

на поры оказалась ниже энергии активации диффузии сурьмы в кремнии, что связывается с влиянием на процесс диффузии полей упругих деформаций вокруг микропустот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sachdeva R., Istratov A. A., Weber E. R. Recombination activity of copper in silicon // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 79. P. 2937–2939.
2. Donnelly S. E., Vishnyakov V. M., Carter G., Terry J., Haworth L. I., Sermannic P., Birtcher R. C. The use of cavities for gettering in silicon microelectronic devices // Mat. Sci. Eng. B. 2003. Vol. 206. P. 422–426.
3. Wong-Leung J., Ascheron C. E., Petravic M., Elliman R. G., Williams J. S. Gettering of copper to hydrogen-induced cavities in silicon // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 66. № 10. P. 1231–1233.
4. Myers S. M., Petersen G. A., Seager C. H. Binding of cobalt and iron to cavities in silicon // J. Appl. Phys. 1996. Vol. 80. № 7. P. 3717–3726.
5. Perichaud I., Yakimov E., Martinuzzi S., Dubois C. Trapping of gold by nanocavities induced by H⁺ or He⁺⁺ implantation in float zone and Czochralski grown silicon wafers // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 90. № 6. P. 2806–2812.
6. Bruno E., Mirabella S., Priolo F., Napolitani E., Bongiorno C., Raineri V. He induced nanovoids for point-defect engineering in B-implanted crystalline Si // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 101. P. 0235150–0235155.
7. Kinomura A., Suzuki R., Ohdaira T., Muramatsu M., He C., Oshima N., Matsumoto T., Tanoue H., Horino Y. Temperature-dependent growth and transient state of hydrogen-induced nanocavities in silicon // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. P. 034301-1–034301-6.
8. Wen C. Y., Spaeren F. Filling the voids in silicon single crystals by precipitation of Cu₃Si // Phil. Mag. 2007. Vol. 87. № 35. P. 5565–5579.
9. Trumbore F. A. Solid solubilities of impurity elements in germanium and silicon // Bell Syst. Tech. J. 1960. Vol. 39. P. 205–233.
10. Van der Pauw L. J. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape // Philips Res. Repts. 1958. Vol. 13. № 1. P. 1–9.
11. Бураков А. В., Якубеня С. Н., Янченко А. М. Прибор для бесконтактного измерения времени жизни неравновесных носителей заряда // ПТЭ. 1986. № 4. С. 226–230.
12. Takamura Y., Vaillionis A., Marshall A. F., Griffin P. B., Plummer J. D. Dopant deactivation in heavily Sb doped Si (001): A high resolution x-ray diffraction and transmission electron microscopy study // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 92. № 9. P. 5503–5507.
13. Method for manufacturing electronic devices in semiconductor substrates provided with gettering sites: Patent No: US 6451672 B1 / D. Caruso, V. Raineri, M. Saggio, U. Stagnitti. 2002.
14. Delamare R., Ntsoenzok E., Labohm F., Veen A., Grisolia J., Claverie A. Anormal growth of cavities in MeV He implanted Si covered with a thin Al foil // Nucl. Instr. Meth. B. 2002. Vol. 186. P. 324–328.
15. Raineri V., Fallica P. G., Percolla G., Battaglia A., Barbagallo M., Campicano S. U. Gettering of metals by voids in silicon // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 78. № 6. P. 3727–3735.
16. Liefing R., Wijburg R. C. M., Custer J. S., Wallinga H., Saris F. W. Improved device performance by multistep or carbon co-implants // IEEE Trans. Electron Dev. 1994. Vol. ED-41. P. 50.
17. Пирс К., Адамс А., Кац Л., Цай Дж., Сейдел Т., Макгиллис Д. Технология СБИС: в 2 кн. М., 1986. Кн. 1. С. 259.
18. Roqueta F., Alquier D., Ventura L., Dubois Ch., Jerisian R. Boron gettering on cavities induced by helium implantation in Si // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 2001. Vol. 183. P. 318–322.
19. Wong-Leung J., Williams J. S., Petravic M. The influence of cavities and point defects on boron diffusion in silicon // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 72. № 19. P. 2418–2420.
20. Akiyama T., Okamoto Y., Saito M., Oshiyama A. Multivacancy and Its Hydrogen Decoration in Crystalline Si // Jpn. J. Appl. Phys. 1999. Vol. 38. P. L1363–L1365.

