



Обзор

Обзорная статья

УДК 66.017

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11805>**Современные научные и практические решения в технологии изготовления подложек полупроводниковых соединений A^3B^5 . Обзор**Е. Н. Абрамова^{1✉}, Р. Ю. Козлов¹, Ю. В. Сыров¹, А. И. Хохлов¹, Ю. Н. Пархоменко²¹АО «Гиредмет» ПАО «Росатом»,
ул. Электродная, д. 2., стр. 1, Москва 111524, Российская Федерация²ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1, Москва 119049, Российская Федерация**Аннотация**

Сегодня в электронном и оптическом приборостроении в качестве подложек для эпитаксиального роста широко используются монокристаллические полупроводниковые материалы A^3B^5 – GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP. Данные материалы получают в виде массивных монокристаллических слитков. В связи с этим именно для них разрабатываются технологии изготовления и обработки пластин, используемых в качестве подложек для операций эпитаксиального роста. Миниатюризация современных систем и приборов обуславливает высокие требования к качеству поверхности этих подложек. Одним из основных критериев является низкая шероховатость (R_a) поверхности порядка 0.5 нм. Достижение таких значений требует усовершенствования методов обработки поверхности.

В статье проанализированы современные подходы к обработке поверхности полупроводниковых пластин монокристаллических материалов A^3B^5 . Рассмотрены особенности шлифовки полупроводниковых пластин как этапа, предшествующего полировке. Проведен анализ методов полировки и установлено, что наибольшее развитие и распространение сегодня имеет химико-механическая полировка пластин A^3B^5 , для которой рассмотрены основные параметры и систематизированы теоретические подходы. Выявлены ключевые тенденции развития технологии химико-механической обработки полупроводниковых пластин A^3B^5 для получения пластин высокого качества. Приведены и проанализированы современные исследования различных методик химической полировки, как возможного аналога химико-механической обработки поверхности. Также рассмотрены методики пассивации поверхности после получения пластин с низкой шероховатостью. Пассивацию проводят для снижения реакционной способности поверхности и стабилизации электронных состояний в приповерхностных слоях пластины.

Предложено классифицировать подходы к пассивации на основе получаемого химического состава поверхности, когда пассивирующие слои создают при помощи окисления, сульфидирования, нитрирования. Также предложена классификация по способам создания пассивирующих покрытий с выделением химических методов при обработке поверхности в растворах и физико-химических методов.

Ключевые слова: полупроводниковые пластины, материалы A^3B^5 , шлифовка, полировка, химико-механическая полировка, пассивация поверхности

Для цитирования: Абрамова Е. Н., Козлов Р. Ю., Сыров Ю. В., Хохлов А. И., Пархоменко Ю. Н. Современные научные и практические решения в технологии изготовления подложек полупроводниковых соединений A^3B^5 . Обзор. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(1): 3–24. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11805>

For citation: Abramova E. N., Kozlov R. U., Syrov U. V., Khokholov A. I., Parkhomenko Yu. N. Modern scientific and practical approaches to the production of substrates from semiconductor compounds A^3B^5 . Review. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(1): 3–24. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11805>

✉ Абрамова Елена Николаевна, e-mail: overmind11@rambler.ru

© Абрамова Е. Н., Козлов Р. Ю., Сыров Ю. В., Хохлов А. И., Пархоменко Ю. Н., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Многообразие бинарных соединений A^3B^5 включает антимониды, арсениды, нитриды и фосфиды индия, галлия, алюминия и бора. Многие из них представляют особый интерес для развития электронного приборостроения, СВЧ-техники, оптоэлектроники и фотоники, производства различных сенсоров и датчиков. Сегодня в полупроводниковом производстве ряд соединений A^3B^5 получают в виде монокристаллических слитков, которые разделяют на пластины для дальнейшего изготовления приборов на их основе, а также эпитаксиальными методами в виде пленок на подложках. В качестве материалов подложек наибольший интерес сегодня представляют прямозонные материалы с высокой подвижностью носителей заряда GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP, GaN. Нитрид галлия выращивают как эпитаксиальными методами на подложках других материалов, так и дорогостоящими аммонотермальным методом и из расплава Na-Ga-N [1]. Для материалов GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP разработаны технологии промышленного получения монокристаллов, которые затем разделяют на пластины. При этом разделение монокристаллического слитка на пластины сопряжено с образованием высокодефектной поверхности. Таким образом, актуальность рассмотрения именно указанных материалов обусловлена с одной стороны интересом к ним приборостроителей, с другой – тем фактом, что массивные монокристаллические слитки в промышленном масштабе производятся именно из полупроводниковых соединений GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP, и последующие операции для получения пластин высокого качества для прецизионных процессов эпитаксиального роста разрабатываются и исследуются только для этих материалов.

Процесс стремительного развития различных направлений электроники и оптики сопряжен с миниатюризацией полупроводниковых приборов и структур. Это в свою очередь требует повышения качества полупроводниковых пластин, на основе которых изготавливают эти приборы. Сегодня в мире наблюдается спрос на пластины качества «ery-ready» [2] как наиболее технологичных для дальнейшего применения. Как отмечено в [3], понятие «ery-ready» подразумевает возможность использования полупроводниковых монокристаллических пластин, прежде всего в операциях эпитаксии, без специальной предварительной обработки вне эпитаксиального реактора. При этом общепринятое определе-

ние термину «ery-ready» на сегодняшний день отсутствует. Наряду с необходимыми электрофизическими характеристиками и низкой дефектностью, важным критерием качества полупроводниковых пластин является планарность поверхности с максимальной шероховатостью (R_a) порядка 0.5 нм.

Сегодня получение монокристаллических подложек A^3B^5 производится по технологической схеме, которая в общем виде включает следующие основные этапы:

- 1) резка монокристалла на пластины;
- 2) снятие фаски с пластин;
- 3) шлифовка пластин и их последующая химическая очистка;
- 4) полировка поверхности и последующая отмывка;
- 5) пассивация поверхности.

Цель данного обзора состоит в систематизации и анализе научных подходов и практических разработок для шлифовки и полировки полупроводниковых пластин, получаемых из монокристаллических слитков GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP.

2. Шлифовка полупроводниковых пластин

Процесс шлифовки следует за операцией резки монокристалла на пластины. В случае резки полупроводниковых монокристаллов отрезными дисками (алмазными отрезными кругами с внутренней режущей кромкой – АКВР) в приповерхностной области пластины образуется шероховатый неплоскостный слой. Одной из главных причин этого являются крупные алмазные зерна с размером основной фракции 28–40 мкм, используемые при распиливании [4]. В связи с этим на последующей операции шлифовки требуется уменьшение шероховатости поверхности и обеспечение ее планаризации, что приводит к значимым потерям дорогостоящего материала. Переход к проволочной резке монокристаллов уменьшает толщину шероховатого слоя за счет меньшего размера зерен алмаза (менее 20 мкм), закрепленных на проволоке, а также ввиду малых термодинамических напряжений в зоне контакта инструмента со слитком [4, 5], решает в принципе вопрос снижения потерь материала, но не проблему планаризации поверхности. Таким образом, сегодня главная задача шлифовки состоит в обеспечении высокой планарности поверхности с низкой шероховатостью.

В процессе шлифовки частицы абразива проникают в шлифуемый материал и удаляют его фрагменты. В результате этого выравнивается

толщина пластины, а сама пластина утончается. При этом остается нарушенная область [6], состоящая из рельефного слоя, трещиноватого слоя, дефектного слоя, содержащего остаточные трещины и напряжения. Ее толщина пропорциональна размеру частиц абразива [7, 8], их количеству, а также зависит от твердости абразива (обычно составляет около трех размеров зерна абразива).

Существует два основных метода шлифовки полупроводниковых пластин: с помощью шлифовального круга и с использованием суспензии на основе шлифовальных порошков (в англоязычной терминологии они называются grinding и lapping, соответственно) [9, 10]. Шлифовка при помощи шлифовальных порошков также может называться притиркой [11].

Обычно выделяют три механизма удаления материала:

- в результате скола микрочастиц материала закрепленными в шлифовальнике частицами абразива,
- срезания материала абразивом,
- скола материала после перекачивания незакрепленных зерен, их индентирования в материал и образования трещин и напряжений.

Шлифовка при помощи шлифовальных порошков является результатом их совокупного действия. При этом предпочтительным механизмом удаления материала является его скол в местах пересечения трещин, образовавшихся в результате индентирования частиц свободного абразива. Это обеспечивает более равномерное удаление материала. Шлифовка на шлифовальном круге происходит в результате действия первых двух механизмов, где основной вклад вносит срезание материала. Также шлифовка на шлифовальном круге возможна путем квазипластичного удаления материала [12, 13], когда достигнуто необходимое напряжение в поверхностном слое [10, 12, 14]. Данный подход представляется перспективным видом обработки A^3B^5 . Однако сегодня шлифовальные круги крайне редко используются в промышленности для полупроводников A^3B^5 , в связи с чем, не рассматриваются в данном обзоре.

2.1. Шлифовка с применением шлифовальных порошков (притирка) полупроводниковых пластин

Цель шлифовки с применением шлифовальных порошков состоит в обеспечении шероховатости пластин A^3B^5 R_a порядка 0.63–1.0 мкм и

их разнотолщинности (Total Thickness Variation; TTV) $4\div 6$ мкм.

Для двусторонней притирки обычно характерна меньшая разнотолщинность пластин, чем для односторонней, в связи с более равномерным воздействием на пластину. Под давлением частицы абразива режущими гранями проникают (индентируются) в поверхностные слои пластины на глубину $5\div 10$ % собственного размера и срезают/скалывают их фрагменты [15]. При этом между поверхностью пластины и поверхностью шлифовальника необходим зазор для равномерного распределения там абразивной суспензии. С этой целью подбирается инертный к абразивам растворитель (вода или органические растворители, например, масла) необходимой вязкости.

Известные формы частиц шлифовальных порошков: круглая, уплощенная, цилиндрическая, неопределенная многоугольная. Форма абразивов влияет на перечисленные выше механизмы удаления материала. Для шлифовки обычно применяют порошки с различным размером зерен – от 3 до 63 мкм, чаще используют порошки с размером зерен $5\div 20$ мкм [16]. В разных регионах мира применяются различные стандарты для классификации абразивных порошков: ГОСТ 52381-2005 (Россия), FEPA (Европейские страны, США), ANSI – CAMI (США), JIS (Япония).

Как правило, для удаления более крупных неровностей поверхности и выравнивания пластины по толщине при грубой шлифовке используют твердые порошки с большим размером зерен, затем проводят тонкую шлифовку на более низкоразмерных порошках. Необходимо отметить, что благодаря проволочной резке качество получаемых пластин позволяет проводить одностадийную операцию притирки.

Для эффективного сглаживания неровностей пластины выбранный абразив должен быть тверже материала. Для шлифовки хрупких материалов A^3B^5 исследуется возможность применения как высокотвердых, так менее твердых порошков. В работе [17] шлифовка пластин InSb с ориентацией (100) осуществлялась с применением алмазной суспензии с размером частиц абразива 1 мкм. В исследовании [18] для шлифовки GaAs применялся абразив Al_2O_3 с размером частиц 5 мкм. В работе [2] шлифовальные порошки из электрокорунда с размерами зерен в диапазоне $10\div 14$ и $5\div 7$ мкм соответственно, использовались для обработки поверхностей GaAs и InSb. В этих исследованиях было обнаружено, что шлифовка

позволяет добиться равномерной поверхности без завальцовок [17], при этом незначительно увеличивается прочность пластин GaAs и InSb после резки [2]. Также сегодня широко используются имеющиеся в продаже коммерческие шлифовальные порошки и суспензии, например, содержащие одновременно Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , составы которых полностью не раскрываются, а именно: являются ли шлифовальные порошки простой механической смесью или же указанные вещества равномерно представлены в составе каждой частицы порошка [19].

