

УДК 621.794.4:546.811/815'24

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ БРОМИСТОВОДОРОДНОЙ КИСЛОТЫ НА ХАРАКТЕР ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ $PbTe$ И $Pb_{1-x}Sn_xTe$ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ H_2O_2 – HBr –ЭТИЛЕНГЛИКОЛЬ

© 2019 г. Г. П. Маланич¹, *, В. Н. Томашик¹

¹Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, Украина, 03028 Киев, пр. Науки, 41

*e-mail: galya.malanich@gmail.com

Поступила в редакцию 20.06.2018 г.

После доработки 18.01.2019 г.

Принята к публикации 04.02.2019 г.

Исследован характер химико-механического (ХМП) и химико-динамического полирования (ХДП) монокристаллов $PbTe$ и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ в зависимости от концентрации HBr , используемой для приготовления травильных смесей (H_2O_2 – HBr –ЭГ)/ЭГ. Изучены зависимости скоростей ХМП и ХДП от состава растворов, а также влияние исходной концентрации HBr на концентрационный интервал полирующих травителей, качество полученной поверхности и состояние поверхности после полирования путем измерения шероховатости, оптимизированы составы полирующих смесей и режимы проведения операций для формирования высококачественной полированной поверхности.

Ключевые слова: химическое травление, теллурид свинца, твердые растворы, скорость растворения

DOI: 10.1134/S0002337X1907011X

ВВЕДЕНИЕ

При создании рабочих элементов приборов дефектно-примесные скопления на поверхности полупроводника могут привести к неконтролируемому ухудшению их параметров. Особенно важным является этап химической обработки кристаллов $PbTe$ и $Pb_{1-x}Sn_xTe$, 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. Предварительная обработка кристаллов перед финишным химическим полированием включает нескольких этапов: резка слитков на пластины, механическое шлифование абразивами, механическое полирование пастами.

Стадия резки сопровождается интенсивным механическим влиянием на поверхность и приводит к значительным нарушениям и большой шероховатости. Авторы работы [1] установили, что глубина нарушенного слоя для полупроводниковых монокристаллических пластин $PbTe$ после резки алмазным кругом составляет ~120 мкм и не зависит от состава исследуемых образцов. Следует отметить, что на толщину нарушенного слоя почти не влияет кристаллографическая ориентация

поверхности пластин. Последующие механические процессы шлифования и полирования, которые используются для придания пластинам заданной толщины, строгих геометрических параметров (плоскопараллельности) и чистоты поверхности, также оставляют после себя нарушенный слой. Глубина нарушенного слоя пластин полупроводников после шлифования абразивами составляет 11–32 мкм для порошка М10 и 7–26 мкм для порошка М5.

Следующим этапом является механическое полирование, которое проводят для удаления пластически деформированных приповерхностных слоев абразивными порошками субмикронной фракции в виде суспензий или паст. При механическом полировании нарушенный слой в отличие от шлифованной поверхности является аморфным. Его толщина после механического полирования суспензией Al_2O_3 не превышает 3 мкм, а высота микронеровностей на поверхности образцов составляет 0.05–0.1 мкм.

Полученная в результате струнной резки, шлифования и механического полирования поверхность все еще является структурно несовершенной, а поверхностный слой деформированным. Для улучшения качества поверхностного слоя целесообразно применять химико-механическое полирование (ХМП), которое осуществляют в результате

одновременного действия химических и механических факторов. Оно приблизительно описывается эвристическим уравнением Престона [2]. Скорость снятия полупроводникового материала, качество поверхности и геометрические параметры пластин, количество и глубина структурных нарушений в значительной мере связаны с условиями полирования, поскольку в зависимости от состава суспензии, температуры обработки и давления на пластины может преобладать как химическая, так и механическая составляющая [3]. После ХМП на полированных поверхностях может присутствовать пластично-деформированный нарушенный слой незначительной толщины.

Авторами [4] и др. отмечается, что при ХМП образуется полированная зеркальная поверхность с неровностями не более 0.02 мкм, с совершенной структурой и высокой степенью чистоты. Ряд исследователей считают, что даже при таком ХМП, которое обязательно связано с механическим давлением и трением поверхности образцов с полировальником, существует нарушенный слой, т.е. в приповерхностном слое имеется повышенная плотность дислокаций и остаточных упругих деформаций, и требуется дополнительное химическое или газовое травление.

