

**Ионная диагностика поверхностей эффективных термоэммиттеров в мощных ЭВП / О.И. Лукша, О.Ю. Цыбин // Научное приборостроение. — 1992. — Т.2. — N 4: Поверхность и методы ее исследования. — С. 35–42.**

Проведены испытания диагностического комплекса, основанного на измерении характеристик потоков ионизованных и нейтральных атомных и многоатомных частиц, образующихся на поверхности эффективных термоэммиттеров в мощных ЭВП как одновременно с формированием электронного потока, так и при положительном потенциале катода. Состав и пространственное распределение потоков с поверхности определены времяпролетным методом в сочетании с визуализацией в специальном ионно-оптическом преобразователе. Полученные данные интересны для построения углубленных представлений о физических процессах, происходящих в мощных ЭВП, о состоянии эмиттирующих поверхностей в процессе эксплуатации, для создания диагностической аппаратуры. Библи. 20 назв. Ил. 5.

---

О. И. Лукша, О. Ю. Цыбин

(Санкт-Петербургский государственный технический университет)

## ИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕРМОЭМИТТЕРОВ В МОЩНЫХ ЭВП

*New method of effective thermoemitter surface diagnostic in powerful electron devices both for negative and positive cathode potential is described. It is based on the detection of ions and neutral atoms ejected from emitter surface. The composition and the spacial distribution of particles flow have been determined by time-of flight and ion-optical analysers.*

### Введение

Современный комплекс методов и аппаратуры для диагностики поверхностей эффективных термоэмиттеров позволяет осуществлять их многостороннее исследование (например, [1-10]). Это относится преимущественно к этапам изготовления катодов, т.е. к условиям, далеким от эксплуатационных.

Известно, однако, что состав поверхности эмиттера и его характеристики испытывают существенные изменения именно в процессах включения, токоотбора, а также при воздействии различных побочных факторов, обусловленных функционированием прибора в целом. Поэтому актуальным является развитие диагностического комплекса, применимого непосредственно в рабочих условиях для определения состава поверхностей эффективных эмиттеров и пространственно-временных характеристик протекающих на них процессов. В этом направлении в последние годы развивались методы диагностики, основанные на регистрации нейтральных и ионизированных вторичных атомных частиц, образующихся на поверхности электродов и в рабочем объеме [11-17].

В данной статье описана методика и приведены результаты экспериментальных исследований термоэмиттеров из гексаборида лантана (ГЛ), металлопористых (МПК) и металлосплавных (МСК) с помощью комплекса методов, включающего ионную диагностику, в процессе эксплуатации катодов в мощных электронных пушках.

### Методика измерений и аппаратура

Методика измерений основана на регистрации ионов, образующихся на поверхности эффективного термокатода во время работы прибора. Механизмы ормирования потока ионизованных частиц в этих условиях сложны и мало изучены. Они включают ионное распыление (ИР), поверхностную ионизацию (ПИ), электронно-стимулированную десорбцию (ЭСД), относительный вклад которых в суммарный эффект при их одновременной реализации трудно определить.

Эффективность образования ионов зависит от характеристик бомбардировки поверхности, токоотбора, значения работы выхода или энергии сродства к электрону, температуры, микроструктуры поверхности и электрического поля. Поэтому основной интерес представляет информация, получаемая при

измерениях локальных значений плотности отбираемого ионного тока, изменений этих значений во времени и по поверхности эмиттера отдельно для каждого сорта ионов, как отрицательных, регистрируемых одновременно с эмиссией рабочего электронного потока, так и положительных.