Также на процесс обработки поверхности влияет материал самого шлифовальника. Необходимой операцией, предшествующей притирке полупроводниковых пластин, является выравнивание шлифовальных столов. В результате этого их планарность должна составлять величину, равную среднему размеру зерна абразива. Обычно используются шлифовальники из чугуна или стекол различных марок, более твердые чем абразивы. Частицы абразива не проникают в них. В связи с этим их движение по поверхности полупроводниковой пластины имеет характер перекатывания. Это может обуславливать разрушение частиц абразива.

Наряду с подбором абразивов и шлифовальников, оптимизация режимов притирки включает подбор усилия прижима на площадь поверхности (давления), концентрации частиц абразива в шлифовальной суспензии, скорость подачи суспензии, скорость перемещения шлифовального диска. Оптимизация перечисленных параметров позволяет достичь R_a порядка $0.63 \div 1$ мкм и TTV порядка $2 \div 4$ мкм.

3. Полировка полупроводниковых пластин

Полировка полупроводниковых пластин является методом обработки, который следует за шлифовкой. Её цель состоит в удалении нарушенного слоя и сглаживания шероховатости поверхности при сохранении формы после шлифовки. При этом полированные пластины не должны иметь механических дефектов (таких как трещины, царапины) и остаточных частиц абразивов на поверхности [12].

Основные методы полировки различных материалов включают:

- механическую полировку;
- химическую (химико-динамическую, электрохимическую полировку, сухое травление) полировку;

– химико-механическую полировку (ХМП) (с абразивом или без абразива).

С учетом высокой хрупкости и низкой твердости материалов GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP, механическая полировка пластин не позволяет обеспечить требования к качеству поверхности, предъявляемые для проведения процессов эпитаксиального наращивания [20].

3.1. Химико-механическая полировка

3.1.1. Параметры процесса ХМП

В промышленной обработке пластин полупроводниковых материалов A^3B^5 наиболее часто применяется химико-механическая полировка. Этот тип обработки поверхности основан на совокупном эффекте химического и механического воздействия на материалы. Процесс проводят на полировальном станке с геометрией кругового движения полировальника с использованием абразивных частиц или без них. Также существуют установки иной геометрии, например, в работе [21] исследуется ХМП на рулонном станке.

Для различных материалов A^3B^5 разрабатываются различные методики ХМП. Например, в работе [22] полировка пластин InP включает его взаимодействие с окислителем – $NaClO$ – и образование оксидного слоя, который механически удаляется полировальником без абразива. В [23] методика ХМП GaAs включает образование оксидных слоев на поверхности пластины при взаимодействии с H_2O_2 или $NaClO$. Затем оксиды взаимодействуют со щелочами с образованием гидроокисей, которые механически удаляются при помощи абразива.

В целом, сущность химико-механической полировки заключается в переводе обрабатываемого материала в иную химическую форму – преимущественно оксидную и гидроксидную – и последующее механическое удаление этих соединений. Особенности механизмов данных процессов зависят от конкретных условий ХМП. Оптимальные условия полировки подбираются для конкретной системы.

В общем виде ключевые параметры процесса ХМП, которые определяют качество обработки поверхности, включают следующие:

1. Параметры механического воздействия:
 - 1.1. материал и твердость полировальника, расположение на нем борозд, геометрию борозд, морфологию поверхности полировальника;
 - 1.2. давление (нагрузка, усилие прижатия) на пластине;
 - 1.3. размер и концентрация частиц абразива;

- 1.4. температура процесса;
- 1.5. относительная скорость между пластиной и полировальником;
- 1.6. вязкость полировального раствора;
2. Параметры химической составляющей процесса обработки:
 - 2.1. вещества и их концентрации в полировальной смеси: окислитель, комплексообразователь, пассивирующий агент, абразив, диспергент для обеспечения стабильного распределения частиц абразива в растворе, растворитель; стабильность компонентов при хранении, pH раствора;
 - 2.2. скорость подачи полировальной смеси;
3. Параметры обрабатываемого материала:
 - 3.1. разнотолщинность и геометрические параметры пластины после шлифовки;
 - 3.2. тип, химический состав и особенности обрабатываемого материала, кристаллографическая ориентация пластины.

Указанные параметры взаимосвязаны и способны оказывать влияние друг на друга. В связи с этим целесообразен предварительный анализ их взаимозависимостей.

а) Как правило, для оптимизации режимов ХМП в первую очередь определяют требуемое **давление на пластину и относительную скорость между пластиной и полировальником**. Они вносят важный вклад в скорость удаления материала с поверхности пластины. В исследовании [24] обнаружено, что при полировке GaAs при усилии ниже 90 Н на пластине диаметром 4 дюйма скорость съема материала неравномерна в разных областях поверхности, а при значениях выше 90 Н скорость удаления материала по поверхности выравнивается и снижается шероховатость.

В работе [25] обнаружено, что при полировке пластин InSb в составах на основе коллоидного раствора диоксида кремния (добавлено 0.2 об. %, коллоидного раствора SiO₂ с размером частиц 50 нм, масс. содержание диоксида кремния в исходном коллоидном растворе – 31 %), перекиси водорода и лимонной или молочной кислоты при pH = 4, скорости полировальника 60 об/мин, оптимальная нагрузка составляет 80 г/см². Это объясняется оптимальной толщиной слоя полировального раствора между пластиной и полировальником и соответствием друг другу скорости химической реакции и механического удаления продуктов. При понижении нагрузки до 40 г/см² наблюдается рост шероховатости поверхности. По мнению авторов, это может быть вызвано увеличением толщины

слоя полировальной смеси и, связанной с этим, неравномерностью химических процессов на поверхности пластины. С повышением нагрузки более 100 г/см² в процессе ХМП превалирует механическое удаление материала, что также приводит к ухудшению характеристик образца [25].

При этом режим смачивания и толщина слоя полирующего раствора между пластиной и полировальником, определяется не только давлением, а отношением к нему относительной скорости и вязкости полировальной смеси ($\eta \cdot V/P$).

б) **Вязкость** раствора влияет также на массоперенос удаляемых с поверхности продуктов реакции, движение частиц абразива. При слишком высокой вязкости движение частиц абразива в полировальной смеси и отвод продуктов ХМП от поверхности пластины затруднены. При этом возможны локальные скопления продуктов полировки и связанное с этим неравномерное смачивание пластины полировальным раствором.

При слишком низкой вязкости превалирует прямой контакт полировальника с обрабатываемой поверхностью и механическое воздействие на материал. При этом вероятен неравномерный съём и рост шероховатости.

Вязкость определяется как химическим составом полировальной смеси, pH, типом, размером частиц и концентрацией абразива [26], так и может зависеть от механических параметров ХМП. В работе [27] изучена зависимость вязкости полировальной смеси с коллоидными частицами диоксида кремния от скорости сдвига полировального раствора, которая определяется отношением скорости между полировальником и пластиной (м/с) и расстояния между ними (м). Обнаружено, что со значительным ростом скорости сдвига вязкость полировального состава на основе коллоидного раствора диоксида кремния возрастает, свойства полировальных растворов сильно отклоняются от свойств ньютоновской жидкости. При этом, как отмечают авторы [27], режим движения жидкости с ростом скорости между полировальником и пластиной переходит в турбулентный.

в) Диоксид кремния является наиболее распространенным коммерческим абразивом для ХМП А³В⁵. Он используется в виде коллоидных растворов. При этом необходимы добавки для стабилизации частиц, препятствующие их коагуляции и седиментации. Однако их составы производителями не раскрываются. Функция абразива заключается в механическом съеме материала и сорбции продуктов полировки для

их удаления. Экспериментальные данные о влиянии **размеров** и **концентрации частиц абразива** в полировальной смеси на характеристики ХМП, включая скорость удаления материала, разнятся в ряде работ [21, 28]. Общие требования к абразивам состоят в соизмеримой (или ниже) обрабатываемого материала твердости, инертности по отношению к компонентам полировальной смеси, низкой размерности зерен (десятки и сотни нм, чаще используют $10 \div 100$ нм [29]). В работе [30] обнаружено, что SiO_2 обладает низкой реакционной способностью по отношению к GaAs. Также в этом исследовании обнаружена склонность к взаимодействию абразивных частиц CeO_2 и GaAs. При этом актуальными остаются дополнительные исследования влияния диспергентов для абразива на его абразивные свойства [31–33].

В ряде работ при полировке материалов A^3B^5 абразивные частицы не используются [22, 34, 35]. Это обуславливает иную специфику механизма полировки, где механическое удаление окисленных форм материала осуществляется сугубо полировальником.

г) Как для абразивной, так и для безабразивной ХМП полупроводниковых материалов обычно используют полиуретановые **полировальники** различной жесткости. В [36] обнаружено, что более мягкие полировальники обеспечивают меньшее число дефектов на пластинах A^3B^5 .

Морфология поверхности полировальника должна обеспечивать преимущественное удаление выступающих неровностей на поверхности пластины. При моделировании процесса ХМП в [37, 38] предпринята попытка учесть влияние площади поверхности полировальника, находящейся в контакте с поверхностью, на скорость удаления материала. Предложена ее оценка на основе преобразованной формулы Гринвуда–Вильямсона (1):

$$A_r = (f_s / C) \cdot (R_p / \sigma_p)^{1/2} \cdot (P \cdot A_w / E_{pw}), \quad (1)$$

где A – площадь контакта полировальника с пластиной, R_p – средний радиус кривизны неровностей полировальника, σ_p – стандартное отклонение нормального распределения высот неровностей полировальника, P – давление, A_w – номинальная площадь поверхности пластины, E_{pw} – усредненный модуль Юнга пластины и полировальника (модуль упругости полировальника как правило в три раза меньше, чем материала [22]), f_s – поверхностная плотность выступающих неровностей полировальника, разде-

ленных бороздами, C – постоянная, равная $0.3 \div 0.4$.

С учетом этого предложена методика оценки скорости полирования [52]. Фактически площадь поверхности полировальника, находящаяся в контакте с пластиной, не является постоянным параметром, так как происходит глянцева-ние и механическое изнашивание полировальника [37, 38]. Чтобы снизить эффект глянцева-ния поверхность полировальника взрыхляют, например, алмазной головкой [39, 40, 41, 42]. В связи с этим, возможны колебания количества частиц абразива на полировальнике [43]. При этом, чем больше выступающих неровностей имеет полировальник, тем более вероятно глассирование пластины по поверхности [44].

д) Количество частиц абразива, подаваемых на полировальник в единицу времени, зависит от **скорости подачи полировальной смеси**. При этом в случае чрезмерного потока полировальной смеси на поверхности обрабатываемой пластины может скопиться такое количество частиц абразива, что они покроют всю его поверхность. Это в свою очередь способно привести к снижению скорости химических реакций ХПМ из-за затрудненного подвода реагентов в зону реакции [21, 45].

В случае недостаточной скорости подачи полировальной смеси возможно неравномерное распределение по концентрации ее компонентов на полировальнике, неравномерные химические взаимодействия на поверхности пластины и рост шероховатости.

Таким образом, скорость подачи полировальной смеси способна влиять на кинетику химических взаимодействий, на режим смачивания поверхности, а также на отвод тепла и снижение/поддержание температуры в зоне реакции.

е) **Температура** является еще одним важным параметром процесса ХПМ. Для ее контроля в работе [46] предложено использовать инфракрасный датчик. Температура влияет на кинетику химических процессов, вязкость полировальной смеси (рост температуры приводит к снижению вязкости), дзета-потенциал абразивных частиц, их гидродинамический радиус и, соответственно, на механику удаления материала, рН полировального раствора. С ростом температуры увеличивается и растворимость кислорода в полировальной смеси, что может приводить к нежелательным неконтролируемым процессам окисления обрабатываемого материала.

