

## ЭМИССИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИОНОВ-ДИМЕРОВ ВИДА «ПРИМЕСЬ ЦИНКА—МАТРИЧНЫЙ АТОМ» ИЗ СОЕДИНЕНИЙ GaX (X ≡ N, P, As, Sb)

©2015 Н. Н. Афонин<sup>1</sup>, Д. Ю. Казанцев<sup>2</sup>, А. П. Коварский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный педагогический университет,  
ул. Ленина, 86, 394043 Воронеж, Россия  
e-mail: nafonin@vspsu.ac.ru

<sup>2</sup>Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,  
Политехническая, 26, 194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: alex.kovarsky@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 13.10.2014 г.

**Аннотация.** Изучали эмиссию комплексных примесных атомов цинка из полупроводниковых соединений GaX (X ≡ N, P, As, Sb). Сравнивали эмиссионные параметры при бомбардировке мишеней ионами кислорода (O<sub>2</sub><sup>+</sup>) и цезия (Cs<sup>+</sup>). Параллельно в том же режиме записывали сигнал атомарных ионов Zn<sup>+</sup>.

Измерения проводили с помощью образцов, в которые цинк внедрен ионной имплантацией. Показано, что выходы комплексных ионов GaZn<sup>+</sup> для некоторых мишеней сравнимы с ионными выходами CsZn<sup>+</sup>. Для практики послойного анализа это означает возможность определять в одном эксперименте одновременно с цинком другие электроположительные элементы, используя первичный пучок ионов кислорода. Экспериментально проверена возможность определения цинка при записи масс-спектра отрицательных вторичных ионов. На основе полученных данных сделаны предположения о механизме эмиссии комплексных ионов с цинком.

**Ключевые слова:** вторично-ионная масс-спектрометрия.

### ВВЕДЕНИЕ

В полупроводниковых соединениях A<sub>3</sub>B<sub>5</sub>p-тип проводимости часто создают введением в матрицу атомов цинка. Контроль содержания всей введенной примеси цинка, а не только электрически активной части, и распределение цинка по глубине образцов проводят методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) [1].

Известно [2], что ионный выход атомов цинка при зондировании мишени ионами кислорода крайне низок, и аналитический сигнал имеет невысокую интенсивность, что не позволяет получать низкие пределы обнаружения примеси. Гуно [3] экспериментально показал возможность значительного увеличения ионного выхода при бомбардировке образца ионами цезия и регистрации положительного сигнала CsZn<sup>+</sup>. В настоящее время такая комбинация первичного и вторичного анализируемого сигнала используется в практике послойного определения цинка в полупроводниковых

соединениях A<sub>3</sub>B<sub>5</sub> [см., например, 4—8]. Однако такой режим измерений не позволяет получить высокую чувствительность по большинству электроположительных элементов, одновременная регистрация которых желательна при измерении концентрационных распределений цинка.

Мы предприняли попытку экспериментально выявить фрагменты с цинком, которые имеют относительно высокий ионный выход при бомбардировке образцов GaX (X = N, P, As, Sb) первичными ионами кислорода. В приложениях метода ВИМС выявление таких фрагментов позволяет «одновременную» регистрацию и цинка, легатуры p-типа, и примесных электроположительных элементов, загрязняющих образец. Предполагали, что такими фрагментами могут быть димеры вида «примесь — матрица» (GaZn<sup>+</sup>). Такие фрагменты могут эмитировать из бинарных матриц GaX при бомбардировке их ионами кислорода (O<sub>2</sub><sup>+</sup>). Полученные результаты сопоставляли с измерениями распределений

цинка, проведёнными при бомбардировке мишеней ионами цезия и регистрации сигнала  $\text{CsZn}^+$ .

Проведены также измерения эмиссии цинксо-держащих отрицательных вторичных ионов  $\text{XZn}^-$  при бомбардировке образцов первичными ионами цезия. Цель данных измерений — расширение возможности метода ВИМС при необходимости одновременной регистрации с цинком электроотрицательных элементов.

