РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 526 654** (13) **C2**

(51) МПК
C23C 14/48 (2006.01)
C23C 14/02 (2006.01)
C23C 14/58 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2012149878/02, 23.11.2012**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.11.2012

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **23.11.2012**

(43) Дата публикации заявки: **27.05.2014** Бюл. № **15**

(45) Опубликовано: **27.08.2014** Бюл. № **24**

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2238999 C1, 27.10.2004. RU 2039843 C1, 20.07.1995. KR 20010039594 A, 15.05.2001**

Адрес для переписки:
634050, г. Томск, пр-кт Ленина, д. 30, ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, отдел правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности

(72) Автор(ы):
Степанов Игорь Борисович (RU),
Рябчиков Александр Ильич (RU),
Сивин Денис Олегович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессинального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)

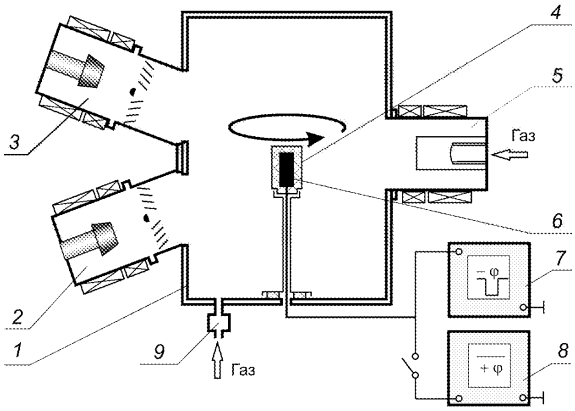
(54) СПОСОБ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ИОННОЙ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ИЛИ ПРОВОДЯЩЕГО МАТЕРИАЛА С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к ионной очистке поверхности изделий из диэлектрического материала или проводящего материала с диэлектрическими включениями. Изделия размещают на проводящем держателе, генерируют плазму с импульсно-периодическим ускорением ее ионов путем прохождения плазменного потока через ускоряющий зазор и с обеспечением поочередного облучения поверхности изделий потоком ускоренных ионов и плазмой при подаче на проводящий держатель высокочастотных короткоимпульсных потенциалов смещения. Длительность импульсов 0,1-10 мкс, коэффициент заполнения импульсов 50-99% и амплитуда потенциала 1-10 кВ. При этом облучение поверхности изделий ведут при длительности импульса потенциала смещения, которая меньше времени зарядки емкости конденсатора, образованного проводящим держателем и эмиссионной границей плазмы, и при длительности паузы между импульсами ускоряющего напряжения, которая меньше времени прохождения плазменного потока через ускоряющий зазор. Обеспечивается повышение эффективности короткоимпульсной, высокочастотной ионной обработки материалов. 7 з.п. ф-лы, 6 ил., 2 пр.

RU 2526654 C2

RU 2526654 C2



Фиг. 1

RU 2526654 C2

RU 2526654 C2

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 526 654** (13) **C2**

(51) Int. Cl.
C23C 14/48 (2006.01)
C23C 14/02 (2006.01)
C23C 14/58 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(21)(22) Application: **2012149878/02, 23.11.2012**

(24) Effective date for property rights:
23.11.2012

Priority:
(22) Date of filing: **23.11.2012**

(43) Application published: **27.05.2014** Bull. № **15**

(45) Date of publication: **27.08.2014** Bull. № **24**

Mail address:
634050, g. Tomsk, pr-kt Lenina, d. 30, FGBOU VPO NI TPU, otdel pravovoj okhrany rezultatov intellektualnoj deyatelnosti

(72) Inventor(s):
Stepanov Igor Borisovich (RU),
Ryabchikov Aleksandr Ilich (RU),
Sivin Denis Olegovich (RU)

(73) Proprietor(s):
Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego professinalnogo obrazovaniya "Natsionalnyj issledovatelskij Tomskij politekhnicheskij universitet" (RU)

(54) METHOD FOR PULSE-PERIODIC ION-BEAM CLEANING OF SURFACE OF ARTICLES MADE OF DIELECTRIC MATERIAL OR CONDUCTING MATERIAL WITH DIELECTRIC INCLUSIONS

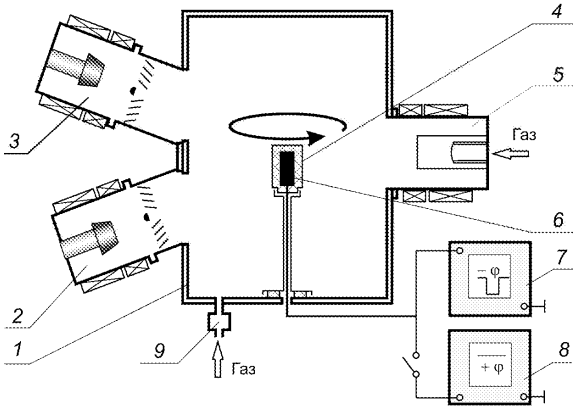
(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to ion-beam cleaning of the surface of articles made of dielectric material or conducting material with dielectric inclusions. The method comprises placing articles on a conducting holder, generating plasma with pulse-periodic acceleration of ions thereof by passing a plasma stream through an acceleration gap and successively irradiating the surface of the articles with a stream of accelerated ions and the plasma while applying high-frequency short-pulse bias potential on the conducting the conducting holder. The pulse duration is equal to 0.1-10 mcm, the pulse duty factor is equal to 50-99% and the amplitude of the potential is equal to 1-10 kV. Irradiation of the surface of the articles is carried out with pulse duration of the bias potential which is shorter than the charging time of the capacitor formed by the conducting holder and the emission plasma boundary, and with duration of the interval between pulses of the accelerating voltage which is shorter than the time taken by the plasma stream to pass through the acceleration gap.

