

УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ Ga^+ И In^+ , ЭМИТИРУЕМЫХ ИЗ СПЛАВНОГО ГАЛЛИЙ-ИНДИЕВОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

В.К.Медведев, В.И.Черный

Институт физики АН УССР
252650, Киев

Поступила в редакцию 2 апреля 1991 г.

Обнаружено сильное отличие угловых распределений ионов галлия и индия, эмиттируемых из сплавного галлий-индивого жидкотемпературного источника ионов. Приводится качественное объяснение эффекта, основанное на учете различия полей испарения ионов галлия и индия.

Жидкотемпературные источники ионов находят все более широкое применение в ионно-лучевых устройствах, предназначенных для микроанализа и микрообработки различных материалов¹. К настоящему времени разработано большое количество таких одноэлементных и сплавных источников, обеспечивающих практически весь необходимый набор ионов². Однако их механизм работы до сих пор остается не до конца ясным. В частности, для сплавных жидкотемпературных источников не выяснены вопросы взаимодействия различных элементов сплава в зоне ионизации. При описании таких источников обычно предполагается, что ионы всех компонент сплава имеют одинаковые угловые распределения и, соответственно, приводится соотношение потоков различных ионов, измеренное для одного направления, чаще всего для оси конуса эмиссии. В настоящей работе обнаружено, что в действительности угловые распределения ионов различных элементов, эмиттируемых сплавным жидкотемпературным источником, могут существенно отличаться.

Экспериментальная установка включала в себя масс-спектрометр МИ-1201Т. Жидкотемпературный источник ионов - заполненная галлий-индивым сплавом (94 ат.% Ga и 6 ат.% In) тонкая tantalовая трубка с выступающим из нее вольфрамовым острием, приваренная к держателям через две вольфрамовые нити - закрепляется на врачающемся в вертикальной плоскости барабане таким образом, что вершина острия располагалась на оси вращения напротив середины входной щели масс-спектрометра. Входная щель была закрыта экраном с горизонтальной щелью шириной около 1 мм против ее середины, что обеспечивало разрешающую способность прибора по углам $< 1^\circ$. Вакуум во входной части масс-спектрометра во время работы жидкотемпературного источника ионов составлял $10^{-6} - 10^{-7}$ Па.

На рис. 1 приведены угловые распределения ионов $^{69}Ga^+$ и $^{115}In^+$ при комнатной температуре источника и малом, близком к пороговому эмиссионному токе 2 мА. Они оказались совершенно разными. Для $^{69}Ga^+$ угловое распределение похоже на типичное угловое распределение однозарядных ионов для одноэлементного источника при низких температурах³. Некоторая асимметрия этого распределения обусловлена, вероятно, асимметрией формы вершины острия. Для $^{115}In^+$ угловое распределение имеет ярко выраженные максимумы при углах $\pm 10^\circ$, угловая плотность ионного тока индия в этих максимумах в десятки раз превышает угловую плотность в центре конуса эмиссии. Если перпендикулярно оси конуса эмиссии поставить экран, то след от ионов Ga^+ на нем будет иметь форму круга, а от ионов In^+ - кольца.

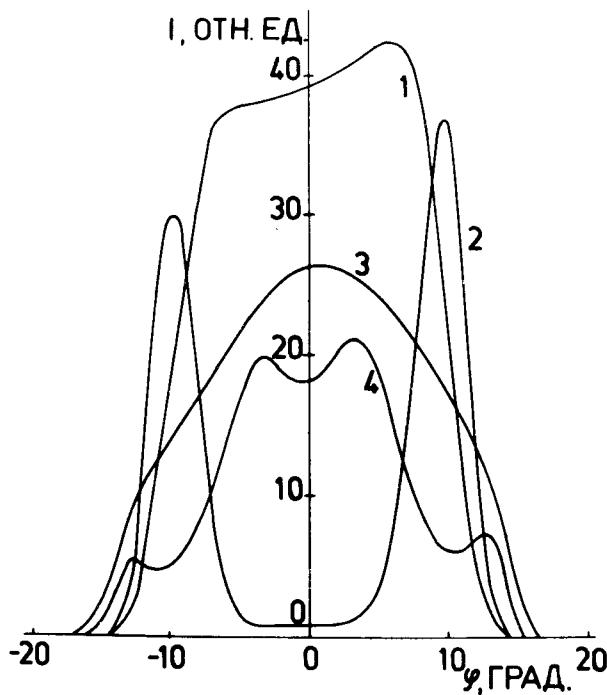


Рис. 1. Угловые распределения ионов $^{69}\text{Ga}^+$ и $^{115}\text{In}^+$, эмиттируемые из сплавного галлий-индийского жидкокометаллического источника ионов при токе эмиссии 2 мкА и различных температурах источника: 1 - $^{69}\text{Ga}^+$, $T = 300\text{ K}$; 2 - $^{115}\text{In}^+$, $T = 300\text{K}$; 3 - $^{69}\text{Ga}^+$, $T = 500\text{ K}$; 4 - $^{115}\text{In}^+$, $T = 520\text{ K}$. Для $^{115}\text{In}^+$ масштаб по вертикали увеличен в 10 раз

При повышении температуры источника угловое распределение ионов $^{69}\text{Ga}^+$ при $T \approx 350\text{K}$ начинает сглаживаться и расширяться и при $T \approx 500\text{ K}$ приобретает типичную "высокотемпературную" форму с максимумом в центре конуса эмиссии и резким спадом на краю конуса. На угловом распределении $^{115}\text{In}^+$ уже при $T \approx 330\text{ K}$ максимумы начинают расширяться и понижаться, ток в центре конуса увеличивается. При $T \approx 380\text{ K}$ каждый максимум разделяется на два, при дальнейшем увеличении температуры внутренние максимумы растут и сближаются, а внешние - уменьшаются и удаляются.

