

PACS numbers: 61.72.uj, 68.35.bg, 68.35.Ct, 68.37.Ps, 81.65.Cf, 81.65.Ps, 82.65.+r

Влияние изменения концентрации $C_6H_8O_7$ на характер химического взаимодействия InAs, InSb, GaAs и GaSb с травильными растворами $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$

И. В. Левченко, И. Б. Стратийчук, В. Н. Томашик, Г. П. Маланич,
А. С. Станецкая, А. А. Корчевой

*Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины,
просп. Науки, 41,
03028 Киев, Украина*

В данной статье рассмотрены особенности химико-динамического полирования полупроводников типа $A^{III}B^V$ травильными композициями $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ с использованием $C_6H_8O_7$ разной исходной концентрации. Установлено, что исследуемые бромвыделяющие смеси характеризуются низкими скоростями травления. Проведён сравнительный анализ влияния изменения состава травильных растворов с разной исходной концентрацией лимонной кислоты на параметры химического взаимодействия кристаллов с травителями и качество получаемой поверхности. Установлено, что увеличение концентрации $C_6H_8O_7$ в составе травителя способствует уменьшению скорости растворения полупроводников от 7,5 мкм/мин до 0,1 мкм/мин. Минимальные значения скоростей травления достигаются при максимальном насыщении смеси органическим компонентом (80 об.%), независимо от его исходной концентрации. Сравнительный анализ экспериментальных результатов свидетельствует о том, что травители на основе $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ с 20% исходной концентрацией $C_6H_8O_7$ (по сравнению с 40%) характеризуются большими скоростями травления и могут быть использованы для качественной финишной обработки кристаллов InAs, InSb, GaAs и GaSb. Установлено, что расположение областей полирующих и неполирующих травильных композиций не зависит от изменения исходной концентрации лимонной кислоты. Полирующая область находится в пределах 2–22 об.% $(NH_4)_2Cr_2O_7$, 10–98 об.% HBr и 0–80 об.% лимонной кислоты для InAs и GaAs, а для кристаллов InSb и GaSb — 2–19 об.% $(NH_4)_2Cr_2O_7$, 10–98 об.% HBr, 0–80 об.% $C_6H_8O_7$. Область неполирующих растворов присуща только антимоноидам. Показано, что полирование травителями состава $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ с использованием 20% $C_6H_8O_7$ эффективнее уменьшает структурные нарушения полупроводников.

У даній статті розглянуто особливості хеміко-динамічного полірування напівпровідників типу $A^{III}B^V$ щавильними композиціями $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ з використанням $C_6H_8O_7$ різної вихідної концентрації. Встановлено, що досліджувані бромвидільні суміші характеризуються низькими швидкостями щавлення. Проведено порівняльну аналізу впливу зміни складу щавильних розчинів із різною вихідною концентрацією лимонної кислоти на параметри хемічної взаємодії кристалів із щавниками і якість одержаної поверхні. Встановлено, що збільшення концентрації $C_6H_8O_7$ у складі щавника сприяє зменшенню швидкості розчинення напівпровідників від 7,5 мкм/хв до 0,1 мкм/хв. Мінімальні значення швидкостей щавлення досягаються при максимальному насиченні суміші органічним компонентом (80 об.%), незалежно від його вихідної концентрації. Порівняльна аналіза експериментальних результатів свідчить про те, що щавники на основі $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ з 20% вихідною концентрацією $C_6H_8O_7$ (у порівнянні з 40%) характеризуються більшими швидкостями щавлення та можуть бути використані для якісного фінішного оброблення кристалів InAs, InSb, GaAs і GaSb. Встановлено, що розташування областей полірувальних і неполірувальних щавильних композицій не залежать від зміни вихідної концентрації лимонної кислоти. Полірувальна область знаходиться в межах 2–22 об.% $(NH_4)_2Cr_2O_7$, 10–98 об.% HBr та 0–80 об.% лимонної кислоти для InAs та GaAs, а для кристалів InSb та GaSb — 2–19 об.% $(NH_4)_2Cr_2O_7$, 10–98 об.% HBr, 0–80 об.% $C_6H_8O_7$. Область неполірувальних розчинів є притаманною лише для антимонідів. Встановлено, що полірувальні щавники складу $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ із використанням 20% $C_6H_8O_7$ ефективніше зменшують структурні порушення напівпровідників.

