для определения угла сустава пальца и управления жестами, что обеспечивает возможность интеграции и многофункционального восприятия полностью мягких носимых физических микросистем для человеко-машинного интерфейса. Он показывает потенциал своего применения в медицинской реабилитации, интеллектуальном управлении.

Интересна работа [28], посвященная эффекту маскировки за счет изменения цвета. Серебристо-белые жидкие металлы, такие как галлий (Ga), эвтектический галлий-индий ($EGaIn$) и галлий-индий-олово ($GaInSn$), становятся все более важными функциональными материалами в макроскопических бионических роботах из-за их высокой способности к деформации при комнатной температуре. Здесь показано быстрое обратимое изменение цвета $GaInSn$ от серебристо-белого до темно-коричневого, вызванное простым прикосновением или отделением от куска графитовой бумаги с шероховатой поверхностью. Повышенный перенос заряда на шероховатой графитовой бумаге является основной причиной обесцвечивания, вызванного контактом. Эта работа должна предложить интересный способ камуфляжа, легких материалов для сбора кожи на интеллектуальных бионических мягких роботах.

4. Заключение

Представлены перспективы развития технологии зондов на основе эвтектических сплавов $EGaIn$, а также новые научно-технические направления по созданию проводящих композитов с использованием эластомеров для многих практических применений.

Краткий анализ показал, что при обсуждении $EGaIn$ -зондов и электродов большое внимание должно уделяться исследованию оксидного слоя $GaOx$, спонтанно образующегося на $EGaIn$, а также исследованию влияния пространственного окружения на каплю эвтектического расплава $EGaIn$ с точки зрения сил адгезии, формы, площади контакта и др.

Получены важные данные по воздействию на эвтектику *EGaIn* различных химических сред и функционализации игл химическими самоорганизующимися монослоями. При этом силы сцепления между *EGaIn* и твердой подложкой могут быть увеличены на 2 порядка. Особый интерес вызывает изучение межфазного поведения эвтектических капель жидкого металла галлия-индия при специальных применениях различных растворителях (полярных, неполярных).

Все еще открытыми остаются вопросы, насколько гладкими являются границы раздела, какие факторы влияют на контактное сопротивление, как часто можно повторно использовать электрод *EGaIn*.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-20162 <https://rscf.ru/project/22-29-20162/>) и гранта Санкт-Петербургского научного фонда (соглашение от 14.04.2022 № 19/2022).

Библиографический список:

