

11

©1992 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ АТОМНЫХ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТИ ТЕРМОКАТОДА ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКИ

О.И.Лукша, О.Ю.Цыбин

Проведены экспериментальные исследования характеристик потоков ионизованных и нейтральных атомных и многоатомных частиц, образующихся на термокатадах электронных пушек как одновременно с формированием электронного потока, так и при положительном потенциале катода. Состав и пространственное распределение потоков по поверхности определены времяпролетным методом в сочетании с визуализацией в специальном ионно-оптическом преобразователе. Полученные данные представляют интерес для построения углубленных представлений о физических процессах, происходящих в разнообразных электронных вакуумных приборах, о состоянии эмиттирующих поверхностей в процессе эксплуатации.

Разнообразные процессы эмиссии ионизованных и нейтральных атомных частиц сопровождают формирование электронных потоков (ЭП) в электронных вакуумных приборах (ЭВП) (например, $[1-6]$). Они составляют сложный малоизученный комплекс, представляющий значительный интерес в связи с рядом актуальных научно-технических проблем. В частности, амплитудно-временные характеристики потоков ионов содержат информацию о процессах десорбции частиц с поверхностей электродов в магнетронных приборах $[1]$, о распределении потенциала и качестве ЭП в электронно-оптических системах с продольным магнитным полем $[2,3]$. Недостатком $[1-3]$ и других подобных работ является отсутствие данных о спектре масс ионов в исследуемых потоках. Обычные методы измерения состава остаточной газовой среды в объеме, соединенном с рабочим пространством, с помощью масс-спектрометров последовательного действия, например магнитных, квадрупольных, не позволяя определять основные пространственно-временные параметры процессов образования и состав ионов и нейтральных частиц непосредственно в рабочих объемах и в рабочих режимах ЭВП $[4,5]$. Для определения совокупного вклада таких процессов, как вторичная эмиссия, ионное распыление, десорбция адатомов, поверхностная и объемная ионизация, в формирование состава активных сред, необходимы, по-видимому, специальные масс-спектрометрические методы и экспериментальные исследования в реальных условиях бомбардировки поверхностей электродов комплексом ионов остаточных газов и паров $[3,6]$.

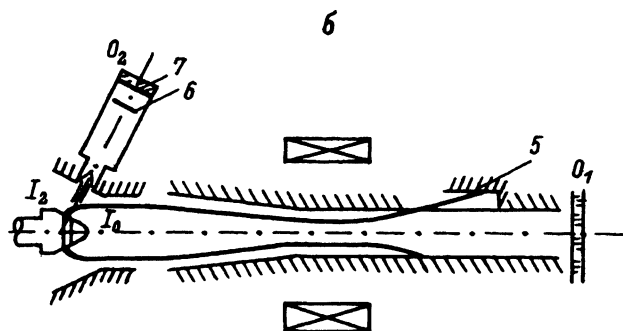
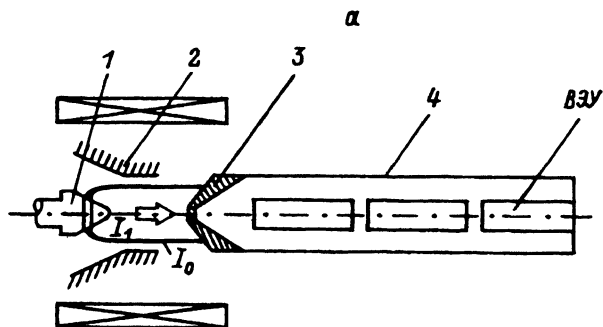


Рис. 1.

Целью данной работы являлось создание методов исследования эмиссии вторичных атомных частиц с поверхности катода ЭВП, измерение пространственно-временных характеристик этих процессов и состава образующихся частиц в электронной пушке.

Методика измерений и аппаратура

Сечение экспериментальных приборов ЭВП-1 и ЭВП-2 схематически показано на рисунке, а, б. Катод 1 конической формы, изготовленный из молибдена, был оснащен эффективным гексаборид-лантановым (ГЛ) или металло-пористым (МПК) термоэммиттером кольцевой формы. ЭП с током I_0 формировался диодной системой с коаксиальным анодом 2, фокусировался магнитным полем, ускорялся и осаждался на коллектор 3. В приборе ЭВП-1 магнитное поле было однородным вдоль оси, а в ЭВП-2 адиабатически возрастало в пространстве дрейфа электронного потока в 15–20 раз относительно значения поля на катоде. Подобные конструкции электронно-оптических систем с магнетронно-инжекторными пушками применяются, например, в устройствах гиротронного типа, в которых предъявляются высокие требования к качеству ЭП.

В ЭВП-1 измеряли свойства потока I_1 образующегося на катоде и поступающего на вход анализатора 4 через отверстие-диафрагму в коллекторе 3 вдоль оси системы. В ЭВП-2 поток I_2 , образованный в области

эмиттера, через диафрагму в аноде 2 поступал на вход одного из оперативного, без нарушения вакуумных условий в электронной пушке, сменяемых анализаторов.

