

**Г.П. Маланич, В.М. Томашик, И.Б. Стратийчук,
З.Ф. Томашик**

ХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ PbTe И Pb_{1-x}Sn_xTe РАСТВОРАМИ H₂O₂-HBr С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНОЙ ИСХОДНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ HBr

Исследован характер химического травления монокристаллов PbTe и твердых растворов Pb_{1-x}Sn_xTe в зависимости от исходной концентрации HBr, используемой для приготовления травильных композиций H₂O₂-HBr. Изучены зависимости скоростей химико-динамического травления поверхности полупроводников от состава растворов, их температуры и перемешивания, а также влияние исходной концентрации HBr на концентрационный интервал полирующих травителей и качество полученной поверхности. Оптимизированы составы травителей и режимы проведения химико-динамического полирования поверхности PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe.

Ключевые слова: монокристалл, теллурид свинца, твердые растворы, скорость травления, химико-динамическое полирование.

1. ВВЕДЕНИЕ

К структурным параметрам полупроводниковых подложек и их качеству предъявляются высокие требования, которые определяют совокупность технологических операций механической и химической обработки, условия и режимы их проведения [1-3]. В связи с этим существует необходимость создания и подбора эффективных травителей с соответствующими скоростями травления материала, получением определенного значения шероховатости поверхности в результате химического полирования и другими специфическими свойствами. Очень важно в процессе технологической обработки поверхности полупроводников использовать как можно меньше различных реактивов, которые могут вносить дополнительные примеси. Поэтому все процессы химического травления целесообразнее проводить травителями, содержащими одни и те же компоненты, но в различном соотношении. Следует отметить, что существуют технологические проблемы при выборе оптимальных составов полирующих травильных композиций как для химико-механического (ХМП), так и для химико-динамического (ХДП) полирования полупроводниковых материалов, для устранения которых нужны дополнительные исследования механизма и кинетики химического растворения полупроводников.

Монокристаллы PbTe и твердых растворов Pb_{1-x}Sn_xTe часто используют в производстве излучателей и детекторов ИК-излучения в спектральном диапазоне 3–14 мкм, работающих в интервале температур от комнатной до 600–650 °С, а также в термоэлектрике и тензометрии [4-7]. Формирование высококачественной полированной поверхности полупроводниковых элементов является важной характеристикой, которая отображается на качестве приборов. Для химической обработки поверхности полупроводниковых материалов типа A^{IV}B^{VI} чаще всего используют бромсодержащие растворы, в частности, травители на основе растворов Br₂ в HBr [8-10]. Это обусловлено тем, что при окислении бромом поверхностных слоев полупроводника образуются хорошо растворимые в воде и различных органических растворителях бромиды, что способствует переводу процесса растворения в диффузионную область. Поскольку работа с травителями на основе элементарного брома сопряжена с рядом трудностей, для химической обработки поверхности исследуемых полупроводников были разработаны бромвыделяющие травильные композиции на основе системы H₂O₂-HBr [11-14]. При этом бром, который выделяется в процессе взаимодействия исходных компонентов H₂O₂ и HBr, растворяется в избытке бромистоводородной кислоты и

образуются травильные смеси, похожие по своим свойствам и составу на растворы брома в HBr. При приготовлении бромвыделяющих травителей возникает проблема с выбором исходной концентрации бромистоводородной кислоты, поскольку в промышленности она выпускается разной концентрации. Поэтому исследования проводили с использованием различной исходной концентрации бромистоводородной кислоты: 40, 44 и 48 %-ной HBr.