1. **Zhao, Z.** Smart eutectic gallium–indium: from properties to applications / Z. Zhao, S. Soni, T. Lee et al. // *Advanced Materials*. – 2023. – V. 35. – I. 1. – Art. №. 2203391 – 46 p. DOI: 10.1002/adma.202203391.
2. **Пермяков, Н.В.** Использование жидких зондов на основе эвтектического раствора для исследования проводящих свойств тонких пленок / Н.В. Пермяков // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2021. – Вып. 13. – С. 338-344. DOI: 10.26456/pcasenn/2021.13.338.
3. **Permiakov, N.** Investigation of the conductive properties of ZnO thin films using liquid probes and creation of a setup using liquid probes EGaIn for studying the conductive properties of thin films / N. Permiakov, E. Maraeva, A. Bobkov et al. // *Technologies*. – 2023. – V. 11. – I. 1. – P. 26-36. DOI: 10.3390/technologies11010026.
4. **Бобков, А.А.** Исследование явлений, возникающих при формировании фрактальных микроструктур в слоях поликарбоната, полиметилметакрилата, оксида индия–олова, оксида цинка / А.А. Бобков, В.Ф. Бороздюля, И.А. Ламкин и др. // *Физика и химия стекла*. – 2019. – Т. 45. – № 3. – С. 288-297. DOI: 10.1134/S0132665119010128.
5. **Rothmund, P.** Influence of the contact area on the current density across molecular tunneling junctions measured with EGaIn top-electrodes / P. Rothmund, C.M. Bowers, Z. Suo, G.M. Whitesides // *Chemistry of Materials*. – 2018. – V. 30. – I. 1. – P. 129-137. DOI: 10.1021/acs.chemmater.7b03384.
6. **Chiechi, R.C.** Eutectic gallium–indium (EGaIn): a moldable liquid metal for electrical characterization of self-assembled monolayers / R.C. Chiechi, E.A. Weiss, M.D. Dickey, G.M. Whitesides // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2008. – V. 120. – I. 1. – P. 142-144. DOI: 10.1002/anie.200703642.
7. **Fassler, A.** 3D structures of liquid-phase GaIn alloy embedded in PDMS with freeze casting / A. Fassler, C. Majidi. // *Lab on a Chip*. – 2013. – V. 13. – I. 22. – P. 4442-4450. DOI: 10.1039/C3LC50833A.
8. **Fassler, A.** Soft-matter capacitors and inductors for hyperelastic strain sensing and stretchable electronics / A. Fassler, C. Majidi // *Smart Materials and Structures*. – 2013. – V. 22. – № 5. – Art. № 055230. – 8 p. DOI: 10.1088/0964-1726/22/5/055023.
9. **Tabatabai, A.** Liquid-phase gallium–indium alloy electronics with microcontact printing / A. Tabatabai, A. Fassler, C. Usiak, C. Majidi // *Langmuir*. – 2013. – V. 29. – I. 20. – P. 6194-6200. DOI: 10.1021/la401245d.
10. **Qin, D.** Soft lithography for micro-and nanoscale patterning / D. Qin, Y. Xia, G.M. Whitesides // *Nature Protocols*. – 2010. – V. 5. – I. 3. – P. 491-497. DOI: 10.1038/nprot.2009.234.
11. **Niskala, J.R.** Tunneling characteristics of Au–alkanedithiol–Au junctions formed via nanotransfer printing (nTP) / J.R. Niskala, W.C. Rice, R.C. Bruce et al. // *Journal of the American Chemical Society*. – 2012. – V. 134. – I. 29. – P. 12072-12082. DOI: 10.1021/ja302602b.
12. **Li, D.** Rapidly measuring charge carrier mobility of organic semiconductor films upon a point-contact four-probes method / D. Li, S. Li, W. Lu et al. // *IEEE Journal of the Electron Devices Society*. – 2018. – V. 7. – P. 303-308. DOI: 10.1109/JEDS.2018.2872714.
13. **Yoshimoto, S.** Highly anisotropic mobility in solution processed TIPS-pentacene film studied by independently driven four GaIn probes / S. Yoshimoto, K. Takahashi, M. Suzuki et al. // *Applied Physics*

