

PACS numbers: 68.35.Ct, 68.37.Ps, 68.55.J-, 77.84.Bw, 81.05.Hd, 81.65.Cf, 81.65.Ps

## Влияние введения модификатора вязкости в растворы $\text{H}_2\text{O}_2$ – $\text{HBr}$ –этиленгликоль на химическое травление монокристаллов $\text{PbTe}$ и твёрдых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$

Г. П. Маланич, В. Н. Томашик

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

Работа посвящена исследованию взаимодействия монокристаллических пластин  $\text{PbTe}$  и твёрдых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  с бромвыделяющими травителями ( $\text{H}_2\text{O}_2$ – $\text{HBr}$ –этиленгликоль)/этиленгликоль (ЭГ), разработке и оптимизации травильных композиций, а также методик их химической обработки для формирования высококачественной поверхности. Изучены зависимости скоростей химико-механического (ХМП) и химико-динамического (ХДП) полирования от разбавления базового полирующего травителя органическим компонентом. Определён характер растворения исследуемых материалов в растворах ( $\text{H}_2\text{O}_2$ – $\text{HBr}$ –ЭГ)/ЭГ, построены графические зависимости «состав травителя–скорость травления» и установлены концентрационные границы областей полирующих и неполирующих растворов. Показано, что увеличение количества ЭГ в составе травильной смеси уменьшает скорость травления (ХМП) полупроводниковых подложек  $\text{PbTe}$  и твёрдых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  от 185,0 до 23,0 мкм/мин и улучшает полирующие свойства травильных композиций  $\text{H}_2\text{O}_2$ – $\text{HBr}$ –ЭГ. Минимальные значения скоростей травления достигаются при максимальном насыщении смеси органическим компонентом (60 об. %). Микроструктурным и профилографическим анализами установлено влияние количественного и качественного состава травителей, а также способов химической обработки на параметры шероховатости поверхностей  $\text{PbTe}$  и твёрдых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ . Установлено, что ХМП монокристаллических полупроводников растворами состава  $\text{H}_2\text{O}_2$ – $\text{HBr}$ –ЭГ способствует уменьшению структурных нарушений подложек и получению качественной полированной поверхности. Оптимизированы составы полирующих травильных композиций ( $\text{H}_2\text{O}_2$ – $\text{HBr}$ –ЭГ)/ЭГ и технологические режимы ХМП и ХДП для снятия нарушенного слоя, быстрого контролируемого утонения пластины до заданной толщины, снятия тонких плёнок и финишного полирования поверхности, монокристаллических образцов  $\text{PbTe}$  и твёрдых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ .

Роботу присвячено дослідженню взаємодії монокристалічних пластин PbTe і твердих розчинів  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  з бромвиділювальними щавниками ( $H_2O_2$ –HBr–етиленгліколь)/етиленгліколь (EG), розробці й оптимізації щавильних композицій і методик оброблення для формування високоякісної поверхні. Вивчено залежності швидкостей хіміко-механічного (ХМП) і хіміко-динамічного (ХДП) полірування від розведення базового полірувального щавника органічним компонентом. Встановлено характер розчинення досліджуваних матеріалів у розчинах ( $H_2O_2$ –HBr–EG)/EG та побудовано графічні залежності «склад щавника–швидкість щавлення» з визначенням ділянок полірувальних і неполірувальних розчинів. Показано, що збільшення вмісту EG в складі щавильної суміші зменшує швидкість щавлення (ХМП) напівпровідникових підкладинок PbTe і твердих розчинів  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  від 185,0 до 23,0 мкм/хв та поліпшує полірувальні властивості щавильних композицій  $H_2O_2$ –HBr–EG. Мінімальні значення швидкостей щавлення досягаються при максимальній насиченості суміші органічним компонентом (60 об.%). Мікроструктурною і профілографічною аналізами встановлено вплив кількісного і якісного складу щавників, а також способів хімічного оброблення на параметри шерсткості поверхонь PbTe і твердих розчинів  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ . Встановлено, що ХМП монокристалічних напівпровідників розчинами складу  $H_2O_2$ –HBr–EG сприяє зменшенню структурних порушень підкладинок та одержанню якісної полірованої поверхні. Оптимізовано склади полірувальних щавильних композицій ( $H_2O_2$ –HBr–EG)/EG і технологічні режими ХМП та ХДП для видалення порушеного шару, контрольованого стоншування пластин до заданих розмірів, зняття тонких плівок і фінішного полірування поверхні монокристалічних зразків PbTe і твердих розчинів  $Pb_{1-x}Sn_xTe$ .

