

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2544830

СПОСОБ РЕСТАВРАЦИИ МОЩНЫХ ВАКУУМНЫХ СВЧ-ПРИБОРОВ ГИРОТРОННОГО ТИПА

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский Государственный политехнический университет" (ФГАОУ ВО "СПбПУ") (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013149451

Приоритет изобретения **06 ноября 2013 г.**

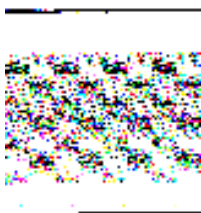
Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **12 февраля 2015 г.**

Срок действия патента истекает **06 ноября 2033 г.**

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий





**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013149451/07, 06.11.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
06.11.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 06.11.2013

(45) Опубликовано: 20.03.2015 Бюл. № 8

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **Известия высших учебных заведений, Прикладная нелинейная динамика**, 2008, т.16, N3, с.129-141 . RU 2244979C1, 20.01.2005. RU 2036529C1 27.05.1995. US 3915533A 28.10.1995. US 5259800A, 09.11.1993

Адрес для переписки:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая,
29, ФГАОУ ВО "СПбПУ", Отдел
интеллектуальной собственности

(72) Автор(ы):

**Лукша Олег Игоревич (RU),
Соминский Геннадий Гиршевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский
Государственный политехнический
университет" (ФГАОУ ВО "СПбПУ") (RU)****(54) СПОСОБ РЕСТАВРАЦИИ МОЩНЫХ ВАКУУМНЫХ СВЧ-ПРИБОРОВ ГИРОТРОННОГО ТИПА**

(57) Реферат:

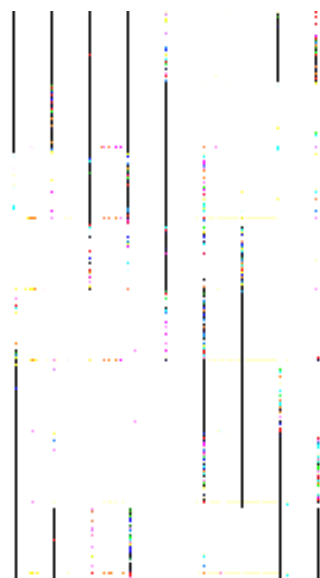
Изобретение относится к электронной технике, а именно к способам реставрации мощных СВЧ-устройств, и может быть использовано для восстановления эксплуатационных характеристик приборов гиротронного типа. Способ включает обработку катода потоком ионов и контроль изменения эмиссионного тока с катода в процессе ионной обработки. Оснащают гиротрон системами напуска и откачки инертного газа, устанавливают давление $p_{и}$ инертного газа в гиротроне удовлетворяющим неравенству $p_{min} < p_{и} < 10^{-5} - 10^{-4}$ Торр, где p_{min} - минимальное

давление инертного газа, при котором необходимое время ионной обработки катода имеет максимально допустимую величину, подают накал на катод и устанавливают мощность накала $P \leq P_c$, где P_c - стандартный накал катода, включают анодное напряжение и устанавливают его величину, производят ионную обработку катода при избранном анодном напряжении и включенном магнитном поле. Технический результат - упрощение способа реставрации и расширение области его применения. 5 ил.

R U
2 5 4 4 8 3 0
C 1

C 1
0 0
2 5 4 4 8 3 0
R U

R U 2 5 4 4 8 3 0 C 1



R U 2 5 4 4 8 3 0 C 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2013149451/07, 06.11.2013**

(24) Effective date for property rights:
06.11.2013

Priority:

(22) Date of filing: **06.11.2013**

(45) Date of publication: **20.03.2015** Bull. № 8

Mail address:

**195251, Sankt-Peterburg, ul. Politekhnikeskaja, 29,
FGAOU VO "SPbPU", Otdel intellektual'noj
sobstvennosti**

(72) Inventor(s):

**Luksha Oleg Igorevich (RU),
Sominskij Gennadij Girshevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Sankt-Peterburgskij
Gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet"
(FGAOU VO "SPbPU") (RU)**

(54) **METHOD FOR RECOVERY OF POWERFUL VACUUM SHF-DEVICE OF GYROTRON TYPE**

(57) Abstract:

FIELD: electricity.

