

Ф И З И К А

УДК 538.975

DOI: 10.31429/vestnik-18-1-46-54

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ДОНОРНЫХ ПРИМЕСЕЙ В ВИСМУТОВЫХ ПЛЕНКАХ

Матвеев Д. Ю.

MASS SPECTROMETRY AS AN EFFECTIVE METHOD FOR MEASURING
THE CONCENTRATION OF DONOR IMPURITIES IN BISMUTH FILMS

D. Yu. Matveev

Astrakhan State University, Astrakhan, Russia
e-mail: danila200586@mail.ru

Abstract. The possibility of determining the quantity of donor impurity of tellurium in bismuth samples by depth using the method of time-of-flight mass spectrometry and by the scanning electron microscopy method with concentration impurity up to 0,150 at. % Te is studied in present paper. To measure the amount of tellurium in bismuth samples, we were use a “LUMAS-30” time-of-flight mass spectrometer with a pulsed low-pressure glow gas discharge in a combined hollow cathode and a “Zeiss Evo-40” scanning electron microscope. The samples for measurements were cut from the start and middle of the ingots of the $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$ alloy with the required impurity concentration. The samples were presented themselves a thin plate in size 10×10 mm and 1 mm thickness. The samples were thoroughly washed in distilled water and then etched in a 65% solution of nitric acid. The samples were strengthened as the bottom of the hollow cathode in the gas-discharge cell, where occurred the impulse ionization of the sample atoms in a glow discharge plasma. The relative error in the distribution of impurities in depth did not exceed 6%, while the error in determining the concentration of impurities by a mass spectrometer, according to passport data, does not exceed 5%. The sensitivity limit in determining the concentration of impurities in the device “LUMAS-30”, according to the passport data is 10^{-6} at. %. As a result of research, we set that the time-of-flight mass spectrometry method allows very accurate determination of the tellurium impurity concentration, and also allows us to establish a uniform distribution of tellurium over the volume of a doped bismuth sample. The method of electron microscopy with using a “Zeiss Evo-40” microscope does not allow to assert a uniform distribution of tellurium over the sample volume.

Keywords: bismuth, tellurium, doping, donor impurity, thin films, time-of-flight mass spectrometry, SEM.

Введение

Физические свойства вещества в массивном или плёночном состоянии в сильной степени зависят от его структуры. Например, в работе [1] авторы, изучая влияние размера частиц и зерен на структурные параметры керамических образцов замещенного поликристаллического железо-иттриевого граната системы $\text{Y}_{3-c}\text{Ca}_c\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (где c — формульная единица), постановили снижение удельной намагниченности насыщения с уменьшением зерен.

Однако структурные свойства феррогранатов зависят не только от условий синтеза, но и от легирования двухвалентной примесью кальция [1]. Поэтому ещё одним способом

изменения свойств вещества является его легирование.

В работе [2] исследуется влияние степени легирования на структурные характеристики плёнок висмута, легированного теллуром, в диапазоне концентраций 0,005–0,150 ат. % Te и толщин 0,3–0,7 мкм. В ней Демидовым Е.В. и Матвеевым Д.Ю. установлено, что увеличение степени легирования теллуром в плёнках висмута приводит к существенному уменьшению фигур роста. Слабое влияние отжига на размеры кристаллитов плёнок висмута, легированного теллуром, указывает на их высокую временную стабильность структуры. Средний размер кристаллитов слабо меняется по логарифмическому закону с ростом

Матвеев Даниил Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики Астраханского государственного университета; e-mail: danila200586@mail.ru.

толщины и концентрации теллура, как показано У. Дилнером и В. Шнелем на основе модели Маядаса–Шацкеса [3, 4]. Влияние концентрации теллура на электрические и гальваномагнитные свойства пленок висмута подробно рассматривается в работах [5–8].

Во всех перечисленных выше работах [1–8] вопрос об измерении концентрации легирующих примесей в пленках современными методами остается открытым. Например, для изготовления пленок висмута, легированного теллуrom, концентрация примеси теллура в висмуте определялась по массе навески испаряемого вещества, причем считалось, что концентрация теллура при переходе от монокристалла к пленке не изменяется [6].

В настоящей работе впервые представляются результаты экспериментального исследования количества примеси теллура в пленках висмута, легированного теллуrom до 0,15 ат. % методами времяпролетной масс-спектрометрии и растровой электронной микроскопии.

1. Методика приготовления проб

Исходными материалами для изготовления плёнок висмута, легированного теллуrom, в данной работе служили монокристаллы висмута с содержанием теллура до 0,150 ат.%, полученные по методике, описанной в работе [9].