The investigation is concerned with both the interaction of the PbTe and  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  solid-solutions' single crystals with the ( $H_2O_2$ –HBr–ethylene glycol)/ethylene glycol (EG) bromine-exhaling mixtures and the development of the etchant compositions as well as the schedule of the surface treatment of the above-mentioned semiconductor materials using the obtained experimental data. The dependences of the chemical-mechanical (CMP) and chemical-dynamical (CDP) polishing rates on the dilution of the base polishing etchant by organic compound are determined. The dissolution of these semiconductor materials in the aqueous ( $H_2O_2$ –HBr–EG)/EG solutions is investigated, and 'etchant composition–etching rate' dependences with determining the regions of polishing and unpolishing solutions are plotted. As found, the semiconductors etching rate (CMP) decreases from 185.0 to 23.0  $\mu m/min$  and the polishing features of the  $H_2O_2$ –HBr–EG etching composition are improved when the EG content is increased. The minimum value of the etching rates is achieved when the saturation with organic component is maximum (60 vol.%). The influence of the quantitative and qualitative etchant compositions and the chemical treatment procedures on the PbTe and  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  solid-solution surface roughness is established using metallography and strip chart recording. As revealed, CMP of the semiconductors by ( $H_2O_2$ –HBr–EG)/EG solutions promotes both the decrease of the structural damages of the substrate and the preparation of the high-quality polished surface. The polishing etch-

ant compositions ( $\text{H}_2\text{O}_2$ – $\text{HBr}$ –EG)/EG and the CDP and CMP technological procedures for the disturbed layer elimination, controlled thinning of the plates up to reference dimension, the thin-layers removing, and the PbTe and  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  solid-solution surface finishing are optimized.

**Ключевые слова:** химическое травление, теллурид свинца, твёрдые растворы, скорость травления, химико-механическое полирование.

**Ключові слова:** хемічне щавлення, Плюмбуму телурид, тверді розчини, швидкість щавлення, хіміко-механічне полірування.

**Keywords:** chemical etching, lead telluride, solid solutions, etching rate, chemical-mechanical polishing.

*(Получено 10 ноября 2017 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Монокристаллический PbTe используется как материал для подложек при выращивании гетероструктур PbTe/ $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ , на основе которых изготавливают фотоприёмники и диодные источники ИК-излучения [1]. Повышенный интерес к твёрдым растворам на основе халькогенидов свинца связан с использованием этих материалов для изготовления фотоприёмников с высокой спектральной чувствительностью в диапазоне «атмосферного окна» 8–14 мкм, что соответствует максимуму излучения абсолютно чёрного тела при 300 К. Перспективно использование твёрдых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  для инжекционных лазеров с излучением в спектральном диапазоне до 30 мкм. Это значение соответствует максимальной длине волны излучения для полупроводниковых лазеров [2].

При создании рабочих элементов приборов особенно важным является этап химической обработки кристаллов PbTe и  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ , главная задача которого заключается в удалении нарушенного слоя, образующегося в результате предыдущих механических обработок, а также получении высокочистых, максимально совершенных по структуре и однородных по химическому составу поверхностей.

Для удовлетворения вышеперечисленных требований лучше всего подходит метод ХМП.

Процесс ХМП проводят на изготовленном из мягких натуральных или искусственных тканей полировальнике. В большинстве случаев его проводят в специальном, для каждого полупроводникового материала, полирующем травителе. Съём материала, качество поверхности и геометрические параметры подложек в большой степени зависят от состава полирующей смеси, темпера-

туры обработки, давления на пластину и материала полировальника.