Учитывая высокую реакционную способность обрабатываемых материалов и химических реагентов, ХМП A^3B^5 проводится при комнатной температуре.

ж) Химическое взаимодействие обрабатываемого материала и полировальной смеси является первой стадией процесса ХМП. В общем виде химизм процесса заключается в окислении элементов A^3 и B^5 , при этом составы окисленных форм каждого элемента отличаются и зависят от pH среды [47]. В качестве окислителей чаще всего используются H_2O_2 или $NaClO$. Помимо окислителя, абразива и диспергента для абразива, полировальные смеси могут включать ряд веществ, выполняющих функции комплексообразователя, пассивирующего агента, растворителя, также возможно добавление буферных растворов. Конкретный **состав полировальной смеси** определяет pH, возможные реакции, составы окисленных форм, комплексных соединений, которые обладают различной растворимостью и легче или сложнее удаляются механически.

Для различных материалов предлагаются различные полировальные составы (примеры конкретных составов приведены в табл. 1, раздел 3.1.3). Конкретные составы буферных смесей в литературе не приводят [48].

В работе [49] показано, что скорость химических взаимодействий полировального раствора с полупроводниковыми материалами зависит от соотношения в них компонентов и их концентраций.

з) В ряде исследований анализируется влияние pH полировального раствора на скорость ХМП различных материалов A^3B^5 . Например, в [28] обнаружено, что сильноокислая или сильнощелочная среда приводит к росту скорости удаления GaAs, в то время как нейтральный pH обуславливает ее значительное снижение. При этом наименьшая шероховатость GaAs наблюдается при pH = 10. В патенте [25] показано, что при полировке пластин InSb в растворе со щелочным pH на поверхности быстро образуются царапины. Со снижением pH от 7 до 2 постепенно возрастает шероховатость поверхности, при этом возрастает и скорость удаления материала. Предложен способ полировки пластин InP и InSb при pH 4–6 смесью, содержащей коллоидный раствор частиц диоксида кремния, перекись водорода и лимонную кислоту [25].

Таким образом, для различных материалов A^3B^5 ХМП производится при помощи полировальных растворов различных химических составов.

и) Химический состав полирующего раствора в свою очередь подбирается в соответствии с **характеристиками обрабатываемого материала**, такими как химический состав и кристаллографическая ориентация пластин. Различные элементы полупроводниковых соединений типа A^3B^5 окисляются с разной скоростью. Растворимость образовавшихся оксидов также отличается. Например, оксиды галлия (Ga_2O_3 [35]), индия (In_2O_3) трудно растворимы в нейтральных средах. Также очень низка растворимость и у их гидроксидов при pH = 5–9, например: $\log C_{Ga(OH)_3} = -7.5$ при pH = 7.5; $\log C_{In(OH)_3} = -9$ при pH = 7.0 [50]. Оксиды As и Sb наоборот хорошо растворимы в нейтральных средах [47].

Это способствует разной скорости удаления атомов различных элементов при полировке и росту шероховатости поверхности [51]. В связи с этим важен учет кристаллографической ориентации полируемой пластины. В частности, для направления [111] теоретически обрабатываемая поверхность может состоять из атомов одного сорта. В направлениях [100] и [110] плоскости состоят из атомов 3 и 5 групп. Это, в свою очередь, обуславливает разную скорость удаления атомов с поверхности.

Таким образом, многочисленные параметры ХМП имеют глубокие сложные взаимосвязи. Оптимизация процесса полировки является многофакторной нелинейной задачей. Для ее решения разрабатываются модели механизмов этого процесса, учитывающие ключевые факторы.

3.1.2. Модели механизма ХМП

Несмотря на широкое практическое применение, фундаментальные основы механизмов ХМП до сих пор являются предметом многочисленных дискуссий [54]. Модели, описывающие ХМП, как правило, основаны на установлении зависимости скорости удаления материала с поверхности (скорости съема) от приложенного давления и относительной скорости между пластиной и полировальником (подход Престона), выражение 2:

$$MRR = K \cdot P \cdot V, \quad (2)$$

где MRR – скорость удаления материала, K – коэффициент Престона, P – давление на пластину, V – относительная скорость между полировальником и пластиной, которую можно упрощенно вычислить, перемножив расстояние между центрами пластины и полировальника на относительную скорость об/мин [55].

Однако, уравнение Престона не позволяет учесть случаев экспериментально наблюдаемо-

го нелинейного изменения скорости удаления материала с ростом давления и относительной скорости. В связи с этим вводят поправочные степенные показатели (a , b выражение (3)) для оценки реального влияния этих параметров [55]:

$$MRR = K \cdot P^a \cdot V^b. \quad (3)$$

В работе [56] предложена полиномиальная модель химико-механической планаризации на основе преобразованного уравнения Престона, с учетом зависимости скорости планаризации от времени.

Указанные подходы позволяют учесть наличие других факторов ХМП, влияющих на скорость съема материала, однако не конкретизируют их и не рассматривают механизм их влияния.

В работе [53] предложена модель оценки скорости съема материала абразивными частицами с учетом их количества и геометрии, давления и относительной скорости на выступах пластины и общего давления и относительной скорости пластины. Однако при этом не учитывается химическая составляющая процесса ХМП.

В обзоре [57] рассмотрена эрозионная модель ХМП, в которой сделана попытка отразить химическую составляющую процесса. Согласно эрозионной модели [58], поверхность пластины изменяется (полируется) за счет эрозии, скорость которой определяется как:

$$v_n = f(\sigma_t(t), \sigma_n(t)), \quad (4)$$

где v_n – скорость эрозии в направлении нормали к поверхности пластины, f – эмпирическое соотношение химической и механической эрозии, зависящее от среднего давления на пластине и величин σ_n , σ_t – нормального и касательного напряжения в данной точке поверхности пластины.

Скорость съема при этом описывается выражением (5):

$$V_n = K(P) \cdot (\sigma_t + D \cdot \sigma_t^2), \quad (5)$$

где V_n – скорость удаления материала, K и D – константы, определяемые свойствами материала и химическими процессами.

Таким образом, сделана попытка учесть химические процессы при полировке. При этом предполагается, что химические реакции и скорость диффузии влияют на величину давления [57].

В работе [59] предложен теоретический иной подход для описания механизма ХМП через ско-

рость удаления материала с учетом как механической, так и химической составляющей процесса (выражение (6)):

$$MMR_{\text{thickness}} = C3(1 - \Phi[3 - C2 \cdot P_0^{1/3}]) \sqrt{P_0} \cdot V, \quad (6)$$

где $C2$ – параметр, зависящий от среднего размера зерна абразива и распределения зерен по размерам, твердости обрабатываемой пластины и полировальника, неровности полировальника, модуля Юнга полировальника; $C3$ – параметр, зависящий от степени разбавления полировального раствора водой, плотности и массовой концентрации полировального раствора до разбавления, среднего размера зерна абразива и распределения зерен по размерам, плотностью абразива, плотностью выпуклостей полировальника, его неровностью и модулем Юнга; Φ определяется как $(x_{\text{max}} - x_{\text{avr}})/\sigma$ – отношение разности максимального и среднего значения к стандартному отклонению, P_0 – давление на пластине; V – относительная скорость между пластиной и полировальником.

В работе [60] предложена еще одна модель для расчета скорости полировки (выражение (7)):

$$MRR(x, y) = K \cdot P_{\text{avg}}^a(x, y) \cdot V_{\text{avg}}^a(x, y) \cdot \{\Omega(x, y)\}, \quad (7)$$

где $MRR(x, y)$ – скорость съема материала в данной точке пластины, P_{avg} , V_{avg} – средние значения давления и относительной скорости на пластине, показатель степени a – неизмеряемая величина, которая определяет вклад давления и относительной скорости между пластиной и полировальником, Ω – пространственный параметр, выражающий влияние распределения по пластине давления, относительной скорости и химических процессов.

В работе [42] рассмотрены различные виды зависимости скорости съема от давления для случаев разной механики взаимодействия полировальника, абразива и обрабатываемой поверхности. Также сделана попытка учесть химическое взаимодействие активного вещества полировального раствора и обрабатываемой поверхности.

Таким образом, в данной модели предлагается учитывать химический аспект обработки через коэффициент диффузии реагента в обрабатываемый материал.

В работе [52] предложены выражения оценки скорости съема, учитывающие свойства самого материала: твердость исходного материала и окисленных форм на поверхности (по Бринеллю). Авторы предлагают различные выражения

для разных случаев глубины индентирования абразивов в поверхностные слои.

Таким образом, одна из основных трудностей при моделировании механизма ХМП состоит в конкретизации вклада химической реакции и механического удаления в итоговый результат. Можно условно выделить механический, химико-механический, химический подходы к решению этого вопроса в различных исследованиях. При этом предложенные модели механизмов полировки преимущественно разработаны на основе конкретных экспериментальных условий. Это обуславливает возможные ограничения их применимости и необходимость корректировки для иных условий обработки полупроводниковых материалов. При этом в ряде работ обозначены границы применимости предложенных выражений оценки скорости съёма [42, 52, 59].

3.1.3. Режимы ХМП A^3B^5

В табл. 1 приведены примеры условий ХМП и полировальных составов для InSb, GaSb, GaAs, InAs. Эффективность полировки оценивается на основе качества пластины. В общем виде параметры оценки качества пластин включают: шероховатость (в том числе R_a , R_z), разнотолщинность пластины; плоскостность пластины (Total Indicator Reading, *TIR*); прогиб пластины (*BOW*); коробление пластины (*WARP*). Также контролируют дефекты на пластине, такие как царапины, остаточные частицы (абразива, пыли, осколки материала). Чем ниже значения этих параметров, тем выше качество пластины. В научных исследованиях для оценки качества полировки наиболее часто используют величины шероховатости поверхности, так как эксперименты проводят не на целых пластинах, а на их фрагментах.

Методы контроля шероховатости включают атомно-силовую микроскопию, контактную и бесконтактную оптическую профилометрию высокого разрешения. Приборы оптической системы контроля качества пластин, как правило, предусматривают возможность мониторинга всей пластины полностью и позволяют определять также *TTV*, *TIR*, *WARP*, *BOW*. Контроль дефектов возможен с помощью оптической (в том числе 3-*d* цифрового оптического микроскопа [61]) и электронной микроскопии, часто используется также метод сканирования поверхности лазерным лучом. Для контроля морфологии поверхности, кристаллического совершенства монокристаллических

пластин после ХМП и дефектов также разрабатываются методики интерферометрии белого света, лазерной интерферометрии, рентгеновской томографии, методов дифракции [62, 63]. Необходимость контроля химического состава полированной поверхности определяется различными химическими свойствами элементов 3-ей и 5-ой групп. Для этого обычно применяют рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию (РФЭС), Оже-спектроскопию [34, 64], энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию.

Также для химико-механической полировки GaAs используются полировальные составы на основе таких композиций как $Br_2/MeOH; NH_3 \cdot H_2O$ и $H_2O_2; H_2SO_4$ и $H_2O_2; H_3PO_4$ и H_2O_2 [23].

Анализ приведенных в табл. 1 режимов ХМП свидетельствует о ряде особенностей обработки полупроводниковых пластин A^3B^5 для получения пластин высокого качества:

1) для конкретного материала A^3B^5 исследуются и разрабатываются различные методики химико-механической обработки, подбираются свои полировальные составы. В качестве окислителей преимущественно используются H_2O_2 и NaOCl. Однако использование NaOCl создает проблему возможного выделения газообразного хлора, в связи с чем исследуются другие окислители, например, $(NH_4)_2Cr_2O_7$, $NaIO_3$, $NaIO_4$.

