

На правах рукописи
УДК 621.383.81

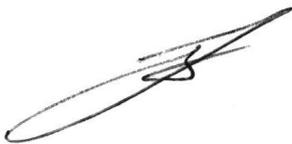
Коновалов Павел Игоревич

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА БИПЛАНАРНЫХ ЭЛЕКТРОННО-
ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРУ
«ОТНОШЕНИЕ СИГНАЛ-ШУМ» ЗА СЧЕТ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ОПЕРАЦИИ ФИНИШНОЙ
ОБРАБОТКИ**

Специальность 05.27.06 – Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов
электронной техники (техн. науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2010

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Степаньянц Юрий Рубенович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Слепцов Владимир Владимирович

кандидат технических наук
Папко Вильямс Михайлович

Ведущая организация: ОАО ЦНИИ «Электрон»

Защита состоится « 03 » февраля 2011г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д.212.141.18 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, зал Ученого Совета.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просьба высылать по указанному выше адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан « 27 » декабря 2010 г.

Телефон для справок: (499) 2670963.

Ученый секретарь диссертационного совета:

доктор технических наук, профессор



Цветков Ю.Б.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Электронно-оптические преобразователи (ЭОП) являются основным элементом широкого ряда современных электронных приборов: детекторов сверхбыстрых процессов, астрономических телескопов, приборов ночного видения гражданского и военного назначения. С развитием науки и техники область применения ЭОП расширяется, и требования к их основным параметрам постоянно растут. В настоящее время только в нашей стране объем выпуска ЭОП достигает 50 тыс. штук в год и продолжает увеличиваться. Более 75% этих приборов составляют бипланарные ЭОП.

Одним из важнейших параметров ЭОП, предназначенных для техники ночного видения, является отношение сигнал-шум, характеризующее способность прибора передавать с минимальными искажениями изображение объекта наблюдения. Как показали исследования, основным источником шума бипланарных ЭОП являются процессы электронно-стимулированной десорбции и ионно-электронной эмиссии, протекающие в каналах микроканальной пластины. Влияние стационарных структурных шумов в данной работе не рассматривалось.

Существующие методы снижения отрицательного влияния этих процессов на качество ЭОП основаны на блокировке шумовых заряженных частиц. При этом проблема снижения интенсивности шумовых процессов, протекающих в микроканальной пластине в составе ЭОП, не решена.

Оценка шумовых характеристик МКП осуществляется с помощью понятия фактор шума. В процессе производства ЭОП на фактор шума в основном оказывают влияние режимы финишной обработки, включающей в себя термическое и электронно-лучевое обезгаживание МКП.

Таким образом, разработка новых технологических режимов операции финишной обработки является актуальной задачей, решение которой приведет к повышению качества ЭОП при неизменной себестоимости изделия, что значительно повысит конкурентоспособность отечественных ЭОП на мировом рынке.

Цель работы

Разработка технологических режимов финишной обработки, обеспечивающих повышение качества ЭОП по параметру «отношение сигнал-шум».

Задачи работы

1. Разработка математической модели влияния параметров работоспособности МКП и технологических параметров финишной обработки на фактор шума МКП в составе ЭОП.

2. Экспериментальные исследования влияния технологических параметров операции финишной обработки на фактор шума МКП в составе ЭОП.

3. Разработка технологических режимов, обеспечивающих повышение отношения сигнал-шум ЭОП.

4. Экспериментальное исследование эффективности новых технологических режимов.

Научная новизна работы

1. Разработана математическая модель влияния эксплуатационных параметров прибора и технологических режимов финишной обработки на фактор шума МКП в составе ЭОП.
2. Впервые исследовано влияние температуры во время тренировки МКП на коэффициент вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) и интенсивность электронно-стимулированной десорбции (ЭСД).
3. Доказана необходимость совмещения электронно-лучевого и термического обезгаживания микроканальной пластины в технологическом процессе операции финишной обработки.
4. Впервые предложены технологические режимы финишной обработки ЭОП, обеспечивающие снижение фактора шума МКП в составе ЭОП и существенное повышение производительности, что было подтверждено в серийном производстве ЭОП 2+ поколения.
6. Доказано, что повышение КВЭЭ первого удара за счет напыления на стенки входной части канала МКП высокоэмиссионного материала не дает положительного эффекта снижения фактора шума МКП при существующих режимах финишной обработки; эффект может быть получен только совместно с реализацией предложенных режимов.

Практическая ценность работы

Полученные результаты были использованы при проектировании и изготовлении нового оборудования финишной сборки ЭОП, при отладке технологического процесса операции финишной обработки на существующем оборудовании, а также при разработке новых модификаций ЭОП с микроканальным усилением. Внедрение предлагаемых режимов финишной обработки на ООО «МЭЛЗ-ЭВП» позволило повысить отношение сигнал-шум ЭОП на 12 % и производительность участка финишной обработки на 60% без дополнительных затрат. Результаты работы могут быть также использованы на предприятиях, выпускающих ЭОП 2+ и 3 поколений.

На защиту выносятся

1. Математическая модель фактора шума МКП, учитывающая влияние эксплуатационных параметров прибора и технологических режимов финишной обработки прибора на фактор шума МКП в составе ЭОП.
2. Результаты экспериментального исследования влияния температуры во время тренировки МКП на коэффициент вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) и интенсивность электронно-стимулированной десорбции (ЭСД).
3. Новые режимы финишной обработки ЭОП, обеспечивающие снижение фактора шума МКП в составе ЭОП и значительное повышение производительности.
4. Результаты анализа качества ЭОП, изготовленных по предложенным режимам в серийном производстве.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Европейской вакуумной конференции г. Стокгольм (2007), а также на научно-техническом совете ООО «МЭЛЗ-ЭВП» (2010) и на тематических заседаниях кафедры «Электронное машиностроение» МГТУ им. Н.Э.Баумана (2006-2010).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 печатных работы в научных журналах, из них в журналах по перечню ВАК – 4.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения с выводами, списка литературы из 67 наименований и 1 приложения. Работа содержит 156 страниц машинописного текста, в том числе 9 таблиц и 77 рисунков.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность решаемых в диссертационной работе проблем, а также определяется область применения результатов диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ конструкций бипланарных электронно-оптических преобразователей и их параметров. Показано, что качество электронно-оптического преобразователя необходимо понимать, как способность выполнить преобразование спектрального состава излучения исходного изображения и усиление слабого светового потока с минимальными информационными потерями в изображении на выходе относительно изображения на входе.