Для химической обработки поверхности полупроводниковых материалов типа $A^{IV}B^{VI}$ наиболее распространенными являются бромсодержащие растворы, в частности травители на основе растворов $Bг_2$ в HBr [5–8]. Травильные смеси для ХМП должны обеспечивать необходимую скорость травления без образования нерастворимых либо трудно растворимых продуктов реакции, быть инертными к материалу полировальника и оборудования, а также иметь низкую токсичность [9]. Нами разработан процесс безабразивного ХМП $PbTe$ и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ травильными смесями на основе растворов $H_2O_2-HBr-этиленгликоль (ЭГ)$, характеризующимися наибольшей вязкостью среди исследуемых систем, наименьшими скоростями травления, а также хорошими полирующими свойствами. При приготовлении бромвыделяющих травителей возникает проблема с выбором концентрации бромистоводородной кислоты, поскольку в промышленности она выпускается разной концентрации. Поэтому исследования проводили с использованием различной исходной концентрацией бромистоводородной кислоты.

Авторы [10] установили, что при химико-динамическом полировании (ХДП) поверхности монокристаллов $PbTe$ и $Pb_{1-x}Sn_xTe$ травильными смесями $H_2O_2 + HBr$ исходная концентрация HBr влияет на интервал полирующих растворов и качество полированной поверхности и при этом существенно не влияет на значения скоростей травления. Введение ЭГ в травильные смеси $H_2O_2 +$

HBr приводит к уменьшению скорости травления до 1.5 мкм/мин и увеличению области полирующих растворов [11]. Данных о влиянии концентрации HBr на процесс ХМП монокристаллов $PbTe$ и $Pb_{1-x}Sn_xTe$ травильными смесями $H_2O_2 + HBr + ЭГ$ в литературе не обнаружено.

Следует также отметить, что преимуществами разработанных бромвыделяющих травителей по сравнению с традиционными бромсодержащими растворами являются: отсутствие необходимости использования токсического свободного $Bг_2$, упрощение процесса приготовления смесей, высокое качество полирования кристаллов $PbTe$ и $Pb_{1-x}Sn_xTe$, а также небольшие скорости травления.

Целью настоящей работы является исследование химического травления поверхности монокристаллов $PbTe$ и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ травителями ($H_2O_2-HBr-ЭГ$)/ЭГ в зависимости от исходной концентрации HBr , установление зависимостей скоростей растворения этих материалов от состава травильных растворов, определение областей полирующих растворов, изучение состояния поверхности после ХМП и ХДП методами микроструктурного и профилографического анализов, а также оптимизация составов полирующих смесей и режимов проведения операций для формирования высококачественной полированной поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследований использовали монокристаллы $PbTe$ и твердых растворов $Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te$, $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$, выращенные методом Бриджмена. Подготовку полупроводниковых пластин ($\sim 5 \times 7 \times 1.5$ мм), а также их предварительную обработку проводили по разработанной ранее методике [11–13].

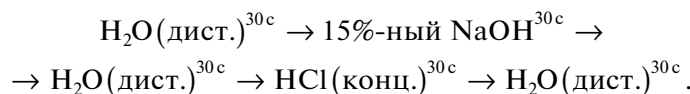
Процесс ХМП осуществляли на стеклянном, обтянутом тканью полировальнике при $T = 293-295$ К и непрерывной подаче травителя со скоростью 2–3 мл/мин. Главное внимание обращали на стабильную структуру ткани и ее механическую и химическую стойкость к компонентам полирующей смеси.

Химическое травление пластин проводили на установке для ХДП с использованием методики вращающегося диска [11, 13]. Скорость растворения определяли по уменьшению толщины пластин при помощи электронного индикатора TE-SA DIGICO 400 с точностью ± 0.2 мкм, а процесс травления проводили в течение 3 мин.

Важной заключительной операцией химического травления является окончание процесса травления и отмывка поверхности образцов от остатков травителя и продуктов реакций. При этом необходимо стремиться к минимуму воз-

можного контакта свежетравленной поверхности образцов с атмосферой окружающей среды. После полирования образцы промывали согласно

следующей схеме (для прекращения взаимодействия между травителем и поверхностью полупроводника) [11, 12]:



Высушивание образцов проводили в потоке сухого воздуха.