В процессе ХМП арсенидов и фосфидов может происходить образование токсичных газов AsH_3 и PH_3 [65–68] даже в окислительной среде. При этом образующийся в ходе ХМП оксид мышьяка (As_2O_3) в зависимости от pH раствора переходит в $HAsO_2$, H_3AsO_4 , AsO_4^{5-} . В случае антимонидов In и Ga состав полировальных смесей влияет именно на окисление элементов 3 группы, так как оксид сурьмы (Sb_2O_3) устойчив практически во всем диапазоне pH [64]. При этом более равномерное удаление материала с поверхности пластин всех рассмотренных материалов наблюдается в растворах с pH ниже или близком к 7 (диапазон pH варьируется от 4 до 7). В основных растворах (pH > 7) скорость удаления материала заметно выше, чем в кислых, при этом наблюдается резкое ухудшение качества поверхностей – рост шероховатости и появление рисок. Также образованию рисок способствуют абразивные частицы в полировальном составе. Это может быть связано с низкой твердостью обрабатываемых материалов.

Таблица 1. Примеры условий ХМП материалов A^3B^5 (где P – давление/нагрузка на пластине, $V_{\text{пол-ник}}$ – скорость полировальника, $V_{\text{пластины}}$ – скорость вращения пластины, $V_{\text{подачи р-ра}}$ – скорость подачи полировального раствора, τ – длительность процесса, T – температура, MMR – скорость съёма материала)

| Обрабатываемый материал | Полировальные составы | Условия обработки | Характеризация |
|----------------------------------|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 5 |
| InSb [114] | 1 этап - Al_2O_3 (3÷9 мкм): $H_2O = 1:30$; 2 этап - H_2O_2 : золь SiO_2 (25÷40 об. %) = 1: 2÷4 (об. соотнош.) | $P: 10\div 15$ г/см ² ; $V_{\text{пол-ник}}: 60\div 90$ об/мин; $V_{\text{подачи р-ра}}: 10\div 20$ капель/мин; $\tau: \sim 20$ ч | Шероховатость < 0.1 мкм |
| InSb <Te> (111), [87] | ZrO_2 (суспензия в кислом растворе): 20%-ный раствор $C_4H_6O_6$ (винная кислота) в растворе H_2O_2 (40 %) = 5:1 | | |
| InSb (112) [115] | $(NH_4)_2Cr_2O_7$ (26 масс. %): HBr (42 масс. %): $CH_2(OH)CH_2(OH)$ (этиленгликоль – EG) = 11: 49:40 (об. %) растворена в EG (0÷ 95 об. %) | Полировальник: батистовая ткань; $T = 293$ К; $V_{\text{подачи р-ра}}: 2\div 3$ мл/мин; $\tau: 2\div 3$ мин. | Шероховатость $R_a - 0.3$ нм |
| InSb [34] | 230 мл H_2O_2 (30%-ный раствор), 75 мл EG, $C_4H_6O_6$, NaCl (0.08 М для грубой полировки и 0.02 М для финишной) в 1 л полировального раствора | $P: 5\cdot 10^{-3}$ Н/м ² ; $V_{\text{пол-ник}}: 35$ об/мин | Шероховатость $R_a 0.3\div 0.5$ кÅ (30÷50 нм) |
| InSb (100) [25] | SiO_2 (раствор частиц 50 нм), $C_6H_8O_7$ ($C_3H_6O_3$), H_2O_2 | Полировальник: полиуретан и полиэстер; pH = 4÷6; $P: 0\div 80$ г/см ² ; $V_{\text{пол-ник}}: 60$ об/мин; $V_{\text{подачи р-ра}}: 160$ мл/мин; $MMR: 0.2\div 0.7$ мкм/мин | Шероховатость $R(\text{max}) - 3$ нм |
| InSb [35] | NaOCl (10%-ный раствор) и $C_6H_8O_7$ (50%-ный раствор) | $P: 0.4; 0.7$ psi; $V_{\text{пол-ник}}: 50; 70$ об/мин; $V_{\text{пластины}}: 30$ об/мин; $\tau: 2\div 3$ мин | Шероховатость 1.5 нм. Встречаются видимые дефекты |
| GaSb (100), GaSb <Te> (100) [86] | 1 этап - $Br_2: C_2H_4(OH)_2 = 1:100$; 2, 3 этапы - анодирование и химическое травление | Полировальник: Rosorfarm 404 | Шероховатость – 0.3÷0.4 нм |
| GaSb (100) [64] | NaOCl (10%-ный раствор) и $C_6H_8O_7$ (10%-ный раствор) | Полировальник: полиуретан; pH = 7; $P: 4$ кПа; $V_{\text{пол-ник}}: 30$ об/мин; $MMR: 10$ нм/мин. | Шероховатость – 0.5 нм |
| GaSb [62] | SiO_2 (35%-ный раствор частиц 50 нм) и $C_3Cl_2N_3NaO_3$ (10%-ный раствор дихлоризоцианурата натрия): $H_2O = 1:20$ и 2 масс. % $NaHCO_3$ | Полировальник: полиуретановый, размер пор 42÷58 мкм, плотность пор 325/мм ² , длина ворса 310 мкм, сжимаемость 15 %, твердость по Шору А 42; $\tau: 50$ мин.; $MMR: 0.216$ мкм/мин | Шероховатость – 0.13 нм |

Продолжение табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------------------|---|--|---|
| GaSb [116] | 1 этап - Al_2O_3 10÷30 %; интенсификатор помола 5÷10 %; диспергент 1÷10 %; H_2O 2 этап - $NaClO$ 1÷10 %; SiO_2 (до 100 нм) 10÷30 %; H_3PO_4 0.01÷0.2 %; H_2O 3 этап - H_2O_2 0.1÷10 %; модификатор рН 0.01÷5 %; H_2O | 1 - Полировальник: CeO_2 ; P : 100÷200 г/см ² ; $V_{пол-ник}$: 10÷40 об/мин; $V_{подачи\ p-ра}$: 10÷50 мл/мин 2 - Полировальник: полиурета- новый рН = 6; P : 80÷150 г/см ² ; $V_{пол-ник}$: 60÷100 об/мин; $V_{подачи\ p-ра}$: 10÷30 мл/мин 3 - полировальник: искусст- венная кожа; рН = 4 | Шероховатость $R_a < 0.3$ нм |
| GaSb (100) [117] | Коммерческие полировальные смеси «BGY-903», «FA/OF3210», или, Dongguan company «3030», или Tianjin Xi Lika «2360»: H_2O : clorox = (1÷10): (50÷100): (1÷10) (об. соотношения) | $T = 15÷60$ °C; P : 2÷25 psi; $V_{подачи\ p-ра}$: 10÷150 мл/мин; τ : 10÷60 мин | Шероховатость $R_a - 0.1÷0.2$ мкм; WARP – 20 мкм; TTV – 5 мкм |
| InAs [118] | NH_2SO_2OH (сульфаминовая кислота): $C_4H_6O_6$: H_2O_2 : $H_2O = 3:1:10:86$ (%) | Полировальник: поливел (синтетическая замша); рН = 1÷2; P : 0.08÷0.12 Па; $V_{пол-ник}$: 55÷65 об/мин; $V_{подачи\ p-ра}$: 10 мл/мин | |
| InAs (001) [86] | $(NH_4)_2Cr_2O_7$ (26 масс. %): HBr (42 масс. %): $CH_2(OH)CH_2(OH) = 11: 49:40$ об. % растворена в EG (0÷ 95 об. %) | Полировальник: батистовая ткань; $T = 293$ К; $V_{подачи\ p-ра}$: 2÷3 мл/мин; τ : 2÷3 мин | $R_a - 0.2$ нм |
| InAs [64] | $NaOCl$ (10%-ный раствор) и $C_6H_7O_8$ (50%-ный раствор) | Полировальник: полиуретан; рН = 7; P : 4 кПа; $V_{пол-ник}$: 30 об/мин; MMR: 10 нм/мин. | Шероховатость – 0.4 нм |
| GaAs [65] | Коммерч. SiO_2 (30 масс.% водный коллоидный раствор частиц разме- ром 35 нм): H_2O_2 (30 масс.% водный раствор) (или $NaIO_3$, $NaIO_4$): $H_2O = 3: 1: 96$ (масс.%). Добавлены HNO_3 или KOH . | рН=2÷3; P : 3.5 psi; $V_{пол-ник}$: 80 об/мин; $V_{пластины}$: 72 об/мин; $V_{подачи\ p-ра}$: 200 мл/мин; τ : 1 мин. | Шероховатость – 0.7;0.5. (рост от изначальной шероховатости 0.2 нм) |
| GaAs [24] | $NaCl$, $C_6H_5O_3SNa$ (бензолсульфонат натрия), $Na_4P_2O_7$, Na_2CO_3 , золь SiO_2 | $T=16$ °C; $P: \geq 90$ Н/81 см ² ; $V_{пол-ник}$: 40 об/мин; $V_{пластины}$: 30÷40 об/мин; $V_{подачи\ p-ра}$: 500 мл/мин; τ : 10 мин. | Шероховатость $R_a \sim 15$ нм; TTV < 5 мкм |
| GaAs [64] | а) $NaOCl$: $H_2O = 1:10$; б) $NaOCl$ (10% водный раствор) и $C_6H_7O_8$ (10% водный раствор) | Полировальник: полиуретан; а) рН=11; б) рН=7; P : 4 кПа; $V_{пол-ник}$: 30 об/мин; MMR: 10 нм/мин. | Шерохова- тость – а) 0.5 нм; б) 0.4 нм |

Окончание табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------------------------|--|--|---|
| n-GaAs (100) [82] | TiO ₂ (анатаз) (5÷10 нм): 7.4 масс.% в H ₂ O ₂ (15%-ный водный раствор) | Полировальник: замша; P: 9.8 кПа; V _{пол-ник} : 80 об/мин; V _{пластины} : 60 об/мин; V _{подачи р-ра} : 30 мл/мин; УФ подсветка: λ = 250 нм (380 нм) | Шероховатость R _a – 0.4÷0.5 нм |
| GaAs (2 дюйма) [119] | H ₂ O ₂ 7.0÷70.0 об. %; C ₄ H ₆ O ₆ (30%-ный раствор) 7.0÷60.0; EG 5.0÷15.0; H ₂ O | Полировальник: батист; P: 4.3÷7.5 кПа; V _{пол-ник} : 20 об/мин; V _{подачи р-ра} : 15÷20 мл/мин; MMR: 0.4÷1.2 мкм/мин | Плоскостность TIR – 2÷3 мкм |
| GaAs (диаметр 100 мм) [120] | 1 этап - Дихлоризоциануровая кислота (C ₃ O ₃ N ₃ CL ₂ NA) 23 масс. %; Трифосфат натрия (Na ₃ P ₃ O ₁₀) 20÷31 масс. %; Na ₂ SO ₄ 8 масс. %; Na ₂ CO ₃ 3 масс. %; H ₂ O SiO ₂ (50 масс. % коллоидный раствор). 2 этап - Дихлоризоциануровая кислота 23 масс. %; Трифосфат натрия 13÷19 масс. %; Na ₂ SO ₄ 8 масс. %; Na ₂ CO ₃ 3 масс. %; H ₂ O. SiO ₂ (50 масс. % коллоидный раствор) | Полировальник: полиуретан. Двусторонняя полировка: P: 50 г/см ² ; V _{пол-ник} : верхнего – 7.7 об/мин, нижнего – 23.2 об/мин; V _{подачи р-ра} : 800 мл/мин; τ: 1 этап – 30 мин, 2 этап 15 мин; MMR: 1 этап -0.6÷1.2 мкм/мин; 2 этап - 0.2÷0.4 мкм/мин | |
| InP [36] | Коммерческий состав на основе SiO ₂ (коллоидный раствор с размером частиц менее 100 нм в кислотной среде) | Полировальник: твердость по Шору D13 | Шероховатость – 0.4÷0.5 нм |
| InP (001) (4 дюйма) [22] | а) NaOCl: H ₂ O = 1:20; б) C ₆ H ₈ O ₇ : H ₂ O = 1:4; | Полировальник: полиуретан; P: 4 кПа; V _{пол-ник} : 30 об/мин; MMR: 5 нм/мин. τ: 150÷210 мин | Шероховатость < 1 нм |
| InP [121] | Коммерч. SiO ₂ (30 масс. % водный коллоидный раствор частиц размером 35 нм): H ₂ O ₂ (30 масс. % водный раствор): C ₂ H ₂ O ₄ (или C ₄ H ₆ O ₆ , C ₆ H ₈ O ₇) = 3: 1: 0.72 (масс. %) в H ₂ O. Добавлены HNO ₃ или KOH | а) pH = 6 (C ₂ H ₂ O ₄); б) pH = 8 (C ₆ H ₈ O ₇); P: 24.1 кПа; V _{пол-ник} : 72 об/мин; V _{пластины} : 80 об/мин; V _{подачи р-ра} : 200 мл/мин | Шероховатость – а) 0.1 нм; б) 0.7 нм |
| InP <S> (100) (2 дюйма) [25] | SiO ₂ (раствор частиц 50 нм), C ₆ H ₈ O ₇ (C ₃ H ₆ O ₃), H ₂ O ₂ | Полировальник: полиуретан и полиэстер; pH = 4÷6; P: 0÷100 г/см ² ; V _{пол-ник} : 60 об/мин; V _{подачи р-ра} : 160 мл/мин; MMR: 0.2÷0.7 мкм/мин | Шероховатость R(max) – 1.5 нм |
| InP<S> (100) (2 дюйма) [122,123] | а) NaOCl (50 об. %) и C ₆ H ₈ O ₇ ; б) NaOCl (50 об. %), C ₆ H ₈ O ₇ , SiO ₂ (5 масс. % раствор) | Полировальник: полиуретан и полиэстер; pH = 5÷6 P: 100 г/см ² ; V _{пол-ник} : 40 об/мин; V _{подачи р-ра} : 30 мл/мин; MMR: а) 0.05 мкм/мин, б) 0.78 мкм/мин | Шероховатость – а) R _a – 0.1 нм, R(max) – 0.8 нм; б) R _a – 0.4 нм, R(max) – 3 нм |