Если изделие работает в условиях достаточно высокой освещенности, определяющими являются геометрические характеристики изображения, которые в большей мере зависят от степени дискретности передающих каналов каждого элемента ЭОП – волоконных шайб, микроканальной пластины, а также от размеров вакуумных промежутков и напряженности электрического поля. Если же освещенность фотокатода ЭОП становится достаточно низкой, на первый план выходят статистические процессы. Статистические характеристики электронно-оптического преобразователя определяются отношением сигнал-шум. Так как предел разрешающей способности ЭОП, как и другие его геометрические характеристики, зависит, в основном, от геометрических характеристик используемой комплектации, основным направлением улучшения качества электронно-оптического преобразователя является разработка технологических методов повышения отношения сигнал-шум.

Для выявления доминирующего фактора, определяющего шумовые характеристики бипланарного электронно-оптического преобразователя, проведена оценка степени влияния различных видов шума, результаты которой представлены в таблице 1, где:

$I_{term50C}$, [A] - термоэмиссионный ток фотокатода;

$I_{раб}$, [A] - рабочий фототок;

$I_{ут}$, [A] - ток утечек по изоляторам;

I_{DARK} , [A] - темновой ток МКП.

В результате анализа показано, что ионная обратная связь – наиболее серьезный фактор, влияющий на работу электронно-оптического преобразователя. Процесс появления этого фактора, а также схема его участия в формировании шума показаны на рис. 1.

В процессе работы прибора фотокатод (рис.1. поз.1) под воздействием падающего на него излучения эмитирует фотоэлектроны $e_{P\text{ SIGNAL}}$, которые, ускоряясь электрическим полем, направляются к микроканальной пластине (рис.1. поз. 2).

Таблица 1.

Виды шума по уровню влияния

Тип шума	Величина	Уровень влияния
Термоэмиссионный ток фотокатода	$I_{term50C} = 1.016 \cdot 10^{-15} [A]$ $I_{раб} = 5,715 \cdot 10^{-11} [A]$	Низкий
Автоэмиссионный ток	На 97% изделий $\ll I_{раб}$	Низкий
Токи утечек по корпусным деталям и изоляторам	$I_{ym} \leq 10^{-10} [A]$	Низкий
Фоновые засветки фотокатода	Количественной оценки нет	Низкий
Темновой ток микроканальной пластины	$I_{DARK} \leq 4 \cdot 10^{-12} [A]$ $I_{раб} \approx 10^{-7} [A]$	Низкий
Процесс эмиссии электронов в каналах микроканальной пластины в результате воздействия потока ионов	Требуются исследования	Высокий
Процесс вторичной электронной эмиссии со стен корпуса прибора	-	Низкий

Во время движения эти сигнальные электроны могут возбуждать и ионизировать атомы остаточных газов. Положительные ионы, появившиеся в результате ионизации I_{ION} , начинают движение в сторону фотокатода, при столкновении с которым вызывают вторичную ионно-электронную эмиссию.

Образование ионов происходит и в процессе электронно-стимулированной десорбции при ударе электрона о стенку канала микроканальной пластины. Такие ионы I_{ESD} , образованные в некоторой начальной части канала без труда покидают его и направляются к фотокатоду. Ионы, образованные в глубине канала МКП, в силу особенности геометрии канала, не смогут его покинуть, они столкнутся со стенкой, что приведет к появлению ионно-электронной эмиссии уже с резистивно-эмиссионного слоя. Причины появления таких ионов аналогичны – это ионизация остаточных газов и электронно-стимулированная десорбция. Т.к. плотность тока увеличивается по длине канала от входа к выходу, очевидно, что интенсивности описанных процессов будут расти также по длине канала. Соответственно, можно сделать вывод, что основной вклад в шумовые процессы ЭОП вносит микроканальная пластина.

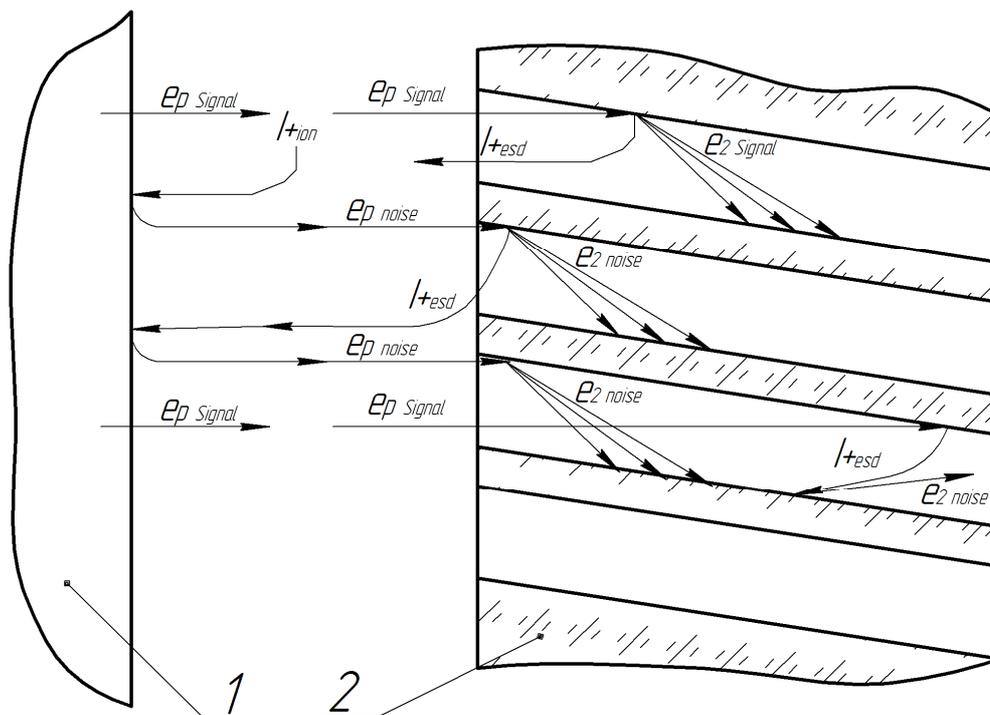


Рис. 1. Ионная обратная связь – основной источник шума ЭОП
1 – фотокатод; 2 – микроканальная пластина

Шумовые характеристики МКП принято оценивать фактором шума F . В настоящее время широко распространены 2 модели фактора шума МКП:

$$F = \frac{1}{A} \left(1 + \frac{2}{\delta_0} \right) \quad (1)$$

$$F = \frac{1}{A} \left(1 + \frac{2}{\delta_0} + \frac{Gr\sigma(\sigma + 2)}{\delta_0(1 - Gr\sigma)} \right), \quad (2)$$

где A - коэффициент прозрачности МКП;

δ_0 - коэффициент вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ) первого удара;

G - коэффициент усиления МКП;

r - количество ионов, образующихся в пересчете на один выходящий из МКП электрон ($r \ll 1$);

σ - число вторичных электронов, образующихся при соударении иона со стенкой канала.