Для объяснения возможной причины отличия угловых распределений ионов Ga^+ и In^+ при комнатной температуре источника рассмотрим работу сплавного жидкокометаллического источника ионов в устойчивом режиме, который, вероятно, осуществляется при низких температурах источника и малых эмиссионных токах. Под действием электрического поля жидкий металл на вершине острия образует конус Тэйлора, на вершине которого вырастает тонкий (диаметром меньше 10 нм⁴) выступ. По мере увеличения длины выступа электрическое поле на его вершине растет, и начинается интенсивная эмиссия ионов. При этом длина выступа стабилизируется таким образом, что электрическое поле на его вершине, создаваемое внешним потенциалом и ионным объемным зарядом, становится равным полю испарения ионов. Поле, при котором энергия испарения однозарядных ионов становится равной нулю, пропорционально квадрату теплоты испарения однозарядного иона q_i , равной

$$q_i = q_a + v_i - \varphi.$$

У In теплота сублимации q_a примерно на 0,4 эВ, а потенциал ионизации v_i на 0,2 эВ меньше, чем у Ga. В результате при работе выхода φ около 4 эВ испаряющее поле для In^+ оказывается примерно на 30% меньше, чем для Ga^+ . И если в сплавном источнике In - Ga испаряющее поле для Ga^+ достигается на вершине выступа, для In^+ это поле достигается уже на некотором расстоянии от вершины. Поэтому ионы In^+ испаряются с боковой поверхности выступа, давая вклад в боковые максимумы (рис. 2). Из-за малой толщины выступа этот процесс приводит к эффективному уходу In из струи, так что на вершине выступа его концентрация становится очень малой и, соответственно, резко уменьшается ионный ток In^+ в центре конуса эмиссии.

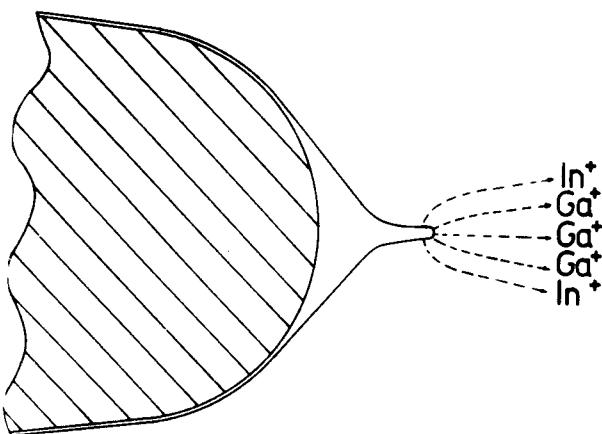


Рис. 2. Предполагаемая схема пространственного разделения ионов галлия и индия в сплавном жидкокометаллическом источнике ионов, работающем в устойчивом режиме

При повышении температуры режим работы источника при малых эмиссионных токах существенно изменяется. Детальные исследования галлиевого жидкокометаллического источника ионов в работах^{5,6} и в нашей лаборатории (результаты будут опубликованы в УФЖ) показали, что при этом сильно изменяется угловое распределение ионов Ga^+ , резко расширяется их энергетическое распределение, в центральной части конуса эмиссии в нем появляется большое количество медленных ионов. В этой же части конуса эмиссии появляются ионы Ga_2^+ с большим энергодефицитом, а на угловом распределении двухзарядных ионов Ga^{++} в центральной части конуса эмиссии появляется минимум. Эти данные наилучшим образом согласуются с моделью⁷, согласно которой выступ на вершине конуса Тэйлора при высоких температурах источника становится неустойчивым и наряду с ионами из него эмиттируются заряженные капли. Образованные в присутствии сильного электрического поля, эти капли несут значительный положительный заряд и взрываются на небольшом расстоянии от выступа, создавая облако из нейтральных атомов, двухатомных однозарядных ионов и заряженных кластеров. Изменение углового распределения ионов In^+ , по-видимому, отражает изменение механизма эмиссии - наряду с испарением с боковой поверхности выступа при повышенных температурах источника ионы In^+ испаряются с взрывающихся капель и с места отрыва капель от выступа.

В заключение подчеркнем, что обнаруженное в настоящей работе существенное отличие угловых распределений ионов различных элементов следует учитывать как при теоретическом рассмотрении механизма работы сплавных жидкокометаллических источников ионов, так и при их практическом применении.

Литература

1. Melnyailis J. J. Vac. Sci. Technol., B, 1987, 5, 469.
 2. Prewett P.D. Vacuum, 1984, 34, 931.
 3. Bennasayag G., Sudraud P. J. Phys., Suppl. N1245, c. 9 - 223.
 4. Wilkens B., Venkatesan T. J. Vac. Sci. Technol., B, 1983, 1, 1132.
 5. Swanson L.W., Schwind G.A., Bell A.E. J. Appl. Phys., 1980, 51, 3453.
 6. Hornsey R.I. Appl. Phys. A., 1989, 49, 697.
 7. Joyes P., Van de Walle J. J. Phys., 1986, 47, 841.
-