Следует отметить, что преимуществами разработанных бромвыделяющих травителей по сравнению с традиционными бромсодержащими растворами являются: отсутствие необходимости использования токсического свободного Br₂, упрощение процесса приготовления смесей, высокое качество полирования кристаллов PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe, а также небольшие скорости травления.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование характера химического травления поверхности монокристаллов PbTe и твердых растворов Pb_{1-x}Sn_xTe травителями H₂O₂-HBr в зависимости от исходной концентрации HBr, установление зависимостей скоростей растворения этих материалов от состава травильных растворов, их температуры и скорости перемешивания, определение областей полирующих растворов и лимитирующих стадий процесса растворения, изучение состояния поверхности после ХДП методами микроструктурного анализа и электронной микроскопии, а также разработка и оптимизация на основании полученных экспериментальных данных полирующих травителей.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследований использовали монокристаллы PbTe и твердых растворов Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te, Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (II), выращенные методом Бриджмена, а также Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (I), полученные из паровой фазы. Образцы вырезали из кристаллических слитков с помощью струны с алмазным напылением, при этом размеры пластин составляли ~5×7×1,5 мм. Деформированный слой, образовавшийся на поверхности пластин в процессе резки, частично удаляли механическим шлифованием, используя водные суспензии абразивных порошков М 10 и М 5. Для удаления с поверхности пластин загрязнений, которые вносятся в процессе резки и шлифования, их промывали в теплой дистиллированной воде с добавлением поверхностно-активных веществ, затем несколько раз ополаскивали дистиллированной водой и высушивали в потоке сухого воздуха. Далее подготовленные пластины приклеивали с помощью пиццина нерабочей стороной на кварцевые подложки. Остатки пиццина с поверхности образцов и подложек отмывали органическими растворителями: ацетоном, толуолом и этиловым спиртом. Нарушенный путем резки и шлифования слой с поверхности всех исследуемых полупроводниковых образцов удаляли методом ХМП бромвыделяющим травителем H₂O₂-HBr-этиленгликоль со скоростью растворения ≈170,0 мкм/мин [14]. Если процесс ХМП образцов PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe проводить травителем такого же состава, но используя HBr с исходной концентрацией 40%, то скорость растворения составит $v_{ХМП} \approx 80,0$ мкм/мин. Процесс ХМП осуществляли на стеклянном полировальнике, обтянутом тканью, при $T = 293-295$ К и непрерывной подаче травителя со скоростью 2–3 мл/мин.

Для приготовления травителей использовали растворы 35 %-ной H₂O₂ и 40, 44 и 48 %-ной бромистоводородной кислоты, а также этиленгликоль (все реактивы “ос.ч.” и “х.ч.”). Указанные компоненты смешивали в определенном порядке в количествах, соответствующих их объёмному соотношению в травильных растворах, т.е. состав выражали в об.%. Приготовленные растворы перед процессом травления выдерживали в течение двух часов до окончательного прекращения газообразования в реакции, происходящей между исходными компонентами травителя:



Химическое травление пластин проводили на установке для ХДП с использованием методики вращающегося диска [11-13]. Скорость растворения монокристаллов определяли по уменьшению толщины пластин при помощи многооборотного индикатора 1МИГП с точностью $\pm 0,5$ мкм. Одновременно растворяли четыре образца, при этом отклонение в измерении толщины не превышало 5%. Микроструктуру поверхности полупроводниковых образцов PbTe и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ после различных этапов механической и химической обработки изучали методами металлографии и электронного микроанализа. Исследования проводили в белом свете с помощью металлографического микроскопа МИМ-7 с цифровой видеокамерой eTREK DCM800 (8 Мрiх) и настольного сканирующего (растрового) электронного микроскопа JEOL JCM-5000 NeoScore.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные исследования концентрационных зависимостей скоростей растворения монокристаллических образцов PbTe и $Pb_{1-x}Sn_xTe$ травителями H_2O_2-HBr проводили при $T = 294$ К и скорости вращения диска $\gamma = 86$ мин⁻¹. В зависимости от исходной концентрации HBr исследуемый интервал концентраций в травильных композициях H_2O_2-HBr был разным, что обусловлено в первую очередь поиском составов полирующих травителей.

Растворы H_2O_2-HBr с использованием 40 %-ной HBr. Процесс ХДП кристаллов PbTe и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ в травильных растворах H_2O_2-HBr с использованием 40 %-ной HBr проводили в интервале концентраций 1–16 об.% H_2O_2 в HBr (табл. 1). Нами установлено, что после травления монокристаллов PbTe и $Pb_{1-x}Sn_xTe$ водными растворами H_2O_2-HBr , содержащими 2-8 об.% H_2O_2 , образующаяся поверхность характеризуется зеркальным блеском, при этом наблюдается рост скорости растворения всех исследуемых материалов с увеличением содержания H_2O_2 в смеси. Для вышеуказанных полупроводников максимальная скорость растворения наблюдается в смеси, содержащей 8 об.% H_2O_2 в HBr (рис. 1). Дальнейшее увеличение в составе смеси содержания окислителя H_2O_2 от 8 до 16 об.% приводит к уменьшению скорости травления образцов (мкм/мин): для PbTe – 3,7 (рис. 1а), для $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$ – 2,3 (рис. 1б), для $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I) (рис. 1в) и $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (II) (рис. 1г) – 1,3 и 1,8 соответственно, при этом на поверхности кристаллов образуется пленка [11, 12].