Поступила в редакцию 08.01.13.

Павел Кириллович Садовский – аспирант кафедры физики полупроводников и наноэлектроники. Научный руководитель – А. Р. Челябинский.

Алексей Романович Челябинский – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник кафедры физики полупроводников и наноэлектроники.

Владимир Борисович Оджаев – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики полупроводников и наноэлектроники.

Мария Иосифовна Тарасик – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры энергофизики.

Аркадий Степанович Турцевич – доктор технических наук, главный инженер ОАО «Интеграл».

Юрий Борисович Васильев – ведущий инженер ОАО «Интеграл».

УДК 533.9.082.5; 621.373.826; 621.793.79

М. П. ПАТАПОВИЧ, ЧИНЬ НГОК ХОАНГ (ВЬЕТНАМ), И. Д. ПАШКОВСКАЯ,
ЛЭ ТХИ КИМ АНЬ (ВЬЕТНАМ), Ж. И. БУЛОЙЧИК, А. П. ЗАЖОГИН

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОДЕРЖАНИЯ ЭССЕНЦИАЛЬНЫХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Для разработки методик анализа содержания тяжелых металлов в биологических объектах (минерализованные волосы, ногти и т. д.) методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии со сдвоенными лазерными импульсами изучено влияние физико-химических свойств фосфатов К и Na на пространственное распределение катионов меди, цинка и железа при высыхании капли водного раствора хлоридов металлов на поверхности пористого тела (бумажного фильтра). По-

казано, что предварительное нанесение на подложку фосфатов калия уменьшает скорость движения катионов к периферии при высыхании капли жидкости, а также ее размер более существенно, чем при использовании фосфатов натрия. Катионы калия (натрия) в виде растворов хлоридов или кислых фосфатов при этом диффундируют на периферию высыхающей капли. Установлено, что размеры зон для ортофосфатов металлов зависят и определяются растворимостью в ряду железо > цинк > медь. Интенсивность линий элементов в спектрах при этом усиливается в несколько раз. Полученные результаты показывают, что использование фосфатов калия для увеличения интенсивности линий в спектрах высохших капель является перспективным направлением для разработки методик количественного анализа растворов биологических образцов методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии со сдвоенными лазерными импульсами.

Ключевые слова: приповерхностная лазерная плазма; лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия; сдвоенные лазерные импульсы; тяжелые металлы; медь; цинк; железо; фосфаты калия и натрия.

To develop an analytical method determining the content of heavy metals in biological objects (human hair, nails, etc.), the effect exerted by the physical and chemical properties of K and Na phosphates on the spatial distribution of copper, zinc, and iron cations on drying of the drops of metal chloride aqueous solutions on the surface of a porous body (paper filter) has been studied by means of multichannel atomic-emission spectrometry with double laser pulses. It has been shown that preliminary deposition of potassium phosphates on the substrate results in a considerably reduced rate of cationic motion to the periphery on drying of the liquid drop and also in the reduced drop size as compared to sodium phosphates. In the process potassium (sodium) cations in the form of solutions of chlorides or acid phosphates diffuse to the periphery of the drying drop. It has been found that sizes of the bands for orthophosphates of metals are dependent on solubility in the series: iron > zinc > copper. The line intensities for elements in spectra are increased several fold. The obtained results demonstrate that the use of potassium phosphates to increase the spectral line intensities of the dried drops offers much promise in the development of qualitative analytical methods for solutions of biological samples by means of atomic-emission spectrometry with double laser pulses.

Key words: surface laser plasma; laser atomic-emission spectrometry; double laser pulses; heavy metals; copper; zinc; iron; potassium and sodium phosphates.

В практике исследований элементного состава биологических образцов методом атомно-эмиссионной спектроскопии актуальной задачей является повышение чувствительности анализа. Это важно тогда, когда требуется определять в образце одновременно содержание макро- и микроэлементов, особенно в отдельных фрагментах биологических образцов различного происхождения.