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы были приготовлены путем имплантации цинка в монокристаллические пластины GaP, GaAs, GaSb и эпитаксиальные слои GaN толщиной более 1 микрона, нанесенные на сапфир. Энергия имплантации и количество внедренной примеси (доза) представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры имплантации цинка в соединения GaX (X = N, P, As, Sb)

Образец	GaN, (0001)	GaP, (001)	GaAs, (001)	GaSb, (001)
Энергия имплантации, (кэВ)	200	250	250	250
Доза имплантации ( $\text{см}^{-2}$ )	$3 \times 10^{14}$	$1 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{15}$	$3 \times 10^{13}$

Известно [9], что имплантация антимолидов третьей группы приводит к «распуханию» кристаллической решетки (свеллинг). Последний может в несколько раз увеличить объём имплантированной области образца, что делает образец непригодным для калибровки измеряемого сигнала (имп/с) и перевода его в концентрацию примеси ( $\text{ат}/\text{см}^3$ ). В [10] мы показали, что снижение дозы имплантации даёт возможность минимизировать свеллинг антимолида галлия и сделать такой образец пригодным для калибровки измеряемого сигнала. Образец GaSb с дозой имплантации  $3 \cdot 10^{13}$   $\text{ат}/\text{см}^2$  (см. табл. 1) практически не подвержен свеллингу и может использоваться для перевода сигнала  $\text{GaZn}^+$  в концентрацию цинка. Для остальных мишеней галлиевого ряда эффект свеллинга не наблюдают, что делает такие образцы весьма удобными для получения количественной информации о содержании примесного атома [11]. Отметим, что энергия имплантации выбрана таким образом, чтобы глубина залегания максимума распределения находилась на расстоянии 200—300 постоянных решётки от поверхности. В этом случае ионы, эмитирующие с таких глубин образца, считают ионами объёмного происхождения [1].

Измерения проводили на ионном микроанализаторе IMS 4f (САМЕСА, Франция). Измеряли сигнал положительных однозаряженных, одноатомных ( $\text{Zn}^+$ ) и ионов — димеров вида ( $\text{GaZn}^+$ ) при бомбардировке мишеней первичным пучком кислорода ( $\text{O}_2^+$ ). Полученные данные сравнивали с широко распространённым приёмом регистрации сигнала  $\text{CsZn}^+$  при бомбардировке образцов

ионами цезия. Кроме того, исследовали эмиссию отрицательных вторичных ионов в комплексе с цинком из тех же соединений вида  $\text{ZnX}^-$ . В этом случае бомбардировку образцов проводили ионами цезия  $\text{Cs}^+$ .

Ускоряющее напряжение для первичных пучков разного сорта было 10 кВ, что с учетом потенциала на мишени (+4.5 кВ) определяет энергию первичных частиц у поверхности мишени 5.5 кэВ. При потенциале на мишени — 4.5 кВ энергия ионов цезия 14.5 кэВ. При одинаковой полярности первичных и вторичных ионов угол падения пучка на мишень составляет  $42^\circ$  относительно нормали к поверхности. При разной полярности первичных и вторичных ионов угол падения —  $22^\circ$ . Для удобства сравнения измерений на пучках ионов цезия и кислорода плотность тока бомбардировки выбирали такой, чтобы скорость распыления мишеней была в обоих случаях одинакова. Иначе говоря, чтобы объём анализируемой пробы, распыляемой кислородным пучком, был таким же, как и объём, распыляемый пучком ионов цезия.