In this article, the peculiarities of the chemical-dynamic polishing of III–V semiconductors in the etching $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ compositions using various $C_6H_8O_7$ concentrations are determined. As revealed, the investigated bromine emerging mixtures are characterized by low etching rates. A comparative analysis of the influence of compositions with various concentrations of a citric acid on both the etching solution–crystal chemical interaction and the quality of the resulting surface is made. As established, the increase of the $C_6H_8O_7$ concentration promotes the decrease of the semiconductor dissolution rate from 7.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ to 0.1 $\mu\text{m}/\text{min}$. The minimum value of the etching rates is achieved when the saturation of the organic component is maximum (80 vol.%), and this value is not depend on the initial $C_6H_8O_7$ concentration. As shown, the etching $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ -based compositions with initial 20% $C_6H_8O_7$ (in comparison with 40% one) are characterized by higher etching rates, and they can be used for the high-quality finish treatment of the InAs, InSb, GaAs, and GaSb crystal surfaces. As found, the arrangement of the polishing and unpolishing regions is independent on the changes of the initial citric-acid concentration. The polishing solution region contains (in vol.%) 2–22 vol.% $(NH_4)_2Cr_2O_7$, 10–98 vol.% HBr and 0–80 vol.% citric acid for the InAs and GaAs crystals, and for the InSb and GaSb crystals, 2–19 vol.% $(NH_4)_2Cr_2O_7$, 10–98 vol.% HBr, 0–80 vol.% $C_6H_8O_7$. Only antimonides have the unpolishing solution region. As found, the pol-

ishing by the $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ -based etchants more effectively decreases the structural damages of semiconductors when the 20% $C_6H_8O_7$ is used.

Ключевые слова: полупроводники, лимонная кислота, химико-динамическое полирование, травители, бромвыделяющие растворы.

Ключові слова: напівпровідники, лимонна кислота, хеміко-динамічне полірування, щавники, бромвидільні розчини.

Key words: semiconductors, citric acid, chemical-dynamic polishing, etchants, bromine emerging solutions.

(Получено 11 апреля 2017 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

На первый взгляд, химическое травление полупроводниковых материалов кажется относительно простым для практической реализации процессом. Однако серьёзную научно-техническую проблему создаёт технология получения высококачественной полированной и структурно совершенной поверхности подложек при сохранении геометрических параметров. Качество полученной поверхности влияет не только на структуру и свойства материалов, но и на оптимизацию процесса изготовления полупроводниковых изделий, его воспроизводимость, качество и стоимость. Химико-динамическое полирование (ХДП) поверхности кристаллов обеспечивает качественную очистку поверхности и получение наноразмерного рельефа при взаимодействии поверхности полупроводников с травильным раствором. Для получения подобного результата нужны исследования физико-химических закономерностей, определяющих взаимосвязь между кинетикой растворения и механизмом полирования пластин, влияние основных компонентов травителя, взаимодействие кристаллов с травильной смесью, участие в формировании границы раздела фаз. Именно отсутствие систематических сведений из этой области исследований препятствует совершенствованию технологии химической обработки полупроводниковых материалов.

Полупроводники типа $A^{III}B^V$ широко применяют в технологиях твердотельного освещения и спин-электроники для изготовления электронных и фотонных систем: многопереходных солнечных элементов на основе $InGaAs/GaAsPN$, трёхклеммных LED-структур, полевых транзисторов (FET), биполярных транзисторов с гетеропереходом (HBT) и поверхностно излучающих лазеров с вертикальным резонатором (VCSEL). Растёт интерес и к гетероструктурам $AlGaAs/GaAs$, $InGaAs/GaAs$, $InP/GaAsSb/InP$, а так-

же InAs, InSb, в частности, для изготовления сверхбыстродействующих приборов с минимальным энергопотреблением [1, 2].