SUBSTANCE: method includes cathode processing by ion flow and control of emission current measurement at cathode in process of ion-beam processing. Gyrotron is equipped with inert gas puffing and degassing systems, pressure p_i of inert gas is set so that inequality $p_{min} < p_i < 10^{-5} - 10^{-4}$ Torr is met, where p_{min} is minimum pressure of inert gas, at that required time of ion-beam processing has maximum value, filament voltage is supplied to cathode and filament power is set as $P \leq P_s$, where P_s is standard cathode glow, anode voltage is connected and its values is set, ionic processing is made at selected anode voltage and switched on magnetic field.

EFFECT: simplifying the recovery method and expanding its scope of application.

5 dwg



RU 2 544 830 C1

RU 2 544 830 C1

Изобретение относится к электронной технике, а именно к способам реставрации мощных СВЧ-устройств, и может быть использовано для восстановления эксплуатационных характеристик приборов гиротронного типа, деградация которых обусловлена ухудшением эмиссионных характеристик катода в процессе их работы.

5 При эксплуатации мощных гиротронных приборов, используемых для нагрева плазмы современных установок управляемого термоядерного синтеза, для реализации ряда технологических процессов, а также в радиолокации, очень важно обеспечить достаточную величину и высокую однородность потока электронов, эмитированных катодом. Падение тока эмиссии катода препятствует получению больших мощностей
10 в приборах данного типа. Неоднородности эмиссии ведут к ухудшению качества винтового электронного пучка (ВЭП), а также к развитию и усилению паразитных колебаний пространственного заряда в них. В результате падает эффективность приборов данного типа. Устройства гиротронного типа работают, как правило, в отсутствии ограничения тока с катода пространственным зарядом. В этих условиях
15 для создания интенсивного и однородного в поперечном сечении электронного потока изготовители стремятся обеспечить малую работу выхода и высокую однородность работы выхода по поверхности катода. Однако даже катоды, достаточно эффективные и однородные при постановке в прибор, приобретают эмиссионные неоднородности из-за неоднородного загрязнения их поверхности веществами, которые десорбируются
20 с электродов и из-за выработки поверхности катода в процессе эксплуатации под действием ионной и/или электронной бомбардировки. Одновременно уменьшается и их эффективность. Отравление катода в процессе работы, а также развитие эмиссионных неоднородностей его поверхности ведут не только к падению выходной мощности и к уменьшению эффективности, но и к сокращению срока службы этих сложных и
25 дорогостоящих приборов.

Известен способ реставрации электровакуумных СВЧ-приборов большой мощности (патент RU №2244979), включающий термическую обработку катода. Термическая обработка позволяет удалить газы, адсорбированные на поверхности катодов и/или обеспечить попадание активного вещества из толщи катода к его поверхности. Это
30 способствует повышению эмиссионной активности катода. Однако для удаления многих видов загрязнений требуется прогрев при температурах, превышающих температуру катода в работающем приборе, что может привести к уменьшению долговечности катода или даже к его разрушению. Прогрев не позволяет полностью восстановить высокую эмиссионную активность катода при характерных для катодов рабочих
35 температурах. Прогревом не удается, как правило, устранить и неоднородности эмиссии.

Известен способ реставрации мощных СВЧ-приборов гиротронного типа (О.И. Лукша, Г.Г. Соминский, Д.Б. Самсонов, G. Dammertz, В. Piosczyk, М.К. Thumm «Исследование возможностей использования ионной обработки для повышения качества гиротронных катодов», Известия высших учебных заведений, прикладная нелинейная
40 динамика, 2008, т.16, №3, с.129-141) - прототип.