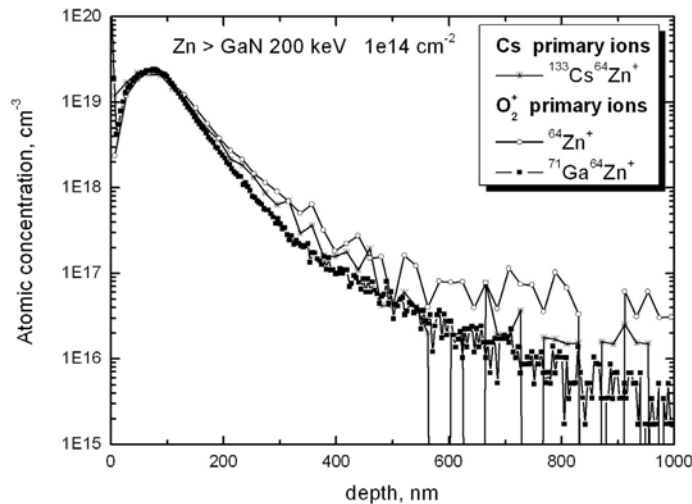
В наших экспериментах указанное условие выполнялось при токе ионов кислорода 750 нА, диаметр пучка на мишени примерно 70 мкм, и токе ионов цезия — 100 нА, диаметр пучка ~ 50 мкм. Для минимизации «кратерного эффекта» [10] пучок каждого сорта ионов разворачивали в растр на площади  $250 \times 250$   $\text{мкм}^2$ , в анализатор отбирали ионы из центральной части распыляемой области диаметром 60 мкм с помощью «полевой» апертуры, размещенной в плоскости изображения. Энергетическая полоса пропускания масс-сепаратора составляла  $\Delta E = 130$  эВ.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

На рис. 1—4 показаны профили цинка, имплантированного в GaX матрицы, измеренные в разных режимах. Измеряли токи вторичных ионов  $Zn^+$ ,  $GaZn^+$  и  $CsZn^+$ . Результаты измерений образцов в разных режимах были преобразованы в координаты концентрация цинка — глубина отбора пробы. По оси ординат отложена концентрация цинка, пересчитанная по дозе имплантации. По оси абс-

цисс — глубина отбора пробы, определяемая по глубине кратера, измеренной профилографом после окончания записи профиля и удалении держателя образцов из камеры прибора.

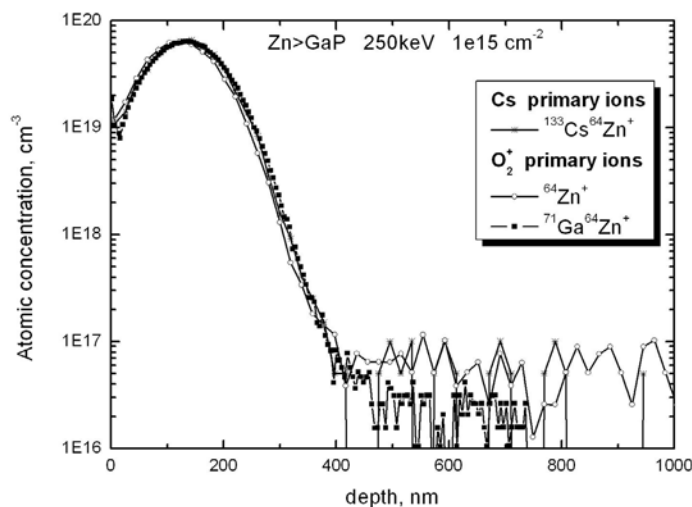
По этим данным получены значения ионных выходов фрагментов и пределы их обнаружения, приведенные в табл. 2. Пределы обнаружения определяли на «хвостах» измеренных профилей, параллельных оси абсцисс. Расчёт проводили по не менее чем 20 точкам данных.



**Рис. 1.** Концентрационный профиль цинка, имплантированного в GaN; измерения по разным аналитическим сигналам с использованием зондирующих пучков цезия и кислорода

Данные для образцов GaP и GaAs с измерениями профилей цинка в области масс-спектра отрицательных ионов не приводятся (сигналы  $ZnP^-$  и  $ZnAs^-$ ), поскольку идентичны по форме показан-

ным на рис. 2 и 3, но с динамическим диапазоном на порядок худшим, чем для положительного аналитического сигнала.