Таблица 1. Скорости травления ($T = 294$ К, $\gamma = 86$ мин⁻¹) монокристаллических полупроводников PbTe и $Pb_{1-x}Sn_xTe$ в бромвыделяющих растворах H_2O_2-HBr с использованием различной исходной концентрацией HBr.

Состав травителя $H_2O_2:HBr$, об. %	Скорости травления, $v_{ХДП}$, мкм/мин											
	PbTe			$Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$			$Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I)			$Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (II)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1:99	3,3	–	–	3,7	–	–	2,7	–	–	2,7	–	–
2:98	5,7*	4,3*	3,8*	6,0*	5,7*	4,0*	3,8*	4,3*	4,3*	7,7*	4,2*	4,7*
4:96	10,8*	8,6*	8,2*	5,3*	7,1*	6,7*	9,0*	7,1*	8,2*	6,5*	7,0*	7,7*
6:94	12,8*	11,9*	11,8*	11,8*	10,6*	8,3*	12,2*	11,1*	12,0*	12,0*	10,5*	10,5*
8:92	14,0*	14,7*	13,2*	16,5*	14,3*	13,3*	12,8*	14,3*	14,0*	17,2*	14,0*	12,3*
10:90	9,7	13,8	16,7*	8,8	14,7	15,8*	8,7	15,0	17,2*	10,0	13,7	16,3*
12:88	4,8	–	14,8	4,8	–	14,7	6,0	–	17,7	4,8	–	14,8
14:86	3,3	–	–	3,5	–	–	2,7	–	–	2,5	–	–
16:84	3,7	–	–	2,3	–	–	1,3	–	–	1,8	–	–

Примечание: исходная концентрация HBr: 1 – 40%, 2 – 44% и 3 – 48%;

* скорости травления (ХДП) в полирующих растворах.

