УДК 621.794.4:546.811/815'24

ХИМИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН РbTe И Pb_{1 – r}Sn_rTe

© 2020 г. Г. П. Маланич^{1, *}, В. Н. Томашик¹, А. А. Корчевой¹

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

*e-mail: galya.malanich@gmail.com Поступила в редакцию 20.11.2019 г. После доработки 31.01.2020 г. Принята к публикации 03.03.2020 г.

Исследован процесс химико-механического и химико-динамического полирования поверхности монокристаллов PbTe и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_x$ Te бромвыделяющими травителями на основе водных растворов ($H_2O_2 + HBr +$ этиленгликоль)/глицерин. Изучены зависимости скоростей химико-механического и химико-динамического полирования от разбавления базового полирующего травителя органическим компонентом. Оптимизированы составы полирующих смесей и режимы проведения операций химического травления на основании металлографических исследований поверхности кристаллов, измерений их шероховатости, а также элементного состава поверхности образцов.

Ключевые слова: химическое травление, теллурид свинца, скорость растворения **DOI:** 10.31857/S0002337X20080096

ВВЕДЕНИЕ

В современной технологии полупроводниковых материалов значительную роль играют обработка их поверхности и подготовка к формированию на ней рабочих элементов приборов. Особое значение придается получению поверхностей, максимально совершенных по структуре, геометрии и однородных по химической природе и чистоте, что является важным условием изготовления на их основе качественных полупроводниковых устройств. Этап химической обработки кристаллов РbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe особенно важен при создании рабочих элементов приборов, поскольку он приводит к удалению нарушенного слоя, образовавшегося в результате предыдущих механических обработок, а также способствует получению высокочистых, максимально совершенных по структуре и однородных по химическому составу поверхностей. Эти проблемы успешно решаются использованием жидкофазного травления. Процесс химического полирования имеет ряд недостатков: не сохраняются плоскопараллельность противоположных сторон и гладкость пластин; образцы травятся неравномерно, часто наблюдается селективный характер травления; на поверхности образцов возможно образование пленки химических соединений, не растворяющихся в процессе травления и удаляющихся только дополнительной обработкой.

Чтобы предотвратить вышеперечисленные недостатки, следует использовать метод химикомеханического полирования (ХМП). Процесс ХМП осуществляется в результате совместного воздействия химических и механических факторов и приблизительно описывается уравнением Престона [1, 2]. На практике процесс ХМП проводят на изготовленном из мягких натуральных или искусственных тканей полировальнике, на который подают травильный раствор или суспензию, состоящую из травителя и абразивных частиц (Al₂O₃, SiO₂, CeO₂, Mn₂O₃ и др.). Однако при использовании суспензий возникают некоторые трудности, связанные с агломерацией абразивных частиц с течением времени, в результате чего ухудшаются свойства самой полирующей смеси и качество полирования. Типичными для процесса ХМП с использованием суспензий являются различные дефекты: остатки полирующей суспензии, царапины, каверны. По причине более активного химического травления одного из материалов могут возникать углубления до десятков нанометров с неровной поверхностью, повторяющие рисунок, выполненный этим материалом на поверхности подложки. Поэтому в большинстве случаев операцию ХМП проводят в специальном для каждого полупроводникового материала полирующем травителе. При таком полировании реактивы окисляют или растворяют поверхностные слои пластин, а полировальник механически удаляет продукты взаимодействия и микроскопические частицы полупроводника. Съем материала, качество поверхности и геометрические параметры подложек в большой степени зависят от состава полирующей смеси, температуры обработки, давления на пластину и материала полировальника.

Поскольку кристаллы РbTe и Pb_{1 - x}Sn_xTe характеризуются низкими значениями микротвердости, их механическая обработка (резка, шлифование, полирование) приводит к образованию нарушенного слоя в несколько сотен микрон [3, 4]. Удаление нарушенного слоя полирующим травлением влияет на планарность пластины, что имеет большое значение, если пластины используются как подложки для эпитаксиального роста пленок. При обработке кристаллов группы А^{IV}В^{VI} наилучшие результаты достигаются именно после ХМП: шероховатость поверхности рельефа не превышает $H_z = 40-60$ Å, а толщина приповерхностного оксидного слоя составляет 65–130 Å [5]. Учитывая это, кроме абразивной обработки с максимально мелким зерном на заключительных этапах, особое внимание уделяли ХМП, поскольку только благодаря ему удалось получить максимально гладкую, ровную, с минимальным нарушенным слоем поверхность, что ни механической, ни чисто химической обработкой отдельно получить не удавалось. Авторы [6] также подчеркивают, что качество обработанной поверхности значительно лучше при обработке методом ХМП.