**Рис. 2.** Концентрационный профиль цинка, имплантированного в GaP; измерения по разным аналитическим сигналам с использованием зондирующих пучков цезия и кислорода

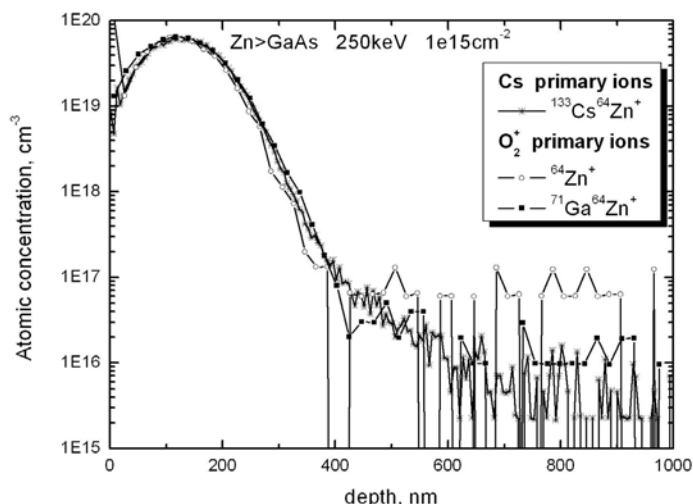


Рис. 3. Концентрационный профиль цинка, имплантированного в GaAs; измерения по разным аналитическим сигналам с использованием зондирующих пучков цезия и кислорода

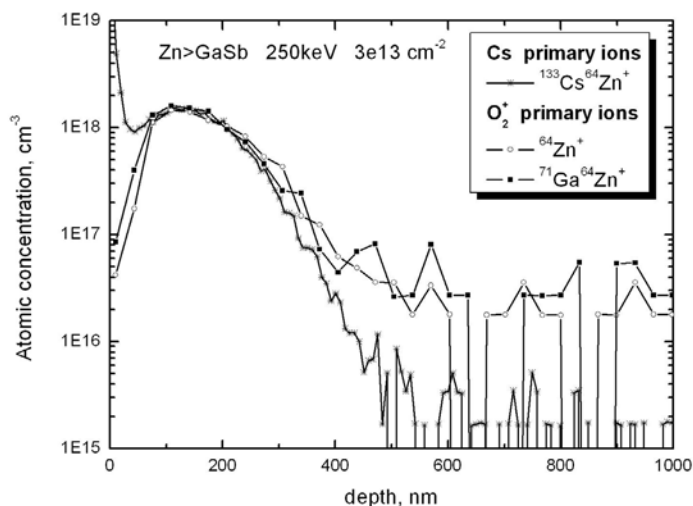


Рис. 4. Концентрационный профиль цинка, имплантированного в GaSb; измерения по разным аналитическим сигналам с использованием зондирующих пучков цезия и кислорода

Таблица 2. Значения пределов обнаружения цинка в матрицах GaX (из рис. 1—4), полученные при использовании разных аналитических сигналов положительного масс-спектра (строки 4, 5, 6) и отрицательного масс-спектра (строка 7)

Образец	Нитрид Галлия	Фосфид Галлия	Арсенид Галлия	Антимонид Галлия
$C_{\max}$ [ат/см <sup>3</sup> ]	$2.4 \cdot 10^{19}$	$6 \cdot 10^{19}$	$7 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{18}$
Аналит. сигнал	Предел обнаружения [ат/см <sup>3</sup> ]	Предел обнаружения [ат/см <sup>3</sup> ]	Предел обнаружения [ат/см <sup>3</sup> ]	Предел обнаружения [ат/см <sup>3</sup> ]
Zn <sup>+</sup>	$(5 \pm 2.4) \cdot 10^{16}$	$(7 \pm 3.9) \cdot 10^{16}$	$(4 \pm 2) \cdot 10^{16}$	$(3 \pm 0.91) \cdot 10^{16}$
GaZn <sup>+</sup>	$(3 \pm 1.6) \cdot 10^{16}$	$(5 \pm 2.7) \cdot 10^{16}$	$(1 \pm 0.76) \cdot 10^{16}$	$(3 \pm 2.8) \cdot 10^{16}$
CsZn <sup>+</sup>	$(5 \pm 2.9) \cdot 10^{15}$	$(2 \pm 0.97) \cdot 10^{16}$	$(5.6 \pm 4.5) \cdot 10^{15}$	$(3 \pm 1.2) \cdot 10^{15}$
X <sub>5</sub> Zn <sup>-</sup>	-	$(6.7 \pm 3) \cdot 10^{17}$	$(4 \pm 1.7) \cdot 10^{17}$	-