Нарушение баланса макро- и микроэлементов в организме человека может явиться причиной и стартовым механизмом возникновения многих заболеваний. Как правило, дисбаланс химических элементов в организме взрослых и детей заключается в недостаточном содержании ряда эссенциальных (жизненно необходимых) микро- и макроэлементов (Zn, Cu, Fe, Ca, Mg и др.) и одновременно в избыточном накоплении ряда токсичных металлов (Al, Cd, Be и др.) [1–4].

В Республике Беларусь проводятся исследования по выяснению участия и роли макро- и микроэлементов в развитии острой церебральной ишемии [5, 6]. В настоящее время многие вопросы не вполне ясны и требуется дальнейшее изучение роли эссенциальных макро- и микроэлементов в механизмах адаптации организма при данной патологии.

Существуют самые разнообразные причины дисбаланса микро- и макроэлементов, например несбалансированность элементного состава пищевых продуктов. Так, с дефицитом *цинка* может быть связан целый спектр неврологических и нервно-психических расстройств – эпилепсия, рассеянный склероз, болезнь Хантингтона, дизлексия (нарушение речи), острый психоз, слабоумие, патологическое отвращение к еде, синдром дефицита внимания с гиперактивностью и депрессия.

Недостаток *меди* входит в число основных причин развития коронарной болезни сердца. Однако следует знать, что больше – не всегда лучше. При избытке меди усиливается оседание холестерина на стенках артерий, что повышает риск инфаркта, хотя нормальный уровень меди, наоборот, способствует профилактике атеросклероза. Первичный дефицит меди и неблагоприятное соотношение этого элемента с цинком приводят к биохимическим сдвигам, которые можно рассматривать в качестве факторов риска ишемической болезни сердца. *Железо* является составной частью гемоглобина, сложных железобелковых комплексов и ряда ферментов, усиливающих процессы дыхания в клетках. Оно стимулирует кроветворение, входит в состав протоплазмы всех клеток. Железосодержащие соединения играют важную роль в функционировании иммунной системы, прежде всего клеточного звена.

Все это подчеркивает важность постоянного контроля поступления и накопления элементов в биологических системах для своевременной коррекции нарушений элементного статуса.

Элементы можно определять в биологических жидкостях (кровь, сыворотка, моча, спинно-мозговая жидкость), а также тканях. Однако найденные значения могут не совсем точно отражать их истинное содержание в данный момент, поскольку в организме действуют резервные механизмы, выравнивающие уровень элементов в крови. Кроме того, непосредственное влияние на их концентрацию в данный момент оказывает применяемая диета. По этим причинам такие показатели не всегда объективны.

Одним из лучших методов оценки состояния минерального обмена в организме является анализ содержания элементов в волосах. Патологическое состояние организма человека тесно связано с изменением содержания химических элементов в органах и тканях, и элементный состав волос дает важную

информацию, которая в сочетании с симптомами и биохимическими анализами помогает врачу в диагностике физиологических нарушений, связанных с отклонениями как в общем, так и метаболизме токсичных элементов. Получение такого биоматериала, как волосы, абсолютно безопасно. При этом концентрация токсичных металлов в волосах может быть в несколько сот раз выше, чем в моче и крови. Учитывая это, волосы – самая удобная ткань для оценки суммарной нагрузки на организм, включающей стрессы, качество питания, характер заболевания.

В волосах накапливаются практически все доступные для анализа химические элементы (около 70), которые поступают в организм различными путями: с пищей, водой, при приеме лекарств, биологически активных добавок и т. д. Способность волос аккумулировать в себе химические элементы связана с особенностями их строения и формирования. В среднем за один месяц волосы вырастают на $1 \div 1,5$ см. Фактически в период роста волоса по его длине записывается вся история изменения содержания элементов в организме [7–9].

Концентрация большинства важных для жизнедеятельности организма тяжелых металлов в волосах мала ($10^{-4} \div 10^{-3}$ %), прямым методом определять их не удастся [1–3]. Для количественного анализа элементов проводят минерализацию волос методом мокрого озоления и определяют элементы в высушенных пробах с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии с возбуждением спектров электрической дугой [7, 10].