Отмечено, что растворы $K_3[Fe(CN)_6]$: NaOH : : глицерин (этиленгликоль) являются полирующими для образцов *p*-PbTe и *p*-Pb_{1-x}Sn_xTe, тогда</sub> как для $n-Pb_{1-x}Sn_xTe$ только некоторые составы обладают полирующими свойствами, а для *n*-PbTe они являются селективными. В работе [7] ХМП монокристаллов *n*-Pb_{1-x}Sn_xTe ($0 \le x \le 0.24$), ориентированных в плоскости (100), проводили травителем состава 2 об. % Br₂ : 98 об. % HBr, а после травления образцы промывали чистой водой и сушили в потоке очищенного N2. Нитевидные монокристаллы Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te (100) *р*- и *n*-типа, полученные методом сублимации, после ХМП травили раствором, содержащим 10 частей (95% HBr + 5% Br₂) и 1 часть толуола [8]. Использование такого травителя для химического полирования нитевидных кристаллов Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te с примесью индия обеспечивает получение зеркально гладкой поверхности без оксидной пленки, что, по мнению авторов, связано с тем, что в состав раствора введен толуол, который регулирует интенсивность растворения.

Однако травильные смеси на основе элементарного брома характеризуются большими скоростями полирования, а их компоненты высокотоксичны, в связи с чем возникают трудности при их приготовлении и контроле состава, а также необходимость в использовании специального оборудования. Более практичными и перспективными являются бромвыделяющие травильные смеси [9], в которых бром выделяется в результате окислительно-восстановительных химических реакций между компонентами травителя: окислителем (H_2O_2) и соединениями брома (HBr).

В работе [10] разработана методика процесса ХМП монокристаллов РbТе и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ травильными смесями $H_2O_2 + HBr$ (40%)/этиленгликоль (ЭГ). Установлено, что скорость ХМП можно изменять в пределах 0.5-80.0 мкм/мин путем варьирования соотношения базового травителя и вязкого компонента (ЭГ). Данный вид химической обработки является важным этапом в подготовке поверхности рабочих элементов полупроводниковых приборов, который позволяет обеспечить однородность и гладкость поверхности и избежать ее загрязнения. Поэтому был исследован процесс химико-динамического полирования (**ХДП**) PbTe и Pb_{1 – x}Sn_xTe травильными смесями на основе растворов системы H₂O₂-HBr. Установлено, что растворы, содержащие от 2 до 10 об. % H₂O₂ в HBr, формируют полированную поверхность, а дальнейшее увеличение содержания H2O2 в смесях приводит к образованию неполирующих растворов. Скорости полирования (v_{пол}) в таких травильных смесях изменяются от 3.8 до 17.2 мкм/мин [9]. Введение этиленгликоля в травильные смеси H₂O₂ + HBr приводит к уменьшению скорости травления до 1.5 мкм/мин и увеличению области полирующих растворов [11].

Травильные смеси для ХМП должны удовлетворять целому ряду требований: обеспечивать необходимую скорость травления без образования нерастворимых либо труднорастворимых продуктов реакции: быть инертными к материалу полировальника и оборудования; обладать низкой степенью токсичности [12]. Этим требованиям отвечают некоторые составы травильных композиций на основе растворов H₂O₂-HBr-ЭГ. Нами разработан процесс ХМП и ХДП РbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe травильными смесями на основе растворов H₂O₂-HBr–ЭГ, которые характеризуются наибольшей вязкостью среди исследуемых систем, средними скоростями травления, а также высокими полирующими свойствами. Практический интерес представляют растворы H₂O₂-HBr-ЭГ, разбавленные глицерином (ГЛ), поскольку для ГЛ динамическая вязкость $\eta = 1450$ мПа с, тогда как для ЭГ она составляет только 19.8 мПа с.

Цель работы — влияние дополнительного количества вязкого компонента (глицерина) в травильных смесях $H_2O_2 + HBr + \Im\Gamma$ на процесс ХМП и ХДП поверхности монокристаллов PbTe и Pb_{1 — x}Sn_xTe и определение морфологии поверхности после ХМП и ХДП методами атомно-силовой микроскопии (ACM), микроструктурного и профилографического анализов, а также оптимизация составов полирующих смесей и режимов проведения операций для формирования сверхгладкой полированной поверхности исследуемых пластин.