Для приготовления сплавов Vi–Te использовался висмут марки «Vi-000» чистотой 99,9999 % и Te чистотой 99,999 %.

Чистый висмут предварительно обезгаживался и очищался от окислов путем перегонки через капилляр при температуре 380 °C в вакууме до 10^{-2} мм.рт.ст. в ампуле из молибденового стекла.

Необходимое для приготовления сплава количество висмута и теллура взвешивалось на демпферных весах АДВ-200 и стационарных ювелирных весах WAGA TORSYJNA-WT, соответственно.

Сначала взвешивалась навеска Te, рассчитанная примерно на 50 г сплава. Расчёт навески теллура заданной концентрации производился с учетом коэффициента отдачи атомов теллура в висмуте ($\eta = 0,7$). Эта навеска выбиралась в виде одного кусочка, что уменьшало вероятность частичной потери её при работе с ней. Затем по фактической массе теллура рассчитывалась масса висмута. Ампула с компонентами сплава откачивалась

до давления 10^{-2} мм.рт.ст., после чего отплавлялась. После этого она помещалась в печь, где выдерживалась при температуре 380 °C в течение суток, при этом печь непрерывно покачивалась, что обеспечивало хорошее перемешивание сплава. После этого пробирка вынималась из печи, располагалась горизонтально и расплав быстро затвердевал.

Полученные слитки в ампулах подвергались зонному выравниванию путем двух проходов зоны во встречных направлениях. Зонная плавка проводилась со скоростью 3 см/ч [9]. В результате плавки вырастал крупнооблочный кристалл висмута, легированного теллуrom, заданной концентрации. Таким образом, были приготовлены монокристаллические слитки с содержанием примесей до 0,150 ат. % Te.

Количество теллура в пленке задавалось путем использования для распыления кусочков монокристалла висмута $Vi_{99,85}Te_{0,15}$.

Пробы для измерений изготавливались методом электроискровой проволочной резки из начала и середины слитков сплава $Vi_{99,85}Te_{0,15}$. Пробы представляли собой тонкие пластины размером 10×10 мм и толщиной в 1 мм.

Пробы тщательно промывались в дистиллированной воде, а затем подвергались травлению в 65 % растворе азотной кислоты для удаления поверхностного слоя со следами внешних загрязнений.

2. Методика эксперимента

Измерение концентрации примеси теллура в висмутовых пробах осуществлялось с помощью времяпролетного масс-спектрометра «ЛЮМАС-30» с импульсным тлеющим газовым разрядом низкого давления в комбинированном полом катоде, а также растрового электронного микроскопа «Zeiss Evo-40» [10].

Метод времяпролетной масс-спектрометрии основан на разделении в пространстве или во времени, различающихся по отношению массы к заряду предварительно ионизированных частиц. Разделение на пакеты близких по отношению массы к заряду ионов происходит при движении ионизированных молекул газа в бесполом пространстве.

Экспериментальная установка (рис. 1) состояла из блока ионизации твердотельных проб в импульсном газовом разряде в полом катоде и времяпролетного масс-спектрометра «ЛЮМАС-30» с ортогональной геометрией

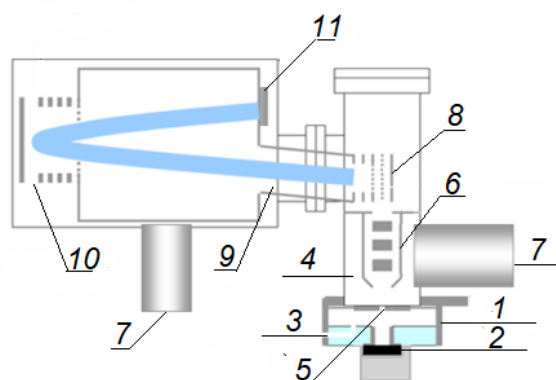


Рис. 1. Принципиальная схема времяпролетного масс-спектрометра «ЛЮМАС-30»:
 1 — разрядная камера; 2 — проба; 3 — газовая смесь; 4 — зона дифференциальной откачки;
 5 — сэмплер; 6 — ионная оптика; 7 — вакуумная откачка (турбомолекулярные насосы);
 8 — диафрагма выталкивающей зоны; 9 — дрейфовая труба; 10 — масс-рефлектор;
 11 — микроканальный детектор

расположения дрейфовой зоны, включавшего в себя масс-рефлектор, который использовался в качестве регистрирующей системы образовавшихся ионов, и микроканальный детектор. Ионная оптика масс-спектрометра была рассчитана и предварительно оптимизирована сотрудниками кафедры аналитической химии Санкт-Петербургского государственного университета [10, 11].