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА

Авторы [3] сравнивают результаты полученной поверхности кристаллов GaSb после травления индуктивно-связанной плазмой и химического травления, а также сочетание обоих методов. Травильные растворы на основе $C_6H_8O_7:H_2O$ в соотношении 1:1 истончают приповерхностные слои n -типа кристаллов (100)GaSb со скоростью травления $\nu = 3,57 \cdot 10^{-3}$ мкм/мин и формируют зеркальную поверхность с шероховатостью $R_z = 2,47$ нм. Использование $C_6H_8O_7$ в качестве органического компонента также изложено в работе [4]. Добавление лимонной кислоты в состав травильного раствора на основе $H_3PO_4/H_2O_2/H_2O$ способствует улучшению свойств полученной поверхности InAs/GaSb и её вольт-амперных характеристик.

Процесс ХДП полупроводников типа $A^{III}B^V$ часто проводят с использованием бромсодержащих травильных композиций. Так, в [5] исследовалось взаимодействие поверхности кристаллов InSb(111) с растворами на основе HBr/Br_2 и $H_3PO_4/H_2O_2/C_6H_8O_7$ в контролируемых гидродинамических условиях. Авторы отмечают, что Br_2 и H_2O_2 как окисляющие агенты инициируют процесс травления кристаллов. Лимонная кислота и Br^- (для раствора брома) выступают в качестве комплексообразующего агента, который способствует растворению Sb. Было отмечено, что по сравнению с продуктами окисления в травильных композициях HBr/Br_2 оксиды, полученные после химического взаимодействия исследуемых кристаллов с раствором $H_3PO_4/H_2O_2/C_6H_8O_7$, не влияют на кинетику процесса травления. Кроме того, химическое взаимодействие с растворами на основе перекиси водорода не изменяет начальную плоскостность поверхности, в то время как бромсодержащий травитель способствует образованию кластеров и столбцов.

Химическая обработка полупроводников типа $A^{III}B^V$ затруднена, что обусловлено их реакционной способностью и ограниченной растворимостью продуктов взаимодействия с травильными растворами [6]. Результаты экспериментальных исследований химического полирования поверхности полупроводников хромсодержащими травильными композициями на основе $(NH_4)_2Cr_2O_7$ свидетельствуют о том, что таким смесям характерны невысокие скорости растворения кристаллов и хорошие полирующие свойства.

Целью настоящей работы было изучение влияния травильных растворов на основе $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ с использованием

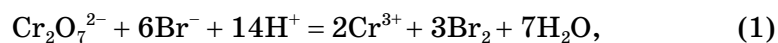
органической кислоты различной исходной концентрации на параметры химико-динамического полирования полупроводников $InAs$, $InSb$, $GaAs$ и $GaSb$, выявление и сравнение зависимостей скорости травления кристаллов от состава травильных растворов, определение составов полирующих растворов, а также оптимизация условий проведения ХДП.

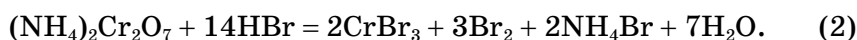
Для экспериментальных исследований использовали кристаллы n -типа: $InAs$, $InSb$, $GaAs$, $GaSb$. Монокристаллические слитки разрезали с помощью струнной резки на пластины размером $5 \times 5 \times 2$ мм. Для механического шлифования поверхности полупроводниковых пластин использовали водные суспензии абразивных порошков (АСМ 10/7, АСМ 5/3 и АСМ 1/0) в порядке уменьшения диаметра зерна абразива от 10 до 1 мкм. Поскольку поверхность кристаллов после механического шлифования остаётся структурно несовершенной, следующим этапом было химико-механическое полирование. В качестве полирующего раствора использовали разработанный в нашей лаборатории универсальный бромвыделяющий травитель.

Изучение концентрационных зависимостей скоростей травления исследуемых полупроводников от состава растворов осуществляли с использованием метода математического планирования эксперимента на симплексе. Применение уравнения четвёртого порядка для трёхкомпонентных систем позволяет в значительной степени сократить количество экспериментов [7]. Таким методом можно избежать исследований большого количества областей неполирующих растворов и акцентировать внимание на полезных для практического применения травильных растворах.