Разработанная методика подобна вторично-ионной масс-спектрометрии, применяемой для диагностики поверхностей твердых тел. В данном случае, однако, первичная ионная бомбардировка эмиттера специфически присуща рабочим режимам ЭВП, отличается сложным составом и широким энергетическим распределением потока частиц, и дополнена иными механизмами (ПИ, ЭСД). Кроме того, структуру экстрагируемого потока можно было наблюдать с помощью ионно-оптического преобразователя, подобного ионному микроскопу [10]. К ионной диагностике отнесена также методика исследований, основанная на экстракции нейтральных атомных частиц из области вблизи термоэмиттера, их ионизации электронным ударом и фокусировка с помощью электрического поля на вход пространства дрейфа времяпролетного анализатора.

Решение поставленной задачи потребовало привлечения методов масс-спектрометрии. Масс-анализаторы последовательного действия: магнитные, квадрупольные и др. — широко применяются в электронной технике на этапах изготовления и тренировки приборов [18—20]. В данной работе для диагностики поверхностей эмиттеров в рабочих условиях ЭВП был применен времяпролетный анализ с прямой экстракцией частиц из прикатодной области. Это позволило проводить измерения в импульсном режиме, в том числе и единичных импульсов, и, несмотря на значительный позиционный и энергетический разброс в потоках атомных частиц, с приемлемым пространственным, временным и масс-спектральным разрешением.

Сечения экспериментальных приборов ЭВП-1 и ЭВП-2 схематически изображены на рис. 1. Молибденовый керн катода 1, оснащенного эффективным термоэмиттером (ГЛ, МПК, МСК) кольцевой формы, можно было вращать вокруг оси относительно отверстия-диафрагмы, закрытого мелкоструктурной сеткой в анодном блоке 2 в работающем приборе. Керн катода был отъюстирован в системе подшипников, радиальное смещение поверхности эмиттера при вращении не превышало 0,3 мм (приблизительно 2% от расстояния между катодом и анодом).

Электронный поток с током  $I_0$  осаждался на коллектор 3. В ЭВП-1 измеряли свойства потока  $I_1$ , образующегося на катоде и поступающего на вход анализатора 4 через отверстие-диафрагму в коллекторе 3 в направлении вдоль оси системы. В ЭВП-2 поток  $I_2$ , образованный вблизи поверхности термоэмиттера, поступал на вход одного из сменяемых анализаторов. Времяпролетный анализатор 4 общей длиной около 850 мм состоял из двух изолированных труб дрейфа и детектора ионов с вторично-электронным множителем типа ВЭУ-2. Ионный преобразователь состоял из микроканальной пластины — множителя 6 и люминесцентного экрана 7, установленных на траекториях ионов, покидающих эмиттер в направлении нормали к его поверхности. Увеличение этой схемы было обусловлено расходимостью ионного потока в азимутальном направлении в соответствии с направлением линий напряженности электрического поля и достигало приблизительно 10. Смену анализаторов можно было осуществлять оперативно, без нарушения вакуумных условий в электронной пушке. Азимутальное распределение плотности тока эмиттируемого электронного потока измеряли с помощью анализатора 5, установленного за продоль-