Методика измерений основана на применении времяпролетного анализа с прямой экстракцией частиц из рабочего объема в сочетании с визуализацией потока в специальном ионно-оптическом преобразователе — “микроскопе”. Эта методика подобна обычной вторично-ионной масс-спектрометрии, применяемой для диагностики поверхностей твердых тел. Отличие состоит в том, что в данном случае первичная ионная бомбардировка мишени специфически присуща рабочим режимам поверхностей электродов в ЭВП. Разработанный подход обеспечил возможность получения пространственно-временных зависимостей пучков вторичных частиц одновременно с разрешением по массам.

Времяпролетный анализатор 4 общей длиной 850 мм состоял из двух изолированных труб дрейфа и детектора ионов с вторично-эмиссионным множителем типа ВЭУ-2. Ионный преобразователь состоял из микроканальной пластины — множителя 6 и люминесцентного экрана 7, установленных на траекториях ионов, покидающих эмиттер по нормали к его поверхности. Увеличение этой схемы было обусловлено расхождением ионного потока в азимутальном направлении в соответствии с расходимостью линий напряженности электрического поля и достигало приблизительно 10.

Оптические окна O_1 и O_2 служили для измерения температуры катода оптическим пирометром и наблюдения изображения на экране 7. Азимутальные характеристики потоков частиц в ЭВП-2 измеряли, вращая катод в работающем приборе с помощью сильфонного узла. Азимутальное распределение плотности тока формируемого ЭП измеряли с помощью анализатора 5, установленного за продольной узкой щелью в коллекторе 3.

Во время измерений регулировали напряжение между анодом и катодом в пределах 5–25 кВ (анод при этом был заземлен) при длительности импульсов 1–150 мкс и частоте следования 10–100 Гц, магнитное поле на катоде 0.1–0.2 Тл, температура эмиттеров 1000 – 1500°С плотность тока ЭП 1.5–5.0 $\text{Å}/\text{см}^2$, давление остаточных газов при непрерывной безмасляной откачке 10^{-6} – 10^{-7} Тор.

Сигналы потоков I_1 , I_2 , поступающих на детектор, записывали с помощью цифрового осциллографа С9-8. Контрольные измерения и калибровка анализаторов проводились при напуске в приборы аргона, неона, углекислого газа с помощью игольчатого накатателя, а также по типичным составляющим в спектре остаточных газов.

Результаты измерений и обсуждение

Наблюдаемые на экране осциллографа сигналы потоков I_1 , I_2 представляли собой набор задержанных пиков, положение и амплитуда которых зависели от режима измерений. Интерпретация сигналов основывалась на зависимостях характеристик пиков от значений напряжений, токов, магнитного поля, давления газов, материалов электродов. Несмотря на возможный значительный разброс по координатам и скоростям в ансамбле частиц, поступающих на вход анализатора, приемлемые разрешения по массам (~ 20) и по времени,

а также по положению точек эмиссии частиц достигались при достаточно высоком значении импульсного ускоряющего напряжения 5–10 кВ.

Установлено, что поток I_1 в приосевой области прибора ЭВП-1 состоял из частиц, покидающих катод в нейтральном I_1^0 и отрицательном I_1^- зарядовых состояниях. Спектр I_1^0 содержал как типичные остаточные газы, так и тяжелые компоненты со значениями масс до 3000 а.е.м., относящимися, по предположению, к кластерам молибдена. Тяжелые частицы обнаруживались при плотности тока ионной бомбардировки катода, превышающей приблизительно $10^{-2} - 10^{-3} \text{ \AA/cm}^2$. Ионизация этих частиц осуществлялась в пространстве дрейфа электронным ударом. Значения скоростей частиц в потоке I_1^- соответствовали полной пройденной разности потенциалов между катодом и первой трубкой дрейфа. По-видимому, основными составляющими были ионы C^- , CO_2^- , Mo^- . Если поверхность катода была покрыта платиновой фольгой, то вместо ионов молибдена обнаруживали ионы Pt^- . Варьированием напряжений на электродах, применением дополнительного неоднородного магнитного поля в области дрейфа ионов установлено, что ионы Pt^- были устойчивы, а ионы Mo^- спонтанно распадались и за 1–5 мкс дрейфа становились электронейтральными. В потоке I_2^- в приборе ЭВП-2 измеренные значения масс соответствовали ионам O^- , O_2^- , CO_2^- при формировании ЭП ГЛ катодом и H^- , H_2^- , O^- при использовании МПК.

