

УДК 621.794.4:546.811/815'24

*З. Ф. ТОМАШИК, Г. П. МАЛАНИЧ, В. Н. ТОМАШИК, И. Б. СТРАТИЙЧУК, Г. А. ПАЩЕНКО,
А. С. КРАВЦОВА*

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МОНОКРИСТАЛЛОВ PbTe И Pb_{1-x}Sn_xTe БРОМВЫДЕЛЯЮЩИМИ ТРАВИТЕЛЯМИ H₂O₂-HBr- ЭТИЛЕНГЛИКОЛЬ

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, г. Киев

Исследовано химическое травление монокристаллов PbTe и твердых растворов Pb_{1-x}Sn_xTe бромвыделяющими травителями H₂O₂-HBr-этиленгликоль. Построены диаграммы "состав травителя - скорость травления", определены границы областей полирующих растворов, изучены зависимости скоростей растворения кристаллов от температуры, скорости перемешивания травителей и состава твердых растворов. Оптимизированы составы травителей и технологические режимы химического полирования поверхности, проведен ее микроструктурный и профилографический анализ после различных этапов обработки.

Введение

Полупроводниковые материалы на основе PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe широко используются для изготовления среднетемпературных термоэлектрических преобразователей, фотоприемников, а также излучателей среднего и дальнего инфракрасного диапазона оптического спектра [1]. К структурным параметрам полупроводниковых подложек и их качеству выдвигаются высокие требования, которые определяют совокупность технологических операций механической и химико-механической обработки, условия и режимы их проведения [2-4]. В связи с этим существует необходимость создания и подбора эффективных травителей с соответствующей скоростью травления материала, шероховатостью поверхности и другими специфическими свойствами. Однако существуют техно-

логические проблемы при выборе оптимальных составов полирующих травильных композиций как для химико-механического (ХМП), так и для химико-динамического (ХДП) полирования этих материалов.

Для химической обработки поверхности полупроводниковых материалов типа A^{IV}B^{VI}, A^{II}B^{VI} и A^{III}B^V часто используют бромсодержащие растворы [5], в частности травители на основе Br₂ в HBr [6-8]. 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 тра-

© З.Ф. Томашик, Г.П. Маланич, В.Н. Томашик, И.Б. Стратийчук, Г.А. Пащенко, А.С. Кравцова, 2012

вителями на основе элементарного брома сопряжена с рядом трудностей, для химической обработки поверхности полупроводников A^{III}B^V и A^{II}B^{VI} были разработаны бромвыделяющие травильные композиции на основе системы H₂O₂–HBr [9–11]. При этом бром, который выделяется в процессе взаимодействия компонентов H₂O₂ и HBr, растворяется в избытке бромистоводородной кислоты и образуются травильные смеси, похожие по своим свойствам и составу на растворы брома в HBr. Добавление в такие травители вязкого компонента, например, этиленгликоля (ЭГ), усиливает их полирующее действие, что обусловлено уменьшением скорости растворения, связанным с замедлением скорости удаления продуктов травления и доставки свежих порций активных компонентов травителя на границу раздела “кристалл–травитель”. В литературе не обнаружено данных о применении бромвыделяющих травильных композиций на основе водных растворов H₂O₂–HBr для химической обработки монокристаллов PbTe и твердых растворов Pb_{1-x}Sn_xTe, но предварительные наши исследования показали перспективность использования таких травителей для ХДП указанных полупроводниковых материалов.

Целью настоящей работы является исследование характера физико-химического взаимодействия монокристаллов PbTe и твердых растворов Pb_{1-x}Sn_xTe с бромвыделяющими растворами H₂O₂–HBr–ЭГ, установление концентрационных границ полирующих травителей, зависимостей скорости растворения материалов от температуры и скорости перемешивания травильных смесей, влияние состава твердых растворов на параметры химического травления, а также оптимизация составов полирующих травильных композиций с малыми скоростями растворения и режимов химико-динамического полирования поверхностей указанных полупроводников.