Для приготовления травителей использовали 43 и 48%-ную HBr, 35%-ный H₂O₂ и ЭГ (все реактивы “ос. ч.” и “х. ч.”). Компоненты раствора смешивали в определенном порядке в количествах, соответствующих их объемному соотношению в травильных смесях, т.е. состав травителя выражали в об. %.

Микропрофили поверхности образцов и определяющие характеристики шероховатости получены на базовой длине 0.25 мм (при длине трассирования 1.5 мм и скорости трассирования 0.15 мм/с) с использованием профилометра марки HOMMEL-ETAMIC W5, позволяющего определять высоту микронеровностей ≥5 нм в диапазоне измерений от –210 до +110 мкм, класс точности по DIN 4772 = 1 (3%).

Морфологические исследования полированных поверхностей монокристаллов PbTe проводили с помощью сканирующего зондового микроскопа NanoScope IIIa Dimension 3000 (Digital Instruments/Bruker Corp.) методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в режиме периодического контакта (*tapping mode*) при комнатных условиях с точностью ±1 нм. Измерения проведены в центральной зоне образцов с использованием серийных кремниевых зондов Nano World с номинальным радиусом округления острия марки NCH до 10 нм. Исследования методом электронной микроскопии проводили с помощью настольного электронного микроскопа JEOL JCM-5000 NeoScope. Образцы помещали на выдвижной столик камеры, после чего в течение 3 мин автоматически создавался низкий вакуум 10⁻³ Па (ускоряющее напряжение 15 кВ). В результате электронного микроанализа были получены микрорентгенограммы (увеличение от ×10 до ×20000) поверхностей монокристаллов PbTe после различных этапов обработки. Контроль качества полированных поверхностей проводили, также используя металлографический микроскоп МИМ-7. Совмещенная с микроскопом цифровая видеокамера eTREK DCM800 (8 Mpix) позволяла на мониторе визуально наблюдать за состоянием поверхности объекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку в процессе подготовки поверхности полупроводников существует необходимость быстрого уменьшения толщины пластины до заданных размеров с одновременным сохранением ее планарности, целесообразно применять ХМП, когда по сравнению с ХДП скорость полирования в несколько раз больше за счет механической составляющей, которая действует на кристалл. Процесс ХДП для полупроводниковых кристаллов не всегда обеспечивает высококачественную полированную поверхность с идеальной плоскостностью в макромасштабе, поэтому для таких целей лучше использовать метод ХМП. В результате трения поверхностей подложки и полировальника температура в области контакта может превышать температуру окружающего травителя на 10°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 смесей для ХМП мы приняли во внимание тот факт, что за счет действия механической составляющей скорость снятия материала этим методом может быть в несколько раз больше по сравнению с использованием этого травителя для ХДП.

Химико-механическое полирование

Растворы (H₂O₂–HBr–ЭГ)/ЭГ с использованием 48%-ной HBr. Нами был выбран базовый полирующий травитель БР, характеризующийся скоростями ХДП: 8.2 мкм/мин для PbTe, 8.4 мкм/мин для Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te, 7.7 мкм/мин для Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te, обладающий хорошими полирующими свойствами. Видно (рис. 1а), что скорость ХМП в базовом травителе составляет 185.0 мкм/мин для PbTe, 174.5 мкм/мин для Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te и 175.0 мкм/мин для Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te, 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 БР дополнительно приливали определенное количество модификатора вязкости ЭГ. Как видно из рис. 1а, по мере разбавления базового травителя скорость ХМП изменяется в