В способе-прототипе для реставрации гиротрона катод этого прибора обрабатывают потоком ионов и контролируют изменения эмиссионного тока с катода в процессе ионной обработки. Для осуществления ионной обработки извлеченную из гиротрона катодную систему помещают в специальную вакуумную камеру, подвергающуюся
45 непрерывной откачке и оснащенную системой для испытания катода с геометрией магнетронно-инжекторной пушки (МИП), а также источником потока ионов калия. Источник формирует поток ионов, бомбардирующий локальный участок поверхности катода, установленного в пушке. Катод закрепляют в подвижной подвеске. Его

вращение вокруг оси позволяет обеспечить попадание потока ионов из источника на разные участки катода. Исследования, выполненные с наиболее широко используемыми в гиротронах металлопористыми W-Ba катодами, показали, что обработка потоком ионов позволяет увеличить ток эмиссии с катода и повысить его эмиссионную однородность. Проведенные исследования свидетельствуют, что обработка может производиться не только ионами калия, но и другими типами ионов, поскольку улучшение эмиссионных характеристик катода связано с удалением под действием ионной бомбардировки загрязнений с его поверхности и/или с изменением структуры приповерхностных слоев катода, а не с появлением в процессе бомбардировки атомов калия на поверхности и в приповерхностных слоях катода. Полученные авторами упомянутой работы-прототипа данные свидетельствуют, что в случае металлопористых W-Ba катодов бомбардировка ионами с энергией $4-5 \leq W_{и} \leq 14-15$ кэВ позволяет добиться повышения эмиссионной эффективности обрабатываемого участка.

В способе-прототипе необходимо использовать вспомогательную технологическую установку, что усложняет его реализацию и является недостатком способа. Недостатком способа-прототипа является и то, что для его реализации необходимо перемещать катод из гиротрона в технологическую установку, а затем устанавливать его обратно в гиротрон. В связи с этим способ-прототип приемлем только для разборных экспериментальных гиротронов, но не может быть применен для реставрации мощных неразборных стандартных приборов. Кроме того, перенос отреставрированного катода при атмосферном давлении из установки, где проводилась его обработка, в гиротрон ведет к понижению его эмиссионной активности. После установки катода в гиротрон требуется дополнительная термообработка катода, которая, как правило, не позволяет полностью восстановить его эмиссионную эффективность и повысить однородность эмиссии, достигнутые во вспомогательной технологической камере.

Технической задачей изобретения является упрощение способа реставрации и одновременно расширение области его применения, обеспечение возможности его использования в стандартных неразборных гиротронах большой мощности.

Поставленная задача достигается тем, что для осуществления реставрации металлопористого W-Ba катода оснащают гиротрон системами напуска и откачки инертного газа, устанавливают давление $p_{и}$ инертного газа в гиротроне,

удовлетворяющим неравенству $p_{\min} < p_{и} < 10^{-5} - 10^{-4}$ Торр, где p_{\min} - минимальное давление инертного газа, при котором необходимое время ионной обработки катода имеет максимально допустимую величину, подают накал на катод и устанавливают мощность накала $P \leq P_c$, где P_c - стандартный накал катода, включают анодное напряжение и устанавливают его величину $U_a = U_{\text{обр}}$ из интервала $U_{\min} \leq U_{\text{обр}} \leq U_{\max}$, где минимальное напряжение U_{\min} определяется соотношением $U_{\min} = (1,5-2,0)W_{\text{опт}}/e$, в котором $W_{\text{опт}}$ - оптимальная энергия ионов, бомбардирующих катод, при которой для реставрации катода требуется минимальная доза облучения, e - заряд электрона, а максимальное напряжение U_{\max} есть напряжение, при превышении которого возможны разрядные явления в зазоре катод - анод и/или мощность, переносимая в пучке, превышает значение, которое может быть рассеяно на канале транспортировки и/или на коллекторе, производят ионную обработку катода при избранном напряжении $U_a = U_{\text{обр}}$ и включенном магнитном поле, причем магнитное поле B_k у катода магнетронно-инжекторной пушки (МИП) устанавливают, удовлетворяющим соотношению $B_{кр} < B_k$