2) В связи с этим для всех рассматриваемых материалов изучается возможность полировки без абразивных частиц или с использованием абразивных частиц относительно низкой твердости [69–72] нанометровых размеров (не более нескольких десятков нм). Чаще всего используют полировальные составы на основе SiO_2 . При этом механизм воздействия абразивных частиц остается дискуссионным вопросом [73, 74]. В частности, существуют разные взгляды на то, участвует ли SiO_2 в химических процессах ХМП материалов A^3B^5 [30, 66];

3) для более равномерного удаления материала и получения более совершенных поверхностей полировка может осуществляться в несколько последовательных этапов от более грубой к более тонкой обработке. Это обеспечивается снижением скорости съема материала на последующих этапах. Снижение скорости ХМП является общей тенденцией как для одноэтапной, так и для многоэтапной полировки. Для этого используют ряд приемов, которые включают [75, 76]:

- снижение давления на обрабатываемую пластину до оптимальных значений;
- рассмотренный выше подбор значений pH полировального раствора;
- оптимизацию, в том числе снижение, концентрации реагентов в полировальном составе [22, 34].

Пластины из монокристаллических слитков материалов GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP сегодня обрабатываются в промышленности посредством ХМП [77], однако очевиден недостаток понимания теоретических основ данного процесса. Это касается, прежде всего, химических аспектов: кинетики и термодинамики взаимодействия материалов с различными окислителями и влияния на них характеристик самого материала (его кристаллографической ориентации, дефектов); влияния механического воздействия на химические процессы; а также взаимодействия полученных при окислении продуктов с комплексообразователями, влияния на кинетику процессов наличия или отсутствия буферных растворов в составе полировальных композиций. В [65] отмечено, что для поддержания pH добавляют KOH , HNO_3 , NaHCO_3 . Предполагается, что они не взаимодействуют с обрабатываемыми материалами. При этом в большинстве исследований вопрос таких добавок не затрагивается.

Помимо изучения условий и полировальных составов традиционной ХМП сегодня также ис-

следуются новые подходы к данной технологии на примерах различных полупроводниковых материалов. Так в исследовании [78] на примере кремния предложена методика химического травления, за которым следует полировка магнитным абразивом с приложением магнитного поля. Полировки магнитными частицами также исследуется в работах [79, 80]. Также есть исследования методик ХМП GaAs с использованием абразивного ледяного диска [81], с абразивом TiO_2 при ультрафиолетовом (УФ) облучении [82]. На примере 4H-SiC исследуется методика планаризации поверхности, где кремний переводят в окисленное состояние путем плазменно-электролитического оксидирования с последующим удалением оксида абразивным составом [83]. Такой метод окисления предполагает перенос обрабатываемой пластины из электролитической ячейки на полировальник, что обуславливает трудность масштабирования технологии. В работе [84] предложен способ модернизации ХМП для нитрида галлия с размещением на полировальнике наночастиц золота. По предположению авторов, наночастицы золота взаимодействуют с полируемой поверхностью под воздействием УФ-излучения с образованием в валентной зоне обрабатываемого материала носителей заряда - «дырок». Это, в свою очередь, способствует окислению. Данный подход позволил получить шероховатость R_a порядка 1.3 нм, однако использование наночастиц золота существенно усложняет и удорожает процесс.

В исследовании [85] предлагается модернизировать процесс подачи полировального раствора путем его изначальной ионизации при погружении катода и анода в бак с раствором и дальнейшей пульверизации раствора на полировальник при подведении к току жидкости газа (кислорода или азота) непосредственно перед подачей.

3.2. Химическая полировка полупроводниковых пластин и новые подходы к ней

В случае бесконтактной химической полировки полупроводниковых пластин для обеспечения равномерности их химического взаимодействия с травителем процесс проводят в гидродинамических условиях по способу вращающегося диска в устройстве типа «бочка» [17] или при перемешивании раствора вблизи обрабатываемой поверхности. Для химической полиров-

ки A^3B^5 используются растворы на основе таких травящих реагентов как HF , HCl , Br_2 , $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [86] и окислителей HNO_3 , H_2O_2 [87]. В исследованиях [88, 89] исследовано влияние брома на химическое травление пластин InSb , InAs , GaAs и обнаружено, что такие составы наиболее применимы для InAs . Однако к недостаткам брома относят высокую химическую активность и токсичность.

В работе [90] предложена методика, сочетающая в едином процессе электрохимическое получение травящего реагента Br_2 и химическое травление им пластины GaAs .

В [86] исследовано электрохимическое анодирование пластин в растворе $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6/\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$ при разности потенциалов $50 \div 100$ В и последующее химическое удаление полученных оксидов раствором HCl .

В [91] изучена методика полировки поверхности SiC расплавом KOH . Такой подход может рассматриваться и для материалов A^3B^5 . Перспективным направлением исследований представляется подбор реагентов для обработки в их расплавах материалов GaAs , GaSb , InAs , InSb , InP .

В работе [92] предлагается применять гидридную газофазную эпитаксию для выравнивания поверхности GaAs (100), при этом сами авторы отмечают высокую стоимость такой обработки. В литературе также приводятся методы полировки GaSb путем реактивного травления поверхности в плазме аргона и реактивного ионного травления в плазме CCl_2F_2 или CCl_4 [86].

Таким образом, можно выделить обработку в расплаве, жидкостной, газофазной, а также электрохимический подходы к химической полировке. Наиболее разработанным из них является жидкофазный подход. Основным недостатком жидкостной, а также электрохимической обработки является трудность обеспечения равномерности процессов взаимодействия с травителем всей поверхности пластины.

Новые методы химической обработки полупроводниковых пластин, безусловно, представляют значительный научный интерес. Их практическое применение требует нетривиальных инженерных решений и достижения экономической целесообразности.

4. Очистка и пассивация поверхностей материалов A^3B^5

Высокая реакционная способность материалов A^3B^5 обуславливает образование на поверхности пластин нестехиометрических оксидов

элементов 3 и 5 групп при их хранении в воздушной атмосфере. Химический состав и толщина оксидных слоев зависят от условий окружающей среды и изменяются во времени [93]. Присутствие таких естественных оксидов приводит к неоднородности свойств материала на поверхности и в объеме. К наиболее значимым из них относят повышенную плотность поверхностных состояний, появление уровней в запрещенной зоне в приповерхностных слоях. Это влияет на электронные, химические, оптические свойства пластин [86, 94]. Наличие оксидов также сказывается на характере зародышеобразования на начальной стадии эпитаксиального роста структур на подложках и плотности дефектов в эпитаксиальных слоях [93].

В связи с этим разрабатываются различные методики очистки [40] и пассивации поверхности A^3B^5 . Пассивация может быть отдельным технологическим этапом обработки полупроводниковых подложек или непосредственно сопутствовать полировке без существенного по времени перерыва в технологическом процессе. Также осуществляют пассивацию готовых полупроводниковых структур. Для этого разрабатываются отдельные методы, не рассматриваемые в данном обзоре. Цель пассивации подложек состоит в существенном снижении реакционной способности поверхности полупроводников и стабилизации электронных состояний в приповерхностных слоях пластины.

Очистка проводится как отмывкой, например, в растворах кислот HCl , HNO_3 , HF или брома [95–97], так и обработкой в плазме водорода [98]. При этом удаление естественных оксидных слоев с поверхности при помощи термического отжига применимо не для всех материалов A^3B^5 . Например, в случае InSb удаление оксидов In происходит при температуре порядка 325 °С, а оксидов Sb при температуре, близкой к температуре плавления материала.

Методики пассивации классифицируют различными способами [99]. Можно выделить подход на основе получаемого химического состава поверхности, когда создают пассивирующие слои при помощи окисления, сульфидирования, нитрирования и т. д. [100].

Также можно классифицировать пассивацию по способам ее осуществления и обобщенно выделить химические методы в растворах и физико-химические методы.

Сегодня разрабатываются методики оксидирования монокристаллических материалов

плазменным и анодным окислением. Например, электрохимическое окисление GaSb, InSb, InAs проводится в электролитах на основе KMnO_4 , KOH , H_2O_2 , H_3AsO_4 [86]. Однако, существенным недостатком электрохимической обработки является неравномерность процессов анодирования в разных областях поверхности пластины [101]. В работе [88] исследовано химическое окисление пластин InSb (111) в растворах $\text{HBr} \cdot \text{H}_2\text{O}$ и $\text{H}_3\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Обнаружено, что обработка в фосфорной кислоте позволяет получить более толстые рыхлые слои, обогащенные In. В то же время обработка растворами на основе Br_2 приводит к образованию более тонких оксидных слоев на поверхности.

В обзоре [102] рассмотрены методики сульфидирования поверхности InAs в растворах тиолов, цистамина, тиацетамида, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$, а также аминоксилот и пептидов. Предполагается, что тиолы, образованные углеродными цепочками и группой SH-, склонны к самосборке и образованию на поверхности A^3B^5 пассивирующего монослоя, препятствующего окислению [95, 103].

В работах [93,84] предложена методика сульфидирования поверхности InSb в растворе сульфида натрия при температуре 45°C . Как отмечено в [105], в отличие от большинства соединений A^3B^5 , отжиг пластин InSb после обработки серосодержащими растворами приводит к разрыву связей In-S и Sb-S при температурах 310 и 400°C , соответственно. В [106] предложена методика анодной пассивации InSb в электролите на основе Na_2S . При этом в [107] анодное сульфидирование InSb в электролите на основе серной кислоты привело к обогащению поверхности Sb. В целом отмечается, что сульфидирование поверхностей пластин A^3B^5 позволяет существенно снизить плотность поверхностных состояний и электроактивных центров, предотвратить взаимодействие с кислородом воздуха за счет образования химических связей с серой [106, 108]. Однако при длительном хранении пластин A^3B^5 с сульфидированной поверхностью в атмосфере окисление все же возможно [109].