Экспериментальная часть

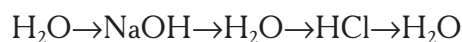
Для экспериментальных исследований использовали выращенные методом Бриджмена монокристаллы PbTe и твердых растворов Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te, Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (II), а также выращенные из паровой фазы Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (I). Монокристаллические слитки разрезали на пластины размером ~5×7×1,5 мм с помощью струнной резки. Нарушенный слой, который образовывался в процессе резки, частично удаляли механическим шлифованием водными суспензиями абразивных порошков М 10 и М 5. Для удаления с поверхности пластин загрязнений, которые вносятся в процессе резки и шлифования, проводили их промывку теплой дистиллированной водой с добавлением поверхностно-активных веществ, затем несколько раз ополаскивали дистиллированной водой и высушивали в потоке сухого воздуха. Далее подготовленные пластины приклеивали с помощью пидеина нерабочей стороной на кварцевые подложки. Остатки пидеина с поверх-

ности образцов и подложек отмывали органическими растворителями: ацетоном, толуолом и этиловым спиртом. После этого с поверхности образцов удаляли нарушенный при резке и шлифовании слой толщиной 100–150 мкм методом ХМП разработанным нами бромвыделяющим травителем системы H₂O₂–HBr–ЭГ (со скоростью полирования ≈80 мкм/мин). Скорость растворения определяли по уменьшению толщины пластин при помощи многооборотного индикатора 1МИГП с точностью ±0,5 мкм. Одновременно растворяли 4 образца, при этом отклонение при измерении толщины не превышало 5%. Поскольку процесс травления проводили в течение 2–3 мин, то погрешность в определении скоростей травления составляет 0,1–0,2 мкм/мин.

Для приготовления травильных композиций использовали 48 %-ную HBr, 35 %-ный H₂O₂ и ЭГ (все реактивы марки “ос.ч.” и “х.ч.”). Указанные компоненты смешивали в количествах, соответствующих их объемному соотношению в растворах (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:



Протравленные пластины быстро извлекали из травильного раствора и сразу же подвергали промывке для полного удаления с поверхности остатков травителя и продуктов взаимодействия кристаллов с ним. Нами установлено, что если промывать образцы только деионизированной водой, то на их поверхности образуется пленка белого цвета. Поэтому по разработанной нами методике для промывки дополнительно использовали водные растворы 15%-го NaOH и концентрированную HCl, а процесс промывки проводили поэтапно по схеме (по 30 с в каждом растворе):



После промывки образцы высушивали в потоке сухого воздуха.

Микроструктуру поверхности образцов PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe после различных этапов механической и химической обработки изучали методами металлографического и электронного микроанализа. Исследования проводили в белом свете с помощью металлографического микроскопа МИМ-7 с цифровой видеокамерой eTREK DCM800 (8 Mpix) и настольного сканирующего (растрового) электронного микроскопа JEOL JCM-5000 NeoScore. Макропрофилограммы получали с помощью автоматического профилографа-профилометра 252 модели. При работе опоры-станину

ориентировали четко горизонтально, что позволяет определять отклонения поверхности исходного образца от плоскопараллельности и их изменения после каждого типа обработки. Микропрофили поверхности образцов, определяющие характеристики шероховатости, получены на базовой длине 0,8 мм с использованием профилометра марки ALPHA STEP 100 фирмы TENCOR INSTRUMENT, позволяющего определять высоту микронеровностей 15 нм.

Результаты и их обсуждение

Исследования закономерностей растворения указанных материалов в травильных композициях H_2O_2 –HBr и H_2O_2 –HBr–ЭГ проводили в воспроизводимых гидродинамических условиях с использованием методики вращающегося диска на установке для ХДП [3,5].

На рис. 1. представлена концентрационная зависимость скоростей растворения (v) PbTe и твердых растворов $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$, $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I), $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (II) в травильных композициях системы H_2O_2 –HBr. Исследования проводили при температуре 295 К и скорости вращения диска (γ) 86 мин^{-1} в интервале концентраций 2–12 об.% H_2O_2 в HBr. Как видно из рис. 1, для всех исследуемых материалов при увеличении содержания H_2O_2 в травильной смеси с 2 до 10 об.% скорость растворения возрастает. При этом она изменяется в пределах 4,0–16,5 мкм/мин для PbTe и 4,0–15,5 мкм/мин для $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$, а также 4,5–17,0 мкм/мин и 4,5–16,0 мкм/мин для $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I) и $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (II) соответственно. В указанном концентрационном интервале поверхность всех исследуемых образцов характеризуется зеркальным блеском, а при увеличении содержания H_2O_2 в составе травителя до 12 об.% H_2O_2 –HBr качество поверхности исследуемых образцов ухудшается и скорость травления несколько уменьшается.