Анализ зависимостей фактора мощности шума МКП от коэффициента вторичной электронной эмиссии первого удара с учетом обратной связи ионно-электронной эмиссии (2) и без него (1) показал:

1) Определяющее влияние на величину фактора мощности шума МКП оказывают КВЭЭ первого удара δ_0 и коэффициент открытой поверхности МКП A .

2) Очевидно быстрое ухудшение F с ростом усиления петли обратной связи $\delta_{oc} = Gr\sigma$ ионно-электронной эмиссии, что не учтано в модели (1).

Модель (2) дает более детальное описание процессов, протекающих в микроканальной пластине, однако, ее прикладное использование в инженерных расчетах затруднено ввиду отсутствия основного эксплуатационного параметра –

напряжения питания МКП, величина которого, как показывают эксперименты, сильно влияет на значение фактора шума.

В литературе встречаются описания некоторых технических решений по уменьшению фактора шума МКП: интенсивное облучение входной плоскости МКП электронным лучом; увеличение КВЭЭ первого удара; создание сложной винтовой геометрии каналов микроканальной пластины; установка нескольких МКП в шеврон.

Описанные методы позволяют в некоторой степени снизить отрицательное влияние обратного ионного потока на параметры ЭОП, вызывая при этом ряд новых проблем. Однако они не устраняют источник обратного ионного потока и не уменьшают его величину; некоторые даже наоборот увеличивают либо приводят к значительному ухудшению разрешающей способности.

Анализ технологического процесса изготовления ЭОП показал, что операцией, определяющей режим работы микроканальной пластины в составе электронно-оптического преобразователя, является операция финишной обработки. Под операцией финишной обработки подразумевают окончательное обезгаживание всех узлов будущего прибора (вакуумный отжиг в общем вакуумном объеме, обезгаживание микроканальной пластины и люминесцентного экрана бомбардировкой электронным потоком), формирование на входной оптической линзе фотоэмиссионного покрытия, а также окончательную сборку прибора и его герметизацию.

В первой главе подробно рассмотрена операция финишной обработки, как основное воздействие на МКП на этапе производства ЭОП, и сформулированы цель и задачи работы.

Вторая глава посвящена расширению математической модели фактора шума МКП (2). Для этой цели проведен анализ влияния напряжения питания МКП на все входящие в модель компоненты. Предложена новая модель, учитывающая влияние напряжения питания МКП ($U_{MCP}, [B]$) и величины соотношения КВЭЭ первого удара к КВЭЭ среднему по каналу (коэффициент c) на фактор шума.

$$F(U_{MCP}, T, c) = \frac{1}{A} \left(1 + \frac{2}{\delta(U_{MCP}, T) \cdot c} + \frac{G(U_{MCP}, T, c) r(U_{MCP}, T) \sigma(U_{MCP}, T) [(\sigma(U_{MCP}, T) + 2)]}{\delta(U_{MCP}, T) \cdot c (1 - G(U_{MCP}, T, c) r(U_{MCP}, T) \sigma(U_{MCP}, T))} \right), \text{ где}$$

$$G(U_{MCP}, T, c) = \left(\frac{BUc}{2\alpha\sqrt{U_0}} \cdot f_\delta(T) \cdot c \right) \cdot [\delta(U_{MCP}, T)]^{\left[\frac{4U_0\alpha^2}{U_{MCP}} - 1 \right]};$$

$$\delta(U_{MCP}, T) = \frac{BU_{MCP}}{2\alpha\sqrt{U_0}} \cdot f_\delta(T) - \text{коэффициент вторичной электронной эмиссии,}$$

средний по каналу МКП;

$$\sigma(U_{MCP}, T) = k\delta(U_{MCP}, T);$$

$$f_\delta(T) = 0.94392 - 1.7963 \cdot 10^{-4} \cdot T - 8.24916 \cdot 10^{-7} \cdot T^2;$$

$$f_r(T) = 1.28552 \cdot \exp\left[-\frac{T}{325.40218}\right] - 0.28117;$$

$$r(U_{MCP}, T) = r_0(U_{MCP}) \cdot f_r(T) \cdot \delta(U_{MCP}, T) \int_1^{\left[\frac{4U_0\alpha^2}{U_{MCP}}\right]} \delta(U_{MCP}, T)^{\left[x-1-\frac{4U_0\alpha^2}{U_{MCP}}\right]} dx$$

k – отношение коэффициента ионно-электронной эмиссии к коэффициенту вторичной электронной эмиссии для одного материала при той же начальной энергии;

B - константа материала;

U_0 - средний потенциал эмиссии вторичных электронов под прямыми углами к стенке;

U_c , [В] - напряжение катодного смещения при тренировке МКП, определяющее энергию первичных электронов для первого удара;

T , [°С] – температура тренировки МКП;

α – отношение длины канала МКП к диаметру канала;

$r_0(U_{MCP})$ - интенсивность электронно-стимулированной десорбции (количество ионов, выбиваемых одним электроном).

На основании анализа предложенной модели сделан следующий вывод: снижение фактора шума возможно за счет увеличения КВЭЭ первого удара, а также за счет снижения количества ионов, образующихся в канале МКП, причем, второй путь наиболее эффективен.

Показано, что ионизация остаточных газов в приборе не оказывает существенного влияния на шумовые характеристики ЭОП.

Изучение процесса электронно-стимулированной десорбции (ЭСД) как второго механизма образования ионов в МКП, проводилось экспериментально.