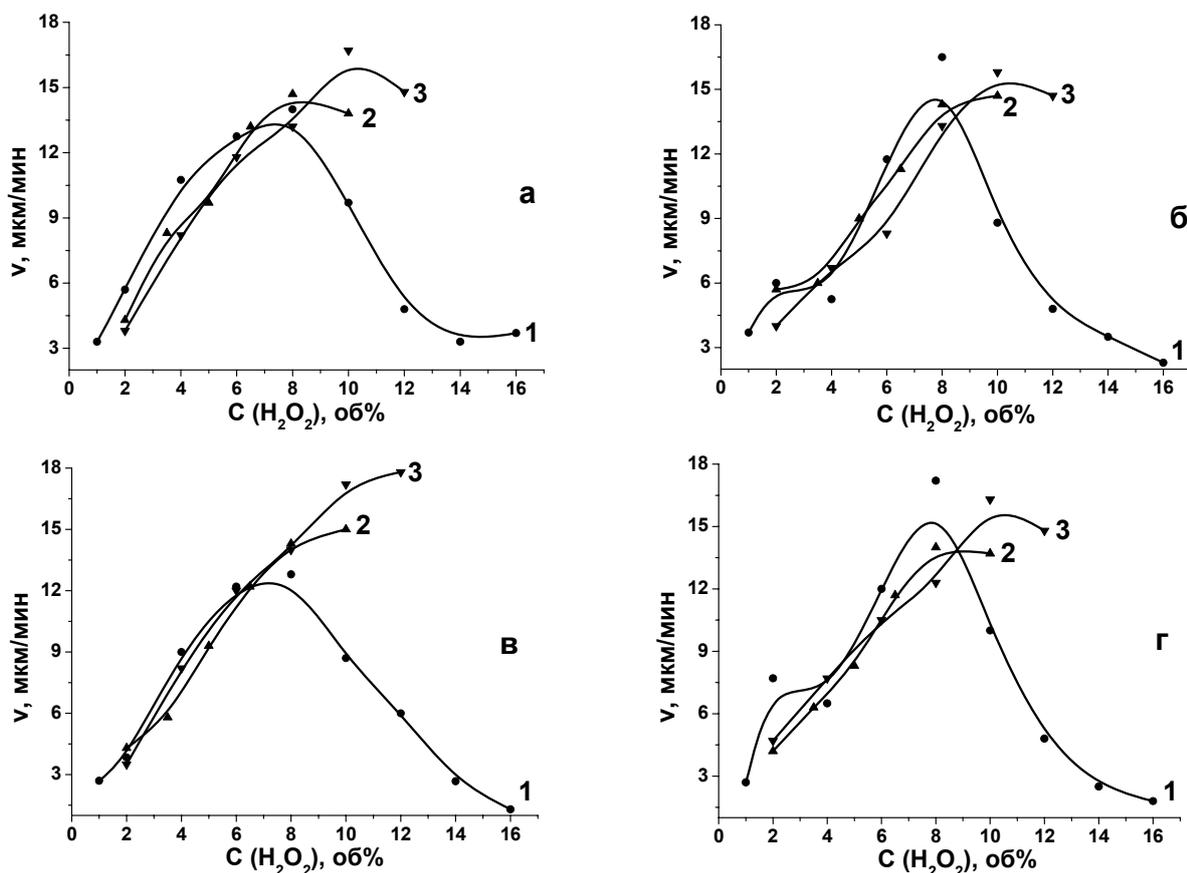


Рис. 1. Зависимости ($T = 296 \text{ K}$; $\gamma = 86 \text{ мин}^{-1}$) скорости травления $v_{хдп}$ (мкм/мин) монокристаллов PbTe (а), $\text{Pb}_{0,83}\text{Sn}_{0,17}\text{Te}$ (б), $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$ (I) (в), $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$ (II) (г) в растворах H_2O_2 –HBr от исходной концентрации HBr: 40% (1), 44% (2), 48% (3).

Такую зависимость скоростей травления PbTe и твердых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ от состава растворов H_2O_2 –HBr можно объяснить тем, что с увеличением содержания окислителя концентрация образовавшегося брома в травильной композиции увеличивается и достигает своего оптимального значения при 8 об.% H_2O_2 (достаточное количество остаточной HBr после реакции между исходными компонентами), что, в свою очередь, соответствует максимальной скорости травления. При увеличении H_2O_2 от 8 до 16 об.% концентрация активного компонента продолжает расти, но при этом уменьшается количество остаточной HBr, а это, соответственно, приводит к уменьшению скорости растворения.

Таким образом, в зависимости от соотношения $[\text{H}_2\text{O}_2]/[\text{HBr}]$ в конкретном растворе выделившийся бром может растворяться в избытке бромистоводородной кислоты, образуя травильные смеси, похожие по своим свойствам и составу на растворы брома в HBr, либо сосуществовать в свободном состоянии с избытком перекиси водорода. Химическое взаимодействие согласно реакции (1) между исходными компонентами используемых в данной работе концентраций протекает практически полностью, если содержание H_2O_2 в смеси составляет 22,56 об.% (исходные концентрации водных растворов HBr и H_2O_2 составляют 40 % и 35 % соответственно). При меньшем содержании H_2O_2 , то есть при избытке HBr, бром, который выделяется в процессе взаимодействия, связывается с HBr в растворе практически полностью.

Растворы H_2O_2 –HBr с использованием 44 %-ной HBr. При использовании HBr с исходной концентрацией 44 % полирующие травители в системе H_2O_2 –HBr, как и в предыдущем случае, формируются в интервале 2–8 об.% H_2O_2 в HBr (рис. 1), при этом скорости полирования составляют (мкм/мин): 4,3–14,7 для PbTe (рис. 1а), 5,7–14,3 для

$Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$ (рис. 1б), 4,3–14,3 и 4,2–14,0 для $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I) (рис. 1в) и $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (II) (рис. 1г) соответственно. Максимальная скорость травления для $PbTe$ и $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (II) наблюдается при 8 об.% H_2O_2 в HBr , тогда как для $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$ и $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I) – при 10 об.% H_2O_2 в HBr (табл. 1). Следует отметить, что влияние природы исходного материала на скорость травления наблюдается только при использовании HBr с исходной концентрацией 44%. Для всех исследуемых монокристаллических полупроводников растворы, содержащие 10 об.% H_2O_2 в HBr , являются неполирующими (на поверхности образцов образуется белая пленка).