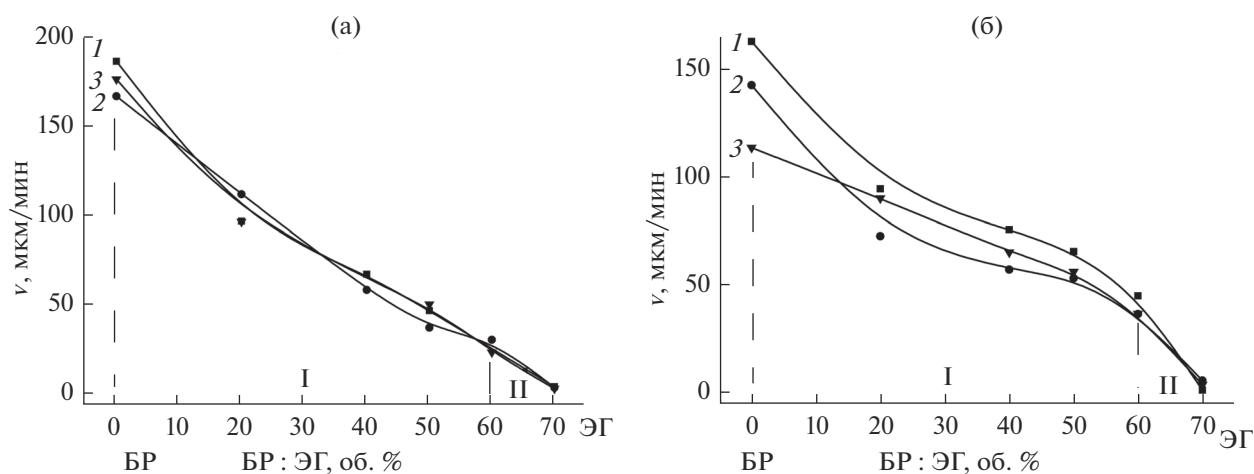


Рис. 1. Зависимости скорости ХМП ($T = 294$ К) монокристаллов PbTe (1), $Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te$ (2), $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ (3) от разбавления базового полирующего травителя (БР) ЭГ в смесях $(H_2O_2-NBr-ЭГ)/ЭГ$ с использованием 48%-ной НВг (а) и 43%-ной НВг (б) (показаны области полирующих (I) и неполирующих (II) растворов).

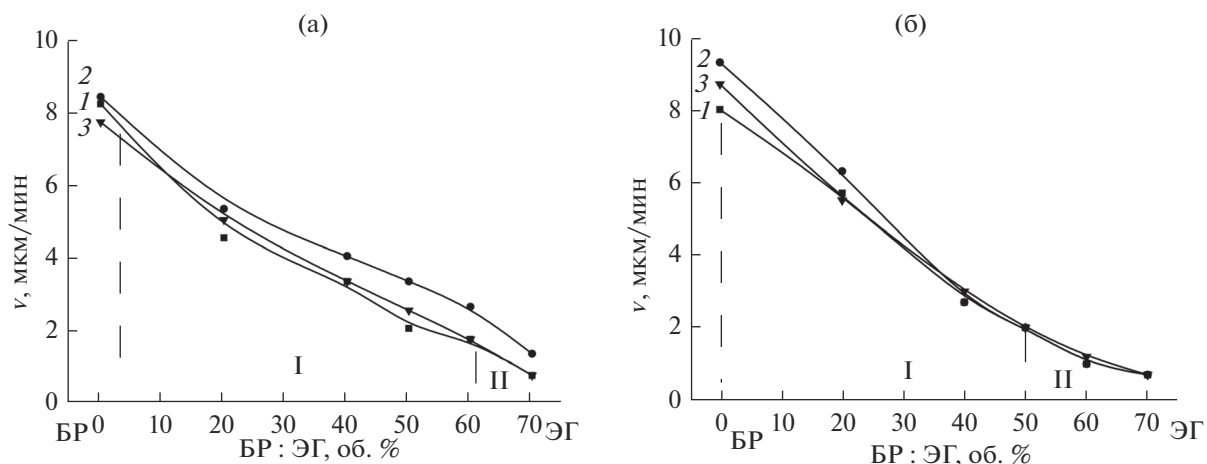


Рис. 2. Зависимости скорости ХДП ($T = 294$ К, $\gamma = 78$ мин $^{-1}$) монокристаллов PbTe (1), $Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te$ (2), $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ (3) от разбавления БР ЭГ в растворах $(H_2O_2-NBr-ЭГ)/ЭГ$ с использованием 48%-ной НВг (а) и 43%-ной НВг (б) (показаны области полирующих (I) и неполирующих (II) растворов).