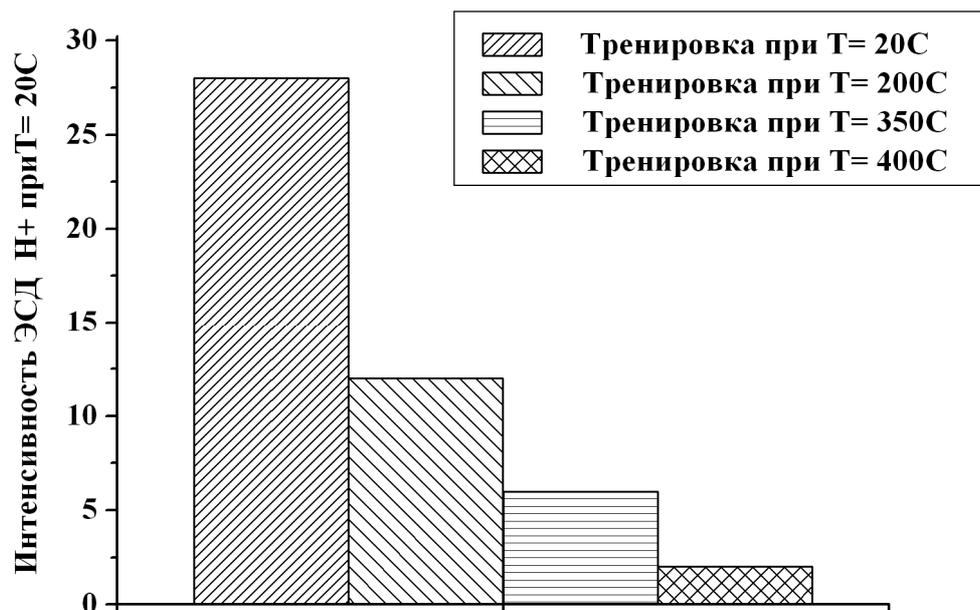


Рис.2. Интенсивность остаточной ЭСД после тренировки МКП при различных температурах

Как видно из рис.2, остаточная интенсивность десорбции ионов водорода снижается при увеличении температуры тренировки. Обработка микроканальной пластины перед герметизацией электронно-оптического преобразователя при температуре 400°C позволяет снизить интенсивность десорбции в составе ЭОП практически в 10 раз по сравнению с классическими режимами обработки.

На основании приведенных выше данных сделаны следующие заключения:

- 1) При прочих равных условиях интенсивность электронно-стимулированной десорбции с поверхности каналов микроканальной пластины при ее тренировке прямо пропорциональна температуре микроканальной пластины в процессе тренировки.
- 2) При низких температурах (порядка 20°C) общий поток десорбированных ионов очень мал и практически не зависит от тока первичного луча.
- 3) Чем выше температура МКП, тем большее влияние на интенсивность десорбции оказывает ток электронного луча.
- 4) Чем выше температура, при которой выполняется тренировка микроканальной пластины, тем ниже интенсивность электронно-стимулированной десорбции с поверхности ее каналов в процессе работы ЭОП.

Для анализа влияния совмещенного термического и электронного обезгаживания микроканальной пластины на коэффициент вторичной электронной эмиссии был проведен ряд экспериментов, в результате которых установлено:

- электронное обезгаживание МКП при 200°C снижает КВЭЭ по сравнению с классическим режимом обработки на 12.5%;
- увеличение температуры до 350°C приводит к падению КВЭЭ уже на 22%;
- электронное обезгаживание при температуре 20°C снижает исходный КВЭЭ ~ на 6%.

С учетом экспериментальных данных, в зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии и интенсивности электронно-стимулированной десорбции $\delta(U_{MCP})$ и $r_0(U_{MCP})$, входящие в модель фактора мощности шума МКП, был введен еще один параметр - температура.

На рис. 3 представлена зависимость фактора шума МКП от температуры тренировки для различных напряжений питания МКП. В диапазоне рабочих значений напряжения питания МКП (800-900В) фактор шума МКП при увеличении температуры тренировки имеет две фазы: фазу падения и фазу роста. Точка минимума, разделяющая эти фазы, смещается в сторону более высоких температур при увеличении напряжения питания МКП. Оптимальной температурой тренировки с точки зрения минимального фактора шума МКП при работе в диапазоне 800-900В является 200 ± 20 °C.

При увеличении коэффициента вторичной электронной эмиссии первого удара относительно среднего по каналу (коэффициент C) в два раза, фактор шума МКП довольно резко снижается даже при тренировке в условиях низкой температуры (20°C) при напряжении питания МКП до 750В (рис.4). При дальнейшем увеличении напряжения питания МКП, фактор шума начинает быстро расти и приближается к величине, соответствующей $c=1$. Это объясняется увеличением коэффициента усиления МКП, и, как следствие, увеличением петли

обратной связи. Если же совместить увеличение КВЭЭ первого удара относительно среднего по каналу с последующим электронно-лучевым обезгаживанием на температуре 200 ± 20 °С, фактор шума будет снижаться на всем диапазоне напряжения питания МКП и его величина будет минимальной.

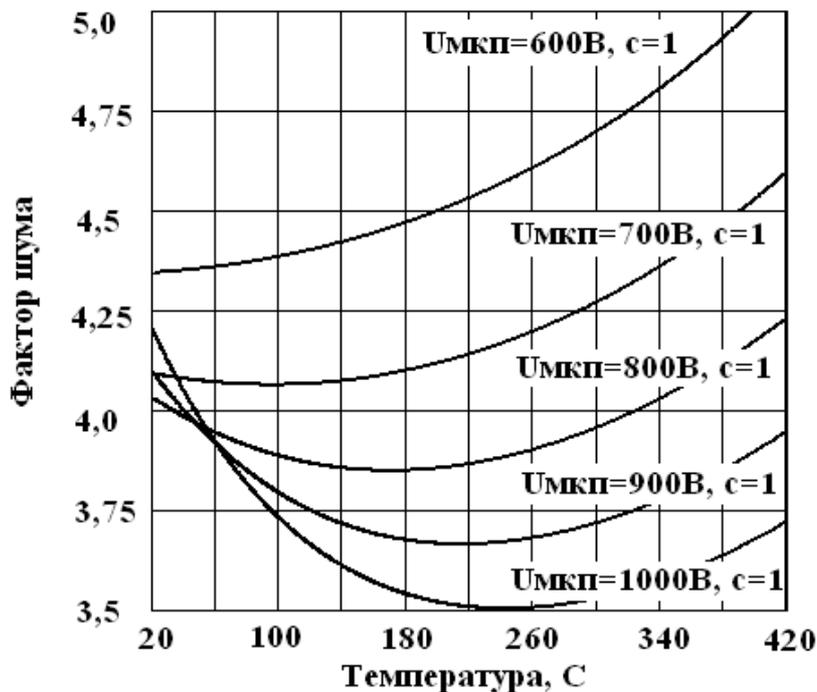


Рис. 3. Фактор шума МКП в зависимости от температуры тренировки для различных напряжений питания МКП