Растворы H_2O_2 – HBr с использованием 48 %-ной HBr . Нами установлено, что наиболее перспективными для ХДП $PbTe$ и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ являются травильные растворы, для приготовления которых используется 48%-ная HBr (табл. 1), при этом интервал полирующих растворов наибольший и составляет 2–10 об.% H_2O_2 в HBr (рис. 1). Скорости полирования в этом концентрационном интервале изменяются в пределах (мкм/мин): 3,8–16,7 для $PbTe$ (рис. 1а), 4,0–15,8 для $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$ (рис. 1б), 4,3–17,2 и 4,7–16,3 для $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I) (рис. 1в) и $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (II) (рис. 1г) соответственно [13]. Таким полирующим бромвыделяющим травителям, которые содержат 2–10 об.% H_2O_2 в HBr (48 %-ной), соответствуют бромсодержащие травители Br_2 – HBr в интервале концентраций 1,3–8,6 об.% Br_2 в HBr (рис. 2), что полностью совпадает с литературными данными [8–10]. При увеличении содержания H_2O_2 в составе травителя до 12 об.% качество поверхности исследуемых полупроводниковых образцов ухудшается и скорость травления несколько уменьшается.

Таким образом, качество обрабатываемой поверхности и интервал полирующих растворов зависит не только от содержания H_2O_2 в смеси H_2O_2 – HBr , а и от исходной концентрации HBr . В табл. 2 приведены расчетные количества образовавшегося брома и остаточной HBr после химического взаимодействия исходных реагентов H_2O_2 и HBr . Анализируя полученные данные, видим, что полирующими являются травильные композиции H_2O_2 – HBr , содержащие от 1,3 до 8,6 об.% Br_2 в HBr . Неполирующие травильные растворы H_2O_2 – HBr формируются при содержании в них менее 1 об.% Br_2 в HBr (растворы, обогащенные бромистоводородной кислотой) и более 9 об.% Br_2 в HBr (травители, насыщенные бромом при недостаточном количестве HBr).

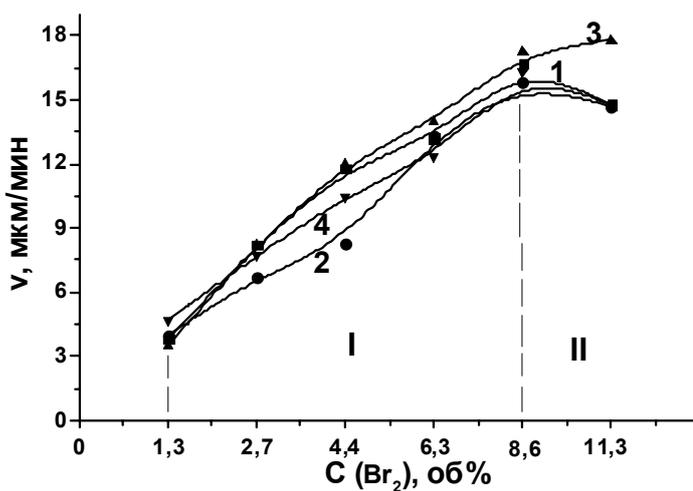


Рис. 2. Зависимости скорости травления $v_{ХДП}$ (мкм/мин) монокристаллов $PbTe$ (I), $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$ (2), $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I) (3) и $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (II) (4) от соотношения Br_2 , образовавшегося в процессе взаимодействия H_2O_2 и HBr (48%-ная) (I – полирующие, II – неполирующие растворы, $T = 294$ К, $\gamma = 86$ мин⁻¹).

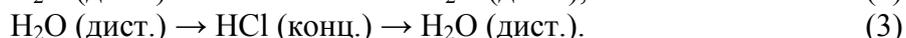
Таблица 2. Рассчитанные объем образовавшегося Br_2 и масса остаточной HBr после химического взаимодействия водных растворов H_2O_2 – HBr .