Удаление нарушенного слоя полирующим травлением влияет на планарность пластины, что имеет большое значение, если пластины используются как подложки для эпитаксиального роста плёнок.

Авторы [3] подчёркивают, что качество обработанной поверхности значительно лучше именно при обработке методом ХМП. В работе [4] процесс ХМП монокристаллов  $n\text{-Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  ( $0 \leq x \leq 0,24$ ), ориентированных в направлении (100), проводили бромсодержащим травителем состава 2%  $\text{Br}_2$ :98%  $\text{HBr}$ , а после травления образцы промывали чистой водой и сушили в потоке очищенного  $\text{N}_2$ .

Более практичными и перспективными являются бромвыделяющие травильные композиции [5], в которых бром выделяется в результате окислительно-восстановительных химических реакций между компонентами травителя: окислителем ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) и соединениями брома ( $\text{HBr}$ ). Преимущества бромвыделяющих травильных композиций в сравнении с традиционными бромсодержащими растворами следующие:

- отсутствие необходимости использования токсического свободного  $\text{Br}_2$ ;
- упрощение процесса приготовления смесей;
- возможность выбора широкого спектра скоростей полирования;
- высокое качество полирования монокристаллов  $\text{PbTe}$  и твёрдых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ;
- стабильность травильных растворов ( $\cong 1$  месяц) и сохранение их полирующих свойств.

Травильные смеси для ХМП должны удовлетворять целому ряду требований [6]: обеспечивать необходимую скорость травления без образования нерастворимых либо труднорастворимых продуктов реакции; быть инертными к материалу полировальника и оборудования; владеть низкой степенью токсичности. Этим требованиям отвечают полирующие составы травильных композиций на основе растворов  $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr--ЭГ}$ .

Целью настоящей работы является исследование влияния дополнительного введения вязкого компонента, в частности ЭГ, в травильные растворы  $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr--ЭГ}$  на процесс ХМП и ХДП поверхности монокристаллов  $\text{PbTe}$  и твёрдых растворов  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ; изучение состояния поверхности после ХМП и ХДП методами микроструктурного и профилографического анализов, а также оптимизация составов полирующих композиций и режимов проведения операций для формирования высококачественной полированной поверхности.

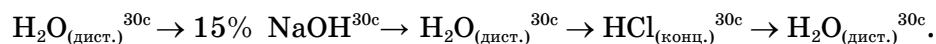
## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследований использовали монокристаллы  $\text{PbTe}$  и твёрдых растворов  $\text{Pb}_{0,83}\text{Sn}_{0,17}\text{Te}$ ,  $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$  (II), выращенные методом Бриджмена, а также  $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$  (I), полученные из паровой фазы. Подготовку полупроводниковых пластин ( $\cong 5 \times 7 \times 1,5$  мм), а также их предварительную обработку проводили по разработанной нами ранее методике [5, 7].

Процесс ХМП осуществляли на стеклянном полировальнике, обтянутом тканью, при  $T = 293\text{--}295$  К и непрерывной подаче травителя со скоростью 2–3 мл/мин. Главное внимание обращали на стабильную структуру ткани, её механическую и химическую стойкость к компонентам полирующей смеси.

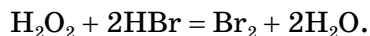
Химическое травление пластин проводили на установке для ХДП с использованием методики вращающегося диска [5]. Скорость растворения определяли по уменьшению толщины пластин при помощи электронного индикатора TESA DIGICO 400 с точностью  $\pm 0,2$  мкм, а процесс травления проводили в течение 2 мин.

Важной заключительной операцией химического травления является окончание процесса и отмывка поверхности образцов от остатков травителя и продуктов реакций. При этом необходимо стремиться к минимуму возможного контакта свежетравлённой поверхности образцов с атмосферой окружающей среды. После полирования образцы тщательно промывали согласно схеме (для прекращения взаимодействия между травителем и поверхностью полупроводника):



Высушивание образцов проводили в потоке сухого воздуха.