Как следует из табл. 2, пределы обнаружения цинка с использованием первичного пучка ионов  $O_2^+$  по аналитическому сигналу  $GaZn^+$  для GaP и GaAs всего вдвое хуже пределов обнаружения примеси по сигналу  $CsZn^+$ . Для GaN и GaSb сигнал  $GaZn^+$  показывает предел обнаружения на порядок хуже, чем по сигналу  $CsZn^+$ . Тем не менее, предлагаемая методика определения цинка по аналитическому сигналу  $GaZn^+$  показывает достаточно низкие значения пределов обнаружения для всех матриц GaX, что важно, если необходимо определение иных электроположительных примесей в одном цикле измерений.

Для расширения возможностей методики определения цинка в области масс-спектра отрицательных вторичных ионов профили измеряли при бомбардировке мишеней ионами цезия и регистрации сигнала  $XZn^-$ , где, как и выше,  $X \equiv N, P, As, Sb$ . Выход димеров  $NZn^-$  и  $SbZn^-$  из матриц GaN и GaSb, соответственно, не наблюдается. Однако выходы димеров  $PZn^-$  и  $AsZn^-$  имеют вполне значимые величины, что позволило определить пределы обнаружения цинка в области масс-спектра отрицательных вторичных ионов для этих матриц (см. табл. 2, последняя строка). Таким образом, по крайней мере, для GaP и GaAs, показана возможность определения цинка в одном эксперименте с электроотрицательными примесями элементами.

Высокие пределы обнаружения цинка по сигналам отрицательных ионов, вероятнее всего, связаны с наличием наложений на аналитический сигнал изобарных пиков. Возможно таковыми являются изобары матрицы, например, в GaP, сигнал  $^{95}(^{64}Zn^{31}P)^-$  может интерферировать с пиком  $^{95}(^{31}P_3^1H_2)^-$ . С учётом неконтролируемых загрязнений анализируемых матриц число интерференций

может быть достаточно велико, что и определяет высокий уровень фонового сигнала.

Измеренные имплантационные профили использовали для определения ионных выходов перечисленных выше фрагментов. Использовали значение концентрации в максимуме распределения, исходя из тех соображений, что в каждой из анализируемых матриц максимальная концентрация цинка залегает на глубине, отстоящей от поверхности не менее чем на 200—300 постоянных решётки. Иначе говоря, ионы, эмитирующие с такой глубины мишени, можно считать ионами объёмного происхождения.

Ионные выходы фрагментов определяли по соотношению [8]:

$$Y = \frac{n \sum I_{SI}}{D \cdot I_{PI} \cdot \eta} = \frac{I_{SI}}{I_{PI} \cdot C^A \cdot \eta \cdot \frac{a}{100}} \quad (1)$$

где  $n$  — число точек измерений аналитического сигнала,

$D$  — доза внедрённого цинка, измеряется в процессе имплантации,

$I_{SI}$  — ток вторичных ионов,

$I_{PI}$  — ток первичных ионов,

$C^A$  — концентрация цинка (изотоп с массовым числом 64 а. е. м., именно этот изотоп имплантирован в анализируемые мишени),

$\eta$  — пропускание прибора, принято 0.1 и

$a/100$  — изотопная распространенность  $\sim 1$ , поскольку имплантирован изотоп  $^{64}Zn$ .