Принцип работы масс-спектрометра заключается в следующем. В разрядную камеру — 1, где укреплен образец — 2, подавалась смесь газов Ar-He-N_2 — 3.

За счет разницы давлений в разрядной камере и зоне дифференциальной откачки — 4, образующиеся в источнике в результате высокоэффективной атомизации анализируемых образцов катодным распылением в импульсном тлеющем разряде ионы пробы вместе со смесью газов (нейтральные атомы) через отверстие в сэмплере — 5 транспортируются в зону дифференциальной откачки, где большинство нейтральных частиц удаляется вакуумной откачкой при помощи турбомолекулярных насосов — 7, а ионы с помощью ионной оптики — 6 и газодинамического переноса собираются на целевой диафрагме выталкивающей зоны — 8.

В выталкивающую зону попадает узкий ленточный пучок ионов, параллельный выталкивающему электроду. Далее, под действием выталкивающего импульса ионы вбрасываются в высоковольтную дрейфовую трубу — 9, где давление составляет 10^{-3} – 10^{-4} Па, что

позволяет практически исключить процессы столкновения. Во времяпролетной трубе происходит их пространственно-временное разделение по времени пролета в зависимости от соотношения массы к заряду (m/z). После этого ионы, отразившись в масс-рефлекторе — 10, применяемом для увеличения разрешающей способности, проходят через энергетический фильтр, который отсекает низкоэнергетичные ионы (для устранения «хвостов» пиков в масс-спектре). Далее ионы детектируются на микроканальном детекторе — 11, сигнал с которого, через усилитель (коэффициент усиления $2 \cdot 10^2$) передается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и далее на ЭВМ, где с помощью соответствующего программного обеспечения формируется масс-спектр как функция интенсивности ионов от их отношения массы к заряду (m/z).

Таким образом, происходило формирование пакетов спектров, содержащих обычно от 1000 до 2000 спектров (задается в зависимости от требуемого разрешения по времени). В нашем случае регистрировалось 1000 пакетов по 2000 спектров.

Пробы $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$ укреплялись в качестве дна полого катода в разрядной камере, где и происходила импульсная ионизация их атомов в плазме тлеющего разряда.

В пленках того же состава точно измерить концентрацию примеси теллура «мешает» кристаллическая подложка, которая в результате импульсной ионизации деформировалась, ломала пленку и вносила существен-

Таблица 1. Управляющие напряжения и некоторые параметры времяпролетного масс-спектрометра, при которых происходил анализ проб $\text{Vi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$

Материал катода, %	Al (99,999)
Разрядный газ, % состав	Ar-He-H ₂ (69,70-30-0,30)
Давление в разрядной ячейке, Торр	1,6
Длительность разрядного импульса, мкс	1,7
Длительность выталкивающего импульса, мкс	1,0
Время задержки выталкивающего импульса, мкс	140
Период следования импульсов, мс	0,3
Напряжение на катоде, В	-1500
Напряжение на пролётной трубе, В	-2000
Время распыления, мин	11
Число пакетов/ Число спектров	1000/2000

Таблица 2. Распределение примеси теллура по глубине пробы, где I — интенсивность сигнала

№ измерения/ место в слитке	I Vi, безр. ед.	I Te, безр. ед.	Концентрация, ат.% Te
1221 /начало	8691	12,51	0,144
1223/начало	8487	11,85	0,140
1227/середина	8897	12,81	0,144
1229/середина	7637	11,37	0,149
1239/середина	10060	14,66	0,146

ные искажения в искомый масс-спектр. Поэтому считалось, что концентрация теллура в пробах соответствует концентрации теллура в пленках, исходя из результатов исследований гальваномагнитных и термоэлектрических свойств этих материалов [5].

В табл. 1 приведены условия, которые менялись при анализе твердотельной пробы.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В результате эксперимента произведено несколько распылений для профиля распределения примесей по глубине пробы, вырезанной из начала и середины слитка (табл. 2). Для одного распыления на примере пробы $\text{Vi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$ на одном рисунке (рис. 2) приведен соответствующий её участок масс-спектра и зависимость интенсивности I сигнала висмута (синяя линия) и изотопа теллура ^{130}Te (фиолетовая линия) от числа пакетов N .

Концентрация теллура в висмуте определялась по размерам площадей пиков радиоактивного изотопа теллура с основной массой — 130 и висмута — 209. Изотоп ^{130}Te выбирался с учётом того, что его пик, как видно из рис. 2,

имел наибольшую интенсивность и был наиболее чётко отделён от остальных (стабильных) изотопов теллура. Кроме того, расчёт производился в предположении, что содержание изотопов теллура в пробе, выданное на масс-спектре, соответствует содержанию изотопов в природном элементе.