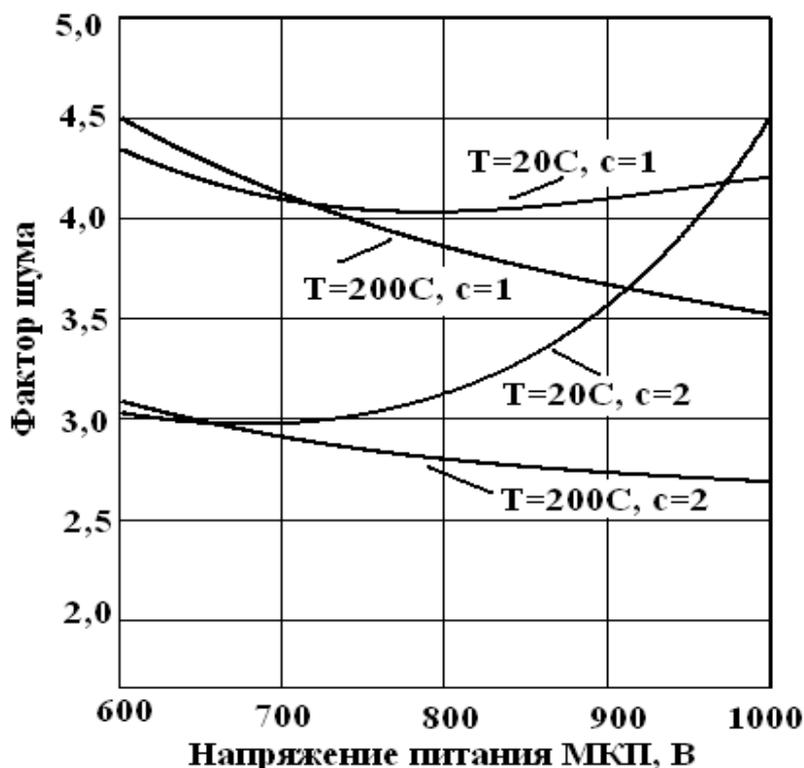


Рис.4. Фактор шума МКП в зависимости от напряжения питания при различных температурах тренировки

Третья глава посвящена разработке новых режимов тренировки микроканальной пластины. Схема операции тренировки приведена на рис.5. Основными параметрами операции являются:

1. $U_{CATHODE}$, [В] – напряжение смещения на нити накала;
2. U_{MCP} , [В] – напряжение питания микроканальной пластины;
3. U_{ANODE} , [кВ] – напряжение смещения на экране ЭОП;
4. I_{ANODE} , [мкА] – ток на выходе МКП;
5. t , [час] – время обработки;
6. T , [°С] – температура, при которой проходит обработка;

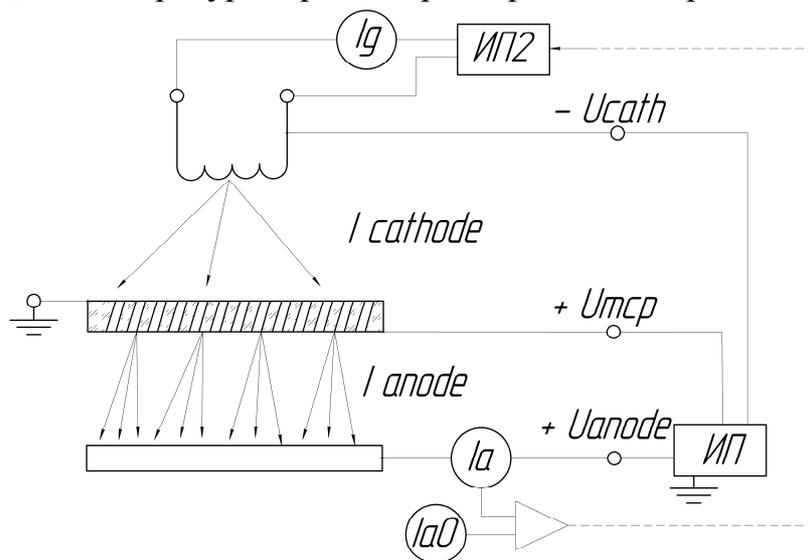


Рис.5. Схема тренировки МКП

$U_{CATHODE}$ определялось исходя из соображения обеспечения минимальной деградации КВЭЭ первого удара (во время тренировки КВЭЭ первого удара должен быть близок к единице). Для определения $U_{CATHODE}$ предложена зависимость

$U_{CATHODE} = \left(\frac{\delta}{B}\right)^2 = \frac{1}{B^2}$, где константа материала МКП (B) может быть определена по паспортным данным МКП с помощью разработанной номограммы.

Напряжение питания МКП определяет энергию электрона в момент удара о стенку канала внутри МКП. Максимальное значение интенсивности ЭСД для различных химических элементов будет соответствовать различной энергии первичных электронов. Для удаления наиболее опасных для ЭОП элементов (вода, водород) с максимальной интенсивностью необходимо установить (согласно экспериментальным данным) напряжение питания МКП, соответствующее энергии электронов в момент удара $E_{H^+} = 73eV$, $E_{H_2} = 63eV$, $E_{H_2O} = 50eV$. Т.е. этот параметр во время тренировки должен изменяться ступенчато. Для определения конкретных значений напряжения питания МКП с помощью метода Монте-Карло была смоделирована зависимость энергии электронов в момент удара от приложенного напряжения МКП. В результате были получены напряжения для трех этапов тренировки $U_{MCP}^1 = 550 В$, $U_{MCP}^2 = 650 В$, $U_{MCP}^3 = 710 В$.