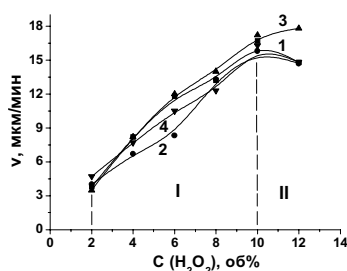


Рис. 1. Зависимость скорости растворения (мкм/мин) поверхности монокристаллов PbTe (1), $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$ (2), $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I) (3) и $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (II) (4) от концентрации H_2O_2 (об.%) в растворах системы H_2O_2 –HBr ($T=295 \text{ K}$, $\gamma=86 \text{ мин}^{-1}$)

Добавление ЭГ к водным растворам H_2O_2 –HBr частично регулирует процесс химического взаимодействия исходных компонентов травителя с выделением свободного брома, увеличивает вяз-

кость раствора, что улучшает полирующие свойства травителя и способствует переводу в раствор продуктов взаимодействия. При использовании трехкомпонентного травителя подбор оптимального соотношения компонентов для решения поставленной задачи методом однофакторного эксперимента – процесс трудоемкий и длительный [12]. С изменением концентраций компонентов изменяется вязкость раствора и, как следствие, скорости химических реакций и диффузионных процессов доставки реакционно-активных компонентов к поверхности травления и отвода продуктов реакции обратно в объем раствора. Поэтому рациональным подходом при подборе соотношений компонентов травителей можно считать использование математического планирования эксперимента на симплексе (метод симплексных решеток Шеффе) [13].

Диаграммы “состав травителя–скорость травления” PbTe и твердых растворов $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$, $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I), $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (II) в водных растворах системы H_2O_2 –HBr–ЭГ приведены на рис. 2. Исследуемый интервал составов травителей (рис. 2,а) ограничен треугольником ABC при объемном соотношении H_2O_2 :HBr:ЭГ в вершинах A, B, C соответственно: A – 2:98:0; B – 2:48:50; C – 10:90:0. Такой выбор концентрационного интервала обусловлен в первую очередь необходимостью исключения из исследований областей пассивации. Из рис. 2,б видно, что скорость растворения монокристаллов PbTe в растворах H_2O_2 –HBr–ЭГ достигает максимальных значений – 16,5 мкм/мин – при содержании 10 об.% H_2O_2 в HBr (вершина C на диаграммах). Минимальные скорости травления – 4,0 мкм/мин – достигаются в смесях, обогащенных бромистоводородной кислотой (при содержании 98 об.% HBr, вершина A на диаграммах), а также в наиболее разбавленных ЭГ составах – 2,5 мкм/мин (вблизи угла B на диаграммах). Большинство травителей системы H_2O_2 –HBr–ЭГ являются полирующими за исключением области неполирующих травителей, ограниченной концентрациями, об.‰: (2–3) H_2O_2 :(66,5–92)HBr:(6–31,5)ЭГ.

При химическом травлении образцов $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$ (рис. 2,в) минимальная скорость травления наблюдается в смесях с наибольшим содержанием ЭГ при объемном соотношении $2H_2O_2$:48HBr:50ЭГ и в растворах с максимальным содержанием HBr (2,0 и 4,0 мкм/мин соответственно), а максимальную скорость растворения – 15,5 мкм/мин выявлено в растворах, обогащенных перекисью водорода. Следует отметить, что почти все растворы этого интервала формируют блестящую полированную поверхность высокого качества для $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$, за исключением неполирующей области, ограниченной концентрациями компонентов, об.‰: (5–7) H_2O_2 :(75–