$\langle (1,1-1,5) \rangle B_{кр}$, где $B_{кр}$ - критическое магнитное поле при анодном напряжении $U_a = U_{обр}$,
 , устанавливают нарастающее в сторону коллектора магнитное поле, а отношение
 максимального магнитного поля B_0 в канале транспортировки пучка к магнитному
 полю у катода B_k задают удовлетворяющим условию осаждения электронов пучка на
 5 удаленном от катода участке канала транспортировки и/или на коллекторе,
 периодически при напряжении $U_a = U_{обр}$ и пониженном накале катода, в условиях, когда
 реализуется режим температурного ограничения тока с катода, измеряют ток катода
 I_T и на основании данных о величине I_T , полученных при одном и том же накале катода
 10 в разные моменты времени t в процессе его обработки, строят зависимость
 ограниченного температурой тока I_T от времени тренировки t , прекращают тренировку
 после того, как скорость изменения тока I_T во времени (dI_T/dt) уменьшается до заданного
 значения, затем выключают напряжение и магнитное поле, откачивают инертный газ
 15 из прибора и обезгаживают гиротрон при значениях мощности накала вплоть до
 стандартного P_c .

Предлагаемый способ имеет существенные преимущества по сравнению с
 прототипом. Он проще в реализации и может быть использован для реставрации
 металлопористых W-Wa катодов в стандартных мощных неразборных гиротронах.

20 Рассмотрим примеры реализации предлагаемого способа. Поясняют результаты
 экспериментов и расчетов, выполненных для проверки возможности реализации способа,
 Фиг.1, Фиг.2, Фиг.3, Фиг.4 и Фиг.5. На Фиг.1 приведена зависимость сечения ионизации
 $\sigma_{и}$ атомов аргона электронным ударом от энергии электронов. На Фиг.2, Фиг.3, Фиг.4
 и Фиг.5 приведены рассчитанные траектории электронов, а также линии постоянного
 25 потенциала U (пунктирные линии) в различных режимах работы экспериментального
 гиротрона (при разных значениях анодного напряжения U_a , тока катода I и разных
 распределениях индукции магнитного поля $B(Z)$ вдоль оси Z . На всех фигурах а - область
 магнетронно-инжекторной пушки (МИП), б - участок канала транспортировки,
 показанный до места осаждения пучка электронов на канале и/или на коллекторе. Здесь
 30 B_k и B_0 соответственно значения магнитного поля на катоде и в максимуме
 распределения $B(Z)$. На Фиг.1, Фиг.2 и Фиг.3 приведены данные, полученные в режимах,
 близких к критическому, в МИП, т.е. в режимах, когда магнитное поле в МИП близко
 по величине к $B_{кр}$. Фиг.2 иллюстрирует результаты расчетов при $U_a = 15$ кВ, $I = 1$ А,
 35 $B_0 = 0.132$ Тл, $B_0/B_k = 2.97$. На Фиг.3 данные получены при $U_a = 12$ кВ. Остальные параметры
 те же, что и на Фиг.2. На Фиг.4 данные получены при $U_a = 10.5$ кВ и $B_0 = 0.117$ Тл.
 Остальные параметры такие же, как на Фиг.2. Фиг.5 иллюстрирует характеристики,
 полученные для рабочего режима гиротрона $U_a = 30$ кВ, $I = 10$ А, $B_0 = 2.75$ Тл, $B_0/B_k = 17.06$.