Напряжение смещения на экране ЭОП определяется исходя из критической величины, соответствующей пробую вакуумного промежутка.

Ток на выходе МКП I_{ANODE} необходимо стремиться довести до максимально допустимого значения, ограничивающегося либо пробоем микроканальной пластины (в результате резкого увеличения давления в каналах при интенсивной ЭСД), либо выгоранием входного торца МКП. Максимальный ток на выходе МКП принимался на порядок выше рабочего тока в приборе: $I_{ANODE_MAX} = I_{CATHODE_MCP} \cdot K_{YC_MCP} \cdot 10 = 5 \cdot 10^{-11} \cdot 5000 \cdot 10 = 2,5 \cdot 10^{-6}$ [А].

Экспериментальные исследования процесса тренировки показали, что пробой наступает при увеличении давления в камере во время тренировки примерно на 2-2,5 порядка. Для создания технологического запаса по давлению было принято допустимым увеличение тока на выходе МКП до значения, соответствующего увеличению давления в камере на порядок. При этом, необходимо следить за током, разогревающим нить накала: постоянная работа на максимуме может приводить к ускоренному распылению нити накала, поэтому ток через нее необходимо удерживать не выше 90% максимального. В нашей системе эта величина составляла 6А.

Время обработки на каждом этапе выбиралось из следующих соображений:

1. Суммарное время обработки на всех этапах тренировки не должно превышать суммарного времени тренировки по действующим режимам (8 часов), чтобы не снижать производительность оборудования, т.е. не более 160 минут на каждый из трех этапов.

2. На каждом этапе необходимо добиться максимального уровня тока на выходе МКП, но действующее ограничение по давлению вынуждает выполнять этот процесс ступенчато. Если давление выросло на порядок, дальнейшее увеличение тока на выходе МКП возможно только при снижении этого давления до приемлемого уровня за некоторое время обработки. Снижение давления более чем на 70% нерационально, т.к. интенсивность десорбции снижается экспоненциально и на дальнейшее снижение необходимо затратить в несколько раз более длительное время, чем на снижение до 50-70%. Температура, при которой должна проводиться тренировка МКП, определена во второй главе и составляет 200 ± 20 °С.

С учетом разработанного алгоритма тренировки МКП была проведена корректировка всей операции финишной обработки ЭОП. В стандартном режиме вакуумная установка после термического обезгаживания требует охлаждения до комнатной температуры для проведения тренировки МКП. После тренировки установка снова нагревается до температуры 200 ± 5 °С (процесс формирования фотокатода, следующий за тренировкой МКП, начинается при температуре 195°С) и выдерживается в течение 4 часов для обеспечения равномерности температуры по подложкам фотокатодов.

При использовании предлагаемого режима тренировки МКП охлаждение после термического обезгаживания проводится только до температуры 200 ± 5 °С. Таким образом, время на дальнейшее охлаждение до комнатной температуры, а также последующий нагрев и выдержку исключается из операции финишной обработки. В результате общая длительность операции снижается с 48 до 30 часов, что увеличивает производительность оборудования на 60%.

По описанному режиму проведено два процесса и изготовлено 8 приборов (по 4 шт. в одном процессе). Приборы прошли полный цикл испытаний и измерений.

Результаты выходного контроля сведены в таблицу 2. Из таблицы следует, что основные выходные параметры ЭОП не ухудшились, а отношение сигнал-шум увеличилось.

Таблица 2

№ Прибора	Интегральная чувств., мкА/лм	Предел разрешающей способности	Умпк для К пр.= 50 000	Яркость темного фона	S/N, (К пр.= 30 000)
8915	720	60	870	< 10-3	23,7
12745	Автоэлектронная эмиссия МКП - брак				
12747	708	53	895	< 10-3	23,1
12748	Пробой - брак				
13880	655	53	920	< 10-3	23,6
14015	605	60	880	< 10-3	21,7
12742	660	60	950	< 10-3	23,6
12601	635	60	920	< 10-3	23,0
Среднее	663,8	-	-	-	23,1
Процент выхода годных изделий	75%				

Зависимость отношения сигнал-шум от напряжения питания микроканальной пластины в составе ЭОП на экспериментальных приборах приведена на рис.6. Т.к. в результате использования разработанного режима у приборов практически отсутствует фаза падения отношения сигнал-шум при увеличении напряжения питания МКП, результирующая средняя величина этого параметра на 12% превышает среднее значение на текущих изделиях (23,2 против 20,7).

Надежность изделий, изготовленных по разработанному режиму, проверялась испытаниями на долговечность по ускоренной методике, принятой на ООО «МЭЛЗ-ЭВП». Результаты испытаний приборов показали, что долговечность приборов не ухудшилась (падение параметров ЭОП в процессе наработки не выходит за пределы допустимых значений для принятой методики испытаний).

В четвертой главе проведен поиск возможных путей дальнейшего увеличения отношения сигнал-шум бипланарных ЭОП. Для этой цели был выполнен анализ связи эксплуатационных параметров электронно-оптического преобразователя в разрезе его шумовых характеристик с ключевыми операциями процесса его изготовления. В результате анализа операции технологического процесса производства ЭОП были разделены по направлениям улучшения отношения сигнал-шум:

- 1) Необходимо при $U_{МКП} = const$ увеличить коэффициент усиления.
- 2) Необходимо снизить скорость падения отношения сигнал-шум с увеличением напряжения питания МКП.
- 3) Необходимо увеличить отношение сигнал-шум во всем диапазоне $U_{МКП}$.