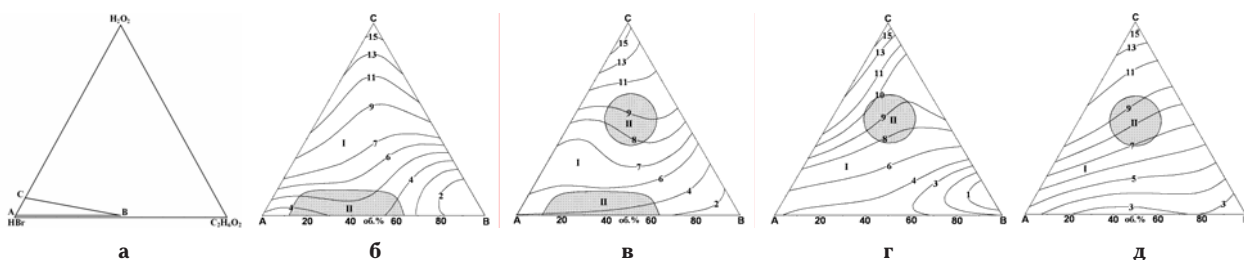


Рис. 2. Концентрационная зависимость скорости травления (мкм/мин) ($T=300\text{ K}$, $\gamma=86\text{ мин}^{-1}$) монокристаллов PbTe (а), Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te (б), Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (I) (в) и Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (II) (г) в бромвыделяющих растворах при объемном соотношении H₂O₂:HBr:ЭГ в вершинах треугольника ABC соответственно, об. %: А – 2:98:0; В – 2:48:50; С – 10:90:0 (I – области полирующих, II – неполирующих растворов)

88)HBr:(6–20)ЭГ и (2–3)H₂O₂:(66,5–92)HBr:(6–31,5)ЭГ (рис. 2,в).

Как видно из рис. 2,г и 2,д, наибольшие скорости растворения монокристаллов Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (I), и Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (II) наблюдаются в растворах с максимальным содержанием перекиси водорода (17,0 и 16,0 мкм/мин соответственно). С увеличением содержания в травителе бромистоводородной кислоты до 98 об. % HBr скорость растворения указанных материалов падает до 4,5 мкм/мин. При максимальном содержании ЭГ в травильной смеси ее можно еще уменьшить добавлением ЭГ и достичь значений 1,5–2,0 мкм/мин. Для этих материалов области полирующих травителей занимают приблизительно 90% изученного концентрационного интервала, за исключением небольшой области неполирующих растворов, об. %: (5–7)H₂O₂:(75–88)HBr:(6–20)ЭГ.

Таким образом, можно сделать вывод, что с увеличением содержания олова в составе твердых растворов Pb_{1-x}Sn_xTe уменьшается область неполирующих растворов в системе H₂O₂–HBr–ЭГ. Также выявлено, что растворы с содержанием, об. %: (2–10)H₂O₂:(48–98)HBr:(0–50)ЭГ наиболее перспективны для формирования на их основе полирующих травителей для ХДП исследованных материалов, поскольку после травления такими составами практически на всех образцах PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe поверхность приобретает зеркальный блеск.

Анализируя диаграммы “состав травителя– скорость травления” PbTe и твердых растворов Pb_{1-x}Sn_xTe в травильных композициях H₂O₂–HBr–ЭГ видно, что они похожи между собой. Это свидетельствует о том, что процесс растворения указанных материалов в исследуемых травителях является однотипным и, вероятно, определяется растворением анионной подрешетки телура.

Для определения кинетических закономерностей процесса растворения PbTe и твердых растворов Pb_{1-x}Sn_xTe, исследовали зависимость скорости растворения (v) вышеуказанных материалов от скорости вращения диска (γ) и от температуры в растворе состава, об. %: 4H₂O₂+83,5HBr+12,5ЭГ. Исследования проводили в температур-

ном интервале 280–305 К при скорости вращения диска 36–120 мин⁻¹. На рис. 3,а представлены зависимости скорости растворения исследованных материалов от скорости вращения диска в координатах $v^{-1}-\gamma^{-1/2}$. Анализируя их можно сделать вывод, что процесс растворения PbTe, Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te, Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (I) и Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te (II) протекает по диффузионному механизму, поскольку соответствующие прямые экстраполируются в начало координат. Эти данные подтверждаются изучением температурных зависимостей скорости растворения (рис. 3,б) построенных в координатах $\ln v-10^3/T$ при скорости вращения диска $\gamma=86\text{ мин}^{-1}$, поскольку рассчитанная из уравнения Аррениуса ($v=C_E \cdot e^{-E_a/RT}$) кажущаяся энергия активации E_a (табл. 1) во всех случаях не превышает 14 кДж/моль, что характерно для процессов растворения, лимитирующей стадией которых является диффузия [14].