Исследования профиля распределения примесей теллура по глубине пробы (табл. 2) указывают на равномерность их распределения. Кроме того, результаты измерений концентрации методом масс-спектрометрии пре-красно сочетаются с методом определения концентрации по массе навески теллура, рассчитанной на 50 г сплава. Как видно из масс-спектра, посторонних химических элементов в пробах не обнаруживается.

Измерение концентрации теллура методом растровой электронной микроскопии происходило на тех же пробах при помощи микроскопа «Zeiss Evo-40».

На рис. 3, 4 показаны растровый электронный спектр для пробы с концентрацией теллура 0,15 ат. % и его электронное изображение с указанием места зондирования, соответственно (спектр 1).

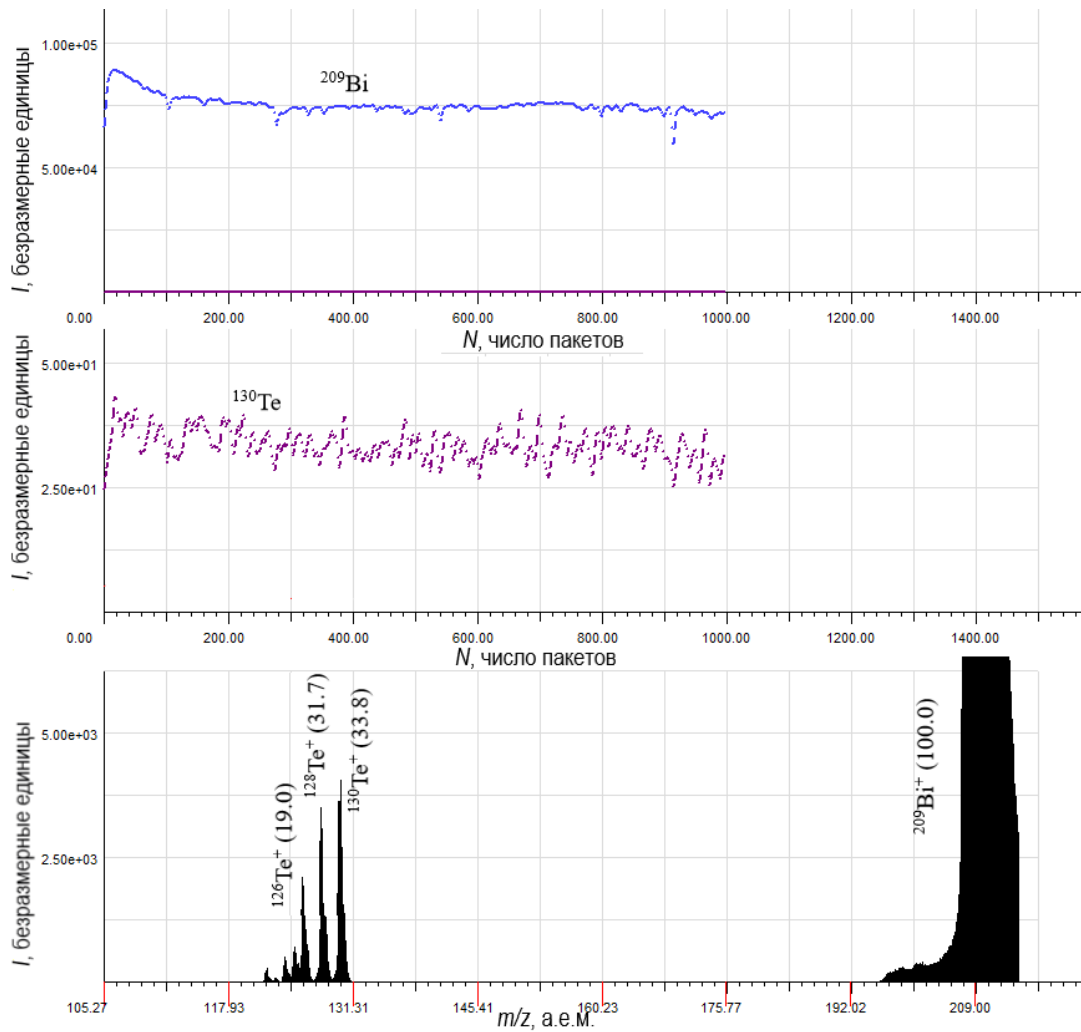


Рис. 2. Участок масс-спектра $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$ и соответствующая интенсивность сигналов химических элементов. Комбинированный катод. Материал катодных стенок — Al. Давление 1,6 Торр, состав газовой смеси: Ar — 69,70 %, He — 30 %, H_2 — 0,30 %