Метод лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии отличается сравнительной простотой подготовки образцов, возможностью определять многие элементы с довольно низкими пределами обнаружения [11]. Требованиям оперативного химико-аналитического контроля содержания различных металлов в объектах растительного и животного происхождения наилучшим образом удовлетворяет лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектральный анализ с применением сдвоенных лазерных импульсов.

Однако предварительно проведенный анализ высушенной капли раствора минерализованных волос на поверхности пористого тела (бумажный фильтр) с использованием этого метода не позволил уверенно обнаружить даже самые характеристичные линии тяжелых элементов. В данной работе с целью повышения чувствительности и расширения возможностей практического использования предлагаемого метода изучено влияние фосфатов K и Na на интенсивность линий некоторых эссенциальных тяжелых металлов (меди, железа и цинка).

Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. В качестве источника абляции и возбуждения приповерхностной плазмы в спектрометре используется двухимпульсный неодимовый лазер (модель LS2131 DM), обладающий широкими возможностями как для регулировки энергии импульсов (от 10 до 80 мДж), так и временного интервала между ними (от 0 до 100 мкс). Длительность импульсов – ≈ 15 нс.

Динамику развития процессов абляции и возбуждения приповерхностной плазмы исследовали при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на поверхность образцов высушенных капель водного раствора хлоридов меди, цинка, железа и фосфатов калия или натрия. Энергия импульсов излучения – 58 и 42 мДж (первый и второй импульсы соответственно), временной интервал между сдвоенными импульсами – 8 мкс [12, 13]. Диаметр пятна абляции – $50 \div 100$ мкм.

Образцы готовили по следующей методике. Каплю раствора хлорида металла определенной концентрации (0,1; 0,5 и 1,0 % металла) наносили на поверхность бумажного фильтра (черная лента) диаметром 20 мм с помощью микропипетки. Объем капли составлял 10 мкл, а размер растекания водного раствора по фильтру – примерно $18 \div 19$ мм. Образец сушили при температуре 50 °С и относительной влажности воздуха $30 \div 35$ % около 5 мин.

На рис. 1 а представлена зависимость интенсивности линий меди от концентрации в спектрах высушенных капель хлорида меди. Анализ по диаметру капли проводили в 25 точках. Аналогичные зависимости получены и для других солей.

Как видно из приведенных графиков (см. рис. 1 а), раствор высыхает практически равномерно по всей поверхности образца. При концентрации 0,1 % интенсивность линии сильно уменьшается. Для повышения концентрации элемента и соответствующей интенсивности линий размер фильтра уменьшили до 6 мм. Концентрацию меди по диаметру пробы оценивали в 8 точках (рис. 1 б). Поскольку при высыхании водного раствора происходит миграция солей по капиллярам фильтра, то по краям скорость высыхания больше и, следовательно, раствор постепенно передвигается на край, увеличивая тем самым концентрацию катионов у края капли. При использовании фильтра размером 6 мм интенсивность линии меди в средней его части по сравнению с фильтром диаметром 20 мм также увеличивается. При малой концентрации меди (0,05 %) закономерности между концентрацией и интенсивностью линии нарушаются.