В выражении (1) токи первичных и вторичных ионов измеряются в эксперименте, а концентрация цинка определяется дозой имплантации изотопа цинка, как интеграл под измеренным профилем. В табл. 3 приведены значения ионных выходов, вычисленные по концентрации в максимуме, атомов и димеров цинка из всех измеренных матриц, определённые по уравнению (1).

**Таблица 3.** Значения ионных выходов цинксодержащих фрагментов из галлиевых матриц.

ОБРАЗЕЦ Аналитический сигнал	GaN	GaP	GaAs	GaSb
$Zn^+$	$2.14 \cdot 10^{-7}$	$1.0 \cdot 10^{-7}$	$0.490 \cdot 10^{-7}$	$7.36 \cdot 10^{-7}$
$GaZn^+$	$17.1 \cdot 10^{-7}$	$34.9 \cdot 10^{-7}$	$9.79 \cdot 10^{-7}$	$2.45 \cdot 10^{-7}$
$CsZn^+$	$23.2 \cdot 10^{-7}$	$5.38 \cdot 10^{-7}$	$7.49 \cdot 10^{-7}$	$14.3 \cdot 10^{-7}$

Как следует из представленных данных, эмиссию димеров можно интерпретировать как результат химической реакции, инициированной первичным пучком. Имплантация примесных атомов

приводит к хаотичному их распределению в решётке основы. Таким образом, ионы первичного пучка играют роль постимплантационного отжига, что приводит к образованию химических связей атомов

цинка с атомами основы. Цинк, как амфотерный элемент, образует химическую связь с элементом более электроположительным, чем сам цинк. В случае бомбардировки цезием (первичный пучок  $Cs^+$ ), в стационарном режиме, большим положительным зарядом в системе Ga, X, Zn обладает Cs. Потенциал ионизации последнего, самый низкий из всех элементов Периодической системы (см. табл. 4),

определяет высокую интенсивность ионного тока фрагментов  $CsZn^+$ . При бомбардировке кислородом систем GaX наиболее электроположителен галлий; образование  $GaZn^+$  так же наиболее вероятно. В табл. 4 сведены значения потенциалов ионизации элементов, участвующих в процессе эмиссии вторичных ионов при бомбардировке первичными ионами кислорода и цезия [12].

Таблица 4. Потенциалы ионизации (эВ)

Элемент	Cs	Ga	Sb	Zn	As	P	O	N
$I_p$ [эВ]	3.894	5.998	8.64	9.394	9.815	10.487	13.62	14.534