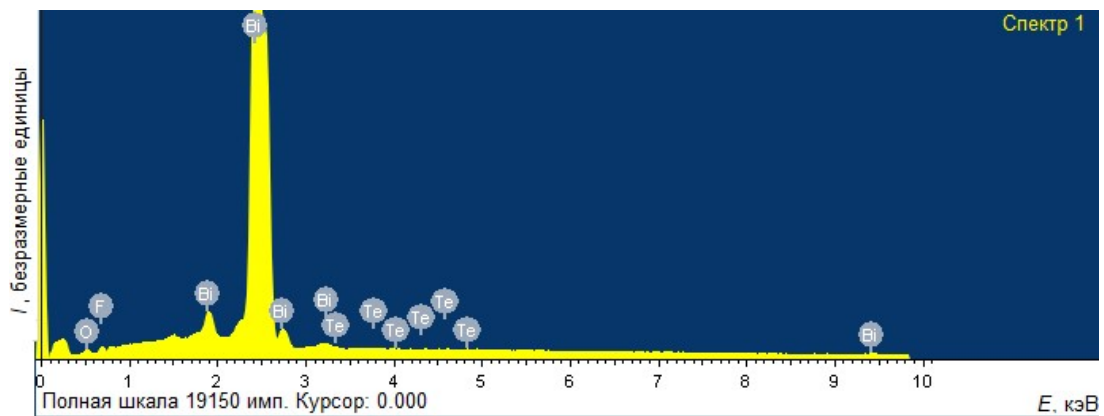


Рис. 3. Электронный спектр $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$

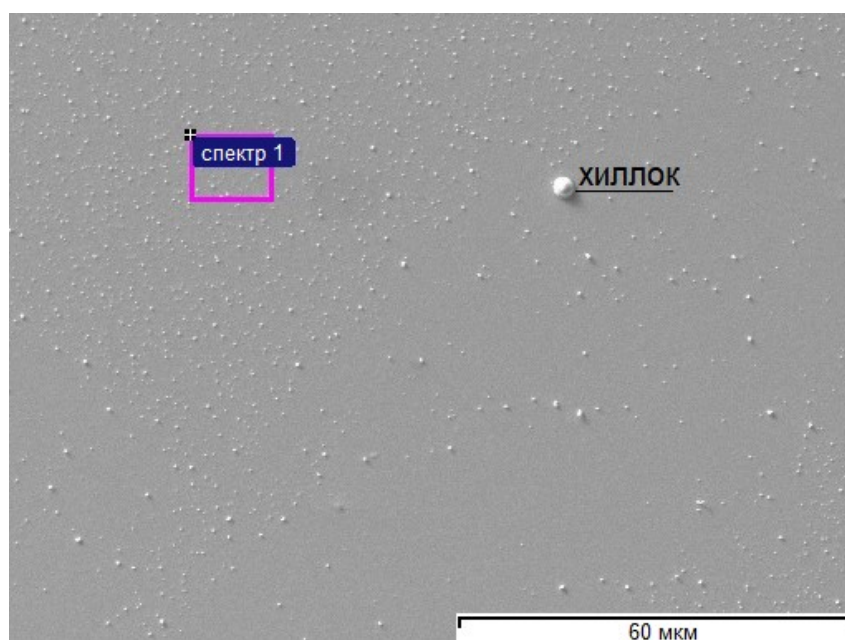


Рис. 4. Электронное изображение поверхности пробы $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$. Размер участка — 60 мкм

Электронный пучок зондировал поверхность каждой пробы многократно в разных её точках (рис. 4).

Как на поверхности легированных, так и нелегированных проб и пленок можно обнаружить хиллоки (бугристые выступы), что также подтверждается многократными исследованиями АСМ-методами в работах [12, 13].

Как видно из рис. 3, помимо пиков висмута и теллура в пробах присутствует кислород, фтор. При измерениях в других областях поверхности можно обнаружить углерод и натрий.

В табл. 3 приведены значения концентрации в весовых и атомных процентах (ат. %) всех элементов, входящих в состав пробы $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$ для различных областей зондирования, а также индексы возбуждаемой серии химических элементов.

Из табл. 3 видно, что концентрация теллура принимает неодинаковые значения в исследуемых областях сканирования поверхности пробы, что говорит о неравномерности распределения примеси по пробе, а также совсем не соответствует концентрации, рассчитываемой по массе навески легирующего вещества.