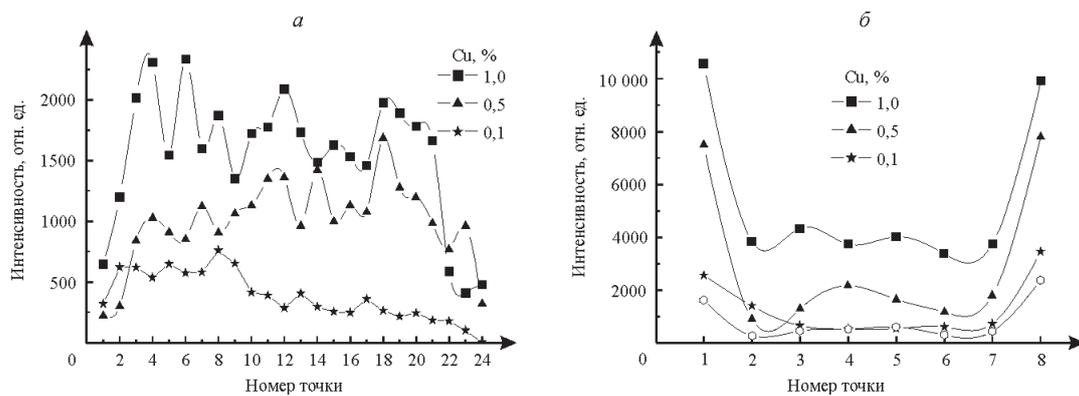


Рис. 1. Интенсивность линии меди ($\lambda = 324,754$ нм) в зависимости от ее концентрации на фильтрах диаметром 20 мм (а) и 6 мм (б)