40 При первоначальной проверке реализуемости способа реставрации было исследовано
 влияние бомбардировки ионами калия на эмиссионную активность (работу выхода)
 локальных участков поверхности металлопористых W-Wa катодов. Измерения
 выполнялись в специальной вакуумной камере в статическом режиме. Для контроля
 воздействия ионной бомбардировки при температурном ограничении эмиссии
 45 измерялись изменения во времени тока эмиссии с бомбардируемого участка катода.
 Воздействие ионной бомбардировки на эмиссионную активность катода зависело от
 энергии ионов и от величины дозы облучения ионами. Бомбардировка ионами с энергией
 $4-5 \leq W_{и} \leq 14-15$ кэВ приводила к увеличению эмиссионной активности (к снижению
 работы выхода бомбардируемого участка). Воздействие бомбардировки было

максимально эффективно при оптимальной энергии ионов $W_{и}=W_{опт} \sim 8-9$ кэВ. При таких энергиях ток эмиссии с бомбардируемого локального участка катода увеличивался до некоторого максимального значения при минимальной удельной дозе облучения ~ 10 мкА·мин/см². Продолжение бомбардировки практически не меняло эмиссионной активности этого участка. При оптимальной энергии ионов $W_{опт} \sim 8-9$ кэВ и плотности тока ионов на катод $\sim 0,25$ мкА/см² максимальная активировка достигалась приблизительно через 60 мин. При обработке катода ионами с энергией меньше или больше оптимального значения, для получения максимальной активировки требовалась большая доза облучения. Наибольшее увеличение плотности тока эмиссии с обрабатываемого участка катода зависело от начальной эффективности (работы выхода) этого участка и достигало 40-100%. Продолжительная выдержка катода при температурах от 700-800°С вплоть до рабочей, при которых происходит испарение атомов калия с поверхности катода, практически не меняла уровня эмиссионной активности обработанного потоком ионов участка. Отсюда можно сделать вывод, что достигнутое повышение плотности тока эмиссии с данного участка обусловлено действием потока ускоренных ионов и не является следствием осаждения атомов калия на катод. Отсюда можно также сделать вывод, что для реставрации катода могут быть использованы не только ионы калия, но и ионы другого сорта, в частности ионы инертных газов.

В работающем гиротроне из-за ионизации остаточного газа электронами, испускаемыми с катода, катод подвергается бомбардировке положительными ионами остаточных газов. Но при давлениях остаточного газа $p_0 \sim 10^{-7}-10^{-8}$ Торр, типичных для стандартных гиротронов, по проведенным оценкам плотность потока ионов на катод не превышает $10^{-9}-10^{-10}$ А/см². Бомбардировка катода столь малым по плотности потоком ионов остаточного газа не предотвращает его деградацию в процессе работы. Плотность ионного тока на катод можно было бы повысить, увеличив давление остаточного газа в гиротроне. Однако при повышенных давлениях происходит отравление металлопористых W-Wa катодов из-за взаимодействия компонентов покрытия с химически активными остаточными газами. Достаточно большие потоки ионов на катод, необходимые для его обработки, можно обеспечить при повышенных давлениях инертного газа (например, аргона) в гиротроне. Инертные газы не отравляют покрытие катода. Поэтому при работе в атмосфере инертных газов можно повышать давление этих газов в гиротроне ориентировочно до $10^{-4}-10^{-5}$ Торр. При больших давлениях возможно зажигание сильноточного разряда в высоковольтном зазоре между катодом и анодом, что недопустимо, так как приводит к интенсивному газовыделению с анода и даже к испарению вещества анода, а вследствие этого - к загрязнению катода десорбированными газами и продуктами испарения с анода.

В отсутствие магнитного поля после подачи анодного напряжения U_a анод подвергается бомбардировке потоком электронов с катода и катод может быть загрязнен продуктами с анода, десорбированными под действием электронной бомбардировки. Такое загрязнение можно свести к допустимому минимуму, если, исключив интенсивную электронную бомбардировку анода, осаждают электроны с катода на удаленном участке канала транспортировки электронного пучка и/или на коллекторе. Как следует из исследования устройств со скрещенными полями магнетронного типа, в условиях, когда можно пренебречь влиянием процессов в пространственном заряде, чтобы избежать бомбардировки анода электронами с катода,