пределах 185.0–3.0 мкм/мин. При этом разница в скоростях ХМП (рис. 1а) и ХДП (рис. 2а) постепенно уменьшается, что свидетельствует о зависимости скорости ХМП от скорости химической реакции. Следует отметить, что поверхности полупроводниковых материалов после ХМП при разбавлении раствора БР от 100 до 40 об. % получались полированными и высокого качества. При дальнейшем разбавлении травителя (70 об. % ЭГ) качество поверхности ухудшалось и на поверхности появлялась белая полупрозрачная пленка.

Растворы $(H_2O_2-NBr-ЭГ)/ЭГ$ с использованием 43%-ной НВг. Базовый полирующий травитель БР $(H_2O_2-NBr-ЭГ)$ того же состава, что и в предыдущем случае, но с использованием 43%-ной НВг характеризуется следующими скоростями

ХДП: 8.0 мкм/мин для PbTe, 9.3 мкм/мин для $Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te$, 8.7 мкм/мин для $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ и обладает хорошими полирующими свойствами. Видно (рис. 1б), что скорость ХМП в базовом травителе составляет 162.0 мкм/мин для PbTe, 142.0 мкм/мин для $Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te$ и 103.5 мкм/мин для $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$.

Полирующие растворы, как и при использовании 48%-ной НВг, формируются при соотношении БР к ЭГ от 100 до 40 об. %. При этом скорости полирования уменьшаются и составляют 40.0 мкм/мин для PbTe, 38.0 мкм/мин для $Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te$ и 36.0 мкм/мин для $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$. Дальнейшее увеличение содержания ЭГ (70 об. %) в составе полирующего травителя приводит к снижению скорости растворения (≈ 1 мкм/мин) и ухуд-