Представленный результат может быть связан с неверной настройкой значений ускоряющих напряжений электронной трубки микроскопа, что ввиду малых их значений приводит к слабому возбуждению L серии

теллура (табл. 3, № измерения 2). С другой стороны, значительные ошибки при определении количественного состава теллура в пробах происходят с одной стороны из-за наложения характеристических линий одного элемента на спектр другого, с другой — из-за слабого проникновения электронного луча вглубь образца, что позволяет лишь определить наличие теллура на его поверхности.

В работе относительная ошибка по распределению примесей по глубине, определяемой методом времяпролетной масс-спектрометрии, не превышала 6 %. Ошибка определения концентрации примеси масс-спектрометром, согласно паспортным данным, не превышает 5 %.

Предел чувствительности в определении концентрации примеси у прибора «ЛЮМАС-30», согласно паспортным данным, составляет 10^{-6} ат. %.

Абсолютные ошибки в определении концентрации теллура в исходной пробе для получения пленок $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$ составляли $(0,150 \pm 0,008)$ ат. % Те.

Необходимо отметить, что разница в определении количества примеси теллура в пробах методом времяпролетной масс-спектрометрии по сравнению с исходным загружаемым количеством теллура составляла не более 6–7 %.

Таблица 3. Элементный состав пробы $\text{Bi}_{99,85}\text{Te}_{0,15}$, полученный с помощью микроскопа «Zeiss Evo-40»

№ измерения	Химический элемент / индекс серии	Весовой %	Атомный %
1	O/K	2,09	18,95
	F/K	1,89	14,41
	Te/L	0,09	0,10
	Bi/M	95,93	66,53
2	O/K	2,14	19,19
	F/K	1,96	14,85
	Te/L	0,01	0,01
	Bi/M	95,89	65,94
3	C/K	18,39	63,53
	O/K	7,45	19,33
	F/K	0,74	1,62
	Na/K	0,50	0,90
	Te/L	1,13	0,37
	Bi/M	71,78	14,25

Заключение

Метод времяпролетной масс-спектрометрии в импульсном газовом разряде в полном катоде позволяет с высокой степенью точности определить концентрацию легирующей примеси теллура в пробах висмута.

Метод времяпролетной масс-спектрометрии позволяет проверить и подтвердить равномерность распределения теллура по объему проб.

Наличие этих фактов может помочь правильно интерпретировать экспериментальные результаты, полученные на пленках висмута, легированного теллуром, так как концентрация в пленке и пробе считается неизменной, о чем свидетельствуют многочисленные работы по измерению электрических и гальваномагнитных свойств тонких пленок и кристаллов висмута, легированного теллуром.

Попытки использования метода электронной микроскопии при помощи микроскопа «Zeiss Evo-40» не даёт необходимой точности определения концентрации примеси.

Литература

1. Булатов М.Ф., Рыбаков А.В., Булатова А.Н., Ильясов Ф.К. Структурные свойства ферро гранатов в зависимости от условий синтеза и концентрации Са // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2009. Т. 8. № 4. С. 86–90.
2. Matveev D.Yu., Starov D.V., Demidov E.V. Structure features of bismuth films doped with tellurium // Journal of nano-and electronic physics. 2018. Vol. 10. Iss. 2. P. 02047 (3 pp). DOI: 10.21272/jnep.10(2).02047
3. Schnelle W. Electrical and galvanomagnetic properties of undoped and doped polycrystalline bismuth films. I. Preparation and experimental characterization // Phys. Stat. Sol. A. 1989. Vol. 115. Iss. 2. P. 505–513. DOI: 10.1002/pssa.2211150218
4. Dillner U., Schnelle W. Electrical and galvanomagnetic properties of undoped and doped polycrystalline bismuth films. II. Analysis in an anisotropic one-carrier model // Phys. Stat. Sol. A. 1989. Vol. 116. Iss. 1. P. 337–342. DOI: 10.1002/pssa.2211160131
5. Грабов В.М., Демидов Е.В., Комаров В.А., Матвеев Д.Ю., Николаева А.А., Маркушев Д., Константинов Е.В., Константинова Е.Е. Размерный эффект в гальваномагнитных явлениях плёнок висмута, легированного теллуром // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48. № 5. С. 648–653. DOI: 10.1134/S106378261405008X
6. Matveev D.Yu. Carrier Scattering Mechanisms in Bismuth Films Doped with Tellurium // Journal of nano-and electronic physics. 2016. Vol. 8. Iss. 3. P. 03012 (5 pp). DOI: 10.21272/jnep.8(3).03012
7. Матвеев Д.Ю. Гальваномагнитные свойства блочных и монокристаллических пленок висмута, легированного теллуром, изготовленных на подложках из слюды-мусковит // Труды XIII международной конференции. 2016. Ч. 2: Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов. С. 268–273.