Состав травителя H_2O_2 : HBr (об.%)	40%-ная HBr		44%-ная HBr		48%-ная HBr	
	V (мл) Br_2	m (г) непрореагировавшей HBr	V (мл) Br_2	m (г) непрореагировавшей HBr	V (мл) Br_2	m (г) непрореагировавшей HBr
1:99	0,6	131,6	0,6	137,9	0,6	143,7
2:98	1,2*	125,5*	1,2*	132,1*	1,2*	138,2*
4:96	2,4*	113,3*	2,4*	120,7*	2,4*	127,4*
6:94	3,6*	101,1*	3,6*	109,2*	3,6*	116,5*
8:92	4,8*	88,9*	4,8*	97,7*	4,8*	105,7*
10:90	6,0	76,7	6,0	86,3	6,0*	94,8*
12:88	7,2	64,5	7,2	74,8	7,2	83,9

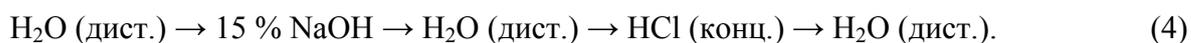
Примечание: объем раствора – 100 мл;

* объем образовавшегося Br_2 и масса остаточной HBr , необходимые для формирования полирующих растворов.

Промывка полупроводниковых образцов после процесса травления. Одним из важных этапов в обработке поверхности полупроводниковых пластин является промывка образцов после процесса травления, которую осуществляют для полного удаления с поверхности остатков травильного раствора и продуктов его взаимодействия с кристаллами. Неэффективной оказалась промывка монокристаллических пластин PbTe и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ после травления только в растворе NaOH (схема 2) либо HCl (схема 3), Независимо от исходной концентрации растворов NaOH и HCl , при их использовании для промывки исследуемых полупроводников после химического травления растворами H_2O_2 – HBr на поверхности всех исследуемых образцов образуется пленка:



Наиболее оптимальным вариантом оказалась промывка поверхности полупроводниковых пластин после обработки травителями, согласно которой после завершения процесса химического травления пластины быстро извлекают из травителя и сразу же промывают поэтапно по схеме 4 в течение 30 с в каждом растворе:



После промывки образцы необходимо высушить в потоке сухого воздуха.

Возможность использования различной исходной концентрации HBr при приготовлении полирующих травителей H_2O_2 – HBr делает их универсальными, поскольку можно использовать кислоту HBr той концентрации, которая есть в наличии. Кроме того, руководствуясь табл. 1, можно выбрать травитель H_2O_2 – HBr с нужной скоростью полирования. При использовании бромистоводородной кислоты с исходной концентрацией 40 или 44% полирующие травители в системе H_2O_2 – HBr формируются в интервале 2–8 об.% H_2O_2 в HBr . Если использовать 48%-ную HBr , полирующие травители H_2O_2 – HBr формируются в интервале 2–10 об.% H_2O_2 в HBr . Такие травильные композиции характеризуются средними скоростями травления (3,8–17,2 мкм/мин) и хорошими полирующими свойствами, что дает возможность использовать их для удаления нарушенного слоя с поверхности монокристаллических пластин PbTe и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ после шлифования абразивными порошками, утонения толщины пластин до заданных размеров, а также для финишного ХДП. При этом утонение пластин до заданной толщины следует

проводить быстрыми травителями, а финишное ХДП – очень медленными травителями, которые можно получить путем введения определенных количеств органических кислот либо модификаторов вязкости в раствор $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr}$.

Предложенные составы полирующих травителей $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr}$ и методики обработки поверхности пластин PbTe и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ способствуют получению полированной поверхности высокого качества ($R_z = 40$ нм). Установлено, что разработанные бромвыделяющие травители более технологичны в сравнении с бромсодержащими, не теряют полирующих свойств более 7 дней, а поверхность кристаллов после ХДП не теряет зеркального блеска в течение длительного времени (≈ 30 дней).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В воспроизводимых гидродинамических условиях исследованы процессы химического растворения монокристаллов PbTe и твердых растворов $\text{Pb}_{0,83}\text{Sn}_{0,17}\text{Te}$, $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$ (I), $\text{Pb}_{0,8}\text{Sn}_{0,2}\text{Te}$ (II) в бромвыделяющих травителях $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr}$, определены концентрационные границы полирующих растворов. Установлено, что применение различной исходной концентрации HBr в травильных композициях $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr}$ существенно не влияет на скорость травления монокристаллов PbTe и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$. Тем не менее, при использовании более концентрированной бромистоводородной кислоты концентрационный интервал полирующих растворов расширяется, а качество полированной поверхности образцов улучшается. Методами металлографического анализа и электронной микроскопии поверхности PbTe после ХДП разработанными травителями подтверждено высокое качество полученной поверхности.