Для исследования физико-химических закономерностей и кинетики процесса взаимодействия кристаллов с компонентами травильных растворов использовали методику вращающегося диска и устройство для её практической реализации [8]. Операцию ХДП проводили в воспроизводимых гидродинамических условиях при $T = 292-294$ К и скорости вращения диска $\gamma = 78$ мин⁻¹ в течение 5–10 мин. Травильные композиции состава $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ готовили из водных растворов исходных реагентов: 26% $(NH_4)_2Cr_2O_7$ (ч.д.а.), 42% HBr (ос.ч.), 20% и 40% $C_6H_8O_7$ (лимонной кислоты; х.ч.). Прекращение процесса газовой выделения, то есть образование в результате взаимодействия активных компонентов травителя свободного Br_2 , свидетельствовало об установлении химического равновесия в растворе.

При взаимодействии окислителя с восстановителем выделяется элементарный бром; при этом образуются так называемые бромвыделяющие растворы:





В зависимости от соотношения $[(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7]/[\text{HBr}]$ в травильной смеси активными компонентами могут быть анионы Br^- и $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$. Наличие галогена с низкой степенью окисления обуславливает сильные восстановительные свойства HBr в составе такой смеси. Химическое взаимодействие между $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ и HBr соответствующих концентраций протекает практически полностью при содержании 30 об. % окислителя в травильном растворе.

Свободный бром выступает в качестве окислителя и, взаимодействуя с полупроводниками, может образовывать растворимые в воде бромиды:



При избытке бромистоводородной кислоты возможно также следующее взаимодействие:



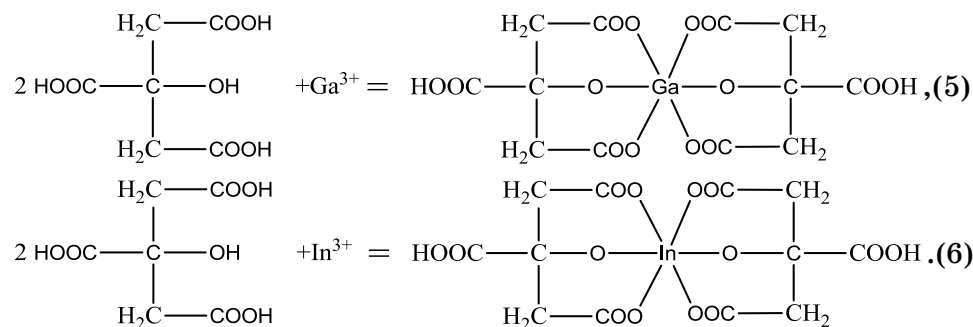
Вероятно, причиной образования бромидов является гетеролитический разрыв связи в адсорбированной на поверхности кристаллов молекуле Br_2 .

На скорость реакции влияет не только этап взаимодействия компонентов травителя с кристаллами, но и этап растворения продуктов окисления, который обеспечивает избежание пассивации поверхности. Поэтому важным агентом травильных растворов является органический компонент, который выступает в роли комплексообразователя. Введение в травильную смесь органической кислоты способствует регулированию процесса химического взаимодействия окислителя с восстановителем, поскольку он удерживает свободный Br_2 на протяжении реакции. Кроме того, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ является модификатором вязкости травильного раствора, уменьшает общую скорость травления и улучшает свойства травильных смесей, увеличивая область полирующих растворов. Подобные свойства связаны со способностью хелатирования ионов металлов и высокой растворимостью лимонной кислоты. Необходимо также отметить, что очень кислые травильные растворы замедляют процессы ионизации органических кислот, которые имеют решающее значение для перевода продуктов взаимодействия травителя с полупроводниками в растворимые формы. Поэтому преимущество в составе травильного раствора должно предоставляться органическому компоненту [9].

Лимонная кислота препятствует отложению продуктов реакции на поверхности кристалла. В случае её взаимодействия с

продуктами, образовавшимися после растворения кристаллов в травильном растворе, могут образовываться цитраты $C_6H_5O_7^{3-}$ или $C_3H_5O(COO)_3^{3-}$.