В работе [109] предложен иной подход к пассивации поверхностей GaAs – нанесение на сульфидированную поверхность пластины GaAs слоя нитрида кремния методом плазмо-химического осаждения из газовой фазы. Этот подход основан на методике пассивации готовых полупроводниковых структур.

Для GaAs разрабатываются также методики нитрирования поверхностей в растворах гидразина [96, 110] и обработкой в плазме азота [111].

Таким образом, эффективная пассивация монокристаллических пластин материалов A^3B^5 является сегодня важной технологической и научной проблемой [112, 113]. Пригодность и целесообразность тех или иных решений зависит от особенностей дальнейшего применения каждого конкретного материала. Как правило, для приборостроения необходимы как химическая чистота поверхности подложек, так и их высокая планарность. Удаление гетероатомов при подготовке подложки к эпитаксиальному росту способно существенно нарушить планарность поверхности. Это обуславливает необходимость дальнейших исследований и разработок методов пассивации.

5. Заключение

Рассмотрены современные подходы к шлифовке, полировке и пассивации поверхности полупроводниковых пластин материалов GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP. Уникальные характеристики этих материалов, такие как высокая хрупкость, различная реакционная способность атомов разных сортов, анизотропия свойств в разных кристаллографических направлениях, обуславливают необходимость подбора специальных режимов их полировки и составов полировальных смесей. В обзоре систематизированы подходы к полировке пластин: механическая, химико-механическая, химическая полировка.

Поскольку механическая полировка пластин не позволяет обеспечить требования к качеству поверхности GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP, она не рассматривается.

В химико-механической полировке A^3B^5 можно выделить одноэтапный и многоэтапный подходы; абразивную и безабразивную полировку. ХМП является основным методом обработки поверхностей GaAs, GaSb, InAs, InSb, InP, так как она наиболее производительна и обеспечивает необходимое качество поверхности. При этом наблюдается недостаток теоретического понимания химических процессов и влияния на них механической составляющей ХМП. Предложенные модели механизмов химико-механической полировки преимущественно разработаны на основе конкретных экспериментальных условий (обрабатываемых материалов, составов полировальных смесей, абразивов). Это обуславливает возможные ограничения их применимости

и необходимость корректировки для иных условий обработки полупроводниковых материалов. Помимо теоретических вопросов, ключевой практической проблемой ХМП для арсенидов и фосфидов является выделение токсичных газов AsH_3 и PH_3 . Для антимонидов такая проблема отсутствует. Это делает ХМП наиболее целесообразным и перспективным методом для их $InSb$, $GaSb$. Для арсенидов и фосфидов ХМП также представляется наиболее целесообразным способом обработки поверхностей. При этом важным направлением развития и оптимизации технологии для этих материалов является проблематика снижения и устранения выделения токсичных газов в ходе процесса.

Химическая полировка включает жидкостной, газофазный, электрохимический подходы, обработку в расплаве травителя. Жидкостный подход в свою очередь реализуется в двух вариантах: по способу вращающегося диска в устройстве типа «бочка» или при перемешивании раствора вблизи обрабатываемой поверхности. Наиболее разработанным из указанных подходов, как в теоретическом, так и в практическом отношении является жидкостный. Основным недостатком жидкостной, а также электрохимической обработки является трудность обеспечения равномерной обработки всех поверхности пластины. При этом перспективным направлением для научных разработок в области полировки антимонидов, арсенидов и фосфидов индия и галлия может стать обработка поверхности в расплавах травителей.

Также в обзоре рассмотрены и систематизированы методики пассивации поверхности пластин. Выделены подходы: на основе получаемого химического состава поверхности – при помощи окисления, сульфидирования, нитрирования; на основе способов создания пассивирующих покрытий – химические жидкостные методы и физико-химические методы.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Вороненков В. В., Бочкарева Н. И., Вирко М. В., ... Шретер Ю. Г. Подложки нитрида галлия: современное состояние, проблемы и перспективы. *Наноиндустрия*. 2017;S(74): 478–483. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29871698>
2. Кормилицина С. С., Молодцова Е. В., Князев С. Н., Козлов Р. Ю., Завражин Д. А., Жарикова Е. В., Сыров Ю. В. Исследование влияния вида обработки на прочность монокристаллических пластин нелегированного антимонида индия. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2021;24(1): 48–56. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-1-48-56>
3. Allwood D. A., Cox S., Mason N. J., Palmer R., Young R., Walke P. J. Monitoring epi-ready semiconductor wafers. *Thin Solid Films*. 2002;412(1-2): 76–83. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(02\)00316-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(02)00316-4)
4. Киселев М. Г., Дроздов А. В., Ямная Д. А. *Технология механического распиливания хрупких неметаллических материалов с вынужденными колебаниями заготовки*. Минск: БНТУ; 2017. Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/37305/Tekhnologiya_mekhanicheskogo_raspilivaniya_hrupkih_nemetallicheskikh_materialov.pdf?sequence=5&isAllowed=y&ysclid=lhkrlgps56194871673
5. Цетыркина С. А., Зуйков И. Ф., Чумакова И. В., Чумакова А. В. Технология резки стрелочной монокристаллического кремния. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2010;1(6): 25–26. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?ysclid=lhkt9qabe438551147&id=22634031>
6. Pei Z., Billingsley S., Miura S. Grinding induced subsurface cracks in silicon wafers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1999;39(7): 1103–1116. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00079-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00079-0)
7. Meng Q., Zhang X., Lu Y., Si J. Calculation and verification of thermal stress in $InSb$ focal plane arrays detector. *Optical and Quantum Electronics*. 2017;49(402) <https://doi.org/10.1007/s11082-017-1243-9>
8. Zhang X., Meng Q., Zhang L., Lv Y. Modeling and deformation analyzing of $InSb$ focal plane arrays detector under thermal shock. *Infrared Physics & Technology*. 2014;63: 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.12.004>
9. Пономарев В. Б., Лошкарев А. Б. *Оборудование заводов материалов электронной техники. Методические указания. Курс лекций*. Екатеринбург: ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ; 2008. 87с. Режим доступа: file:///C:/Users/Lab351/Downloads/Ponomarev_Loshkarev.pdf
10. *Технология интегральной электроники* / под. общ. редакцией А. П. Достанко, Л. И. Гурского. Минск: Интегралполиграф; 2009. 571 с.

11. Притирка и доводка поверхностей деталей машин / под. общ. редакцией С. Г. Бабаева, П. Г. Садыгова. М.: Машиностроение; 1976. 128 с.
12. Marinescu I. D., Rowe W. B., Dimitrov B., Ohmori H. Loose abrasive processes. In book: *Tribology of Abrasive Machining Processes. Second Edition*. Oxford: William Andrew Publishing; 2013. 399–421. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4377-3467-6.00013-6>
13. Теплова Т. Б. Квазипластичное удаление поверхностного слоя твердых хрупких материалов с получением нанометрового рельефа поверхности. *Научный вестник Московского государственного горного университета*. 2010;8: 73–88. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15278524>
14. Горошов В., Захаревич Е., Шавва М. Резание в режиме квазипластичности. *Технологическое оборудование и технологии. Фотоника*. 2015;49(1): 36–43. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23107041>
15. Doi T., Marinescu I. D., Kurokawa S. The current situation in ultra-precision technology – silicon single crystals as an example. In book: *Advances in CMP Polishing Technologies*. USA: William Andrew Publishing; 2012. 15–111 p. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4377-7859-5.00003-x>
16. Deaconescu A., Deaconescu T. Experimental and statistical parametric optimisation of surface roughness and machining productivity by lapping. *Transactions of famena XXXIX-4*. 2015;39: 65–78. Режим доступа: <https://hrcak.srce.hr/152134>
17. Мирофянченко Е. В., Мирофянченко А. Е., Попов В. С. Способ утонения обратной стороны матричного модуля InSb (100) и его влияние на кристаллическую структуру приповерхностных слоев. *Прикладная физика*. 2020;2: 46–52. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rmmbya>
18. Prakash S. J., Tyagi R., Gupta A. Backside thinning of GaAs wafer by lapping using DOE approach. In: *India International Conference on Power Electronics: Materials of international conference IICPE2010, 2010, India: New Delhi*; 2011. p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IICPE.2011.5728072>
19. URL: <https://www.fujimico.com/catalog/Lapping/5>
20. Визер Л. Н. *Технология элементов и структур микроэлектроники*. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет; 2017. Режим доступа: https://www.ncfu.ru/export/uploads/imported-from-dle/op/doclinks2017/Method_Tehnoel_element_i_struk_microel_220301_2017.pdf
21. Lee H., Wang H., Park J., Jeong H. Experimental investigation of process parameters for roll-type linear chemical mechanical polishing (Roll-CMP) system. *Precision Engineering*. 2014;38: 928–934. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.06.003>
22. Brightup S. J., Goorsky M. S. Chemical-mechanical polishing for III–V wafer bonding applications: polishing, roughness, and an abrasive-free polishing model. *ECS Transactions*. 2010;33(4): 383–389. <https://doi.org/10.1149/1.3483528>
23. Deng Q., Kong T., Li G., Yuan J. Study on polishing technology of GaAs wafer. *Advanced Materials Research*. 2012;497: 200–204. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.497.200>
24. Yi D., Li J., Cao J. Study on fundamental polishing characteristics in chemical mechanical polishing of gallium arsenide (GaAs) wafer. *Bulgarian Chemical Communications*. 2017;49(Special Issue-K1): 113–117. Режим доступа: http://bcc.bas.bg/BCC_Volumes/Volume_49_Special_K_2017/BCC-49-SI-K1-2017.pdf#page=111
25. 祐二 森澤, 直紀 高山, NIPPON EKUSHIIDO KK. *Polishing liquid for compound semiconductor and method for polishing compound semiconductor using the same*. Patent No. JP2585963B2, No. JP5341276A; Application 10.12.1993; Publ. 26.02.1997.
26. Lyu B. H., Dai W. T., Weng H. Z., Li M., Deng Q. F., Yuan J. L. Influence of components on the rheological property of shear thickening polishing slurry. *Advanced Materials Research*. 2016;1136: 461–465. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1136.461>
27. Lortz W., Menzel F., Brandes R., Klaessig F., Knothe T., Shibasaki T. News from the M in CMP—Viscosity of CMP slurries, a constant? *MRS Proceedings*. 2003;767(17): 767. <https://doi.org/10.1557/PROC-767-F1.7>
28. Peddetti Sh., Ong P., L. Leunissen H. A., Babu S. V. Chemical mechanical polishing of Ge using colloidal silica particles and H₂O₂. *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2011;14(7): 254–257. <https://doi.org/10.1149/1.3575166>
29. Zhao D., Lu X. Chemical mechanical polishing: Theory and experiment. *Friction*. 2013;1(12): 306–326. <https://doi.org/10.1007/s40544-013-0035-x>
30. Gao J., Zhou H., Du J., ... Qian L. Effect of counter-surface chemical activity on mechanochemical removal of GaAs surface. *Tribology International*. 2022;176: 107928. doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107928
31. Cheng J., Huang S., Li Y., Wang T., Xie L., Lu X. RE (La, Nd and Yb) doped CeO₂ abrasive particles for chemical mechanical polishing of dielectric materials: Experimental and computational analysis. *Applied Surface Science*. 2020;506: 144668. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144668>
32. Seo J., Gowda A., Khajornrungruang P., Hamada S., Song T., Babu S. Trajectories, diffusion, and interactions of single ceria particles on a glass surface observed by evanescent wave microscopy. *Journal of Materials Research*. 2020;35: 321–331. <https://doi.org/10.1557/jmr.2020.6>