- Letters. – 2017. – V. 111. – I. 7. – Art. №. 073301 – 4 p. DOI: 10.1063/1.4998949.
14. **Bo, G.** Recent progress on liquid metals and their applications / G. Bo, L. Ren, X. Xu et al. // *Advances in Physics: X*. – 2018. – V. 3. – I. 1. – P. 412-442. DOI: 10.1080/23746149.2018.1446359.
15. **Khan, M.R.** Giant and switchable surface activity of liquid metal via surface oxidation / M.R. Khan, C.B. Eaker, E.F. Bowden, M.D. Dickey // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2014. – V. 111. – I. 39. – P. 14047-14051. DOI: 10.1080/23746149.2018.1446359.
16. **Kuo, P.H.** Non-invasive Drosophila ECG recording by using eutectic gallium-indium alloy electrode: a feasible tool for future research on the molecular mechanisms involved in cardiac arrhythmia / P.H. Kuo, T.H. Tzeng, Y.C. Huang et al. // *Plos One*. – 2014. – V. 9. – I. 9. – Art. №. e104543 – 8 p. DOI: 10.1371/journal.pone.0104543.
17. **Allioux, F.M.** Applications of liquid metals in nanotechnology / F.M. Allioux, M.B. Ghasemian, W. Xie et al. // *Nanoscale Horizons*. – 2022. – V. 7. – I. 2. – P. 141-167. DOI: 10.1039/d1nh00594d.
18. **Soh, E.J.** AFM manipulation of EGaIn microdroplets to generate controlled, on-demand contacts on molecular self-assembled monolayers / E.J. Soh, H.P. Astier, D. Daniel et al. // *ACS Nano*. – 2022. – V. 16. – I. 9. – P. 14370-14378. DOI: 10.1021/acsnano.2c04667
19. **Amini, S.** Interplay between interfacial energy, contact mechanics, and capillary forces in EGaIn droplets / S. Amini, X. Chen, J.Q.I. Chua et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2022. – V. 14. – I. 24. – P. 28074-28084. DOI: 10.1021/acsam.2c04043.
20. **Лашкова, Н.А.** Способ оценки адгезионной прочности соединения пьезоэлектрических нанокристаллов с подложкой / Н.А. Лашкова, А.И. Максимов, В.А. Мошников. // *Нано- и микросистемная техника*. – 2019. – Т. 21 – №. 2. – С. 73-82. DOI: 10.17587/nmst.21.73-82.
21. Пат. **2654385 Российская Федерация, МПК G01Q60/00 (2010.01), G01Q70/16 (2010.01), B82Y35/00 (2011.01)**. Измерительный зонд и способ его изготовления / Бороздюля В.Ф., Мошников В.А., Пермяков Н.В.; заявитель и патентообладатель Бороздюля В.Ф., Мошников В.А., Пермяков Н.В. – № 2017114837; заявл. 26.04.2017; опубл. 17.05.2018, Бюл. № 14. – 9 с.
22. Пат. **2635335 Российская Федерация, МПК G01N 19/04 (2006.01), G01N 27/00 (2006.01)**. Способ определения адгезионной прочности покрытий к подложке / Лашкова Н.А., Максимов А.И., Алексеев П.А., Мошников В.А.; заявитель и патентообладатель Лашкова Н.А., Максимов А.И., Алексеев П.А., Мошников В.А. – № 2016122810; заявл. 08.06.2016; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 31. – 8 с.
23. **Kim, J.H.** Effect of surrounding solvents on interfacial behavior of gallium-based liquid metal droplets / J.H. Kim, Y.J. Park, S. Kim et al. // *Materials*. – 2022. – V. 15. – I. 3. – P. 706-715. DOI: 10.3390/ma15030706.
24. **Yu, L.** Transportable, enduring, and recoverable liquid metal powders with mechanical sintering conductivity for flexible electronics and electromagnetic interference shielding / L. Yu, X. Qi, Y. Liu et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2022 – V. 14. – I. 42. – P. 48150-48160. DOI: 10.1021/acsam.2c14837.
25. Highly conductive, ultra-stretchable liquid metal composites engineered by magnetic field for robotic, wearable electronic, and medical applications. – Режим доступа: [www.url: https://www.authorea.com/doi/full/10.22541/au.166177625.58898562](https://www.authorea.com/doi/full/10.22541/au.166177625.58898562). – 11.08.2023.
26. **Dong, J.** Hierarchically designed super-elastic metafabric for thermal-wet comfortable and antibacterial epidermal electrode / J. Dong, Y. Peng, X. Nie, et al. // *Advanced Functional Materials*. – 2022. – V. 32. – I. 48. – Art. № 2209762. – 12 p. DOI: 10.1002/adfm.202209762.
27. **Tao, Y.** Liquid metal-based flexible and wearable sensor for functional human-machine interface / Y. Tao, F. Han, C. Shi et al // *Micromachines*. – 2022. – V. 13. – I. 9. – P. 1429-1443. DOI: 10.3390/mi13091429.
28. **Zhao, J.** Rapidly reversible discoloration of liquid metal by contact or separation / J. Zhao, H. Li, X. Bi, et al. // *Materials Chemistry and Physics*. – 2022. – V. 291. – Art. № 126726. – 8 p. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126726.

References:

1. Zhao Z., Soni S., Lee T. et al. Smart eutectic gallium-indium: from properties to applications Smart eutectic gallium-indium: from properties to applications, *Advanced Materials*, 2023, vol. 35, art. no. 2203391, 46 p. DOI: 10.1002/adma.202203391.
2. Permiakov N.V. Ispol'zovanie zhidkikh zondov na osnove evteticheskogo rastvora dlya issledovaniya provodyashchikh svoystv tonkikh plenok [The use of liquid probes based on an eutectic solution for studying the conducting properties of thin films], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostруктур i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp. 338-344. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.338. (In Russian).
3. Permiakov N., Maraeva E., Bobkov A. et al. Investigation of the conductive properties of ZnO thin films using liquid probes and creation of a setup using liquid probes EGaIn for studying the conductive properties of