Вероятнее всего, взаимодействие катионов Ga^{3+} и In^{3+} с органической кислотой приводит к формированию хелатных комплексов, образование которых можно представить следующими химическими уравнениями:



Константы стойкости образования подобных комплексов имеют достаточно большие значения благодаря хелатирующему эффекту. $C_6H_8O_7$ ускоряет также миграцию оксидов металлов, способствуя их расщеплению.

После проведения операции ХДП пластины сразу промывали в растворах $Na_2S_2O_3$, $NaOH$ и несколько раз в дистиллированной воде, высушивали в потоке сухого воздуха. Процесс межоперационного промывания способствует очищению поверхности кристаллов от продуктов взаимодействия и остатков травителя.

Толщину снятого приповерхностного слоя определяли как среднее арифметическое нескольких измерений в одних и тех же точках. Измерение толщины проводили до и после ХДП с помощью электронного индикатора TESA DIGICO 400 с точностью $\pm 0,02$ мкм.

Морфологию поверхности кристаллов после механической и химической обработки исследовали с помощью металлографического анализа с использованием микроскопа МИМ-7 с цифровой видеокамерой eTREK DCM800 с увеличением от 25Ч до 1600Ч. Контроль качества полированных поверхностей проводили также с помощью сканирующего зондового микроскопа NanoScope IIIa Dimension 3000TM (Digital Instruments, США) методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в режиме периодического контакта.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные исследования проводили в концентрационном интервале при соотношении исходных компонентов (об.%):

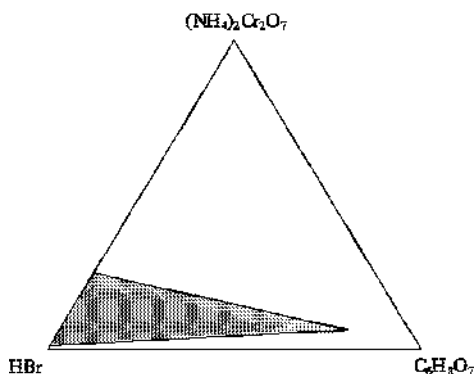


Рис. 1. Концентрационные границы исследуемого интервала травильных растворов [об. %]: 2–22 $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:10–98 HBr:0–80 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$.¹

2–22 $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$:10–98 HBr:0–80 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ (рис. 1). Выбор исследуемого интервала объясняется не только целью избежать областей пассивации, но и тем, что при изменении количества компонентов в травильной смеси возможна резкая смена механизма гетерогенной химической реакции.

По результатам экспериментальных исследований были построены концентрационные зависимости скорости растворения InAs, InSb, GaAs, GaSb и установлены границы полирующих (область I) и неполирующих (область II) растворов. Анализируя полученные диаграммы можно утверждать об аналогичности поведения антимонидов и арсенидов при химическом травлении в исследованных растворах. Стоит отметить, что изменение исходной концентрации лимонной кислоты в травильных растворах влияет не только на скорость травления кристаллов, но и на качество полированной поверхности.

Сравнивая диаграммы «состав раствора–скорость травления» исследуемых полупроводников, в случае использования травильной смеси с 20% (рис. 2, а) и 40% $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ (рис. 2, б) можно отметить следующие отличия. Использование 40% исходного раствора лимонной кислоты в составе травильных композиций значительно снижает общую скорость растворения приповерхностных слоёв кристаллов по сравнению с 20% $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$. В растворах, обогащённых 40% лимонной кислотой, минимальные скорости травления GaAs и InAs находятся в пределах 0,1–0,3 мкм/мин, а в случае использования 20% $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ — в пределах 0,05–0,1 мкм/мин. При ХДП GaSb и InSb скорости растворения достигают минимальных значений 0,1–0,4 мкм/мин в случае использования 20% $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ и 0,1–0,65 мкм/мин при использовании 40% лимонной кислоты при максимальном обогащении $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$. Можно отметить и отличие в скоростях травления при содержании 20%