8. Орлова Д.С., Рогачева Е.И. Гальваномагнитные свойства тонких пленок висмута, легированного теллуром // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. 2009. Т. 7. № 2. С. 487–493.
9. Иванов Г.А., Грабов В.М. Физические свойства кристаллов типа висмута // Физика и техника полупроводников. 1995. Т. 29. № 5. С. 1040–1050.
10. Ганеев А.А., Кузьменков М.А., Потопов С.В., Дробышев А.И., Воронов М.В. Анализ твердотельных образцов с ионизацией пробы в импульсном разряде в комбинированном полом катоде и время-пролетным детектированием ионов // Масс-спектрометрия. 2006. Т. 3. № 3. С. 185–192.
11. Ганеев А.А., Кузьменков М.А., Потопов С.В., Дробышев А.И., Воронов М.В. Время-пролетная масс-спектрометрия с ионизацией пробы в импульсном разряде в полом катоде для анализа твердотельных проводящих образцов // Масс-спектрометрия. 2005. Т. 2. № 4. С. 297–304.
12. Грабов В.М., Демидов, Е.В., Комаров В.А. Ограничение подвижности носителей заряда в плёнках висмута, обусловленное их блочной структурой // Журнал Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2011. № 2. С. 81–85.
13. Грабов В.М., Гереза В.А., Демидов Е.В., Старицын М.В., Суслов А.В., Суслов М.В., Комаров В.А. Атомно-силовая микроскопия и электрические свойства монокристаллических пленок висмута // Журнал Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. № 9. С. 55–60. DOI: 10.31857/S1028096020090058
4. Dillner, U., Schnelle, W. Electrical and galvanomagnetic properties of undoped and doped polycrystalline bismuth films. II. Analysis in an anisotropic one-carrier model. *Phys. Stat. Sol. A*, 1989, vol. 116, no. 1 pp. 337–342. DOI: 10.1002/pssa.2211160131
5. Grabov, V.M., Demidov, E.V., Komarov, V.A., Matveev, D.Yu., Nikolaeva, A.A., Markushchev, D., Konstantinov, E.V., Konstantinova, E.E. Razmernyy effekt v gal'vanomagnitnykh yavleniyakh plenok vismuta, legirovannogo tellurom [Size effect in galvanomagnetic phenomena in bismuth films doped with tellurium]. *Semiconductors*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 630–635. DOI: 10.1134/S106378261405008X (In Russian)
6. Matveev, D.Yu. Carrier Scattering Mechanisms in Bismuth Films Doped with Tellurium. *Journal of nano-and electronic physics*, 2016, vol. 8, iss. 3, pp. 03012-1–03012-5. DOI: 10.21272/jnep.8(3).03012
7. Matveev, D.Yu. Gal'vanomagnitnyye svoystva blochnykh i monokristallicheskiykh plenok vismuta, legirovannogo tellurom, izgotovlennykh na podlozhkakh iz slyudy-muskovit [Galvanomagnetic properties of the single-crystalline and block bismuth films doped with tellurium, prepared on substrates from the mica-muscovite]. *Trudy XIII mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. of the XIII International Conference], 2016, part 2: Perspektivnyye tekhnologii, oborudovaniye i analiticheskiye sistemy dlya materialovedeniya i nanomaterialov [Advanced technologies, equipment and analytical systems for materials science and nanomaterials], pp. 268–273. (In Russian)
8. Orlova, D.S., Rogacheva, E.I. Gal'vanomagnitnyye svoystva tonkikh plenok vismuta, legirovannogo tellurom [Galvanomagnetic properties of tellurium-doped bismuth thin films]. *Nanosistemy, nanomaterialy, nanotekhnologii* [Nanosystems, nanomaterials, nanotechnology], 2009, vol. 7, no. 2, pp. 487–493. (In Russian)