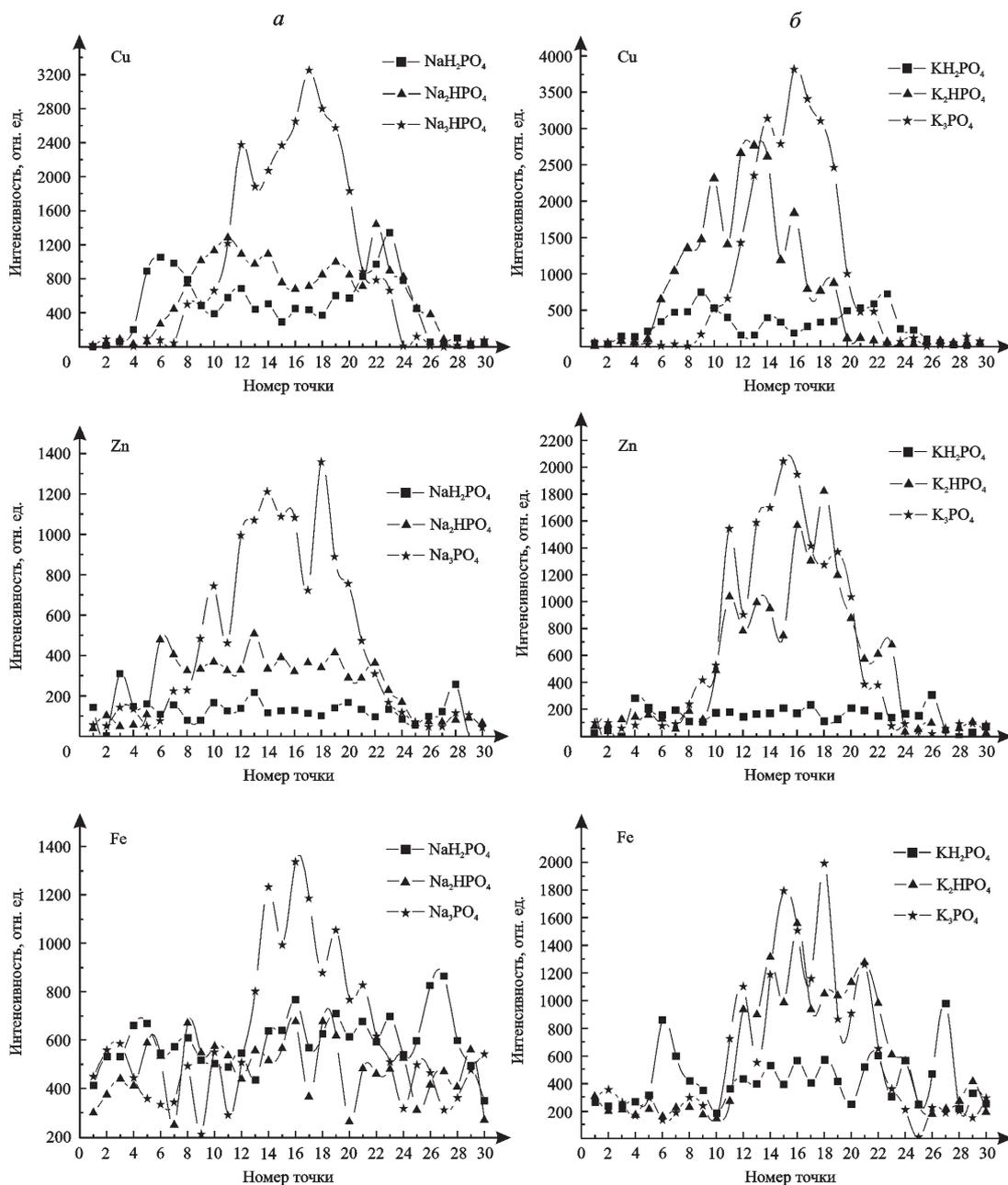


Рис. 2. Интенсивности линий меди Cu I ($\lambda = 324,754$ нм), цинка Zn I ($\lambda = 334,5$ нм) и железа Fe I ($\lambda = 384,105$ нм) в спектрах смеси солей меди, цинка и железа по диаметру образца (20 мм) при введении фосфатов натрия (а) и калия (б)

Для дальнейшей разработки методики полуколичественного и количественного определения элементов нами использован метод осадочной бумажной хроматографии, позволяющий уменьшить размер зоны осаждения элементов, а также оценить особенности поверхностного распределения макроэлементов [13].

В качестве осадителей для хлоридов меди, цинка, кальция и железа использовали моно-, ди- и ортофосфаты натрия, поскольку фосфаты тяжелых металлов обладают ограниченной растворимостью и вполне удовлетворяют требованиям осадочной хроматографии [14]. Растворимость фосфатов в воде резко падает с увеличением числа замещенных металлом атомов водорода, например, для солей кальция: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 - 1,5 \text{ г/100 г H}_2\text{O}$; $\text{CaHPO}_4 - 0,02 \text{ г/100 г H}_2\text{O}$ и $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 - 8 \cdot 10^{-4} \text{ г/100 г H}_2\text{O}$. Трехзамещенные фосфаты многовалентных элементов практически не растворяются. Так, произведение растворимости (ПР) для $\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$ равно $1,26 \cdot 10^{-37}$, $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 - 1 \cdot 10^{-31}$ и $\text{FePO}_4 - 1,13 \cdot 10^{-22}$. Литературные данные по растворимости других фосфатов немногочисленны и весьма противоречивы [14, 15].

Методика подготовки образцов следующая: раствор фосфата натрия (калия) концентрацией 5 % наносили микропипеткой (10 мкл) на поверхность бумажного фильтра диаметром 20 мм и высушивали. Процесс сушки проходил при температуре 50 °С и относительной влажности воздуха 30÷35 % в течение примерно 5 мин. Затем на поверхность высушенной капли наносили смесь хлоридов металлов с концентрацией 1 % каждого металла. После высушивания образцы анализировали по диаметру, как описано выше. Результаты проведенных исследований приведены на рисунках 2 а и рисунках 2 б.

Без использования осадителей (как видно из рис. 1 а) соли распределяются практически по всей площади образца. При введении фосфатов концентрация элементов в центральной части начинает заметно увеличиваться и наблюдается определенная закономерность их пространственного распределения. Особенно это заметно для образцов, где в качестве осадителя использовали растворы фосфатов калия (см. рис. 2 б), что, по-видимому, объясняется большей растворимостью фосфатов калия, чем фосфатов натрия. При нанесении капли раствора солей тяжелых металлов на высохшую каплю фосфата калия последний растворяется быстрее, а тяжелые металлы осаждаются по месту нанесения капли. Это подтверждается тем, что ортофосфаты цинка, меди и железа в растворах могут быть получены при использовании как ортофосфатов щелочных металлов, так и гидрофосфатов по реакции



Дополнительным фактором, влияющим на размер зоны распределения фосфатов тяжелых металлов, является то, что дигидрофосфаты имеют кислую реакцию, гидрофосфаты – слабощелочную, ортофосфаты – щелочную. Так, при одной и той же концентрации раствора рН для Na_2HPO_4 равен 9, а для $\text{NaH}_2\text{PO}_4 - 4$, т. е. дигидрофосфаты хорошо растворимы в воде, а почти все гидрофосфаты и ортофосфаты малорастворимы. Поэтому при недостатке гидрофосфата натрия (калия) в данном месте капли раствора солей тяжелых металлов будут распространяться на большую площадь.