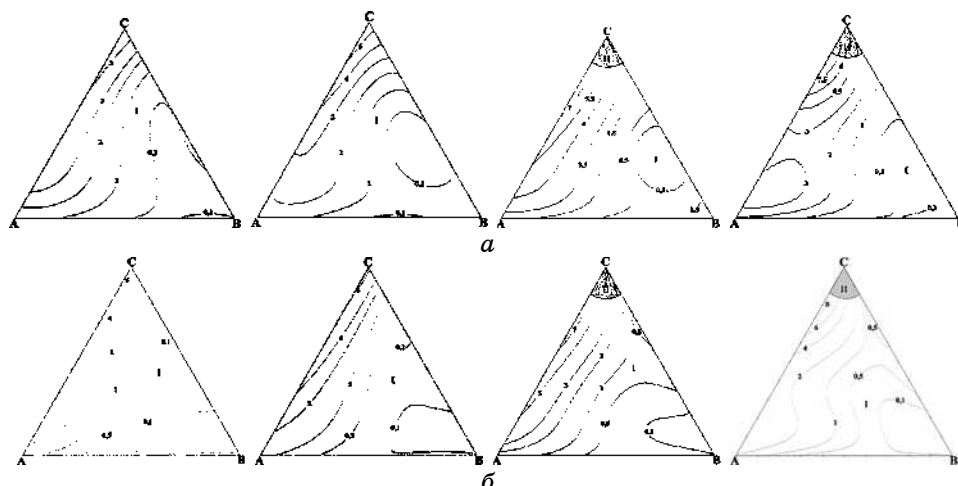


Рис. 2. Концентрационная зависимость скорости травления [мкм/мин] InAs (1), GaAs (2), InSb (3), GaSb (4) в смесях (а) $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ (20%), (б) $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ (40%); I — полирующая область, II — неполирующая область ($T = 292-294$ К, $\gamma = 78$ мин $^{-1}$).²

лимонной кислоты в травильных композициях. В растворах с содержанием 20% $C_6H_8O_7$ скорость травления изменяется в пределах 0,7–1,9 мкм/мин для арсенидов и 0,8–2,5 мкм/мин для антимонидов. При тех же условиях использование 40% $C_6H_8O_7$ увеличивает скорость растворения от 0,05 мкм/мин до 1,1 мкм/мин в случае кристаллов InAs и GaAs, а для кристаллов InSb и GaSb — от 0,05 мкм/мин до 1,4 мкм/мин. Кроме того, стремительное уменьшение скорости травления наблюдается вблизи стороны BC (рис. 2). Необходимо также отметить, что полученные диаграммы характеризуются одинаковыми размерами и расположением областей полирующих и неполирующих растворов. При использовании 20% и 40% $C_6H_8O_7$ максимальные значения скоростей растворения соответствующих кристаллов составляют 5,6–7,5 мкм/мин в вершине C при содержании 22 об.% $(NH_4)_2Cr_2O_7$ в травильной смеси.

Таким образом, можно сделать вывод, что насыщение травильной смеси лимонной кислотой в меньшей степени способствует уменьшению скорости растворения подложек InSb и GaSb по сравнению с кристаллами InAs и GaAs. При использовании обеих концентраций $C_6H_8O_7$ ширина полирующей области находится в следующих пределах: в случае кристаллов InAs и GaAs — 2–22 об.% $(NH_4)_2Cr_2O_7$, 10–98 об.% HBr и 0–80 об.% лимонной кислоты, а также 2–19 об.% $(NH_4)_2Cr_2O_7$, 10–98 об.% HBr, 0–80 об.% $C_6H_8O_7$ — для кристаллов InSb и GaSb.