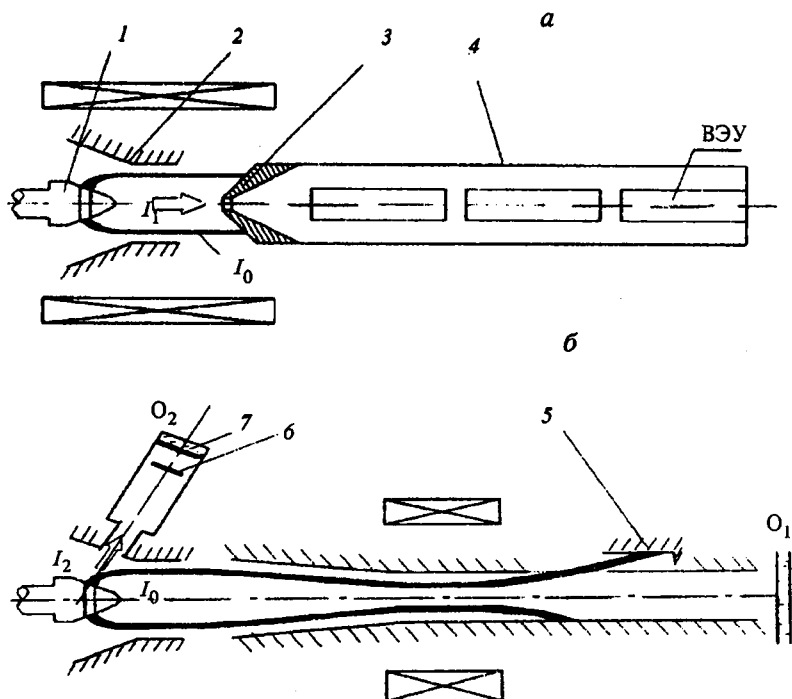


Рис. 1. Сечение экспериментальных приборов ЭВП-1 (а) и ЭВП-2 (б).  
Объяснение в тексте.

ной узкой щелью в коллекторе. Оптические окна  $O_1$  и  $O_2$  предназначались для измерения температуры катода оптическим пирометром и наблюдения изображения на экране 7.

Сигналы потоков  $I_1$ ,  $I_2$ , поступающих на детекторы, записывали с помощью цифрового запоминающего осциллографа С9-8. Контрольные измерения и калибровка анализаторов проводились при напуске в приборы аргона, неона, углекислого газа с помощью игольчатого нагекателя, а также по типичным составляющим в спектре остаточных газов. В приборе ЭВП-1 магнитное поле было однородным вдоль оси в области пушки, а в ЭВП-2 магнитное поле 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 формируемого электронного потока, в то же время типичны для широкого круга различных ЭВП.

Во время измерений регулировали напряжение между анодом и катодом в пределах 5—25 кВ при длительности импульсов 1—150 мкс и частоте следования 10—100 Гц, магнитное поле на катоде составляло 0,1—0,2 Тл, температура эмиттеров — 1000—1500 °С, плотность электронного тока с катода —

$1,0-5,0 \text{ A/cm}^2$ , давление остаточных газов при непрерывной безмасляной откачке—  $10^{-7}-10^{-6} \text{ Тор}$ .

### Результаты измерений и их обсуждение

В широком интервале рабочих режимов приборов ЭВП-1, ЭВП-2 наибольшие значения плотности тока отрицательных или положительных ионов с поверхности термоэмиттеров составляли  $10^{-6}-10^{-7} \text{ A/cm}^2$ . Масс-спектр ионов в потоках определялся по наблюдаемым на экране осциллографа наборам задержанных пиков, положение и амплитуда которых зависели от режима измерений. Интерпретация сигналов основывалась на предварительных калибровках анализаторов, а также на зависимостях характеристик пиков от значений напряжений, токов, магнитного поля, давления газов, материалов электродов.

Было установлено, что поток  $I_1$  в приосевой области прибора ЭВП-1 (рис. 1, а) 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 приблизительно до 3000 Дальтон, относящихся, по предположению, к кластерам молибдена. Тяжелые частицы обнаруживались при плотности тока ионной бомбардировки катода, превышающей  $10^{-2}-10^{-3} \text{ A/cm}^2$ . Ионизация этих частиц осуществлялась в пространстве дрейфа электронным ударом. Значения скоростей частиц в потоке  $I_1^-$  соответствовали полной пройденной разности потенциалов между катодом и трубой дрейфа. Основными составляющими были, по-видимому, ионы  $\text{C}^-$ ,  $\text{CO}^-$ ,  $\text{CO}_2^-$ ,  $\text{Mo}^-$ . Если поверхность катода покрывали платиновой фольгой, то вместо ионов молибдена обнаруживали ион  $\text{Pt}^-$ . Ионы металлов являлись наиболее интенсивной компонентой потока отрицательных ионов, причем ионы платины были устойчивыми, а ионы молибдена спонтанно распадались и за 1—5 мкс дрейфа становились электронейтральными. Эти результаты позволили уточнить картину процессов в области вблизи керна катода, влияющих, очевидно, и на условия работы эмиттера.