Для приготовления травителей использовали водные растворы 48%  $\text{HBr}$ , 35%  $\text{H}_2\text{O}_2$  и ЭГ (все реактивы «ос.ч.» и «х.ч.»). Компоненты раствора смешивали в определённом порядке в количествах, соответствующих их объёмному соотношению в травильных композициях, т.е. состав травителя выражали в об.%. Приготовленные растворы перед процессом травления выдерживали в течение двух часов до окончательного прекращения газообразования в реакции, происходящей между исходными компонентами травителя:



Морфологические исследования полированных поверхностей монокристаллов проводили с помощью сканирующего зондового микроскопа NanoScope IIIa Dimension 3000 (Digital Instruments/

Brukes Corp.) методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в режиме периодического контакта (tapping mode) при комнатных условиях с точностью  $\pm 1$  нм. Измерения проведены в центральной зоне образцов с использованием серийных кремниевых зондов Nano World с номинальным радиусом округления острия до 10 нм, марки NCH.

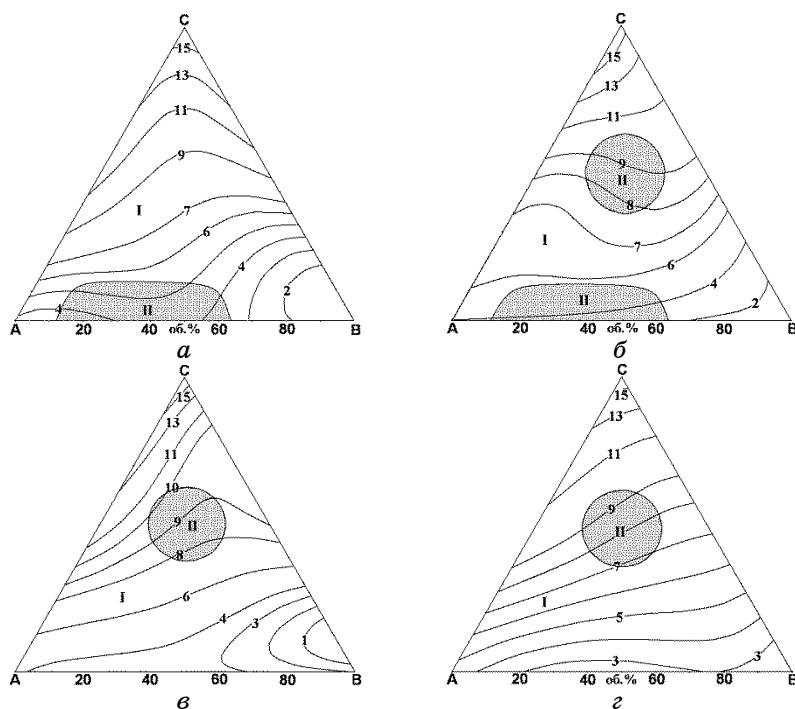
Исследования методом электронной микроскопии проводили с помощью настольного электронного микроскопа JEOL JCM-5000 NeoScore. Образцы помещали на выдвижной столик камеры, после чего в течение 3 мин автоматически создавался низкий вакуум  $10^{-3}$  Па (ускоряющие напряжение 15 кВ). В результате были получены фотографии (увеличение от  $10\times$  до  $20000\times$ ) микроструктуры поверхностей монокристаллов после различных этапов обработки. Контроль качества полированных поверхностей проводили, используя также металлографический микроскоп МИМ-7. Совмещённая с микроскопом цифровая видеокамера eTREK DCM800 (8 Mpix) позволяла на мониторе визуально наблюдать за состоянием поверхности объекта.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При изучении процесса химического растворения полупроводниковых монокристаллов особенное значение имеет как выбор компонентов травителя, так и подбор их соотношения. Нами был выбран концентрационный интервал растворов  $\text{H}_2\text{O}_2\text{:HBr:ЭГ}$ , ограниченный треугольником ABC, объёмное соотношение  $\text{H}_2\text{O}_2\text{:HBr:ЭГ}$  в вершинах которого составляло соответственно (в об.%): А — 2:98:0, В — 2:48:50, С — 10:90:0. Соотношение компонентов травителя в точках А, В и С определяли экспериментально [5].