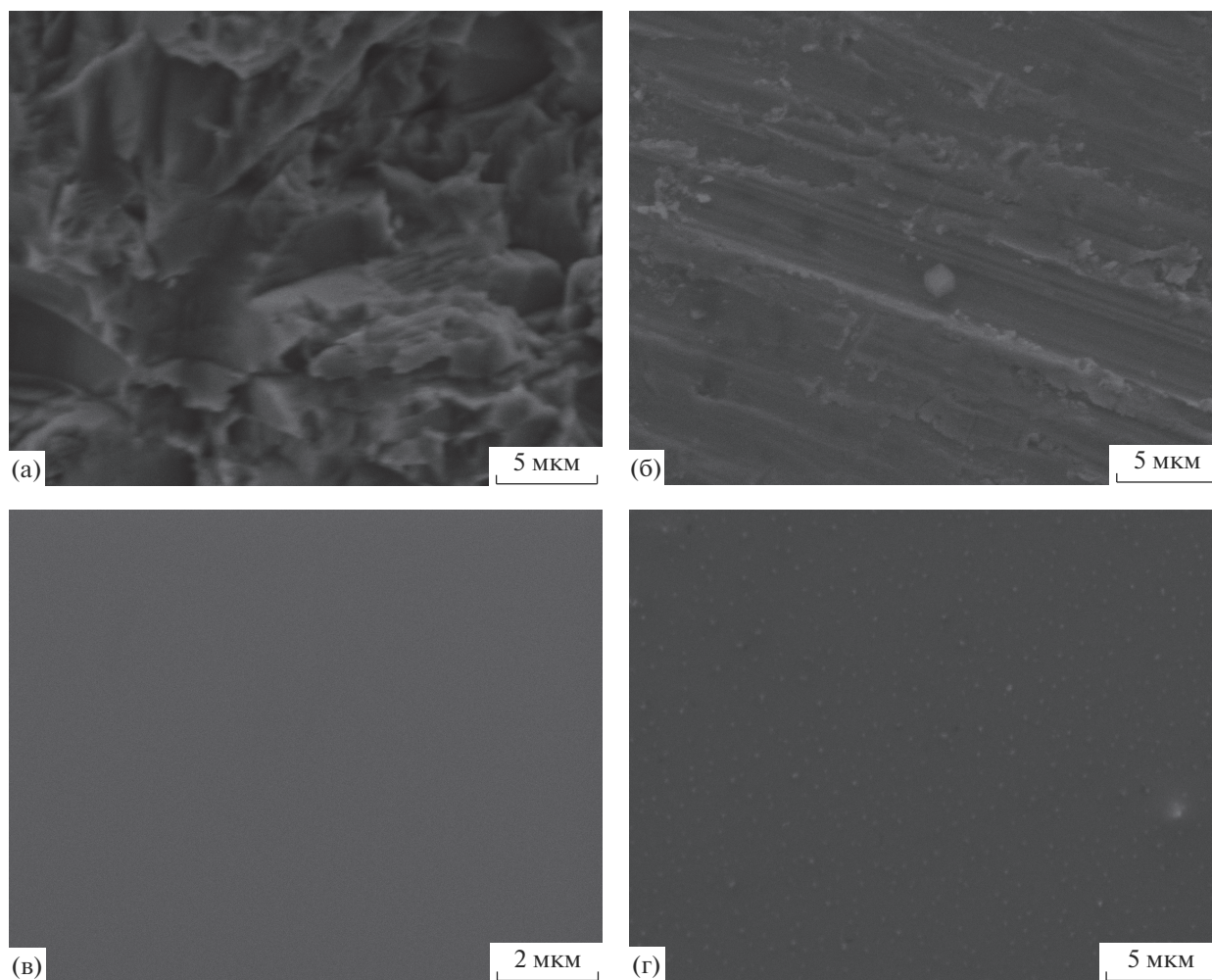


Рис. 3. Микроструктура поверхности PbTe после струнной резки (а), шлифования абразивом М5 (б), а также после обработки полирующим травителем H_2O_2 –HBr–ЭГ методом ХМП (в) и ХДП (г).

шению качества поверхности — образуется полупрозрачная пленка серого оттенка.

Химико-динамическое полирование

Растворы (H_2O_2 –HBr–ЭГ)/ЭГ с использованием 48%-ной HBr. Для уменьшения скорости ХДП непосредственно перед проведением самого процесса к базовому травителю БР дополнительно приливали определенное количество модификатора вязкости ЭГ. Как видно из рис. 2а, по мере разбавления базового травителя скорость ХДП падает от 8.4 до 0.7 мкм/мин. Следует отметить, что поверхности полупроводниковых материалов после ХДП при разбавлении раствора БР от 100 до 40 об. % получились полированными и высокого качества. При дальнейшем разбавлении травителя (70 об. % ЭГ) качество поверхностей ухудшалось: после ХДП на поверхности наблюдались белые пятна.

Растворы (H_2O_2 –HBr–ЭГ)/ЭГ с использованием 43%-ной HBr. При разбавлении базового травителя с использованием 43%-ной HBr скорости ХДП изменяются в следующих пределах: 8.0–2.0 мкм/мин для PbTe, 9.3–2.5 мкм/мин для $Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te$, 8.7–2.3 мкм/мин для $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ (рис. 2б). Полирующие растворы в этом случае формируются при соотношении БР к ЭГ от 100 до 50 об. %, а дальнейшее увеличение ЭГ (60 об. %) приводит к снижению скорости растворения до 0.5 мкм/мин и ухудшению качества поверхности исследуемых кристаллов (по всей поверхности образцов образуется прозрачная пленка белого цвета).

На рис. 3 представлена микроструктура поверхности монокристаллических пластин PbTe после различных этапов механической и химической обработки: резки, шлифования, а также после ХМП и ХДП полирующими травителями.

Основные параметры шероховатости поверхности пластин PbTe и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$

Таблица 1. Параметры шероховатости поверхности пластин PbTe и $Pb_{1-x}Sn_xTe$ после различных этапов механической обработки, полученные с помощью профилометра HOMMEL-ETAMIC W5

Этапы обработки	R_a , мкм	R_z , мкм	R_a , мкм	R_z , мкм	R_a , мкм	R_z , мкм
	PbTe		$Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te$		$Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$	
Струнная резка	1.35	5.83	1.42	6.77	1.45	6.97
Струнная резка + шлифование свободным абразивом M10	0.42	2.68	0.45	2.98	0.50	3.11
Струнная резка + шлифование свободным абразивом M10 + M5	0.22	1.58	0.24	1.72	0.25	1.73
Струнная резка + шлифование свободным абразивом M10 + M5 + M1	0.04	0.45	0.05	0.42	0.04	0.46

Примечание. R_a – среднее арифметическое отклонений профиля в пределах базовой длины; R_z – сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля.