Результаты оценки распределения металлов при образовании ортофосфатов тяжелых металлов приведены на рис. 3 а. Наблюдается определенная корреляционная зависимость размера капли от типа и растворимости образующихся фосфатов элементов. Диаметр пятна тем больше, чем больше растворимость соответствующего ортофосфата металла: железа > цинка > меди (см. выше значения ПР). Катионы калия, натрия в виде растворов хлоридов или кислых фосфатов при этом диффундируют на периферию высыхающей капли, как показано на рис. 3 б.

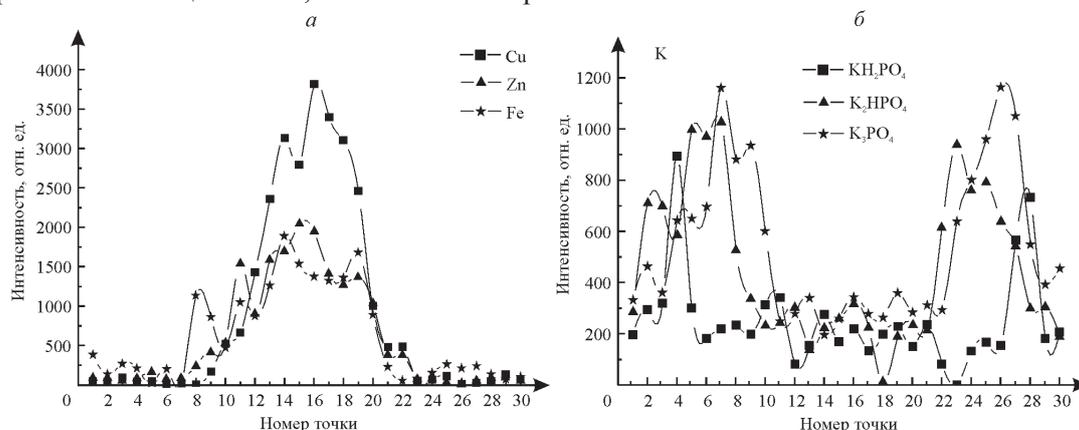


Рис. 3. Интенсивности линий: а – Cu I, Zn I, Fe I в спектрах смеси солей по диаметру образца (20 мм) для ортофосфатов К; б – К для различных фосфатов после реакции осаждения меди

Таким образом, в данной работе показано, что фосфаты калия и натрия позволяют значительно уменьшить размеры зоны распределения тяжелых металлов и тем самым повысить в несколько раз интенсивность линий в спектрах при высыхании капли раствора, нанесенного на высохшую каплю фосфата щелочного металла. С увеличением растворимости фосфата щелочного металла растет скорость реакции осаждения фосфата тяжелого металла и уменьшается размер зоны. Размеры зон для исследуемых тяжелых элементов зависят и определяются растворимостью ортофосфатов металлов в ряду: железо > цинк > медь.