Согласно результатам экспериментальных исследований зависимостей скоростей травления  $\text{PbTe}$  и  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  от состава растворов  $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr--ЭГ}$  построены диаграммы «состав травителя–скорость травления», а также определены концентрационные границы полирующих (I) и неполирующих (II) растворов (рис. 1). Для ХДП исследуемых монокристаллов практический интерес представляют полирующие растворы (в об.%):  $(2\text{--}10)\text{H}_2\text{O}_2\text{:}(48\text{--}98)\text{HBr:}(0\text{--}50)\text{ЭГ}$ , так как после травления в этих смесях сформированная поверхность характеризуется зеркальным блеском, при этом скорости полирования ( $v_{\text{пол}}$ ) изменяются от 1,5 до 17,2 мкм/мин.

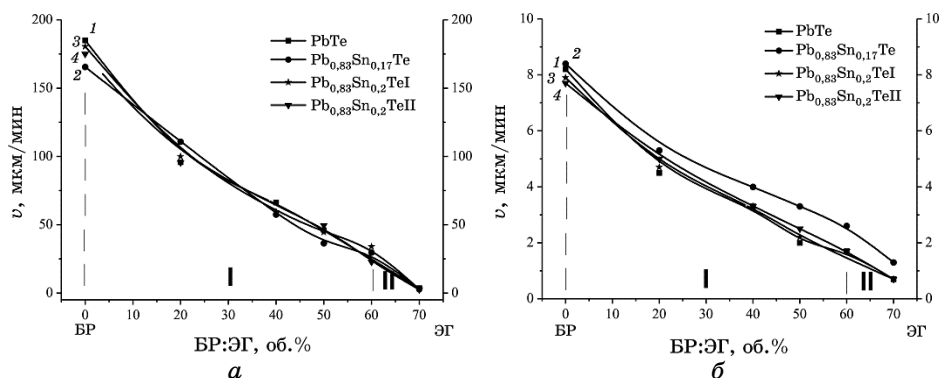
Используя процесс ХДП для полупроводниковых кристаллов, не всегда можно получить высококачественную полированную поверхность с идеальной плоскостностью в макромасштабе, поэтому для таких целей лучше использовать метод ХМП. В результате



**Рис. 1.** Концентрационные зависимости скорости травления (мкм/мин) монокристаллов PbTe (а),  $\text{Pb}_{0,83}\text{Sn}_{0,17}\text{Te}$  (б),  $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$  (I) (в) и  $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$  (II) (г) в растворах  $\text{H}_2\text{O}_2$ -HBr-ЭГ при объёмном соотношении  $\text{H}_2\text{O}_2$ :HBr:ЭГ в вершинах А, В, С (об. %): А — 2:98:0; В — 2:48:50; С — 10:90:0 (I — полирующие и II — неполирующие растворы).<sup>1</sup>

трения поверхностей подложки и полировальника температура в области контакта может превышать температуру окружающего травителя до  $10^\circ\text{C}$ . Это приводит к увеличению скорости химических реакций, что, в свою очередь, может повысить скорость удаления материала подложки до двух раз. При выборе базового полирующего травителя для формирования на его основе полирующих композиций для ХМП мы приняли во внимание тот факт, что за счёт действия механической составляющей скорость снятия материала этим методом может быть в несколько раз больше по сравнению с использованием этого травителя для ХДП.

По результатам исследований нами был выбран базовый полирующий травитель БР, состав которого находится вблизи стороны ВС треугольника ABC. Этот травитель характеризуется скоростями ХДП: 8,2 мкм/мин для PbTe, 8,4 мкм/мин для  $\text{Pb}_{0,83}\text{Sn}_{0,17}\text{Te}$ , 7,9 мкм/мин для  $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$  (I), 7,7 мкм/мин для  $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$  (II), и обладает хорошими полирующими свойствами.