При максимальном обогащении травителя $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (вершина С) в исследуемом интервале травильных растворов с использованием различной концентрации лимонной кислоты при ХДП на поверхности GaSb и InSb происходит так называемое «грубое полирование» и образуется белый налёт. Частичная пассивация плёнкой может быть связана с образованием Sb_2O_3 на поверхности кристаллов [6]. Высокое содержание окислителя в растворе способствует формированию нерастворимых оксидов Sb_2O_3 или Sb_2O_5 . Однако, при повышении содержания восстановителя, может формироваться растворимый SbBr_3 . Данные предположения могут подтверждаться расположением полирующих и неполирующих областей исследуемых растворов. Образовавшуюся плёнку удаляли фильтровальной бумагой, после чего поверхность кристаллов была матовая с тусклым блеском. Таким образом, существует область неполирующих растворов, которая ограничена смесями, содержащими (об.%): 19–22 $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 69–81 HBr и 0–11 лимонной кислоты. Полученные данные свидетельствуют об однотипном механизме взаимодействия кристаллов InAs, InSb, GaAs и GaSb с исследуемыми травильными композициями.

Качество полученной после химико-динамического полирования поверхности исследовали с помощью металлографического анализа. Результаты влияния травильных растворов на микроструктуру поверхности кристаллов представлены на примере GaSb (рис. 3). После обработки полирующими травителями поверхность всех исследуемых кристаллов в обоих случаях является визуально гладкой с зеркальным блеском. При изучении поверхности кристаллов под микроскопом было отмечено, что микроструктура поверхности подложек после травления в растворах с 20% $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ несколько лучше по сравнению с использованием травителей с 40% лимонной кислотой. Результаты металлографического анализа морфологии поверхности кристаллов InAs, InSb, GaAs и GaSb свидетельствуют о перспективности использо-

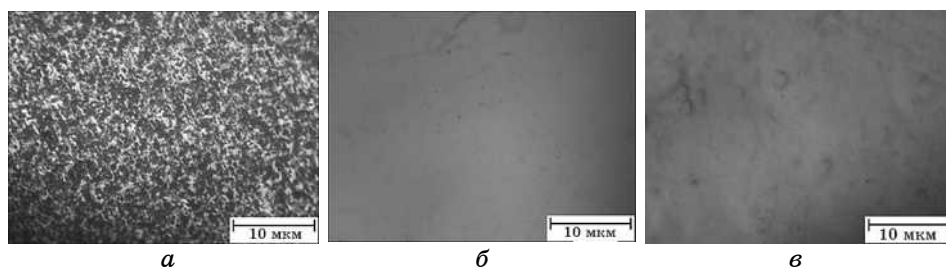


Рис. 3. Морфология поверхности GaSb после (а) резки и ХДП в растворе состава [об.%] 9 $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ +71 HBr+20 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ с использованием 20% (б) или 40% (в) $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$.³

вания травильных растворов состава $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ с использованием 20% раствора лимонной кислоты для получения качественной полированной поверхности исследуемых полупроводников методом химико-динамического полирования.

Методом АСМ были получены данные о структуре поверхности исследуемых полупроводников после ХДП-обработки травителями состава $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ с использованием 20% раствора лимонной кислоты на наноуровне. Параметры шероховатости поверхности исследуемых кристаллов после полирования имеют следующие значения: средняя арифметическая шероховатость поверхности $R_a \approx 3,6$ нм, а $R_{ms} \approx 4,5$ нм. Следует отметить, что согласно требованиям, предъявляемым к сверхгладким полированным поверхностям полупроводников [10], значения R_a должны не превышать 10 нм.