На основе полученных данных мы полагаем, что цинк, как амфотерный элемент, образует химическую связь с более электроположительными элементами, чем он сам. В стационарных условиях, когда установлен баланс распыляющих ионов и распылённых частиц материала, поверхностные слои мишени состоят из атомов матрицы и атомов бомбардирующего пучка. В случае бомбардировки ионами цезия эмитирующий слой содержит атомы цезия; при первичных ионах кислорода в эмитирующем слое присутствует кислород. При имплантации атомы цинка распределяются в решетке анализированных полупроводников хаотично и, возможно, энергия первичного пучка достаточна для образования химической связи. Т.е. образуется химическая связь цезий — цинк, и ионный выход комплекса  $CsZn^+$  превалирует. При бомбардировке кислородом в систему добавляется электроотрицательный кислород, и наиболее электроположительным элементом в данном случае является галлий, который образует связь цинк — галлий. Наличие связи цинк — электроположительный элемент и низкий потенциал ионизации катиона (табл. 4) на наш взгляд и обуславливает высокий выход комплексных ионов с цинком по сравнению с выходом одноатомных ионов цинка. Кроме того, в табл. 3 и 4 прослеживается корреляция между уменьшением величины ионного выхода фрагмента  $GaZn^+$  с увеличением потенциала ионизации аниона в соединении Ga-N, -P, -As, -Sb. Иначе, чем ниже потенциал ионизации аниона, тем выше вероятность нейтрализации эмитирующего комплекса. В случае выхода  $CsZn^+$  подобной корреляции не наблюдается.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучены аналитические характеристики определения цинка в соединениях GaX ( $X \equiv N, P, As, Sb$ ) методом вторично-ионной масс-спектрометрии. Установлена зависимость значений ионного выхода комплексных цинкосодержащих вторичных ионов от химического состава поверхности образца во время травления ее пучком первичных ионов. Показана возможность получения лучших пределов обнаружения при измерении концентрации цинка при использовании комплексных вторичных ионов. Также показана возможность определения содержания цинка при измерении отрицательного масс-спектра вторичных ионов соединений GaP и GaAs.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Benninghoven A., Rudenaur F. G., Wener H. W. *Secondary Ion Mass Spectrometry: Basic Concept, Instrumental aspects, and Trend*. New York, Wiley, 1987, 1202 p.
2. Gao Y. // *J. Appl. Phys*, 1988, vol. 64, № 7, pp. 3760—3762.
3. Gauneau M., Chapling R., Rupert R. // *J. de Physique*, 1984, vol. 45, № 2, suppl 2, pp.119—127; Gao Y. // *Surf. Interface Anal.* 1989, vol. 14, № 4, pp. 552—554.
4. Gnaser H. // *Int. J. Mass Spectrom. Ion Processes*, 1998, vol. 174, pp. 119—127.
5. Gnaser H. // *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1994, vol. 12, № 2, pp. 452—456.
6. Callec R., Favennec P. N., Salvi M., L'Haridon H., and Gauneau M. // *Appl. Phys. Lett.*, 1991, vol. 59, № 15, pp. 1872—1874.
7. Maier M. in «*Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS X)*», Proceedings, 10th International Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry, University of Muenster, Muenster, Germany, October 1—6th, 1995.
8. Kazantsev D. Yu., Kovarsky A. P. // *Applied Surf. Sci.*, 2004, vol. 231—232, pp. 826—828.

9. Day Jr. M.C., Selbin J. New York, Reinhold Publ. Corp., 1962, p. 125.

10. Wilson R. G., Stevie R. A., Magge Ch.W. *Secondary Ion Mass Spectrometry. A Practical Handbook*. New York, Jhon Wiley @ sons, 1989, pt. 3.2.

11. Migeon H. N., LePipec C., LeGoux J.J. «*Secondary Ion Mass Spectromerty (SIMS V)*», Proceedings, 5 Interna-

tional Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry, eds A. Benninghoven, R. J. Colton, D. S. Simons, H. W. Werner. 1985, pp. 155—157.

12. Гуревич Л. В., Карачевцев Г. К., Кондратьев В. Н. и др. *Энергия разрыва химических связей, потенциалы ионизации и средство к электрону*. Справочник. Наука, 1974, с. 226.

## EMISSION COMPLEX IONS-DIMER «IMPURITY ZINC—MATRIX АТОМ» FROM THE COMPOUNDS GaX (X ≡ N, P, As, Sb)

©2015 N. N. Afonin<sup>1</sup>, D. Yu. Kazantsev<sup>2</sup>, A. P. Kovarsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Pedagogical University, Lenin str., 86, 394043 Voronezh, Russia  
e-mail: nafonin@vspu.ac.ru

<sup>2</sup>Ioffe Physico-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Polytekhnicheskaya, 26, 194021 St-Petersburg, Russia  
e-mail: alex.kovarsky@mail.ioffe.ru

Recived 13.10.2014

**Abstracts.** The emission of the zinc cluster secondary ions of semiconductor materials of GaX (X ≡ N, P, As, Sb) was studied. The emission characteristics during oxygen and cesium primaries bombardment were compared. The intensity of the Zn<sup>+</sup> ions was recorded in the same mode as reference. The measurements were performed by using samples ion-implanted with zinc. The studies showed that the yields of GaZn<sup>+</sup> cluster ions are comparable with the CsZn<sup>+</sup> ion yields for the some targets. For the in-depth profile routines that's mean the possibility to determine zinc contents and other electropositive elements in the same mode. The possibility of zinc determination in measuring mass spectra of negative secondary ions was confirmed experimentally. Based on the data obtained, assumptions about the emission mechanism of zinc-containing cluster ions were made.