**Рис. 2.** Зависимости скоростей ХМП ( $T = 294$  К) (а) и ХДП ( $T = 294$  К,  $\gamma = 78$  мин<sup>-1</sup>) (б) монокристаллов PbTe (1), Pb<sub>0,83</sub>Sn<sub>0,17</sub>Te (2), Pb<sub>0,83</sub>Sn<sub>0,2</sub>Te (I) (3) и Pb<sub>0,83</sub>Sn<sub>0,2</sub>Te (II) (4) от разбавления базового травителя (БР) этиленгликолем (I — области полирующих и II — неполирующих растворов).<sup>2</sup>

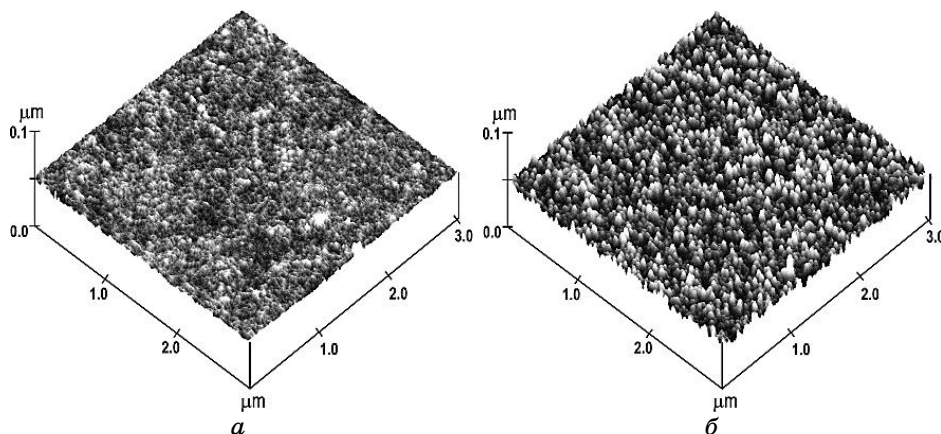
Разница в скоростях травления с использованием разных методов полирования поверхностей PbTe и твёрдых растворов Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te представлена на рис. 2. Видно, что скорость ХМП в базовом травителе составляет: 185,0 мкм/мин для PbTe, 174,5 мкм/мин для Pb<sub>0,83</sub>Sn<sub>0,17</sub>Te, 180,5 мкм/мин для Pb<sub>0,83</sub>Sn<sub>0,2</sub>Te (I), 175,0 мкм/мин для Pb<sub>0,83</sub>Sn<sub>0,2</sub>Te (II), что приблизительно в 20 раз больше скорости ХДП в том же растворе.

Для уменьшения скорости ХМП (уменьшения содержания активного компонента) и улучшения качества обрабатываемой поверхности непосредственно перед проведением процесса ХМП к базовому травителю дополнительно приливали определённое количество модификатора вязкости ЭГ. Как видно из рис. 2, а, по мере разбавления базового раствора БР скорость ХМП изменяется в пределах 185,0–2,5 мкм/мин, а скорость ХДП падает с 8,8 до 0,7 мкм/мин (рис. 2, б); при этом разница в скоростях ХМП и ХДП постепенно уменьшается, что свидетельствует о зависимости скорости ХМП от скорости химической реакции. Таким образом, используя приведённую на рис. 2 зависимость, можно выбрать необходимую скорость ХМП или ХДП, меняя соотношение базового травителя БР и вязкого компонента. Следует отметить, что поверхности полупроводниковых материалов после ХМП и ХДП при разбавлении раствора БР от 100 до 40 об.% получались полированными и высокого качества, при этом скорости ХМП изменялись от 185,0 мкм/мин до 23,0 мкм/мин, а скорости ХДП изменяются в пределах 8,8–2,0 мкм/мин. При дальнейшем разбавлении травителя (70 об.% ЭГ) качество поверхностей ухудшалось, после ХМП на поверхности появлялась белая полупрозрач-

ная плёнка, в то время как после ХДП на поверхности плёнка отсутствовала, однако наблюдались белые пятна.