после резки и шлифования приведены в табл. 1, измерения проводились на базовой длине 0.25 мм при длине трассирования 1.5 мм.

Исследования микроструктуры поверхностей PbTe и $Pb_{1-x}Sn_xTe$ после различных обработок показали, что по сравнению с ХДП после проведения ХМП качество полированной поверхности лучше. Это подтверждается и результатами исследования ее шероховатости. На рис. 4 показаны АСМ-изображения поверхности монокристаллов $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ после ХМП (рис. 4а), а также после последующего этапа обработки методом ХДП (рис. 4б) (площадь анализируемого фрагмента 5×5 мкм). После ХМП поверхности кристаллов PbTe травильными смесями $H_2O_2 + HBr + \text{ЭГ}$ формируется микрорельеф с $R_a < 1$ нм, а после последующего этапа обработки методом ХДП $R_a \approx 2$ нм. Поскольку при ХМП на поверхность образца оказывают совместное воздействие травитель и мягкий полировальник, это способствует равномерному травлению по всей поверхности образца и сглаживанию всех выступов и микро-

неровностей, поэтому ХМП по сравнению с ХДП характеризуется несколько лучшими параметрами шероховатости.

Таким образом, используя новые травильные смеси ($H_2O_2-HBr-ЭГ$)/ЭГ, можно получить полированную поверхность PbTe с $R_a < 10$ нм, что полностью удовлетворяет требованиям, предъявленным к сверхгладким полированным поверхностям [14].

С помощью рентгеноспектрального микроанализа контролировали наличие кислорода и углерода, а также возможных загрязнений химическими соединениями, входящими в состав травителей и растворов для промывки образцов. Например, отсутствие после травления на поверхности исследуемых образцов Вг, С и Na подтверждает эффективность разработанной методики их послеоперационной отмывки. После ХМП и ХДП кристаллов PbTe травильными композициями ($H_2O_2-HBr-ЭГ$)/ЭГ формируется поверхность стехиометрического состава.

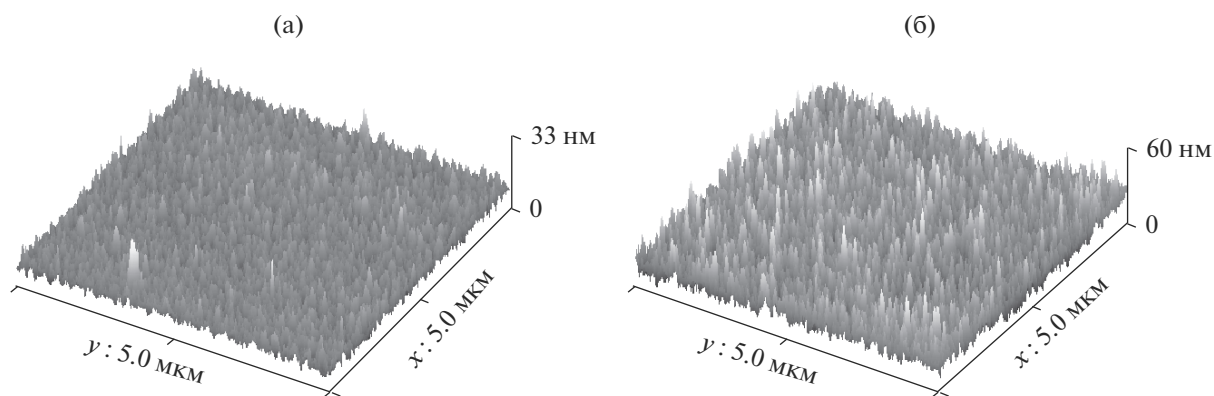


Рис. 4. Трехмерное АСМ-изображение поверхности монокристаллов $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ после обработки методами ХМП (а) и ХДП (б) полирующим раствором $H_2O_2-HBr-ЭГ$.