**Keywords:** secondary ion mass-spectrometry.

### REFERENCES

1. Benninghoven A., Rudenaur F. G., Wener H. W. *Secondary Ion Mass Spectrometry: Basic Concept, Instrumental Aspects, and Trend*. New York, Wiley, 1987, 1202 p.

2. Gao Y. *J. Appl. Phys.*, 1988, vol. 64, № 7, pp. 3760—3762. <http://dx.doi.org/10.1063/1.341381>

3. Gauneau M., Chapling R., Rupert R. *J. de Physique*, 1984, vol. 45, № 2, suppl 2, pp.119—127; Gao Y. // *Surf. Interface Anal.* 1989, vol. 14, № 4, pp. 552—554.

4. Gnaser H. *Int. J. Mass Spectrom. Ion Processes*, 1998, vol. 174, pp. 119—127. DOI:10.1016/S0168—1176(97)00295—4

5. Gnaser H. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1994, vol. 12, № 2, pp. 452—456. <http://dx.doi.org/10.1116/1.579262>

6. Callec R., Favennec P. N., Salvi M., L'Haridon H., and Gauneau M. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, vol. 59, № 15, pp. 1872—1874. <http://dx.doi.org/10.1063/1.106173>

7. Maier M. in «*Secondary Ion Mass Spectromerty (SIMS X)*», Proceedings, 10th International Conference on

Secondary Ion Mass Spectrometry, University of Muenster, Muenster, Germany, October 1—6th, 1995.

8. Kazantsev D. Yu., Kovarsky A. P. *Applied Surf. Sci.*, 2004, vol. 231—232, pp. 826—828. DOI:10.1016/j.apusc.2004.03.131

9. Day Jr. M.C., Selbin J. New York, Reinhold Publ. Corp., 1962, p. 125.

10. Wilson R. G., Stevie R. A., Magge Ch.W. *Secondary Ion Mass Spectrometry. A Practical Handbook*. New York, Jhon Wiley @ sons, 1989, pt. 3.2.

11. Migeon H. N., LePipec C., LeGoux J.J. «*Secondary Ion Mass Spectromerty (SIMS V)*», Proceedings, 5 International Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry, eds A. Benninghoven, R. J. Colton, D. S. Simons, H. W. Werner. 1985, pp. 155—157.

12. Gurevich L. V., Karachevcev G. K., Kondrat'ev V.N. i dr. *Energiya razryva khimicheskikh svyazei, potentsialy ionizatsii i srodstvo k elektronu*. Spravochnik. Nauka Publ., 1974, p. 226.

*Афонин Николай Николаевич* — д. х. н., профессор, Воронежский государственный педагогический университет; тел.: (473) 2208445, e-mail: nafonin@vspu.ac.ru

*Казанцев Дмитрий Юрьевич* — н. с., Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

*Коварский Алексей Павлович* — к. т. н., старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН; тел.: +7(812) 2927362, e-mail: alex.kovarsky@mail.ioffe.ru

*Afonin Nikolay N.* — Dr. Sci. (Chem.), Professor, Voronezh State Pedagogical University; ph: (473) 2208445, e-mail: nafonin@vspu.ac.ru

*Kazantsev Dmitrii Yu.* — Researcher, Ioffe Physico-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences

*Kovarsky Alex P.* — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Center for the Physics of Nanoheterostructures, Surface Analysis Group, Ioffe Physico-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences; ph.: +7(812) 2927362, e-mail: alex.kovarsky@mail.ioffe.ru