При положительной полярности напряжения на катоде возникал поток N_2^- содержащий ионы BN^+ , BP^+ , B_4C^+ , B_2O_3^+ , B_2S_3^+ , La_2O_3^+ , эмиттированные с поверхности ГЛ. Этот комплекс ионов соответствует известному набору устойчивых соединений, образующихся при взаимодействии LaV_6 с остаточными газами и наиболее вероятными примесями [7]. Соотношения амплитуд пиков, образующих сигнал I_2^+ было специфичным для разных эмиттеров и различных точек поверхности каждого эмиттера. Пространственная картина процессов была построена на основе измерения и сопоставления следующих данных: азимутальных зависимостей амплитуд составляющих I_2^- , I_2^+ , соответствующих различным ионам, от угла φ_k поворота катода; изображения на экране ионного микроскопа; зависимостей $I_4(\varphi_k)$, где I_4 — электронный ток, отбираемый с термоэмиттера на анализатор 4 через диафрагму в аноде прибора ЭВП-2 при снятом магнитном поле; азимутальных зависимостей $I_5(\varphi_k)$ электронного тока ЭП на датчик 5 в ЭВП-2. Наибольшее пространственное разрешение наблюдаемых на поверхности эмиттера неоднородностей эмиссии ионов данного вида составило приблизительно 0.1 мм. На исследованных эмиттерах были выявлены, в частности, неоднородности распределений плотностей ионных и электронных токов с поверхности. Характерный масштаб неоднородностей составлял 0.5–5.0 мм, отношение плотностей токов с различных участков достигало ~ 10 .

Была выявлена также сложная динамика процессов на эмиттере. Динамические явления в первом приближении можно было охарактеризовать как быстрыми, протекающими за интервалы времени $\sim 10^{-2}$ с, так и медленными, наблюдаемыми в течение многих часов работы, суще-

ственными немонотонными изменениями амплитуд ионных составляющих. Изучение корреляций зависимостей амплитуд потоков I_{0-5} от режима измерений показало возможность анализа взаимосвязи стехиометрического состава и эмиссионных свойств различных участков поверхности эмиттера.

В соответствии с результатами измерений и расчетными данными можно считать, что поток вторичных частиц I_1 образовывался преимущественно за счет ионного распыления поверхности катода, а поток I_2 — в основном путем поверхностной ионизации. Плотность частиц в потоке I_1 составляла $\sim 10^{-3} - 10^{-2}$ от плотности электронов в ЭП I_0 , а поток I_2 имел плотность частиц $\sim 10^{-5} - 10^{-4}$ от плотности I_0 .

Измеренное импульсное значение концентрации атомных частиц в рабочем объеме превышало среднее значение приблизительно на порядок даже в хорошо обезгаженном приборе.

Выводы

В электронной пушке с магнитным полем и в квазиплоском диоде без магнитного поля обнаружены сопутствующие формированию электронного пучка образованные на термокатоде потоки быстрых нейтральных и заряженных атомных частиц, обладающие высокой эффективностью распыления при бомбардировке поверхностей электродов, а также медленных атомных и многоатомных частиц, характеризующиеся высокой концентрацией. Измеренные состав потоков и пространственно-временные характеристики обусловлены в основном используемыми материалами эмиттера и других электродов, условиями ионного распыления и поверхностной ионизации, состоянием поверхностей. По-видимому, существенное возрастание концентрации и изменение состава атомных и многоатомных частиц в импульсе, обусловленное десорбцией и распылением частиц с поверхностей, принципиально неизбежно в мощных электронных вакуумных приборах с низкой частотой следования рабочих импульсов. Сопоставление характеристик электронной эмиссии и процессов образования атомных частиц на катоде дают информацию о состоянии поверхности эмиттера в процессе его эксплуатации. Таким образом, метод прямой экстракции атомных частиц на входное устройство ионного микроскопа и времяпролетного масс-анализатора позволяет осуществлять изучение структуры активных сред и состояние поверхностей электродов в электронных вакуумных приборах в рабочих режимах. Полученные данные могут быть использованы для построения углубленных представлений о физических процессах, происходящих в разнообразных электронных вакуумных приборах.

Список литературы

- [1] Соминский Г.Г., Цыбин О.Ю. Анализ процессов десорбции и распыления в высоковольтной магнетронной системе. Л., 1989. № 429. С. 49–52.
- [2] Болотов В.Е., Зайцев Н.И., Корблев Г.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. № 16. С. 1013–1016.
- [3] Петров Д.Р., Цыбин О.Ю. // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. М., 1990. № 10 (434). С. 34–36.
- [4] Конторин Ф.Ю., Манькин И.А. // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. М., 1985. № 2. 50 с.

- [5] *Калябина И.А.* Обзоры по электронной технике. Сер.7. Технология, организация производства и оборудование. М., 1979. № 19. 36 с.
- [6] *Лукша О.И., Цыбин О.Ю., Шешко О.Л.* // Тез. докл. XXI Всесоюз. конф. по эмиссионной электронике. Л., 1990. Т. 2. С. 180.
- [7] *Авдиенко А.А., Малев М.Д.* // ЖТФ. 1976. Т. 46. Вып. 10 С. 2101-2107.

Санкт-Петербургский государственный
технический университет

Поступило в Редакцию
18 декабря 1991 г.