Таблица 1
Предэкспоненциальный множитель $\ln(C_E)$ и кажущаяся энергия активации (E_a) процесса растворения (кДж/моль) PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe в полирующем травителе

Полупроводник	Состав травителя, об. %: 4H ₂ O ₂ +83,5HBr+12,5ЭГ		
	$\ln(C_E)$	E_a , кДж/моль	механизм растворения
PbTe	5,4	8,7	диффузионный
Pb _{0,83} Sn _{0,17} Te	5,2	8,4	диффузионный
Pb _{0,8} Sn _{0,2} Te (I)	7,2	13,1	диффузионный
Pb _{0,8} Sn _{0,2} Te (II)	5,7	9,7	диффузионный

Типичные макропрофили поверхности пластин PbTe после резки, а также после полирования методом ХМП в травителе состава, об. %: 6H₂O₂–74HBr–20 ЭГ и ХДП в травителе состава: об. %: 4H₂O₂–58,5HBr–37,5ЭГ приведены на рис. 4. Характер профилограмм свидетельствует о том, что ХМП приводит к улучшению плоскостности. Кроме того, при проведении ХМП наблюдается отклонение от плоскопараллельности, которое в данном случае нивелирует “клин” (рис. 4, профиль 1).

Оценку шероховатости проводили расчетом

стандартных параметров шероховатости: R_z — суммы средних арифметических абсолютных отклонений точек пяти наибольших по величине минимумов и пяти наибольших максимумов в пределах базовой длины; R_a — среднего арифметического абсолютных значений отклонения профиля от базовой (средней) линии в пределах базовой длины; R_{max} — высоты максимальной неровности в пределах базовой длины. Данные о значениях этих параметров приведены в табл. 2, и свидетельствуют о следующем:

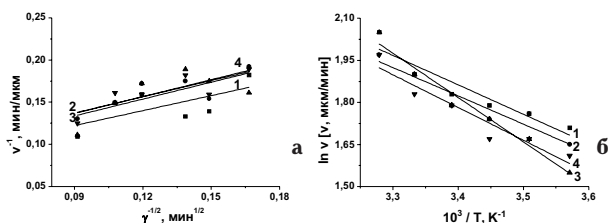


Рис. 3. Зависимость скорости растворения (мкм/мин) поверхности монокристаллов РbТе (1), $Pb_{0,83}Sn_{0,17}Te$ (2), $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I) (3) и $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (II) (4) от: а — скорости вращения диска (γ) при $T=300$ К и б — температуры (T) при $\gamma=86$ мин⁻¹ в растворе, содержащем, об. %: $4H_2O_2+83,5HBr+12,5\Delta$

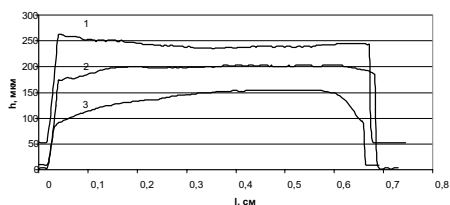


Рис. 4. Профиллограммы поверхности образца РbТе: 1 — после резки, 2 — после ХМП полирующим травителем, об. %: $6H_2O_2-74HBr-20\Delta$; 3 — после ХДП полирующим травителем, об. %: $4H_2O_2-58,5HBr-37,5\Delta$

1) параметры шероховатости образцов $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I) немного лучше по сравнению с образцами РbТе, что может быть связано с разной твердостью и структурными особенностями этих материалов;

2) после ХМП для $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ (I) параметр R_z становится меньше в 5 раз по сравнению со шлифованной поверхностью и в 7 раз меньше относительно поверхности после резки; значения R_a уменьшаются соответственно в 5 и 10 раз, что свидетельствует о сглаживании неровностей и более равномерном их распределении по высоте; для R_{max} после ХМП эти значения уменьшаются в 5 и 7 раз соответственно;

3) операция ХДП по сравнению с ХМП характеризуется несколько худшими параметрами шероховатости, это может быть связано с тем, что при ХМП на поверхность образца оказывают совместное воздействие химически активная (травящая) среда и мягкий полировальник, что способствует равномерному травлению по всей повер-

хности образца, а также сглаживанию всех выступов и микронеровностей.