Для диагностики процессов на эмиттере наибольший интерес представляли данные о характеристиках потока  $I_2$ . Поток  $I_2^-$  измеряли одновременно с отбросом и определением параметров электронного потока. Установлено, что различным эмиттерам соответствовали разные наборы ионов. При использовании в приборе ЭВП-2 ГЛ катода измеренные значения масс соответствовали ионам  $\text{OH}^-$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{CO}_2^-$ ,  $(\text{VO}_2)^-$ , осмированного МПК—  $\text{H}^-(\text{H}_2^-)$ ,  $\text{OH}^-$ , МСК —  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}^-$ ,  $\text{O}_2^-$ ,  $\text{CO}_2^-$ . Превалирующим механизмом образования кислородсодержащих и водородных ионов, обладающих высокими значениями сродства к электрону, представляется механизм поверхностной ионизации.

При положительной полярности напряжения на катоде ионный ток зарегистрирован лишь при использовании ГЛ, а на остальных эмиттерах его величина была приблизительно на два порядка ниже и находилась на пределе чувствительности аппаратуры. Поток  $I_2^+$  содержал ионы  $\text{VN}^+$ ,  $\text{VP}^+$ ,  $\text{V}_4\text{C}^+$ ,

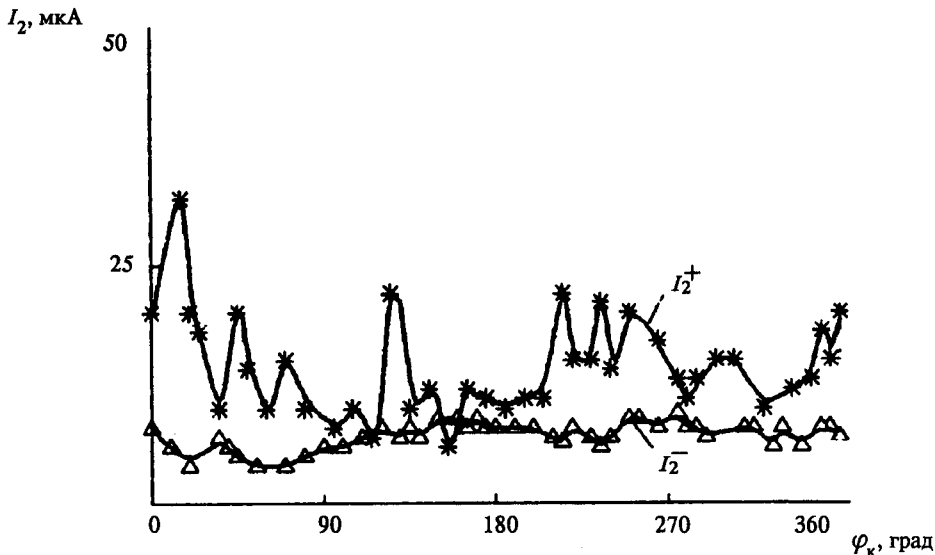


Рис. 2. Зависимости тока положительных  $I_2^+$  и отрицательных  $I_2^-$  ионов на ВЭУ от угла поворота катода  $\varphi_k$  в приборе ЭВП-2.

$B_2O_3^+$ ,  $B_2S_3^+$ ,  $La_2O_3^+$ , эмиттированные с ГЛ поверхности. Этот комплекс ионов соответствует известному набору устойчивых соединений, образующихся при взаимодействии нагретого вероятными примесями. Соотношения амплитуд пиков, образующих сигнал  $I_2^+$ , было специфичным для различных эмиттеров и разных точек поверхности каждого эмиттера.