Таким образом, используя одни и те же компоненты, можно формировать полирующие травильные смеси ($\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr--ЭГ}$)/ЭГ с необходимым спектром скоростей ХМП. Такой подход позволяет сократить длительность процессов химической обработки полупроводника и упростить этапы отмывки пластин. Следует отметить, что такие полирующие смеси характеризуются значениями pH 4.0–6.0, что очень важно при их использовании в процессах, где технологическое оборудование может подвергаться коррозии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован характер ХМП и ХДП монокристаллов PbTe и твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ травильными смесями ($\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr--ЭГ}$)/ЭГ в зависимости от концентрации HBr. Установлено, что увеличение исходной концентрации бромистоводородной кислоты в составе травильных смесей приводит к увеличению скорости ХМП и не влияет на интервал полирующих растворов. Обработка исследуемых кристаллов вышеуказанными растворами дает возможность получить сверхгладкую поверхность ($R_a < 10$ нм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипова Е.В., Гук В.Г., Фролов А.А., Шепатковский О.П., Панушина Т.И. Исследование нарушенных слоев на поверхности монокристаллов теллурида свинца при различных способах резки // Неорганические материалы. 1991. Т. 27. № 6. С. 1200–1203.
2. Oliver M.R. Chemical-Mechanical Planarization of Semiconductor Materials. Springer, 2004. 524 p.
3. Стратийчук И.Б. Хіміко-маханічне полірування монокристалів CdTe бромвиділяючими розчинами $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr}$ –етиленгліколь // Оптоелектроника и полупровод. техника. 2011. Вып. 46. С. 134–139.
4. Гуменюк О.Р., Томашик З.Ф., Томашик В.Н., Фейчук П.И. Компенсационный эффект в кинетике химического взаимодействия CdTe с растворами системы $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HI}$ –молочная кислота // Конден-

сир. среды и межфаз. границы. 2002. Т. 4. № 3. С. 242–246.

5. Васильева Л.Ф., Соколова Г.А., Шахина Т.В. К травлению поверхности подложек PbTe и $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ // Западская лаборатория. 1980. Т. 46. № 11. С. 1034–1035.
6. Barros A.S., Abramof E., Rappl P.H.O. Lead Telluride p-n-Junctions for Infrared Detection: Electrical and Optical Characteristics // Braz. J. Phys. A. 2006. V. 36. № 2. P. 474–477.
7. Walker P., Tarn W.H. Handbook of Metal Etchants. CRC Press LLC, 1991. 1415 p.
8. Meglei D.F., Dyntu M.P., Donu S.V. Indium Impurity Effect on Growth and Structural Perfection of Lead–Tin Telluride Wire Crystals // Mold. J. Phys. Sci. 2010. V. 9. № 2. P. 156–158.
9. Луфт Б.Д., Перевошиков В.А., Возмилова Л.Н. и др. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников. М.: Радио и связь, 1982. 136 с.
10. Маланич Г.П., Томашик В.Н., Стратийчук И.Б., Томашик З.Ф. Химическое травление монокристаллов PbTe и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ растворами $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr}$ с использованием разной исходной концентрации HBr // Оптоелектроника и полупровод. техника. 2015. Вып. 50. С. 94–101.
11. Томашик З.Ф., Маланич Г.П., Томашик В.Н., Стратийчук И.Б., Пашенко Г.А., Кравцова А.С. Формирование полированных поверхностей монокристаллов PbTe и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ бромвыделяющими травителями $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr}$ –этиленгліколь // Вопросы химии и хим. технологии. 2012. № 4. С. 120–125.
12. Маланич Г.П., Томашик З.Ф., Томашик В.М., Стратийчук И.Б., Сафрюк Н.В., Кладько В.П. Хіміко-маханічне полірування монокристалів PbTe та твердих розчинів $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ в травильних композиціях $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr}$ –етиленгліколь // Наук. вісник ЧНУ. Хімія. 2013. Вип. 640. С. 72–78.
13. Маланич Г.П., Томашик В.Н., Стратийчук И.Б., Томашик З.Ф. Травление поверхности кристаллов PbTe и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ водными растворами $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr}$ –винная кислота // Неорганические материалы. 2014. Т. 50. № 7. С. 713–718.
14. Пон С.С., Шароді І.С. Фізична електроніка. Львів: Євровіт, 2001. 250 с.