На рис. 5 представлена микроструктура поверхности монокристаллов РbТе после различных этапов механической и химической обработки: после резки, а также после ХМП и ХДП полирующими травителями. Фотографии сделаны с помощью металломикроскопа (а) и электронного микроскопа (б, в, г). Как видно из рис 5,в и рис. 5,г, при химической обработке монокристаллов РbТе полирующими растворами, об. %: $6H_2O_2-74HBr-20\Delta$ (в случае ХМП) и $4H_2O_2-58,5HBr-37,5\Delta$ (при ХДП), поверхности образцов имеют характерный для полированной поверхности вид.

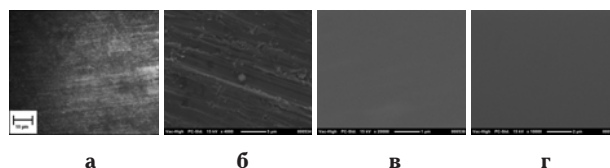


Рис. 5. Микроструктура поверхности монокристаллов РbТе: а, б — после струнной резки; в — после ХМП полирующим травителем, об. %: $6H_2O_2-74HBr-20\Delta$; г — после ХДП полирующим травителем состава, об. %: $4H_2O_2-58,5HBr-37,5\Delta$ (а — МИМ-7; б, в, г — электронный микроскоп JEOL JCM-5000 NeoScope)

Таким образом, предложенные полирующие бромвыделяющие травители $H_2O_2-HBr-\Delta$ и методики обработки поверхности монокристаллических пластин РbТе и $Pb_{1-x}Sn_xTe$ способствуют значительному уменьшению шероховатости поверхности по сравнению с ее величиной, полученной после резки слитка на пластины и после ее шлифования. Преимуществами разработанных бромвыделяющих травителей по сравнению с бромсодержащими является: отсутствие необходимости использования токсического свободного Br_2 ; упрощение процесса приготовления смесей; высокое качество полирования монокристаллов РbТе и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$.

Выводы

В воспроизводимых гидродинамических условиях с использованием методики вращающегося диска исследовано физико-химическое взаимодействие монокристаллов РbТе и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с травильными композициями $H_2O_2-HBr-\Delta$. Построены диаграммы “состав травителя—скорость травления” и определены границы областей полирующих и неполирующих растворов. Показано, что увеличение содержания олова в составе твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ приводит к уменьшению областей неполирующих растворов на соответствующих диаграммах. Из зависимостей скоростей растворения от температуры и скорости вращения диска установлено, что процесс растворения исследуемых материалов в полирующих растворах $H_2O_2-HBr-\Delta$ лимитируется диффузионными стадиями. Для химической обработки монокристаллов РbТе и $Pb_{1-x}Sn_xTe$

Параметры шероховатости поверхности PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe после различных этапов механической и химической обработки

Образец	Этапы обработки	R _z , мкм	R _a , мкм	R _{max} , мкм	Состояние поверхности
PbTe	струнная резка	1,54	0,5	2,0	волнистая, рельефная поверхность со следами реза (продольные полосы, небольшие уступы)
	струнная резка + шлифование свободным абразивом	0,9	0,25	1,2	шероховатая
	струнная резка + шлифование свободным абразивом + ХМП	0,25	0,07	0,27	ровная, зеркально-гладкая
	струнная резка + шлифование свободным абразивом + ХМП + ХДП	0,29	0,11	0,45	ровная, зеркально-гладкая
Pb _{0,8} Sn _{0,2} Te (I)	струнная резка	1,32	0,55	1,8	волнистая, рельефная поверхность со следами реза (продольные полосы, небольшие уступы)
	струнная резка + шлифование свободным абразивом	0,8	0,28	1,25	шероховатая
	струнная резка + шлифование свободным абразивом + ХМП	0,18	0,05	0,22	ровная, зеркально-гладкая,
	струнная резка + шлифование свободным абразивом + ХМП + ХДП	0,26	0,09	0,32	ровная, зеркально-гладкая,