На рис. 2 приведены типичные для ГЛ эмиттеров азимутальные распределения токов некоторых положительных и отрицательных ионов, усредненных по ширине термопояска. Особенностью распределений являлось наличие в большинстве случаев квазипериодической модуляции, причем максимумам тока отрицательных ионов и электронного тока соответствовали, как правило, минимумы тока положительных ионов. По-видимому, основной причиной наблюдаемых неоднородностей могло быть наличие неоднородно распределенных примесей на поверхности. Вывод о "пятнистости" термоэмиттера подтвержден результатами исследований пространственного распределения плотности потока положительных ионов по его изображению на люминесцентном экране ионно-оптического преобразователя. На регистрируемых изображениях (типичная фотография приведена на рис. 3) наблюдались две характерные области с отчетливой границей между ни-



Рис. 3. Изображение на люминесцентном экране при регистрации положительных ионов в приборе ЭВП-2.

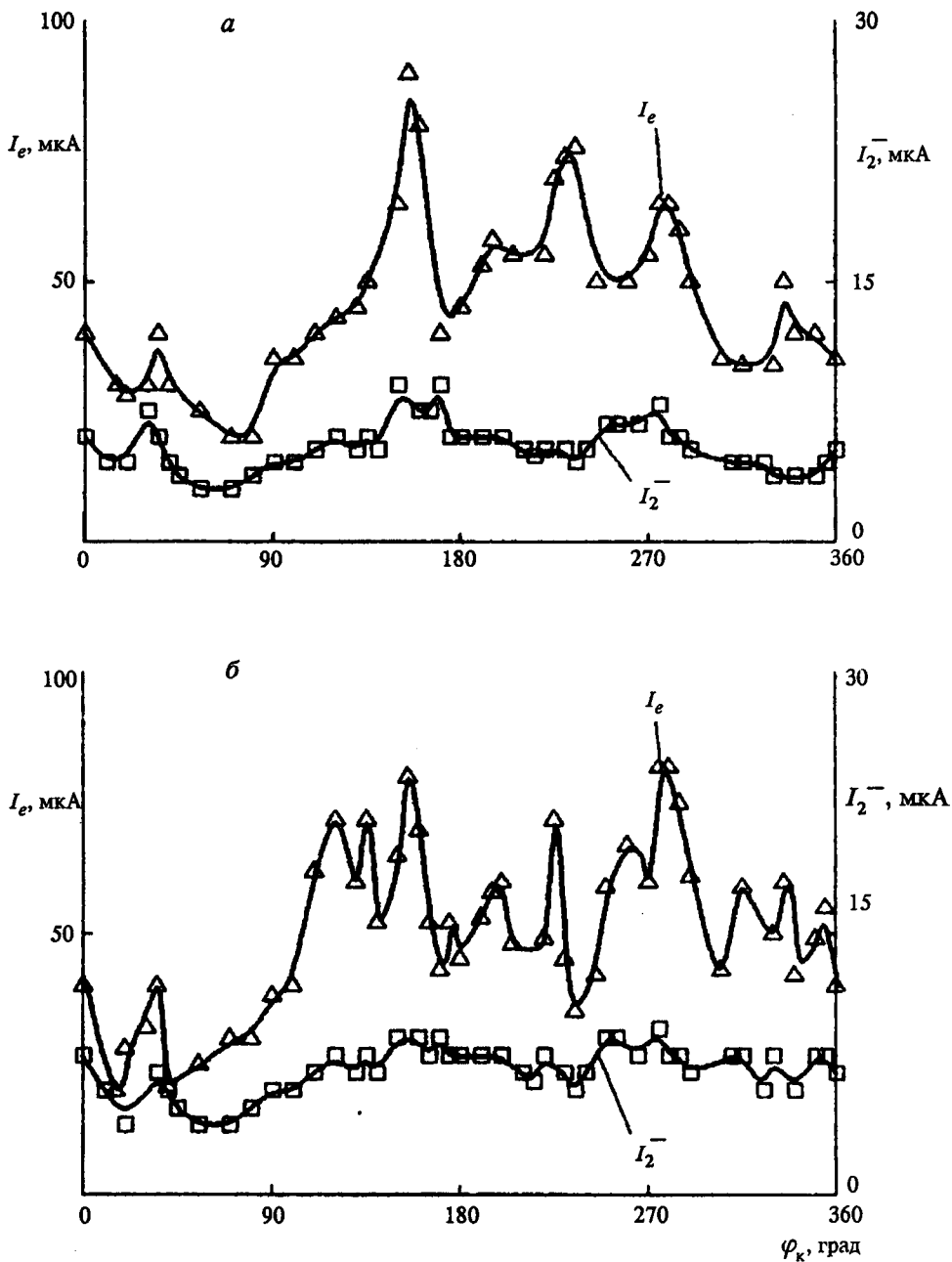


Рис. 4. Зависимости электронного  $I_e$  и ионного  $I_2^-$  токов на ВЭУ от угла поворота катода  $\varphi_k$  в приборе ЭВП-2 в начале измерений (а) и после ~ 25 ч работы в импульсном режиме (б).

ми, соответствующие термопояску (справа) и молибденовому ядру (слева). Поток положительных ионов с ядра был более интенсивным, что связано с различием работ выхода и, соответственно, с разницей эффективности поверхностной ионизации. Подобные приведенным выше зависимости получены при исследовании характеристик МПК и МСК.