G.P. Malanych, V.M. Tomashik, I.B. Stratiychuk, Z.F. Tomashik

CHEMICAL ETCHING OF PbTe AND $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ SINGLE CRYSTALS BY USING $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr}$ SOLUTIONS WITH DIFFERENT INITIAL HBr CONCENTRATIONS

Investigated in this work is the nature of the chemical etching of PbTe and $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ solid solutions single crystals depending on initial HBr concentrations used for preparing the $\text{H}_2\text{O}_2\text{--HBr}$ etching compositions. The dependences of chemical-dynamic etching rate of semiconductor surfaces on the composition etchants, their temperature and stirring regimes have been studied. The influence of the initial HBr concentration on the concentration range of polishing etchants and quality of the obtained surfaces has been also determined. The authors have performed optimization of etchant compositions and operation conditions for chemical-dynamic polishing the surfaces of the PbTe and $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ single crystals.

Keywords: single crystal, lead telluride, solid solutions, etching rate, chemical-dynamic polishing.

1. *Перевозищев В.А., Скупов В.Д.* Особенности абразивной и химической обработки поверхности полупроводников. – Нижний Новгород: ННГУ. – 1992.
2. *Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников / Б.Д. Луфт, В.А. Перевозищев, Л.Н. Возмилова и др.* – М.: Радио и связь. – 1982.
3. *Сангвал К.* Травление кристаллов: теория, эксперимент, применение: Пер. с англ. – М.: Мир. – 1990.
4. *Любченко А.В., Сальков Е.А., Сизов Ф.Ф.* Физические основы полупроводниковой инфракрасной фотоэлектроники. Современные тенденции, новые материалы. – Киев: Наукова думка. – 1984.

5. Синтез і термоелектричні властивості легованого плюмбум телуриду PbTe:Ni та твердого розчину PbSnTe / Д.М. Фреїк, І.В. Горічок, Н.І. Дикун та ін. // Фізика і хімія твердого тіла. – 2010. – **11**, № 3. – С. 712-716.
6. Шперун В.М., Фреїк Д.М., Запужляк Р.І. Термоелектрика телуриду свинцю та його аналогів. – Івано-Франківськ: Плай. – 2000.
7. 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. – **9**, № 2. – P. 156-158.
8. Васильєва Л.Ф., Соколова Г.А., Шахіна Т.В. К травленню поверхності подложек PbTe и Pb_xSn_{1-x}Te // Заводская лаборатория. – 1980. – **46**, № 11. – С. 1034-1035.
9. Barros A.S., Abramof E., Rappl P.H.O. Lead telluride p-n-junctions for infrared detection: Electrical and optical characteristics // Braz. J. Phys. – 2006. – **36**, № 2A. – P. 474-477.
10. Walker P., Tarn W.H. Handbook of metal etchants. – CRC Press LLC. – 1991.
11. Застосування бромвиділяючих травників H₂O₂-HBr для хімічного полірування поверхні PbTe та твердих розчинів Pb_{1-x}Sn_xTe / З.Ф. Томашик, В.М. Томашик, І.Б. Стратійчук та ін. // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – **12**, № 4. – С. 1007-1012.
12. Формирование полированных поверхностей монокристаллов PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe бром-выделяющими травителями H₂O₂-HBr-этиленгликоль / З.Ф. Томашик, Г.П. Маланич, В.Н. Томашик, и др. // Вопросы химии и хим. технологии. – 2012. – № 4. – С. 120-125.
13. Etching behavior of PbTe and Pb_{1-x}Sn_xTe crystal surfaces in aqueous H₂O₂-HBr-tartaric acid solutions / G.P. Malanych, V.N. Tomashyk, I.B. Stratiychuk, Z.F. Tomashyk // Inorgan. Mater. – 2014. – **50**, № 7. – P. 661-666.
14. Хіміко-механічне полірування монокристалів PbTe та твердих розчинів Pb_{1-x}Sn_xTe в травильних композиціях H₂O₂-HBr-етиленгліколь / Г.П. Маланич, З.Ф. Томашик, В.М. Томашик та ін. // Науковий вісник ЧНУ. Хімія. – Чернівці: ЧНУ. – 2013. – Вип. 640. – С. 72-78.

Институт физики полупроводников
им. В.Е. Лашкарева НАН Украины,
проспект Науки, 41
03680 Киев, Украина
e-mail: galya_malanich@mail.ru

Получено 09.04.2015 г.