впервые предложено использовать бромвыделяющие травильные композиции на основе водных растворов системы H₂O₂-HBr-ЭГ с небольшими (1–17 мкм/мин) скоростями травления. Оптимизированы составы травителей и технологические режимы проведения операций химической обработки поверхности после ХДП указанных полупроводниковых материалов, а также разработано последовательность этапов промывки исследуемых образцов после процессов ХМП и ХДП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шелимова Л.Е., Томашик В.Н., Грыцив В.И. Диаграммы состояния в полупроводниковом материаловедении (системы на основе халькогенидов Si, Ge, Sn, Pb). Справочник. – М.: Наука, 1991. – 368 с.
2. Перевоицков В.А., Скупов В.Д. Особенности абразивной и химической обработки поверхности полупроводников. – Нижний Новгород: ННГУ, 1992. – 198 с.
3. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников / Луфт Б.Д., Перевоицков В.А., Возмилова Л. Н. и др. – М.: Радио и связь, 1982. – 136 с.
4. Сангвал К. Травление кристаллов: теория, эксперимент, применение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 496 с.
5. Перевоицков В.А. Процессы химико-динамического полирования поверхности полупроводников // Высокочистые вещества. – 1995. – № 2. – С.5-29.
6. Chemical dissolution of indium arsenide in the Br₂-HBr solutions / Z.F. Tomashik, S.G. Danylenko, V.N. Tomashik, M.Yu. Kravetski // Semicond. Phys., Quantum Electronics and Optoelectronics. – 1999. – Vol.2. – № 4. – С.73-75.
7. Notten P.H.L., Damen A.A.J.M. The Electrochemistry

of InP in Br₂/HBr Solutions and Its Relevance to Etching Behaviour // Appl. Surf. Sci. – 1987. – Vol.28. – P.331-344.

8. Nicorici A., Shklover V., Tudosiciuc A. Low temperature X-Ray powder diffraction study of lead telluride doped with Yb // J. of optoelectronics and advanced materials. – 2008. – Vol.10. – № 4. – P.860-861.

9. Влияние легирования теллурида кадмия на химическое взаимодействие с растворами системы H₂O₂ – HBr / И.Б. Стратийчук, Э.Ф. Томашик, В.Н. Томашик, П.И. Фейчук // Неорган. материалы. – 2004. – Т.49. – № 12. – С.2095-2100.

10. Томашик Э.Ф., Кусяк Н.В., Томашик В.Н. Химическое травление InAs, InSb, GaAs в растворах системы H₂O₂-HBr // Неорган. материалы. – 2002. – Т.38. – № 5. – С.535-538.

11. Химическое травление монокристаллов CdHg_{1-x}Te в бромвыделяющих водных растворах H₂O₂-HBr – растворитель / И.И. Гнатив, Э.Ф. Томашик, В.Н. Томашик, И.Б. Стратийчук // Журн. прикл. химии. – 2006. – Т.79. – № 6. – С.914-919.

12. Травление смесью HNO₃+HCl + глицерин слоев металлизации на гетероструктурах GaAs/Al_xGa_{1-x}As / Арбенина В.В., Мармалюк А.А., Арбенин Д.Е., Будкин И.В., Говорков О.И // Неорган. материалы. – 2008. – Т.44. – № 12. – С.1418-1424.

13. Новик Ф.С. Планирование эксперимента на симплексе при изучении металлургических систем. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

14. Репинский С.М. Физико-химический аспект процессов на границе раздела полупроводник-раствор // Некоторые проблемы физики и химии поверхности полупроводников. – Сибирское отделение Новосибирск: Наука, 1972. – С.9-72.

Поступила в редакцию 26.04.2012