магнитное поле у катода B_K должно превышать критическое значение $B_{кр}$, при котором траектории электронов с катода касаются анода. В условиях, когда процессами в пространственном заряде пренебречь нельзя, падение электронного тока на анод (отсечка анодного тока) происходит в довольно широком интервале значений магнитного поля у катода $B_{кр} < B_K \leq 1,5 B_{кр}$. Введение удовлетворяющего этому соотношению магнитного поля у катода МИП, а также нарастающего в сторону коллектора магнитного поля на участке транспортировки электронного пучка позволяет практически исключить бомбардировку анода МИП и осадить электроны на удаленном участке канала транспортировки пучка электронов и/или на коллекторе, что позволяет свести к допустимому минимуму поток десорбированных продуктов на катод.

Оценить степень восстановления эмиссионной эффективности гиротронного катода можно, периодически измеряя в процессе ионной обработки ток с катода I_T в режиме температурного ограничения эмиссии с катода. Уменьшение скорости изменения этого тока во время t ионной обработки является свидетельством повышения его эмиссионной эффективности. Выход в насыщение зависимости $I_T(t)$, измеряемой при фиксированных значениях мощности накала P и анодного напряжения в режиме температурного ограничения эмиссии, свидетельствует о возможности завершить ионную обработку.

При осуществлении ионной обработки катода в стандартном гиротроне важно иметь возможность контролировать не только изменение величины тока с катода, но и изменения наиболее вероятного значения работы выхода $e\phi_0$, а также величины разброса σ значений работы выхода по поверхности катода. Для контроля изменения величин $e\phi_0$ и σ в процессе ионной обработки катода можно воспользоваться методикой, описанной в работе J.P. Anderson, S.E. Korbly, R.J. Temkin, M.A. Shapiro, IEEE Trans. On Plasma Science., 2002, v.30, N06, p.2117-2123. В этой работе приведено выражение, описывающее зависимость плотности тока эмиссии j с катода от $e\phi_0$ и σ :

$$j = \frac{K A_0}{k T} \exp\left(-\frac{e\phi_0}{k T}\right) \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2k T}\right) \exp\left(-\frac{e E}{k T}\right) \exp\left(-\frac{e \Phi_T}{k T}\right)$$

Здесь K - первеанс МИП, A_0 - постоянная Ричардсона, T - температура катода, ϵ_0 - электрическая постоянная, k - постоянная Больцмана, E - электрическое поле у поверхности катода, Φ_T - величина с размерностью работы выхода, определяемая равенством

$$\Phi_T = \frac{U_a - U_T}{\epsilon_0}$$

где напряжение $U_a = U_T$ соответствует границе между участком вольт-амперной характеристики, где реализуется ограничение тока пространственным зарядом, и областью этой характеристики, где ток ограничен температурой катода.

Значения $e\phi_0$ и σ рассчитываются на основании этой зависимости с использованием измеренных экспериментально при разных накалах катода вольт-амперных характеристик. Расчет $e\phi_0$ и σ позволяет определить допустимые изменения тока эмиссии

катода, регистрируемого во время его ионной обработки.

Чтобы оценить возможность реставрации металлопористого W-Va катода под действием ионной бомбардировки, рассчитаем плотность потока ионов аргона на катод при повышенном давлении аргона в гиротроне. Расчет проведем для гиротрона с геометрией МИП и катодом, имеющим геометрию, типичную для стандартных гиротронов большой мощности. Определим плотность тока ионов с энергиями от 4 до 9 кэВ, которые эффективно активируют катод. Ионы аргона, возникшие в точке с потенциалом U , двигаются к катоду и попадают на его поверхность с энергией eU . Плотность потока ионов на катод с энергиями от 4 до 9 кэВ определяется соотношением

где r_4 и r_9 - радиальные координаты в пространстве между катодом и анодом, соответствующие потенциалам 4 и 9 кВ, n_{Ar} - концентрация атомов аргона, n и v_e - соответственно концентрация и скорость электронов, производящих ионизацию, $\sigma_{и}$ - сечение ионизации аргона электронами со скоростью v_e , j_e - плотность тока электронов, производящих ионизацию, определяемая соотношением

Зависимость сечения ионизации аргона от энергии электронов, необходимая для расчета плотности потока ионов на катод, показана на Фиг.1.