33. Gowda A., Seo J., Ranaweera C. K., Babu S. Cleaning solutions for removal of ~30 nm ceria particles from proline and citric acid containing slurries deposited on silicon dioxide and silicon nitride surfaces. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2020;9: 044013. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ab8ffa>
34. Киселева Л. В., Лопухин А. А., Мезин Ю. С., Савостин А. В., Власов П. В., Вяткина О. С. Влияние режимов химической обработки монокристаллов InSb на состав и структуру поверхности. *Прикладная физика*. 2015;5: 84–89. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24839899>
35. Linehan D. M. Chemical mechanical polishing of InSb. Диссертация на соискание ученой степени магистра. Lund University: 2021. 39 p. Режим доступа: <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9069263>
36. Bhonsle R. K., Teugels L., Ibrahim S. A. U., ... Leunissen L. H. A. Inspection, characterization and classification of defects for improved CMP of III-V materials. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2015;4(11): 5073–5077. <https://doi.org/10.1149/2.0111511jss>
37. Lee H. Semi-empirical material removal model with modified real contact area for CMP. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019;20: 1325–1332. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00161-6>
38. Chen C.-C., Li J.-C., Liao W.-C., Ciou Y.-J., Chen C.-C. Dynamic pad surface metrology monitoring by swingarm chromatic confocal system. *Applied Sciences*. 2021;11(1): 179. <https://doi.org/10.3390/app11010179>
39. Diss Lee B. Modeling of chemical mechanical polishing for shallow trench isolation. PhD Dissertation. USA: MIT, 2002. 201 p. Режим доступа: <https://core.ac.uk/download/pdf/4397042.pdf>
40. Terayama Y., Khajornrungruang P., Suzuki K., Kusatsu K., Hamada S., Wada Y., Hiyama H. Real time nanoscale cleaning phenomenon observation during PVA brush scrubbing by evanescent field. *ECS Trans.* 2019;92(2): 191–197. <https://doi.org/10.1149/09202.0191ecst>
41. Khanna A. J., Jawali P., Redfeld D., ... Bajaj R. Methodology for pad conditioning sweep optimization for advanced nodes. *Microelectronic Engineering*. 2019;216(15): 111101. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.111101>
42. Гольдштейн Р. В., Осипенко М. Н. Химико-механическое полирование. Часть 2. Модель локального взаимодействия. *Вестник ПГТУ. Механика*. 2011;3: 26–42. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16898671>
43. Khanna A. J., Gupta S., Kumar P., Chang F.-C., Singh R. K. Quantification of shear induced agglomeration in chemical mechanical polishing slurries under different chemical environments. *Microelectronic Engineering*. 2019;210: 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.03.012>
44. Han R., Sampurno Y., Theng S., Sudargho F., Zhuang Y., Philipossian A. Application of the Stribeck+ curve in silicon dioxide chemical mechanical planarization. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2017;6: 161–164. <https://doi.org/10.1149/2.0241704jss>
45. Liao X., Sampurno Y., Zhuang Y., Philipossian A. Effect of slurry application/injection schemes on slurry availability during chemical mechanical planarization (CMP). *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2012;15(4): H118–H122. <https://doi.org/10.1149/2.009205esl>
46. Lee J.-T., Lee E.-S., Won J.-K., Choi H.-Z. Wafer polishing process with signal analysis and monitoring for optimum condition of machining. *Advanced Materials Research*. 2010;126-128: 295–304. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.126-128.295>
47. Pourbaix M. Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. USA: National Association of Corrosion Engineers, 2nd edition; 1974. 645 p.
48. Lo R., Lo S.-L. A pilot plant study using ceramic membrane microfiltration, carbon adsorption and reverse osmosis to treat CMP (chemical mechanical polishing) wastewater. *Water Supply*. 2004;4(1): 111–118. <https://doi.org/10.2166/ws.2004.0013>
49. Sioncke S., Brunco D. P., Meuris M., ... Heyns M. M. Etch rates of Ge, GaAs and InGaAs in acids, bases and peroxide based mixtures. *ECS Transactions*. 2008;16(10): 451–460. <https://doi.org/10.1149/1.2986802>
50. Frank-Rotsch Ch., Dropka N., Rotsch P. III Arsenide. In Book: *Single crystals of Electronic Materials: Growth and Properties*. UK: Woodhead Publishing, Elsevier; 2018. pp. 181–240. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102096-8.00006-9>
51. Ong P., Teugel L. CMP processing of high mobility channel materials: alternatives to Si. In book: *Advances in Chemical Mechanical Planarization (CMP), 2nd Edition*. UK: Woodhead Publishing, Elsevier; 2022. pp. 125–142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821791-7.00020-4>
52. Qin K., Moudgil B., Park C. W. A chemical mechanical polishing model incorporating both the chemical and mechanical effects. *Thin Solid Films*. 2004;446(2): 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2003.09.060>
53. Lee H. S., Jeong H. D., Dornfeld D. A. Semi-empirical material removal rate distribution model for SiO₂ chemical mechanical polishing (CMP) processes. *Precision Engineering*. 2013;37: 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2012.12.006>

54. Seo J. A review on chemical and mechanical phenomena at the wafer interface during chemical mechanical planarization. *Journal of Materials Research*. 2021;36(1): 235–257. <https://doi.org/10.1557/s43578-020-00060-x>
55. Park B., Kim Y., Kim H., Jeong H., Dornfeld D. A. Effect of ceria abrasives on planarization efficiency in STI CMP Process. *ECS Transactions*. 2009;19(7): 51–59. <https://doi.org/10.1149/1.3123774>
56. Амирханов А. В., Гладких А. А., Макаручук В. В., Пшенников А. Г., Шахнов В. А. Полиномиальная модель химико-механической планаризации в производстве субмикронных СБИС. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Приборостроение»*. 2012;2: 20–36. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17734975>
57. Гольдштейн Р. В., Осипенко М. Н. Химико-механическое полирование. Часть 1. Основные закономерности: обзор. *Вестник ПГТУ. Механика*. 2011;3: 26–42. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16898670>
58. Runnels S. R. Feature-scale fluid-based erosion modeling for Chemical-Mechanical Polishing. *Journal of Electrochemical Society*. 1994;141(7): 1900–1904. <https://doi.org/10.1149/1.2055024>
59. Luo J., Dornfeld D. A. Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: theory and modelling. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. 2001;14(2): 112–133. <https://doi.org/10.1109/66.920723>
60. Lee H., Lee D., Jeong H. Mechanical aspects of the chemical mechanical polishing process: a review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2016;17(4): 525–536. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0066-0>
61. Papis Polakowska E., Leonhardt E., Kaniewski J. Characterization of (100) GaSb passivated surface using next generation 3D digital microscopy. *Acta Physica Polonica Series a*. 2014;125(4): 1052–1055. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.125.1052>
62. Yan B., Liang H., Liu Y., ... Huang L. Chemical mechanical polishing of GaSb wafers for significantly improved surface quality. *Frontiers in Materials*. 2021;8: 773131. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.773131>
63. Hayashi S., Joshi M. B., Goorsky M. S. Chemical mechanical polishing of exfoliated III-V layers. *ECS Transactions*. 2008;16(8): 295–302. <https://doi.org/10.1149/1.2982881>
64. Seo D., Na J., Lee S., Lim S. Behavior of GaSb (100) and InSb (100) surfaces in the presence of H₂O₂ in acidic and basic cleaning solutions. *Applied Surface Science*. 2017;399: 523–534. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.12.114>
65. Matovu J. B., Ong P., Leunissen L. H. A., Krishnan S., Babua S. V. Fundamental investigation of chemical mechanical polishing of GaAs in silica dispersions: material removal and arsenic trihydride formation pathways. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2013;2(11): 432–439. <https://doi.org/10.1149/2.008311jss>
66. Peddetti Sh., Ong P., Leunissen L. H. A., Babu S. V. Chemical mechanical polishing of InP. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2012;1(4): 184–189. <https://doi.org/10.1149/2.016204jss>
67. Suryadevara B. *Advances in chemical mechanical planarization (CMP)*. 2nd edition. The UK, Cambridge: Woodhead Publishing; 2021. 648 p.
68. Lee H., Dornfeld D. A., Jeong H. Mathematical model-based evaluation methodology for environmental burden of chemical mechanical planarization process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2014;1(1): 11–15. <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0002-7>
69. Андреев В. М., Кудряшов Д. А., Мизеров М. Н., Пушный Б. В. Способ полирования полупроводниковых материалов. Патент № RU2457574, H01L 21/302, B82B 3/00; № 2011106341/28; Заявл. 18.02.2011; Опубл. 27.07.2012, бюл. № 21. Режим доступа: https://patents.s3.yandex.net/RU2457574C1_20120727.pdf
70. Йошида М., Ашидзава Т., Терасаки Х., ... Оотуки Ю. Абразив из оксида церия и способ полирования подложек. Патент № RU2178599C2, H01L 21/304; № 99109040/28; Заявл. 30.09.1997; Опубл. 20.01.2002, бюл. № 2. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2178599C2/ru>
71. Lee H., Jeong H. Analysis of removal mechanism on oxide CMP using mixed abrasive slurry. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2015;16(3): 603–607. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0081-6>
72. Lee H., Lee D., Kim M., Jeong H. Effect of mixing ratio of non-spherical particles in colloidal silica slurry on oxide CMP. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2017;18(10): 1333–1338. <https://doi.org/10.1007/s12541-017-0158-5>
73. Lee H. S., Jeong H. D. Chemical and mechanical balance in polishing of electronic materials for defect-free surfaces. *CIRP Annals*. 2009;58(1): 485–490. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.115>
74. Lee H. Tribology research trends in chemical mechanical polishing (CMP) process. *Tribology and Lubricants*. 2018;34(3): 115–122. <https://doi.org/10.9725/KTS.2018.34.3.115>
75. Suzuki N., Hashimoto Y., Yasuda H., Yamaki S., Mochizuki Y. Prediction of polishing pressure distribution in CMP process with airbag type wafer carrier. *CIRP Annals*. 2017;66(1): 329–332. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.088>
76. Park J.-Y., Han J.-H., Kim C. A study on the influence of the cross-sectional shape of the metal-inserted retainer ring and the pressure distribution from

the multi-zone carrier head to increase the wafer yield. *Applied Sciences*. 2020;10(23): 8362. <https://doi.org/10.3390/app10238362>

77. Martinez B., Flint J. P., Dallas G., ... Furlong M. J. Standardizing large format 5" GaSb and InSb substrate production. *Proceedings Volume 10177, Infrared Technology and Applications XLIII*. 2017; 10177. <https://doi.org/10.1117/12.2263961>

78. Pandey Kh., Pandey P. M. Chemically assisted polishing of monocrystalline silicon wafer Si (100) by DDMAF. *Procedia Engineering*. 2017;184: 178–184. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.083>

79. Kum Ch. W., Sato T., Guo J., Liud K., Butler D. A novel media properties-based material removal rate model for magnetic field-assisted finishing. *International journal of mechanical sciences*. 2018;141: 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.04.006>

80. Zhang J., Wang H., Kumar S., Jin M. Experimental and theoretical study of internal finishing by a novel magnetic driven polishing tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2020;153: 103552. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103552>

81. Lu W. Z., Zuo D. W., Sun Y. L., Zhao Y. F., Xu F., Chen R. F. Temperature field during CMP GaAs wafer using an AID. *Key Engineering Materials*. 2009;416: 28–33. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.416.28>

82. Hong S. H., Isii H., Touge M., Watanabe J. Investigation of chemical mechanical polishing of GaAs wafer by the effect of a photocatalyst. *Key Engineering Materials*. 2005;291–292: 381–384. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.291-292.381>

83. Ma G., Li S., Liu X., Yin X., Jia Z., Liu F. Combination of plasma electrolytic processing and mechanical polishing for single-crystal 4H-SiC. *Micromachines*. 2021;12: 606–618. <https://doi.org/10.3390/mi12060606>