Была выявлена также сложная динамика процессов на эмиттере. Их можно охарактеризовать как быстрыми, протекающими за интервалы времени около  $10^{-2}$  с, так и медленными, наблюдаемыми в течение многих часов работы, изменениями амплитуд ионных составляющих.

Азимутальные распределения ионной и электронной компонент потока (рис. 4) с ГЛ катода (при магнитном поле  $B = 0$ ), измеренные при первом включении катода (а) и через 25 ч работы в режиме импульсного токоотбора (б), показали, что мелкомасштабные неоднородности с течением времени сглаживались, а крупномасштабные сохранялись.

Состав и динамика нейтральных газовых атомов и молекул в экспериментальных приборах ЭВП-1 и ЭВП-2 с разными катодами показали значительные отличия этих характеристик во время рабочего импульса тока от устанавливающихся в паузе. На рис. 5 приведены зависимости спектра нейтралов, измеренного в ЭВП-1 на расстоянии около 10 см от катода, от времени задержки относительно переднего фронта импульса электронного тока, имевшего длительность 2 мкс. Три основных пика соответствуют значениям масс 2, 18, 28 Дальтон. В длинномпульсном режиме работы ЭВП-1 и ЭВП-2 значение концентрации газовых нейтралов нарастало в течение приблизительно 50 мкс, затем выходило в насыщение, после чего начинался спад.

Азимутальные зависимости амплитуд сигналов, образованных нейтральными частицами, экстрагированными из прикатодной области в ЭВП-2, отображали наличие неоднородностей на эмиттере, обнаруживаемых также иными методами.

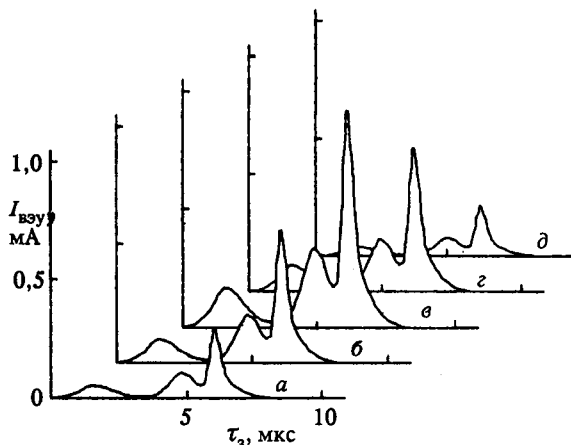


Рис. 5. Изображения сигналов ВЭУ при регистрации нейтральных частиц с массами 2, 18, 28 Дальтон в приборе ЭВП-1 при различных значениях времени задержки  $\Delta\tau_3$  относительно переднего фронта импульса электронного тока.