На Фиг.2-4 приведены рассчитанные траектории электронов и характеристики распределения потенциала в магнетронно-инжекторной пушке (МИП) и в прилегающей области канала транспортировки пучка электронов в режимах, близких к критическому в МИП. На Фиг.5 для сравнения показаны те же характеристики, полученные в типичном для мощного гиротрона закритическом режиме, когда траектории электронов в МИП в большей степени прижаты к катоду. Из проведенных расчетов можно сделать следующие выводы об особенностях режима, близкого к критическому, когда магнитное поле у катода МИП удовлетворяет соотношению $V_{кр} < V_k \leq 1,5 V_{кр}$:

- При напряжениях $U_a \geq V_{min} = (1,5-2,0)W_{опт}/e$ траектории электронов приблизительно параллельны в зазоре между катодом и анодом МИП с потенциалами до 8-9 кВ и это свидетельствует о том, что плотность тока электронов с катода слабо меняется на указанном участке с удалением от катода. Плотность тока электронов на этом участке $j_e \approx I_k/S_э$, где I_k - ток катода, а $S_э$ - площадь его эмитирующей поверхности. В этих условиях эмитирующий участок катода достаточно однородно бомбардируется ионами с энергиями $W_{и} \leq 8-9$ кэВ.

- Полученные данные о распределении потенциала в потоке электронов, движущемся от катода к аноду, а также сведения о зависимости сечения ионизации от энергии электронов (см. Фиг.1) позволяют рассчитать значения сечения ионизации ионов, бомбардирующих катод. Сечение ионизации атомов аргона электронным ударом имеет величину $\sim 1,3 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ для электронов с энергией 9 кэВ и монотонно увеличивается с уменьшением энергии электронов, достигая при энергии 4 кэВ значения $\sim 2,8 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$.

В рассчитанном закритическом режиме (Фиг.5а, 5б) все траектории электронов в области МИП, из которой осуществляется ионная бомбардировка эмитирующей поверхности катода, сосредоточены в области с потенциалами от 0 приблизительно до 4,5 кВ, даже при повышенном напряжении на аноде (30 кВ). Поэтому в таком режиме катод бомбардируется электронами с энергиями $W_{и} \leq 4,5$ кэВ, недостаточными для

эффективной его обработки. Использование напряжений свыше 30 кВ позволяет увеличить максимальные энергии бомбардирующих катод ионов. Однако при этом уменьшается электрическая прочность зазора катод - анод, и в результате затрудняется ионная обработка катода в статическом режиме. Кроме того, с ростом напряжения увеличивается мощность, выделяемая электронным пучком в месте его осаждения на канал транспортировки и/или коллектор.

Таким образом, проведенные расчеты свидетельствуют, что для обработки катода ионами аргона с энергиями $4 \leq W_{и} \leq 9$ кэВ предпочтительно использование режима, близкого к критическому с анодным напряжением $U \sim 14-15$ кВ, т.е. с напряжением, которое удовлетворяет условию $U_a \geq U_{min} = (1,5-2,0)W_{опт}/e$.

Проведенные расчеты свидетельствуют, что даже при достаточно малых плотностях электронного тока с катода $j \sim 10^{-2}-10^{-1}$ А/см², соответствующих режиму температурного ограничения тока с катода, плотность тока ионов аргона на катод с энергиями 4-9 кэВ, необходимыми для его обработки, должна достигать значений порядка $10^{-8}-10^{-7}$ А/см² при давлении аргона $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ Торр. С учетом этих данных следует, что для достижения максимального эффекта активировки необходимо в указанных условиях осуществлять бомбардировку катода в течение нескольких часов, что практически вполне выполнимо. Активирование катода можно производить и при меньших давлениях инертного газа, например при давлениях, превышающих всего в 5-10 раз давление остаточного газа, если допустимо увеличение времени ионной обработки, которое возрастает с уменьшением давления.