- thin films, *Technologies*, 2023, vol. 11, issue 1, pp. 26-36. DOI: 10.3390/technologies11010026.
4. Bobkov A.A., Borodzyulya V.F., Lamkin I.A. et al. Study of effects occurring on formation of fractal microstructures in layers of polycarbonate, polymethyl methacrylate, indium tin oxide, and zinc oxide, *Glass Physics and Chemistry*, 2018, vol. 44, issue 5, pp. 480-485. DOI: 10.1134/S1087659618050048.
5. Rothmund P., Bowers C.M., Suo Z., Whitesides G.M. Influence of the contact area on the current density across molecular tunneling junctions measured with EGAIN top-electrodes, *Chemistry of Materials*, 2018, vol. 30, issue 1, pp. 129-137. DOI: 10.1021/acs.chemmater.7b03384.
6. Chiechi R.C., Weiss E.A., Dickey M.D., Whitesides G.M. Eutectic gallium–indium (EGaIn): a moldable liquid metal for electrical characterization of self-assembled monolayers, *Angewandte Chemie International Edition*, 2008, vol. 120, issue 1, pp. 142-144. DOI: 10.1002/anie.200703642.
7. Fassler A., Majidi C. 3D structures of liquid-phase GaIn alloy embedded in PDMS with freeze casting, *Lab on a Chip*, 2013, vol. 13, issue 22, pp. 4442-4450. DOI: 10.1039/C3LC50833A.
8. Fassler A., Majidi C. Soft-matter capacitors and inductors for hyperelastic strain sensing and stretchable electronics, *Smart Materials and Structures*, 2013, vol. 22, no. 5, art. no. 055230, 8 p. DOI: 10.1088/0964-1726/22/5/055023.
9. Tabatabai A., Fassler A., Usiak C., Majidi C. Liquid-phase gallium–indium alloy electronics with microcontact printing, *Langmuir*, 2013, vol. 29, issue 20, pp. 6194-6200. DOI: 10.1021/la401245d.
10. Qin D., Xia Y., Whitesides G.M. Soft lithography for micro- and nanoscale patterning, *Nature Protocols*, 2010, vol. 5, issue 3, pp. 491-497. DOI: 10.1038/nprot.2009.234.
11. Niskala J.R., Rice W.C., Bruce R.C. et al. Tunneling characteristics of Au–alkanedithiol–Au junctions formed via nanotransfer printing (nTP), *Journal of the American Chemical Society*, 2012, vol. 134, issue 29, pp. 12072-12082. DOI: 10.1021/ja302602b.
12. Li D., Li S., Lu W. et al. Rapidly measuring charge carrier mobility of organic semiconductor films upon a point-contact four-probes method, *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2018, vol. 7, pp. 303-308. DOI: 10.1109/JEDS.2018.2872714.
13. Yoshimoto S., Takahashi K., Suzuki M. et al. Highly anisotropic mobility in solution processed TIPS-pentacene film studied by independently driven four GaIn probes, *Applied Physics Letters*, 2017, vol. 111, issue 7, art. no. 073301, 4 p. DOI: 10.1063/1.4998949.
14. Bo G., Ren L., Xu X. et al. Recent progress on liquid metals and their applications, *Advances in Physics: X*, 2018, vol. 3, issue 1, pp. 412-442. DOI: 10.1080/23746149.2018.1446359.
15. Khan M.R., Eaker C.B., Bowden E.F., Dickey M.D. Giant and switchable surface activity of liquid metal via surface oxidation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, vol. 111, issue 39, pp. 14047-14051. DOI: 10.1080/23746149.2018.1446359.
16. Kuo P.H., Tzeng T.H., Huang Y.C. et al. Non-invasive Drosophila ECG recording by using eutectic gallium–indium alloy electrode: a feasible tool for future research on the molecular mechanisms involved in cardiac arrhythmia, *Plos One*, 2014, vol. 9, issue 9, art. no. e104543, 8 p. DOI: 10.1371/journal.pone.0104543.
17. Allieux F.M., Ghasemian M.B., Xie W. et al. Applications of liquid metals in nanotechnology, *Nanoscale Horizons*, 2022, vol. 7, issue 2, pp. 141-167. DOI: 10.1039/d1nh00594d.
18. Soh E.J., Astier H.P., Daniel D. et al. AFM manipulation of EGaIn microdroplets to generate controlled, on-demand contacts on molecular self-assembled monolayers, *ACS Nano*, 2022, vol. 16, issue 9, pp. 14370-14378. DOI: 10.1021/acsnano.2c04667.
19. Amini S., Chen X., Chua J.Q.I. et al. Interplay between interfacial energy, contact mechanics, and capillary forces in EGaIn droplets, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, vol. 14, issue 24, pp. 28074-28084. DOI: 10.1021/acsmi.2c04043.
20. Lashkova N.A., Maximov A.I., Moshnikov V.A. Sposob otsenki adgezionnoj prochnosti soedineniya p'zoelektricheskikh nanokristallov s podlozhkoj [A method for estimation of the adhesive strength of the piezoelectric nanocrystals' connection to a substrate], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika [Nano- and microsystem technology]*, 2019, vol. 21, issue 2, pp. 73-82. DOI: 10.17587/nmst.21.73-82. (In Russian).
21. Borodzyulya V.F., Moshnikov V.A., Permiakov N.V. *Izmeritel'nyj zond i sposob ego izgotovleniya* [Measuring probe and method for making the same]. Patent RF, no 2654385, 2018. (In Russian).
22. Lashkova N.A., Maximov A.I., Alexeev P.A., Moshnikov V.A. *Sposob opredeleniya adgezionnoj prochnosti pokrytij k podlozhke* [Method for determining the adhesive strength of coatings to a substrate]. Patent RF, no 2635335, 2016. (In Russian).
23. Kim J.H., Park Y.J., Kim S. et al. Effect of surrounding solvents on interfacial behavior of gallium-based liquid metal droplets, *Materials*, 2022, vol. 15, issue 3, pp. 706-715. DOI: 10.3390/ma15030706.
24. Yu L., Qi X., Liu Y. et al. Transportable, enduring, and recoverable liquid metal powders with mechanical sintering conductivity for flexible electronics and electromagnetic interference shielding, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, vol. 14, issue 42, pp. 48150-48160. DOI: 10.1021/acsmi.2c14837.