References

1. Bulatov, M.F., Rybakov, A.V., Bulatova, A.N., Piyasov, F.K. Strukturnyye svoystva ferro granatov v zavisimosti ot usloviy sinteza i kontsentratsii Ca [Structural properties of ferro-garnets depending on the synthesis conditions and Ca concentration]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokkiye tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2009, vol. 8, no. 4, pp. 86–90. (In Russian)
2. Matveev, D.Yu., Starov, D.V., Demidov, E.V. Structure features of bismuth films doped with tellurium. *Journal of nano-and electronic physics*, 2018, vol. 10, iss. 2, pp. 02047-1–102047-3. DOI: 10.21272/jnep.10(2).02047
3. Schnelle, W. Electrical and galvanomagnetic properties of undoped and doped polycrystalline bismuth films. I. Preparation and experimental characterization. *Phys. Stat. Sol. A*, 1989, vol. 115, no. 2, pp. 505–513. DOI: 10.1002/pssa.2211150218
4. Dillner, U., Schnelle, W. Electrical and galvanomagnetic properties of undoped and doped polycrystalline bismuth films. II. Analysis in an anisotropic one-carrier model. *Phys. Stat. Sol. A*, 1989, vol. 116, no. 1 pp. 337–342. DOI: 10.1002/pssa.2211160131
5. Grabov, V.M., Demidov, E.V., Komarov, V.A., Matveev, D.Yu., Nikolaeva, A.A., Markushchev, D., Konstantinov, E.V., Konstantinova, E.E. Razmernyy effekt v gal'vanomagnitnykh yavleniyakh plenok vismuta, legirovannogo tellurom [Size effect in galvanomagnetic phenomena in bismuth films doped with tellurium]. *Semiconductors*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 630–635. DOI: 10.1134/S106378261405008X (In Russian)
6. Matveev, D.Yu. Carrier Scattering Mechanisms in Bismuth Films Doped with Tellurium. *Journal of nano-and electronic physics*, 2016, vol. 8, iss. 3, pp. 03012-1–03012-5. DOI: 10.21272/jnep.8(3).03012
7. Matveev, D.Yu. Gal'vanomagnitnyye svoystva blochnykh i monokristallicheskiykh plenok vismuta, legirovannogo tellurom, izgotovlennykh na podlozhkakh iz slyudy-muskovit [Galvanomagnetic properties of the single-crystalline and block bismuth films doped with tellurium, prepared on substrates from the mica-muscovite]. *Trudy XIII mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. of the XIII International Conference], 2016, part 2: Perspektivnyye tekhnologii, oborudovaniye i analiticheskiye sistemy dlya materialovedeniya i nanomaterialov [Advanced technologies, equipment and analytical systems for materials science and nanomaterials], pp. 268–273. (In Russian)
8. Orlova, D.S., Rogacheva, E.I. Gal'vanomagnitnyye svoystva tonkikh plenok vismuta, legirovannogo tellurom [Galvanomagnetic properties of tellurium-doped bismuth thin films]. *Nanosistemy, nanomaterialy, nanotekhnologii* [Nanosystems, nanomaterials, nanotechnology], 2009, vol. 7, no. 2, pp. 487–493. (In Russian)
9. Ivanov, G.A., Grabov, V.M. Fizicheskie svoystva kristallov tipa vismuta [Physical properties of crystals bismuth type]. *Semiconductors*, 1995, vol. 29, no. 5, pp. 1040–1050. (In Russian)
10. Ganeev, A.A., Kuzmenkov, M.A., Potapov, S.V., Drobyshev, A.I., Voronov, M.V. Analiz tverdotel'nykh obraztsov s ionizatsiyey proby v impul'snom razryade v kombinirovannom polom katode i vremya-proletnym detektirovaniyem ionov [Analysis of solid samples with sample ionization in a pulsed discharge in a combined hollow cathode and time-of-flight ion detection]. *Mass-spektrometriya* [Mass spectrometry], 2006, vol. 3, no. 3, pp. 185–192. (In Russian)
11. Ganeev, A.A., Kuzmenkov, M.A., Potapov, S.V., Drobyshev, A.I., Voronov, M.V. Vremyaproletnaya mass-spektrometriya s ion-

- izatsiyey proby v impul'snom razryade v polom katode dlya analiza tverdotel'nykh provodyashchikh obraztsov [Time-of-flight mass spectrometry with ionization of a sample in a pulsed discharge in a hollow cathode for the analysis of solid-state conducting samples]. *Mass-spektrometriya* [Mass spectrometry], 2005, vol. 2, no. 4, pp. 297–304. (In Russian)
12. Grabov, V.M., Demidov, E.V., Komarov, V.A. Mobility restriction of charge carriers in bismuth films due to film block structure. *Journal of surface investigation: X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 2011, iss. 5, pp. 177–181. DOI: 10.1134/S1027451011020108 (In Russian)
13. Grabov, V.M., Gerega, V.A., Demidov, E.V., Komarov, V.A., Starytsin, M.V., Suslov, A.V., Suslov, M.V. On the atomic-Force microscopy and electrical properties of single-crystal bismuth films. *Journal of surface investigation: X-ray, synchrotron and neutron techniques*, 2020, iss. 14, pp. 913–917. DOI: 10.1134/S1027451020050055 (In Russian)

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2021

© Матвеев Д. Ю., 2021

Статья поступила 10 марта 2021 г.