4. ВЫВОДЫ

Исследовано взаимодействие травильных растворов на основе $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ с различной исходной концентрацией лимонной кислоты на параметры химико-динамического полирования полупроводниковых кристаллов $InAs$, $InSb$, $GaAs$ и $GaSb$. Выявлено, что скорости растворения исследуемых подложек возрастают при увеличении содержания $(NH_4)_2Cr_2O_7$ в травильной смеси и уменьшаются при насыщении раствора органическим компонентом. Установлено, что применение 40% $C_6H_8O_7$ в составе травителей эффективнее уменьшает скорость травления полупроводников, по сравнению с применением 20% $C_6H_8O_7$, но ухудшает качество полируемой поверхности. Определены концентрационные границы полирующих растворов. Травильные смеси на основе $(NH_4)_2Cr_2O_7-HBr-C_6H_8O_7$ характеризуются небольшими скоростями травления и могут быть использованы для качественной финишной обработки поверхности полупроводниковых пластин $InAs$, $InSb$, $GaAs$ и $GaSb$.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. И. Шахнович, *Электроника: наука, технология, бизнес*, 4: 12 (2005).
2. Sh. S. Li, *Semiconductor Physical Electronics* (New York: Springer: 2006).
3. M. N. Kutty, E. Plis, A. Khoshakhlagh et al., *J. Electron. Mater.*, 39, No. 10: 2203 (2010).
4. R. Chaghi, C. Cervera, H. Ait-Kaci et al., *Semicond. Sci. Technol.*, 24: 065010 (2009).
5. D. Aureau, R. Chaghi, I. Gerard et al., *Appl. Surf. Sci.*, 276: 182 (2013).
6. С. М. Гуменюк, *Некоторые проблемы физики и химии полупроводников* (Новосибирск: Наука: 1988).

7. Ф. С. Новик, *Планирование эксперимента на симплексе при изучении металлургических систем* (Москва: Металлургия: 1985).
8. В. А. Перевошиков, *Высокоочищенные вещества*, **2**: 5 (1995).
9. E. Propst, K. W. Vogt, and P. A. Kohl, *J. Electrochem. Soc.*, **140**, No. 12: 3631 (1993).
10. С. С. Поп, І. С. Шароді, *Фізична електроніка* (Львів: Євросвіт: 2001).

REFERENCES

1. I. Shakhnovich, *Ehlektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], **4**: 12 (2005) (in Russian).
2. Sh. S. Li, *Semiconductor Physical Electronics* (New York: Springer: 2006).
3. M. N. Kutty, E. Plis, A. Khoshakhlagh et al., *J. Electron. Mater.*, **39**, No. 10: 2203 (2010).
4. R. Chaghi, C. Cervera, H. Aït-Kaci et al., *Semicond. Sci. Technol.*, **24**: 065010 (2009).
5. D. Aureau, R. Chaghi, I. Gerard et al., *Appl. Surf. Sci.*, **276**: 182 (2013).
6. S. M. Gumenyuk, *Nekotorye Problemy Fiziki i Khimii Poluprovodnikov* [Some Problems of the Physics and Chemistry of the Semiconductors] (Novosibirsk: Nauka: 1988) (in Russian).
7. F. S. Novik, *Planirovanie Ehksperimenta na Simplekse pri Izuchenii Metallurgicheskikh Sistem* [Experiment Planning on the Simplex in the Study of Metallurgical Systems] (Moscow: Metallurgiya: 1985) (in Russian).
8. V. A. Perevoshchikov, *Vysokochistyye Veshchestva*, **2**: 5 (1995) (in Russian).
9. E. Propst, K. W. Vogt, and P. A. Kohl, *J. Electrochem. Soc.*, **140**, No. 12: 3631 (1993).
10. S. S. Pop and I. S. Sharodi, *Fizychna Ehlektronika* [Physical Electronics] (Lviv: Yevrosvit: 2001) (in Ukrainian).

*V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, N.A.S. of Ukraine,
41 Nauky Ave.,
03028 Kyiv, Ukraine*

¹ Fig. 1. The concentration boundaries of the investigated interval of etching solutions [vol.%]: 2–22 (NH₄)₂Cr₂O₇:10–98 HBr:0–80 C₆H₈O₇.

² Fig. 2. The concentration dependences of the etching rate [μm/min] of InAs (1), GaAs (2), InSb (3), GaSb (4) in the mixtures (a) (NH₄)₂Cr₂O₇–HBr–C₆H₈O₇ (20%), (б) (NH₄)₂Cr₂O₇–HBr–C₆H₈O₇ (40%); I—polishing region, II—unpolishing region ($T = 292\text{--}294\text{ K}$, $\gamma = 78\text{ rpm}$).

³ Fig. 3. GaSb surface morphology after (a) cutting and CDP in the solution [vol.%] 9 (NH₄)₂Cr₂O₇+71 HBr+20 C₆H₈O₇ with 20% (б) or 40% (в) C₆H₈O₇.