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 (~5 × 7 × × 1.5 мм), а также их предварительную обработку проводили по разработанной ранее методике [10, 11].

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

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

$$H_2O(дист.)^{30c} \rightarrow 15\%NaOH^{30c} \rightarrow$$

→ $H_2O(дист.)^{30c} \rightarrow HCl(конц.)^{30c} \rightarrow H_2O(дист.)^{30c}$.

Высушивание образцов проводили в потоке сухого воздуха.

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

Для приготовления травителей использовали 48%-ную HBr, 35%-ный H_2O_2 , ЭГ и ГЛ (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. %. Приготовленные растворы перед процессом травления выдерживали в течение 2 ч до окончательного прекращения газообразования в реакции, происходящей между исходными компонентами травителя:

$$H_2O_2 + 2HBr = Br_2 + 2H_2O_2$$

Морфологические исследования полированных поверхностей монокристаллов PbTe проводили с помощью сканирующего зондового микроскопа NanoScope IIIa Dimension 3000 (Digital Instruments/Brukes Corp.) методом ACM в режиме периодического контакта (*tapping mode*) при комнатных условиях с точностью ± 1 нм. Измерения проведены в центральной зоне образцов с использованием серийных кремниевых зондов Naпо World с номинальным радиусом округления острия до 10 нм, марки NCH. 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 вакуум 10^{-3} Па (ускоряющее напряжение 15 кВ). В результате электронного микроанализа были получены фотографии (увеличение от $10 \times$ до 20000×) микроструктуры поверхностей монокристаллов PbTe после различных этапов обработки. Контроль качества полированных поверхностей проводили также с использованием металлографического микроскопа МИМ-7. Совмещенная с микроскопом цифровая видеокамера eTREK DCM800 (8 Mpix) позволяла на мониторе визуально наблюдать за состоянием поверхности объекта.

Элементный состав поверхности образцов исследовали с помощью растрового электронного микроскопа ZEISS EVO 50XVP с разрешением до 2 нм, укомплектованного энергодисперсионным анализатором рентгеновских спектров INCAPentaFETx3 для элементного анализа, с погрешностью ~0.1%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из анализа экспериментальных данных следует, что для ХДП монокристаллов 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) практический интерес представляют полирующие растворы (об. %): (2–10) H_2O_2 : (48–98) HBr : : (0–50) ЭГ [11], так как после травления в них сформированная поверхность характеризуется зеркальным блеском. Скорости полирования ($v_{пол}$)



Рис. 1. Зависимости скоростей XMП (T = 294 K, $\gamma = 90$ мин⁻¹) монокристаллов PbTe (*I*), Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te (*2*), Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te (*3*) от разбавления базового полирующего травителя (БР) ГЛ.

в таких травильных смесях изменяются от 1.5 до 17.2 мкм/мин.

Для того чтобы получить высококачественную полированную поверхность полупроводниковых кристаллов с идеальной плоскостностью в макромасштабе, лучше использовать метод ХМП, поскольку при ХДП неизбежно присутствует незначительная завальцовка краев [13], обусловленная тем, что вблизи края пластины скорость растворения всегда немного больше. Следует отметить, что за счет действия механической составляющей скорость снятия материала методом ХМП в несколько раз больше по сравнению с использованием этого травителя для ХДП. Принимая во внимание вышесказанное, мы выбрали базовый травитель БР, который содержит H₂O₂ + HBr + ЭГ и обладает хорошими полирующими свойствами. Этот травитель характеризируется скоростями ХДП: 8.2 для PbTe, 8.4 для Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te, 7.7 мкм/мин для Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te. На рис. 1 и 2 представлена разница в скоростях травления с использованием методов ХМП и ХДП поверхностей РbTe и твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$. Видно, что скорость XMП (рис. 1) в базовом травителе составляет: 185.0 для РbTe, 164.5 для Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te, 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 улучшения качества обрабатываемой поверхности, а также уменьшения скорости химического полирования непосредственно перед проведением самого процесса к базовому травителю дополнительно приливали определенное количество модификатора вязкости – ГЛ. По мере разбавления базового травителя БР скорость ХМП изменяется в пределах 185.0-1.0 мкм/мин (рис. 1), а скорость ХДП падает от 8.4 до 0.3 мкм/мин (рис. 2). Разница в скоростях ХМП и ХДП постепенно уменьшается, что свидетельствует о зависимости скорости ХМП от скорости химической реакции. При разбавлении БР от 100 до 10 об. % при ХМП поверхности полупроводниковых материалов получались полированными и высокого качества. В то время как для процесса ХДП интервал полирующих растворов составлял от 100 до 70 об. % БР в ГЛ, при увеличении количества ГЛ до 70% скорости ХДП уменьшались до 0.