Таким образом, проведенные эксперименты и расчеты подтверждают возможность реализации предлагаемого способа. Показана возможность реставрации стандартных мощных и неразборных гиротронов в результате обработки гиротронных катодов потоком ионов инертного газа и определена возможность контроля изменения эмиссионных характеристик катода в процессе обработки. Способ достаточно прост и оперативен, позволяет восстановить характеристики мощного неразборного гиротрона, деградировавшие в процессе его эксплуатации из-за ухудшения эмиссионных характеристик катода.

Предлагаемый способ может быть использован и для реставрации гиротронов, работающих не с металлопористыми W-Va катодами, а с катодами другого типа, например с гексаборид-лантановыми катодами. Кроме того, обработка катодов может производиться ионами не только аргона, но и других инертных газов. При реставрации катодов другого типа и/или с использованием ионов других инертных газов необходимо оптимизировать выбор анодного напряжения и магнитного поля в МИП, а также температуры катода во время ионной обработки.

Формула изобретения

Способ реставрации мощных вакуумных СВЧ-приборов гиротронного типа, в котором обрабатывают катод потоком ионов и контролируют изменения эмиссионного тока с катода в процессе ионной обработки, отличающийся тем, что оснащают гиротрон системами напуска и откачки инертного газа, устанавливают давление $p_{и}$ инертного газа в гиротроне удовлетворяющим неравенству $p_{min} < p_{и} < 10^{-5}-10^{-4}$ Торр, где p_{min} - минимальное давление инертного газа, при котором необходимое время ионной обработки катода имеет максимально допустимую величину, подают накал на катод и устанавливают мощность накала $P \leq P_c$, где P_c - стандартный накал катода, включают

анодное напряжение и устанавливают его величину $U_a = U_{обр}$ из интервала $U_{min} \leq U_{обр} \leq U_{max}$, где минимальное напряжение U_{min} определяется соотношением $U_{min} = (1,5-2,0)W_{опт}/e$, в котором $W_{опт}$ - оптимальная энергия ионов, бомбардирующих катод, при которой

5 для реставрации катода требуется минимальная доза облучения, e - заряд электрона, а максимальное напряжение U_{max} есть напряжение, при превышении которого возможны разрядные явления в зазоре катод - анод и/или мощность, переносимая в пучке, превышает значение, которое может быть рассеяно на канале транспортировки и/или на коллекторе, производят ионную обработку катода при избранном напряжении U_a

10 $= U_{обр}$ и включенном магнитном поле, причем магнитное поле B_k у катода магнетронно-инжекторной пушки (МИП) устанавливают, удовлетворяющим соотношению $B_k < B_{кр} < (1,1-1,5)B_{кр}$, где $B_{кр}$ - критическое магнитное поле при анодном напряжении $U_a = U_{обр}$,

15 устанавливают нарастающее в сторону коллектора магнитное поле, а отношение максимального магнитного поля B_0 в канале транспортировки пучка к магнитному полю у катода B_k задают удовлетворяющим условию осаждения электронов пучка на удаленном от катода участке канала транспортировки и/или на коллекторе,

периодически при напряжении $U_a = U_{обр}$ и пониженном накале катода, в условиях, когда реализуется режим температурного ограничения тока с катода, измеряют ток катода

20 I_T и на основании данных о величине I_T , полученных при одном и том же накале катода в разные моменты времени t в процессе его обработки, строят зависимость ограниченного температурой тока I_T от времени тренировки t , прекращают тренировку после того, как скорость изменения тока I_T во времени (dI_T/dt) уменьшается до заданного

25 значения, затем выключают напряжение и магнитное поле, откачивают инертный газ из прибора и обезгаживают гиротрон при значениях мощности накала вплоть до стандартного P_c .

30

35

40

45