84. Ou L., Dong Zh., Kang R., Shi K., Guo D. Photoelectrochemically combined mechanical polishing of n-type gallium nitride wafer by using metal nanoparticles as photocathodes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;105: 4483–4489. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03279-5>

85. Jo H., Lee D. S., Jeong S. H., Lee H. S., Jeong H. D. Hybrid CMP slurry supply system using ionization and atomization. *Applied Sciences*. 2021;11: 2217–2233. <https://doi.org/10.3390/app11052217>

86. Papis Polakowska E. Surface treatments of GaSb and related materials for the processing of mid-infrared semiconductor devices. *Electron Technology – Internet Journal*. 2006;37/38(4): 1–34. Режим доступа: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BWA0-0014-0022>

87. Эминов Ш. О., Джалилова Х. Д., Мамедова Э. А. Жидкостное химическое травление плоскостей (111)In и Sb подложек из InSb. *Неорганические материалы*. 2011;47(4): 394–398. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16311210>

88. Aureau D., Chaghi R., Gerard I., Sik H., Fleury J., Etcheberry A. Wet etching of InSb surfaces in aqueous solutions: Controlled oxide formation. *Applied Surface Science*. 2013;276: 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.03.063>

89. Tomashik Z. F., Kussyak N. V., Tomashik V. N. Chemical etching of InAs, InSb, and GaAs in H₂O₂-HBr solutions. *Inorganic Materials*. 2002;38(5): 434–437. <https://doi.org/10.1023/A:1015402501421>

90. Han L., Xu H., Sartin M. M., ... Tian Zh.-Q. Pulse potential confined electrochemical polishing on gallium arsenide wafer. *Journal of The Electrochemical Society*. 2021;168: 043507. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abf96f>

91. Zhang Y., Chen H., Liu D., Deng H. High efficient polishing of sliced 4H-SiC (0001) by molten KOH etching. *Applied Surface Science*. 2020;525: 146532. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146532>

92. Braun A. K., Ptak A. J. Planarization of rough (100) GaAs substrates via growth by hydride vapor phase epitaxy. *IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC): Conference Record, 2021*, Fort Lauderdale, FL, USA; 2021. pp. 1437–1439. <https://doi.org/10.1109/PVSC43889.2021.9518828>

93. Львова Т. В., Дунаевский М. С., Лебедев М. В., Шахмин А. Л., Седова И. В., Иванов С. В. Химическая пассивация подложек InSb (100) в водных растворах сульфида натрия. *Физика и техника полупроводников*. 2013;47(5): 710–716. Режим доступа: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/4979>

94. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В. Фотоника – новый драйвер GaAs. *Фотоника*. 2020;14(2): 138–149. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.2.138.149>

95. Holloway G. W., Наарамакки Ch. M., Kuyanov P., LaPierre R. R., Baugh J. Electrical characterization of chemical and dielectric passivation of InAs nanowires. *Semiconductor Science and Technology*. 2016;31(11): 114004. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/11/114004>

96. Zou X., Li Ch., Su X., ... Yartsev A. Carrier recombination processes in GaAs wafer passivated by wet nitridation. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2020;12(25): 28360–29367. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c04892>

97. Tereshchenko O. E., Chikichev S. I., Terexhov A. S. Atomic structure and electronic properties of HCl-isopropanol treated and vacuum annealed GaAs 100 surface. *Applied Surface Science*. 1999;142: 75–80. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(98\)00634-5](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(98)00634-5)

98. Haworth L., Lu J., Westwood D. I., MacDonald J. E. Atomic hydrogen cleaning, nitriding and annealing InSb (100). *Applied Surface Science*. 2000;166: 253–258. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(00\)00425-6](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00425-6)
99. Миттова И. Я., Сладкопеевцев Б. В., Донцов А. И., Сыров Ю. В., Ковалева А. С., Тарасова О. С. Термическое окислирование поверхности монокристаллического GaAs, обработанной в парах серы. *Неорганические материалы*. 2021;57(7): 693–699. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21070137>
100. Сыров Ю. В. Взаимодействие антимолида индия с парами теллура. *Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах: Материалы VII Всероссийской конференции, 10–13 ноября 2015, Воронеж*. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга»; 2015. с. 292–293.
101. Hasegawa H., Hartnagel H. L. Anodic oxidation of GaAs in mixed solutions of glycol and water. *Journal of The Electrochemical Society*. 1976;123(5): 713–723. <https://doi.org/10.1149/1.2132915>
102. Jewett S. A., Ivanisevic A. Wet-chemical passivation of InAs: toward surfaces with high stability and low toxicity. *Accounts of Chemical Research*. 2012;45(9): 1451–1459. <https://doi.org/10.1021/ar200282f>
103. Sun M. H., Joyce H. J., Gao Q., Tan H. H., Jagdish C., Ning C. Z. Removal of surface states and recovery of band-edge emission in InAs nanowires through surface passivation. *Nano Letters*. 2012;12(7): 3378–3384. <https://doi.org/10.1021/nl300015w>
104. Solov'ev V. A., Sedova I. V., Lvova T. V., ... Ivanov S. V. Effect of sulfur passivation of InSb (0 0 1) substrates on molecular-beam homoepitaxy. *Applied Surface Science*. 2015;356: 378–382. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.07.200>
105. Zhernokletov D. M., Dong H., Brennan B., Kim J., Wallace R. M. Optimization of the ammonium sulfide (NH₄)₂S passivation process on InSb(111)A. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2012;30(4): 04E103. <https://doi.org/10.1116/1.4719961>
106. Мирофянченко А. Е., Мирофянченко Е. В., Лаврентьев Н. А., Попов В. С. Пассивация фоточувствительных элементов InSb (100) анодным окислением в растворе сульфида натрия с предварительным сульфидированием поверхности. *Прикладная физика*. 2020;3: 33–39. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43807692>
107. Künstler-Hourriez B., Ern e B., Lef evre F., ... Etcheberry A. Surface reactivity of InSb studied by cyclic voltammetry coupled to XPS. *Journal de Physique IV (Proceedings)*. 2006;132: 147–151. <https://doi.org/10.1051/jp4:2006132029>
108. Gong X. Y., Yamaguchi T., Kan H., ... Rinfret R. Sulphur passivation of InAs. *Applied Surface Science*. 1997;113/114: 388–392. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(96\)00936-1](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(96)00936-1)
109. Richard O., Blais S., Ar es R., Aimez V., Jaouad A. Mechanisms of GaAs surface passivation by a one-step dry process using low-frequency plasma enhanced chemical deposition of silicon nitride. *Microelectronic Engineering*. 2020;233: 111398. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2020.111398>
110. Chellu A., Koivusalo E., Raappana M., ... Hakkarainen T. Nanotechnology paper GaAs surface passivation for InAs/GaAs quantum dot based nanophotonic devices. *Nanotechnology*. 2021;32(13): 130001. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abd0b4>
111. Mehdi H., R everet F., Robert-Goumet C., ... Pelissier B. Investigation of N₂ plasma GaAs surface passivation efficiency against air exposure: towards an enhanced diode. *Applied Surface Science*. 2022;579: 152191. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152191>
112. Syrov Y. V. Interaction of indium antimonide with saturated sulfur vapor. *Doklady Chemistry*. 2016;471(2): 365–367. <https://doi.org/10.1134/S0012500816120077>
113. Добровольский Д. С., Давыгоро А. П., Сыров Ю. В., Молодцова Е. В. *Физико-химические процессы в конденсированных средах и на межфазных границах: Материалы VII Всероссийской конференции, 10–13 ноября 2015, Воронеж*. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга»; 2015. с. 192–193.
114. 龚晓霞, 李德香, 张丽霞, 吴宇, 杨雪, 种苏然, 杨文运, 太云见, 黄晖. *Polishing method of indium antimonide single crystal wafer*. Patent CN110788739A, B24B 57/02, C09G 1/0; No CN201911058927.XA; Application 31.10.2019; Publ. 14.02.2020. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/CN110788739A/en>
115. Levchenko I., Tomashyk V., Stratiychuk I., Malanych G. Formation of the InAs-, InSb-, GaAs-, and GaSb-polished surface. *Applied Nanoscience*. 2018;8: 949–953. <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0788-7>
116. 高飞, 李晖, 徐世海, 张颖武, 练小正, 张弛, 王磊, 徐永宽, 程红娟. *A kind of polishing method for gallium antimonide monocrystalline piece*. Patent No CN106064326B, B24B 1/0, B24B; No CN201610615129.2A; Application 01.08.2016; Publ. 03.06.2018. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/CN106064326A/en>
117. 李超, 林泉, 郑安生, 龙彪, 马锦伟. *Double-surface polishing method for gallium antimonide wafer*. Patent No CN102554750A, H01L 21/304; No CN2010106226200A; Application 29.12.2009; Published 11.07.2012.
118. Ковалишина Е. А. *Способ финишного химико-механического полирования пластин InAs*. Патент

№ RU2582904C1, H01L 21/304; № 2014153880/28; Заявл. 29.12.2014; Оpubл. 27.04.2016, бюл. № 12. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2582904C1/ru>

119. Киселева Л. В., Болтарь К. О., Власов П. В., ... Савостин А. В. *Способ химико-механического полирования пластин арсенида галлия*. Патент № RU2545295C1, C30B 33/00, H01L 21/304, H01L 21/306, C30B 29/42; № 2014103552/05; Заявл. 03.02.2014; Оpubл. 27.03.2015, бюл. №9. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU2545295C1_20150327

120. Nakayama M., Itami H., Yamazaki T., Itami H. *Mechano-chemical polishing method for GaAs wafer*. Patent No DE102008004441A1, H01L 21/302, C09G 1/04; No 2007-030735; Application 09.02.2007; Publ. 14.08.2008. Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/EP1763071A1/en>

121. Matovu J. B., Ong P., Leunissen L. H. A., Krishnan S., Babu S. V. Use of multifunctional carboxylic acids and hydrogen peroxide to improve surface quality and minimize phosphine evolution during chemical mechanical polishing of indium phosphide surfaces. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2013;52: 10664–10672. <https://doi.org/10.1021/ie400689q>

122. Morisawa Y., Kikuma I., Takayama N., Takeuchi M. Mirror polishing of InP wafer surfaces with NaOCl-citric acid. *Applied Surface Science*. 1996;92: 147–150. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(95\)00219-7](https://doi.org/10.1016/0169-4332(95)00219-7)

123. Morisawa Y., Kikuma I., Takayama N., Takeuchi M. Effect of SiO₂ powder on mirror polishing of InP wafers. *Journal of Electronic Materials*. 1996;26(1): 34–36. <https://doi.org/10.1007/s11664-997-0130-8>

Информация об авторах

Абрамова Елена Николаевна, к. х. н., в. н. с., АО «Гиредмет», ПАО «Росатом» (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0002-7724-804X>
overmind11@rambler.ru

Козлов Роман Юрьевич, аспирант 4-го года обучения, НИТУ «МИСИС», начальник лаборатории, АО «Гиредмет», ПАО «Росатом» (Москва, Российская Федерация).

rykozlov@rosatom.ru

Хохлов Анатолий Ильич, к. т. н., в. н. с., АО «Гиредмет», ПАО «Росатом» (Москва, Российская Федерация).

yaniki-220@mail.ru

Сыров Юрий Вячеславович, к. ф.-м. н., в. н. с., АО «Гиредмет», ПАО «Росатом» (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-2226-5790>
yvsyrov@yandex.ru

Пархоменко Юрий Николаевич, д. ф.-м. н., профессор кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков, НИТУ «МИСИС» (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1970-9867>
parkhomenko.in@misis.ru

Поступила в редакцию 07.04.2023; одобрена после рецензирования 24.06.2023; принята к публикации 15.09.2023; опубликована онлайн 25.03.2024.