На рис. 3 представлены микрофотографии полированной поверхности PbTe, а также после предварительного этапа шлифования. Микроструктурные исследования кристаллов PbTe и Pb_{1-x}Sn_xTe показали, что после проведения XMП качество полированной поверхности наилучшее. Это подтверждается и результатами ACM-исследований. В табл. 1 представлены данные с параметром R_a (средняя арифметическая шероховатость) для поверхности монокристаллов PbTe после механической и химической обработок. Анализ данных ACM показал, что поверхность исследуемых образцов после XMП характеризуется меньшими параметрами шероховатости ($R_a = 0.9$ нм), чем после



Рис. 2. Зависимости скоростей ХДП (T = 294 K, $\gamma = 78$ мин⁻¹) монокристаллов PbTe (*1*), Pb_{0.83}Sn_{0.17}Te (*2*), Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te (*3*) от разбавления базового полирующего травителя (БР) ГЛ.

процесса ХДП ($R_a = 2.2$ нм). Несколько лучшие параметры шероховатости после ХМП, возможно, связаны с тем, что на поверхность образца оказывают совместное воздействие химически активная среда (травитель) и мягкий полировальник, что в свою очередь способствует равномерному травлению по всей поверхности образца, а также сглаживанию всех выступов и микронеровностей. После химической обработки (ХМП и ХДП) формируется полированная поверхность с параметрами шероховатости, которые соответствуют требованиям, предъявляемым к полированным сверхгладким поверхностям полупроводниковых материалов ($R_a < 10$ нм) [14]. Стоит отметить, что использование ГЛ в качестве органического растворителя при ХМП исследуемых монокристаллических пластин способствует формированию высококачественной сверхгладкой полированной поверхности с $R_a < 1$ нм.

Таблица 1. Параметры шероховатости поверхности монокристаллических образцов PbTe после механической и химической обработок (профилометр HOMMEL-ETAMIC W5 и микроскоп NanoScope IIIa Dimension 3000)						
			Площадь			

Этапы обработки	<i>R_a</i> , нм	Состояние поверхности**	Площадь анализируемого фрагмента	
Струнная резка	1420	Волнистая, рельефная поверхность со следами реза (продольные полосы, небольшие уступы)	$1.5 \times 0.25 \text{ мм}^2$	
Шлифование свободным абразивом М 1	40	Матовая, со структурными дефек- тами, шероховатая	$1.5 \times 0.25 \text{ mm}^2$	
ХМП (БР)	0.9*	Полированная поверхность, зеркаль-	2 × 2 2	
ХДП (БР)	2.2*	ный блеск	3 × 3 MKM ²	

Примечание. *R_a* – среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой длины (профилометр HOMMEL-ETAMIC W5). * Средняя арифметическая шероховатость поверхности (микроскоп NanoScope IIIa Dimension 3000).

** МИМ-7 с цифровой видеокамерой eTREK DCM800 (8 Mpix).



Рис. 3. Микроструктура поверхности монокристалла PbTe после шлифования абразивом ACM 1/0 (а), после XMП (б) и после XДП (в) полирующим травителем (H₂O₂ + HBr + ЭГ)/ГЛ.

Рентгеноспектральный микроанализ подтвердил эффективность разработанной методики химической обработки и послеоперационной отмывки, поскольку на поверхности исследуемых пластин отсутствовали такие элементы, как Br, Cl и Na, которые входят в состав травителей и растворов для промывки образцов. На полирующих поверхностях не выявлено кислорода и углерода. При этом элементы матрицы монокристалла PbTe после полирования в разработанных растворах $(H_2O_2 + HBr + \Im\Gamma)/\Gamma\Pi$ близки к стехиометрическому составу (табл. 2).

Таким образом, предложенные травильные смеси характеризуются широким спектром скоростей ХМП. Такие растворы можно использовать для снятия нарушенного слоя, а также для снятия тонких слоев с поверхности пластин. Разработанные полирующие растворы характеризируются значениями рН 6.0–7.0.