Использование ортофосфатов калия для увеличения интенсивности линий анализируемых тяжелых металлов в спектрах высохших капель является перспективным направлением для разработки высокочувствительных методик количественного анализа растворов биологических образцов методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии со сдвоенными лазерными импульсами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курец Н. И. Роль дисбаланса химических элементов в формировании хронической патологии у детей // Медицинские новости. 2006. № 2. С. 7–17.
2. Авцын А. П., Жаворонков А. А., Риш М. А., Строчкова Л. С. Микроэлементозы человека. М., 1991.
3. Скальный А. В., Рудаков И. А. Биоэлементы в медицине. М., 2004.
4. Скальный А. В. Микроэлементозы человека (диагностика и лечение). М., 1999.
5. Лихачев С. А., Нечипуренко Н. И., Пашковская И. Д., Булойчик Ж. И. Микро- и макроэлементы крови у больных с острой ишемией головного мозга при макроангиопатии // Актуальные проблемы неврологии и нейрохирургии. 2009. Вып. 12. С. 233–239.
6. Нечипуренко Н. И., Верес А. И., Василевская Л. А., Пашковская И. Д. Содержание микроэлементов в крови и состоянии кожной микрогемодинамики у пациентов с дисциркуляторной энцефалопатией при использовании мексидола в комплексном лечении // Неврология и нейрохирургия в Беларуси. 2011. № 3(11). С. 98–108.
7. Гладких Э. А., Полякова Е. В., Шуваева О. В., Бейзель Н. Ф. Применение атомно-эмиссионной спектроскопии с возбуждением спектров в дуге постоянного тока для оценки средних уровней содержания макро- и микроэлементов в волосах человека // Микроэлементы в медицине. 2003. № 4. С. 20–24.
8. Скальный А. В. Референтные значения концентрации химических элементов в волосах, полученные методом ИСП-АЭС (АНО «Центр биотехнологической медицины») // Микроэлементы в медицине. 2003. № 4. С. 55–56.
9. Bass D. A., Hickok D., Qyig D., Urek K. Trace elements in hair: factors determining accuracy, precision and reliability – statistical data included // Med. Rev. 2001. № 6. P. 472–481.
10. Ермалицкая К. Ф., Зажогин А. П., Воропай Е. С. Определение содержания микроэлементов в волосах с помощью атомно-эмиссионного спектрального анализа: материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Технологии обеспечения здоровья». Ярославль, 2008. С. 250–255.
11. Сухов Л. Т. Лазерный спектральный анализ. Новосибирск, 1990.
12. Чинь Нгок Хоанг (Вьетнам), Патапович М. П., Фам Уиен Тхи (Вьетнам), Пашковская И. Д., Булойчик Ж. И., Зажогин А. П. Влияние физико-химических свойств фосфатов калия на распределение катионов Са, Mg и Al в высохших каплях альбумина методом локальной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2012. № 3. С. 12–15.
13. Патапович М. П., Чинь Нгок Хоанг (Вьетнам), Булойчик Ж. И., Зажогин А. П. Влияние физико-химических свойств солей алюминия, введенных в пористые тела, на интенсивность его линий в спектрах при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на пробу // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2011. № 1. С. 17–21.
14. Алексеев В. И. Количественный анализ. М., 1972. С. 65–118.
15. Горюновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии. Киев, 1987. С. 649–685.

Поступила в редакцию 29.02.13.

Мария Петровна Патапович – аспирант кафедры лазерной физики и спектроскопии. Научный руководитель – А. П. Зажогин.

Чинь Нгок Хоанг – аспирант кафедры лазерной физики и спектроскопии. Научный руководитель – А. П. Зажогин.

Ирина Дмитриевна Пашковская – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Республиканского научно-практического центра неврологии и нейрохирургии.

Лэ Тхи Ким Ань – студентка 5-го курса физического факультета.

Жанна Игнатьевна Булойчик – кандидат химических наук, старший научный сотрудник кафедры физической оптики.

Анатолий Павлович Зажогин – доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии.

УДК 539:669.6

В. Г. ШЕПЕЛЕВИЧ

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ЗЕРЕННАЯ СТРУКТУРА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ОЛОВО – КАДМИЙ

Представлены результаты исследования микроструктуры быстрозатвердевших сплавов Sn – (20+40) мас. % Cd. Средняя скорость охлаждения жидкой фазы $\approx 5 \cdot 10^5$ К/с. При исследовании микроструктуры использованы растровая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ и рентгеноспектральный микроанализ. В переохлажденном и пересыщенном жидком растворе происходит спиноподобный распад. Затем в областях, обогащенных Sn и Cd, происходит кристаллизация. Быстрозатвердевшие фольги состоят из твердых растворов олова и кадмия. Частицы кадмия распределены в фольге неоднородно, твердые фазы имеют микрокристаллическую структуру. Средние размеры зерен олова и кадмия равны 0,8 и 0,9 мкм соответственно. Определены удельные поверхности межфазных границ и границ зерен в кристаллических фазах. В быстрозатвердевших фольгах наблюдаются текстуры (100) Sn и (0001) Cd.