Исследования микроструктуры поверхностей  $\text{PbTe}$  и  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  после различных обработок показали, что после проведения процесса ХМП качество полированной поверхности наилучшее. Сравнение микроструктуры поверхностей  $\text{PbTe}$  и  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  после операций ХМП и ХДП, проведённых травителем одного и того же состава, показали, что качество полированной поверхности после ХМП лучше по сравнению с ХДП. Это подтверждается и результатами исследования её шероховатости. Результаты исследований показаны на рис. 3. Анализ данных АСМ, полученных на типовых поверхностях  $\text{PbTe}$ , показал, что поверхность образцов после ХМП обработки (рис. 3, а) более гладкая, чем после ХДП (рис. 3, б). Параметры шероховатости поверхности кристаллов  $\text{PbTe}$  после ХМП травильными композициями  $\text{H}_2\text{O}_2$ – $\text{HBr}$ –ЭГ следующие: средняя арифметическая шероховатость поверхности  $R_a = 0,9$  нм,  $R_{\text{max}} = 14,8$  нм (тут и далее площадь анализируемого фрагмента —  $3 \times 3$  мкм) (рис. 3, а), а после последующего этапа обработки методом ХДП —  $R_a = 2,2$  нм,  $R_{\text{max}} = 33,0$  нм (рис. 3, б). ХМП по сравнению с ХДП характеризуется несколько лучшими параметрами шероховатости; это может быть связано с тем, что при ХМП на поверхность образца оказывают совместное воздействие химически активная среда (травитель) и мягкий полировальник, способствующий равномерному травлению по всей поверхности образца, а также сглаживанию всех выступов и микронеровностей.

В зависимости от поставленной задачи, комбинируя последова-



**Рис. 3.** Трёхмерное АСМ-изображение поверхности монокристаллов  $\text{PbTe}$  после ХМП (а) и ХДП (б) обработки (процессы проводили полирующим раствором  $\text{H}_2\text{O}_2$ – $\text{HBr}$ –ЭГ: ХМП — 1 мин и ХДП — 2 мин,  $\gamma = 78 \text{ мин}^{-1}$ ).<sup>3</sup>

тельность ХМП и ХДП и используя бромвыделяющие травильные композиции  $(\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr--ЭГ})/\text{ЭГ}$ , можно получить высококачественную полированную поверхность PbTe с заданными параметрами, которая соответствует требованиям (значение  $R_a < 10$  нм), предъявляемым к полированным сверхгладким поверхностям полупроводниковых материалов [8].

Таким образом, используя одни и те же компоненты, можно формировать полирующие травильные композиции  $(\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr--ЭГ})/\text{ЭГ}$  с необходимым спектром скоростей ХМП. Следует также подчеркнуть, что такие полирующие смеси характеризуются значениями  $\text{pH} \approx 4,0\text{--}6,0$ , что очень важно при использовании их в процессах, поскольку во многих случаях травитель вследствие своей сильноокислой или щелочной реакции может разъедать материал полировальника и при этом вносить дополнительные загрязнения на поверхность полупроводниковых пластин.

#### 4. ВЫВОДЫ

Исследованы процессы химико-механического и химико-динамического полирования поверхности монокристаллов PbTe и  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  бромвыделяющими травителями  $(\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr--ЭГ})/\text{ЭГ}$ . На основе экспериментальных исследований оптимизированы составы полирующих композиций для обработки кристаллов методами ХМП и ХДП. Показано, что обработка монокристаллов растворами  $(\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr--ЭГ})/\text{ЭГ}$  дает возможность получить сверхгладкую поверхность ( $R_a < 10$  нм).

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. К. Сангвал, *Травление кристаллов: теория, эксперимент, применение* (Москва: Мир: 1990) (пер. с англ.).
2. М. С. Корець, І. Г. Трегуб, С. М. Яшанов, *Матеріалознавство інформаційної техніки: навчальний посібник* (Київ: Вид-во НПУ імені М. П. Драгоманова: 2011).
3. L. Hitova and E. P. Trifonova, *Crystal Res. & Technol.*, **19**: 105 (1984).
4. Y. Sternberg and N. Yellin, *J. Cryst. Growth*, **53**, No. 3: 535 (1981).
5. З. Ф. Томашик, Г. П. Маланич, В. Н. Томашик, И. Б. Стратийчук, Г. А. Пащенко, А. С. Кравцова, *Вопросы химии и хим. технологии*, № 4: 120 (2012).
6. Б. Д. Луфт, В. А. Перевощикова, Л. Н. Возмилова, И. А. Свердлин, К. Г. Марин, *Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников* (Москва: Радио и связь: 1982).
7. Г. П. Маланич, З. Ф. Томашик, В. М. Томашик, І. Б. Стратійчук, Н. В. Сафрюк, В. П. Кладько, *Науковий вісник Чернівецького національного університету. Хімія*, вип. 640: 72 (2013).
8. С. С. Поп, І. С. Шароді, *Фізична електроніка* (Львів: Євросвіт: 2001).