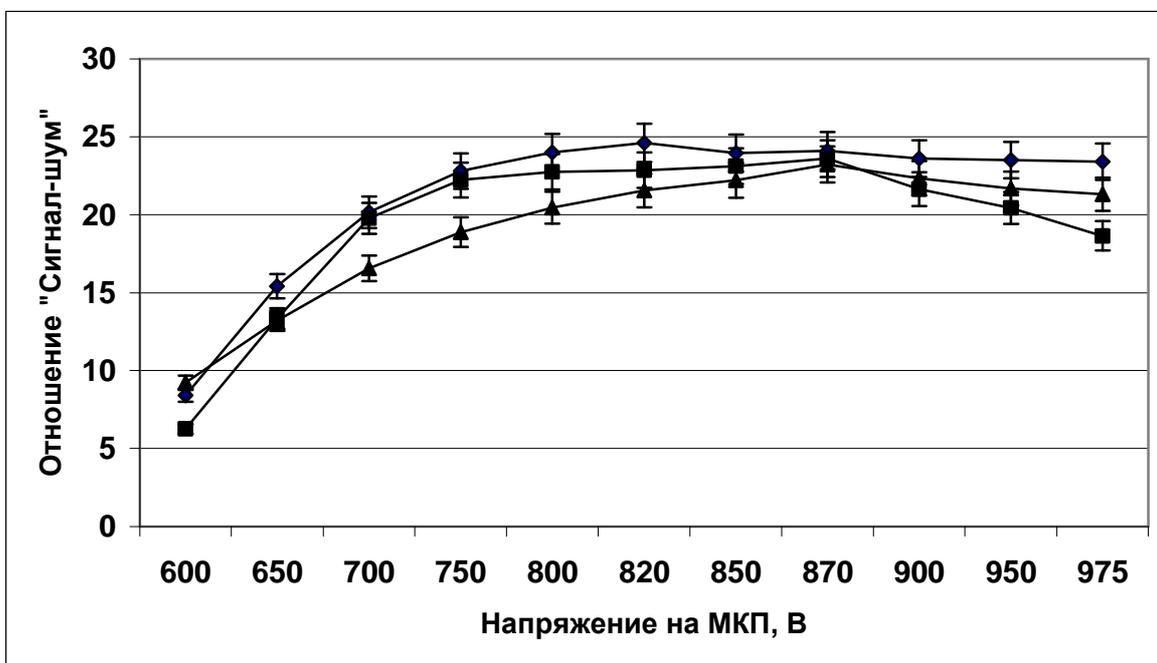
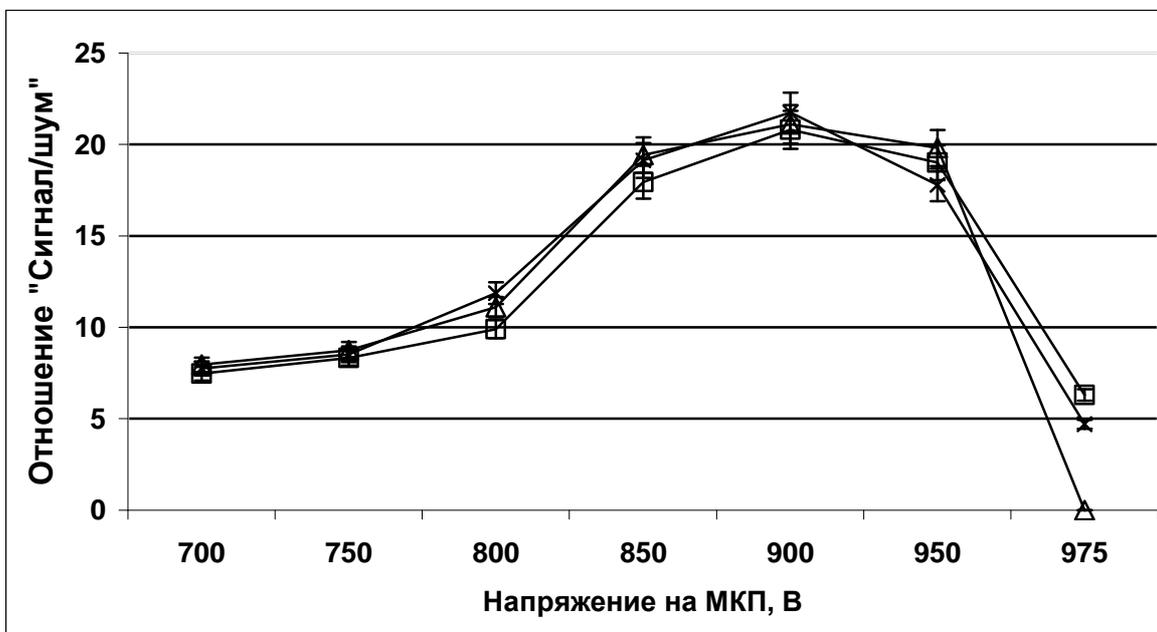


Рис. 6. Отношение сигнал-шум в зависимости от напряжения МКП на текущих изделиях (верхний график) и на изделиях, изготовленных с использованием новых режимов тренировки МКП (нижний график)

Более детальное рассмотрение каждой операции позволило определить для них целевые функции для получения максимального значения сигнал-шум. В таблице №3 приведены результаты этой работы.

Видно, что на 6 из 10 выделенных ранее факторов существенное влияние оказывает операция финишной обработки вакуумного блока, причем три из них связаны с тренировкой микроканальной пластины и были рассмотрены ранее. Четвертый фактор, связанный с операцией финишной обработки, и определяющий отношений сигнал-шум до микроканальной пластины – это интегральная чувствительность фотокатода. Рассмотрены некоторые аспекты технологии формирования фотокатода в разрезе увеличения интегральной чувствительности.

Таблица 3

№п.п.	Фактор	Операция	Целевая функция
1	Интегральная чувствительность фотокатода S_{sum}	Финишная обработка (формирование фотокатода)	$S_{sum} \rightarrow \max$
2	Коэффициент вторично-электронной эмиссии средний по каналу δ	Финишная обработка (тренировка микроканальной пластины)	$\Delta\delta \rightarrow \min$
3	Коэффициент вторично-электронной эмиссии первого удара δ_0	Финишная обработка (тренировка МКП)	$\Delta\delta_0 \rightarrow \min$
		Разработка новых операций	$\delta_0 \rightarrow \max$
4	Световая отдача люминофора B_0	Отжиг адгезива	$\square B_0 \rightarrow \min$
		Отжиг орг. пленки	
		Финишная обработка (вакуумный отжиг)	
5	Нагрузка люминофора $n_{люм}$	Нанесение адгезива	$B(n_{люм}) \rightarrow \max$
		Нанесение люминофора	
6	Толщина алюминиевого покрытия h_{Al}	Напыление алюминия	$B(h_{Al}) \rightarrow \max$
7	Неравномерность алюминиевого покрытия Δh_{Al}	Приготовление органической пленки	$B(\Delta h_{Al}) \rightarrow \max$
		Нанесение органической пленки	
8	Вероятность образования иона в результате ЭСД σ_1	Финишная обработка (тренировка МКП)	$\sigma_1 (U_{тср}) \Rightarrow \min$
9	Вероятность образования иона в результате ионизации остаточных газов σ_2	Финишная обработка (вакуумный отжиг, откачка)	$\sigma_2 (U_{тср}) \Rightarrow \min$
		Мойка деталей и узлов	
10	Прозрачность микроканальной пластины A	Дополнительные операции, требуется разработка	$A \rightarrow \max$

Выявлено, что существующий метод контроля процесса формирования фотокатода, ориентированный только на измерение фототока, является неоптимальным, т.к. он не учитывает соотношение напыляемых щелочных металлов и сурьмы, толщины и сопротивления фотокатода. Все это приводит к выводу о необходимости разработки и внедрения дополнительных контрольных сигналов, которые позволили бы более информативно проводить формирование фотокатода.