25. Highly conductive, ultra-stretchable liquid metal composites engineered by magnetic field for robotic, wearable electronic, and medical applications. Available at: <https://www.authorea.com/doi/full/10.22541/au.166177625.58898562> (accessed 11.08.2023).
26. Dong J., Peng Y., Nie X. et al. Hierarchically designed super-elastic metafabric for thermal-wet comfortable and antibacterial epidermal electrode, *Advanced Functional Materials*, 2022, vol. 32, issue 48, art. № 2209762, 12 p. DOI: 10.1002/adfm.202209762.
27. Tao Y., Han F., Shi C. et al. Liquid Metal-Based Flexible and Wearable Sensor for Functional Human–Machine Interface, *Micromachines*, 2022, vol. 13, issue. 9, pp. 1429-1443. DOI: 10.3390/mi13091429.
28. Zhao J., Li H., Bi X. et al. Rapidly reversible discoloration of liquid metal by contact or separation, *Materials Chemistry and Physics*, 2022, vol. 291, art. no. 126726, 8 p. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.126726.

Review

THE FEATURES OF APPLICATION OF EUTECTIC MELTS BASED ON INDIUM AND GALLIUM

E.V. Maraeva, N.V. Permiakov, V.A. Moshnikov

Saint Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.760

Abstract: In a brief review, the main trends in the use at the present time of eutectic melts based on indium and gallium (*EGaIn*) are considered. Examples of the use of *EGaIn* in transistors, capacitors, electrodes, and probe systems (including those in four-probe techniques) are given. The main properties of *EGaIn* and the spreading of a drop of *EGaIn* melts are considered, and a detailed scheme of the point-contact four-probe method is given. The main issues discussed in the application of *EGaIn* in the field of obtaining liquid electrodes, including the formation of gallium oxides, the possibility is revealed of the influence of the spatial environment on the *EGaIn* droplet and manipulation of microdroplets,. It has been established that among the works of 2022-2023, a large segment is occupied by publications in the field of flexible electronics, intelligent robots, as well as wearable devices (for example, the creation of a metatissue with an antibacterial effect and the ability to be heated with a low energy consumption) and biomedical applications (the development of smart gloves for manipulating gestures, measuring the heart rate of insects).

Keywords: eutectic melts, *EGaIn*, liquid probes, flexible electronics

Мараева Евгения Владимировна – к.ф.-м.н., доцент кафедры микро- и нанoeлектроники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Пермяков Никита Вадимович – к.т.н., доцент кафедры микро- и нанoeлектроники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Мошников Вячеслав Алексеевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры микро- и нанoeлектроники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Evgeniya V. Maraeva – Ph.D., Docent, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Nikita V. Permiakov – Ph.D., Docent, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»,

Vyacheslav A. Moshnikov – D.Sci, Professor, Micro- and Nanoelectronics Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

Поступила в редакцию/received: 20.07.2023; после рецензирования/revised: 24.08.2023; принята/accepted: 31.08.2023.