Тип обработки (на воздухе)	Концентрации элементов, ат. %						
	Te/Pb	С	0	Br	Cl	Na	
Струнная резка	1.07	39.17	6.33	_	_	_	
ХМП (БР)*	1.08	_	_	—	—	—	
ХМП (БР/ГЛ)*	1.05	—	—	_	_	_	
ХДП (БР)*	1.07	—	—	—	—	—	

Таблица 2. Элементный состав поверхности кристаллов РЬТе после поэтапной обработки

* Продолжительность 2 ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован процесс взаимодействия поверхности полупроводниковых монокристаллов PbTe и $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с травильными смесями ($H_2O_2 + HBr + \Theta\Gamma$)/ГЛ.

Показано, что скорость съема исследуемых кристаллов в процессе химической обработки зависит от концентрации вязкого компонента в составе травильной смеси и изменяется в процессе ХМП в пределах 1.0–185.0 мкм/мин, а при ХДП – от 0.3 до 8.4 мкм/мин.

На основе экспериментальных исследований оптимизированы составы полирующих смесей для различных видов обработки методом ХМП и ХДП: удаления с поверхности нарушенного слоя, контролируемого утонения пластин до заданной толщины, снятия тонких слоев. Показано, что обработка исследуемых кристаллов растворами $(H_2O_2 + HBr + \Im\Gamma)/\GammaЛ$ приводит к формированию сверхгладкой полированной поверхности ($R_a < 10$ нм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Oliver M.R. Chemical-Mechanical Planarization of Semiconductor Materials. N.Y.: Springer, 2004. 524 p.
- 2. Гольдитейн Р.В., Осипенко М.Н. Химико-механическое полирование. Ч. 1. Основные закономерности: обзор // Вестн. Пермского ун-та. Механика. 2011. № 3. С. 26–42.
- Engel A., Berger H., Roesler H.-J. Structural Characterization of Cut and Polished PbTe Surfaces // Cryst. Res. Technol. 1982. V. 17. P. 857–864. https://doi.org/10.1002/crat.2170170711
- Crocker A.J., Wilson M. Microhardness in PbTe and Related Alloys // J. Mater. Sci. 1978. V. 13. № 4. P. 833–842. https://doi.org/10.1007/PE00570520
 - https://doi.org/10.1007/BF00570520
- 5. Зломанов В.П., Гаськов А.М., Крылюк О.Н., Крылова И.В. Способ подготовки монокристаллических

образцов твердых растворов на основе халькогенидов свинца для вакуумной эпитаксии: Патент № 1343897 СССР. Опубл. 08.07.87.

- Hitova L., Trifonova E.P. Chemical-Mechanical Polishing of *n*-PbTe and *n*-Pb_{1-x}Sn_xTe Crystals // Cryst. Res. Technol. 1984. V. 19. P. 105–108. https://doi.org/10.1002/crat.2170191128
- 7. *Sternberg Y., Yellin N.* Solvent Inclusions in LPE Grown PbSnTe Layers // J. Cryst. Growth. 1981. V. 53. № 3. P. 535–541. https://doi.org/10.1016/0022-0248(81)90136-6
- 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.
- Маланич Г.П., Томашик В.М., Стратийчук И.Б., Томашик З.Ф. Химическое травление монокристаллов РbTе и Pb_{1-x}Sn_xTe растворами H₂O₂-HBr с использованием разной исходной концентрации HBr // Оптоэлектроника и полупровод. техника. 2015. Вып. 50. С. 94–101.
- Маланич Г.П., Томашик З.Ф., Томашик В.М., та ін. Хіміко-механічне полірування монокристалів РbTе та твердих розчинів Pb_{1-x}Sn_xTe в травильних композиціях H₂O₂-HBr-етиленгліколь // Наук. вісник ЧНУ. Сер. Хімія. 2013. Вип. 640. С. 72–78.
- Томашик З.Ф., Маланич Г.П., Томашик В.Н., Стратийчук И.Б., Пащенко Г.А., Кравцова А.С. Формирование полированных поверхностей монокристаллов РbTе и Pb_{1-x}Sn_xTe бромвыделяющими травителями H₂O₂-HBr-этиленгликоль // Вопросы химии и хим. технологии. 2012. № 4. С.120-125.
- Луфт Б.Д., Перевощиков В.А., Возмилова Л.Н. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников. М.: Радио и связь, 1982. 136 с.
- Перевощиков В.А., Гусев В.К. Гидродинамические условия химического полирования полупроводниковых пластин // Журн. прикл. химии. 1970. Т. 43. № 6. С. 1238–1245.
- 14. *Поп С.С., Шароді І. С.* Фізична електроніка. Львів: Євросвіт, 2001. 250 с.