$\Delta\tau_3$ , мкс: а — 20, б — 35, в — 50, г — 80, д — 130.

## Выводы

Разработанный диагностический комплекс позволил осуществить исследования характеристик эффективных термоэмиттеров непосредственно в процессе их эксплуатации, в рабочих условиях, типичных для широкого класса мощных ЭВП. Методика отличается высокой чувствительностью и информативностью, низким уровнем вносимых в работу прибора возмущений. Выявле-



на возможность анализа состава и эмиссионных свойств различных участков поверхности эмиттеров с помощью ионной диагностики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гнучев Н. М. // Обзоры по электронной технике. Сер.1: Электроника СВЧ. — 1983. — Вып. 6(946). — 60 с.
2. Дюбуа Б. Ч., Земчихин Е. М., Макаров А. П. и др. // Радиотехника и электроника. — 1991. — Т. 36, N 5. — С. 985—993.
3. Макаров А. П., Култашев О. К., Куранова Е. Д. и др. // Там же. — N 11. — С. 2196—2201.
4. Nexsen W. E., Turner W. C. // J. of Applied Physics. — 1990. — V. 68, N 1. — P. 298-303.
5. Haas G. A., Thomas R. E., Marrian Christie R. K., Shin Arnold // IEEE Trans. on ED. — 1991. — V. 38, N 10. — P. 2244—2251.
6. Шаповалов А. С. // Вопросы прикладной физики. — 1989. — Вып. 1. — С. 43—61.
7. Ашкинази Л. А. // Итоги науки и техники. Сер. электроника. — 1985. — Т. 17. — С. 311—343.
8. Christensen J. A. // Microwave J. — 1989. — N 2. — P. 26—43.
9. Юсов Ю. П., Бережной В. П. // Электронная промышленность. — 1990. — N 7. — С. 3—8.
10. Черепин В. Т., Васильев М. А. Методы и приборы для анализа поверхности материалов: Справочник. Киев, 1982.
11. Петров Д. Р., Цыбин О. Ю. // Электронная техника. Сер.1: Электроника СВЧ. — 1990. — Вып. 10 (434). — С. 34—36.
12. Лукша О. И., Цыбин О. Ю., Шешко О. Л. // Всес. конф. по эмиссионной электронике: Тезисы докладов. — Л., 1990. — Т. 2. — С. 180.
13. Лукша О. И., Цыбин О. Ю. // Взаимодействие ионов с поверхностью. Тезисы докладов Всес. конф. — М., 1991. — Т. 2. — С. 31—32.
14. Лукша О. И., Цыбин О. Ю. // Всес. семинар по вторичной ионной и ионно-фотонной эмиссии: Тезисы докладов. — Харьков, 1991. — С. 67—68.
15. Кутеев Б. В., Малюгин В. И., Соминский Г. Г., Цыбин О. Ю. // Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ. — 1974. — Вып. 1. — С. 105—106.
16. Болотов В. Е., Зайцев Н. И., Кораблев Г. С. и др. // Письма в ЖТФ. — 1980. — Т. 6, вып. 16. — С. 1013—1016.
17. Соминский Г. Г., Цыбин О. Ю. // Труды ЛПИ. — 1989. — Вып. 429. — С. 49—52.
18. Калябина И. А. // Обзоры по электронной технике. Сер. 7: Технология, организация производства и оборудование. — 1978. — Вып. 19 (599). — 36 с.
19. Сазонов В. Н. // Электронная техника. Сер. 4: Электровакуумные и газоразрядные приборы. — 1991. — Вып. 1. — С. 60—67.
20. Коротченко В. А., Аникин А. С., Базылев В. К. // Электронная промышленность. — 1990. — N 7. — С. 54—56.