На основе анализа литературных данных и результатов, получаемых на ООО «МЭЛЗ-ЭВП», предложено в качестве дополнительных контрольных сигналов использовать коэффициент оптического отражения и сопротивление фотокатода, а также проводить масс-спектрометрический анализ остаточных газов.

Описан возможный путь интерференционного усиления чувствительности фотокатода за счет создания на подложке фотоэмиссионного материала развитой геометрии. Предложено для этих целей использовать защитную экранирующую сетку.

Общие выводы

1. Показано, что основным источником шума бипланарных ЭОП являются процессы электронно-стимулированной десорбции и ионно-электронной эмиссии, протекающие в каналах микроканальной пластины. Существующие методы снижения отрицательного влияния этих процессов на качество ЭОП основаны на блокировке шумовых заряженных частиц и не связаны со снижением интенсивности обозначенных процессов, что, в конечном итоге, выражается в ухудшении других параметров качества электронно-оптического преобразователя.

2. Разработанная математическая модель фактора шума МКП была подтверждена экспериментальными исследованиями ЭОП 2+ поколения, изготовленных в серийном производстве.

3. Исследования показали, что ионизация остаточных газов в приборе не оказывает существенного влияния на шумовые характеристики ЭОП.

4. Показано, что в процессе производства электронно-оптического преобразователя наибольшее влияние на фактор шума МКП оказывает операция финишной обработки ЭОП, на которой реализуется термическое и электронно-лучевое обезгаживание МКП.

5. Для уменьшения фактора шума МКП в составе ЭОП впервые рекомендовано проводить электронно-лучевое обезгаживание микроканальной пластины совместно с термическим.

6. Экспериментально получены зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии и интенсивности электронно-стимулированной десорбции от температуры совмещенного обезгаживания. Результаты показывают, что увеличение температуры, при которой выполняется тренировка МКП, с 20С до 350С приводит к увеличению деградации КВЭЭ с 6% до 22% (эффект отрицательный), интенсивность электронной стимулированной десорбции, при этом, снижается в 7 раз (эффект положительный). Оптимальное значение температуры, при котором фактор шума в рабочем диапазоне напряжений питания МКП будет минимальным, составляет $200 \pm 20^\circ \text{C}$.

7. Экспериментально изучена зависимость интенсивности электронно-стимулированной десорбции водорода и воды от энергии первичных электронов. С помощью метода Монте-Карло рассчитана зависимость энергии вторичного электрона в МКП в момент удара от напряжения питания МКП. С целью получения максимальной интенсивности электронно-стимулированной десорбции обозначенных газов в процессе тренировки, предложено напряжение на МКП во время этой операции изменять ступенчато (550В, 650В и 710В), а время выдержки на каждой ступени определять моментом снижения давления в камере до исходного значения.

8. В процессе совмещенного обезгаживания МКП типа 18-8 рекомендуется:

- напряжение катодного смещения устанавливать на уровне 20-30В;
- значения тока на выходе МКП устанавливать по увеличению давления в камере на порядок.

9. Снижение фактора шума МКП в составе ЭОП за счет повышения КВЭЭ первого удара при сохранении тренировки МКП при низких температурах (порядка 20°C) возможно только до определенного значения напряжения питания МКП. При превышении этого значения напряжения фактор шума будет увеличиваться и достигать (или превышать) свое исходное значение. Использование технологических путей повышения КВЭЭ первого удара при реализации электронно-лучевого обезгаживания МКП совместно с термическим позволяет добиться максимального снижения фактора шума МКП в составе ЭОП во всем диапазоне напряжения питания МКП.

10. В результате внедрения предложенных режимов обработки МКП на финишной операции было достигнуто увеличение отношения сигнал-шум со среднего значения 20,7 до 23,2, т.е. на 12%; производительность установки финишной обработки выросла на 60%.

11. Для дальнейшего увеличения качества ЭОП рекомендуется:

- на операции формирования фотокатода контролировать помимо фототока коэффициент оптического отражения от поверхности фотокатода, сопротивление фотокатода, а также проводить масс-спектрометрический анализ остаточных газов, что позволит увеличить среднее значение квантового выхода фотокатода;
- при формировании фотокатода использовать свидетель на волоконно-оптической пластине, что позволит увеличить среднее значение интегральной чувствительности на 13,7%;
- при формировании фотокатода установить перед подложками экранирующую сетку, позволяющую получить развитую ячеистую поверхность фотокатода для увеличения квантового выхода за счет изменения угла входа излучения в фотоэмиссионный материал.

Основные работы, освещающие положения диссертации

1. Study of the secondary ion emission by electrons from microchannel plates (MCP)/ P Kononov [etc.]/J.Phys: Conf. Series. 2008. V.100. P.1-4.
2. Коновалов П.И., Меньшиков И.П., Невшупа Р.А. Моделирование передаточной характеристики вакуумной системы, содержащей источник прерывистого газовыделения// Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер.: Естественные науки. 2007. Т. 1(24). С.104-110.
3. Коновалов П.И., Меньшиков И.П., Невшупа Р.А. Динамика давления разреженного газа при наличии периодического ангармонического источника: I. Математическая модель отклика давления // Вакуумная техника и технология. 2007. Т.17, №1. С.21-27.
4. Меньшиков И.П., Коновалов П.И., Невшупа Р.А. Динамика давления разреженного газа при наличии периодического ангармонического источника: II. Критериальный подход к оценке формы пиков газовыделения // Вакуумная техника и технология. 2007. Т.17, №1. С.29-32.