## REFERENCES

1. K. Sangwal, *Etching of Crystals: Theory, Experiment, and Application* (Amsterdam: Elsevier: 1987).
2. M. S. Korets', I. H. Trehub, S. M. Yashanov, *Materialoznavstvo Informatsiynoyi Tekhniky: Navchal'nyy Posibnyk* [Material Science Information Technology: Textbook] (Kyiv: Vyd-vo NPU imeni M. P. Drahomanova: 2011).
3. L. Hitova and E. P. Trifonova, *Crystal Res. & Technol.*, **19**: 105 (1984).
4. Y. Sternberg and N. Yellin, *J. Cryst. Growth*, **53**, No. 3: 535 (1981).
5. Z. F. Tomashyk, G. P. Malanych, V. N. Tomashyk, I. B. Stratiychuk, G. A. Pashchenko, and A. S. Kravtsova, *Voprosy Khim. Khim. Tekhnol.*, No. 4: 120 (2012) (in Ukrainian).
6. B. D. Luft, V. A. Perevoshchikov, L. N. Vozmilova, I. A. Sverdlin, and K. G. Marin, *Fiziko-Khimicheskie Metody Obrabotki Poverkhnosti Poluprovodnikov* [Physicochemical Methods of Processing of Semiconductors' Surface] (Moscow: Radio i Svyaz': 1982) (in Russian).
7. G. P. Malanych, Z. F. Tomashyk, V. M. Tomashyk, I. B. Stratiychuk, N. V. Safryuk, and V. P. Klad'ko, *Nauk. Visnyk Chernivets'koho Natsional'noho Universytetu. Khim.*, Iss. 640: 72 (2013) (in Ukrainian).
8. S. S. Pop and I. S. Sharodi, *Fizychna Ehlektronika* [Physical Electronics] (Lviv: Eurosvit: 2001) (in Ukrainian).

---

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

<sup>1</sup> Fig. 1. The concentration dependences of the etching rate ( $\mu\text{m}/\text{min}$ ) for the PbTe (a),  $\text{Pb}_{0.83}\text{Sn}_{0.17}\text{Te}$  (b),  $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$  (I) (c), and  $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$  (II) (d) single crystals in  $\text{H}_2\text{O}_2$ – $\text{HBr}$ –EG solutions; the  $\text{H}_2\text{O}_2$ : $\text{HBr}$ :EG volume ratio in corners A, B, and C is 2:98:0, 2:48:50, and 10:90:0, respectively (I—polishing solutions and II—nonpolishing solutions).

<sup>2</sup> Fig. 2. Dependences of the CMP ( $T = 294\text{ K}$ ) (a) and CDP ( $T = 294\text{ K}$ ,  $\gamma = 78\text{ min}^{-1}$ ) (b) rates for the PbTe (1),  $\text{Pb}_{0.83}\text{Sn}_{0.17}\text{Te}$  (2),  $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$  (I) (3), and  $\text{Pb}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}\text{Te}$  (II) (4) single crystals versus volume ratio of base etchant B and ethylene glycol (I—polishing and II—unpolishing solutions).

<sup>3</sup> Fig. 3. Three-dimensional AFM image of the PbTe surface after the CMP (a) and CDP (b) treatment (processes were carried out with the  $\text{H}_2\text{O}_2$ – $\text{HBr}$ –EG polishing solution CMP during 1 min and CDP during 2 min with  $\gamma = 78\text{ min}^{-1}$ ).