EFFECT: high efficiency of short-pulse high-frequency ion-treatment of materials.

8 cl, 6 dwg, 2 ex



Фиг. 1

RU 2526654 C2

RU 2526654 C2

Изобретение относится к области ионно-плазменной модификации свойств материалов и может быть использовано для ионной очистки, изменения шероховатости, нагрева и активации поверхности диэлектрических материалов, проводящих материалов с диэлектрическим покрытием или диэлектрическими включениями.

Известен способ вакуумной ионно-плазменной обработки, при котором ионная очистка деталей производится в среде инертного газа с помощью источника газовой плазмы на основе дугового разряда с накаленным катодом в условиях изменения напряжения смещения на подложке от 0 до 1500 В. При этом перед ионной очисткой проводят электронный разогрев детали до температуры начала ионно-вакуумного упрочнения. Так как процесс ионной очистки начинается не при комнатной температуре, а при температуре последующего упрочнения, при которой уже произошла частичная десорбция газов и загрязнений с поверхности подложки, вероятность пробоев дугового промежутка снижается [Патент RU 2122602, C23C 14/48, 27.11.1998].

Известен также способ ионной обработки изделий, включающий погружение изделия в металлическую плазму, генерируемую в вакуумной камере с помощью электродуговых испарителей, и подачу на изделие отрицательного напряжения, превышающего критическую величину, при которой скорость распыления бомбардирующими поверхность ионами металла из окружающей изделие плазмы превышает скорость конденсации металла на его поверхности [Дороднов А.М., Петросов В.А. О физических принципах и типах вакуумных технологических плазменных устройств. Журнал технической физики, т.51, N 3, 1991, с.504-524].

Недостатками известных способов являются ограничения по уровню подаваемого на деталь потенциала или концентрации плазмы вследствие инициирования микродуговых разрядов на начальной стадии обработки, а также отсутствие возможности обработки диэлектрических материалов. Это приводит к снижению производительности процесса и качеству обработки вследствие высокой вероятности формирования микродефектов на поверхности изделия.

Известен способ очистки ионами аргона поверхности лопаток компрессора газотурбинных двигателей, погруженных в газоразрядную плазму, при подачи на лопатки отрицательного потенциала смещения длительностью до 5 мкс с коэффициентом заполнения импульсов 0,5-0,6 при амплитуде потенциала смещения до 2-4 кВ и давлении в рабочем объеме 1-2 Па [Патент RU 2430992, C23C 14/48, C23C 14/06, C23C 14/34, 29.10.2009].

Данный способ обработки обеспечивает высокую интенсивность ионной очистки проводящих материалов в условиях значительного снижения вероятности взрывоэмисионных явлений на поверхности изделий, но не предусматривает очистку диэлектрических материалов.

Этот недостаток отсутствует в способе комплексной обработки изделий преимущественно из диэлектрических материалов, включающем обработку изделий в газовой плазме несамостоятельного разряда, инициируемого электронами, сепарируемыми из металлогазовой ступени плазмы вакуумно-дугового разряда, а также очистку, нагрев и последующее нанесение покрытия, отличающемся тем, что в процессе очистки и нагрева на изделие воздействуют пучком ускоренных частиц с энергией выше порога распыления материала подложки, генерируемых автономным источникам [Патент РФ 2039843, C23C 14/00, 03.03.1992].

Недостатками этого способа обработки являются ограничения по сорту используемой плазмы, необходимость наличия комплекса создания сложного технологического оборудования и ограничения по обработке деталей сложной геометрической формы

(малые радиусы закругления, полости, внутренние поверхности протяженных изделий и т.д.), что существенно затрудняет его применение в машиностроении.

Наиболее близким аналогом, взятым за прототип, является способ ионно-плазменной обработки погруженных в газовую или металлическую плазму материалов путем импульсно-периодического ускорения из нее ионов и поочередного облучения образцов из проводящих, полупроводящих или диэлектрических материалов ионами и плазмой с регулировкой соотношения доз облучения. Стадию ионной очистки и разогрева поверхности образца проводят ионами в короткоимпульсном режиме или в режиме совместного облучения двумя потоками ионов: длинноимпульсным и короткоимпульсным. Длинноимпульсный поток ионов формируют приложением к ускоряющему промежутку импульсно-периодического напряжения амплитудой 20-50 кВ. Короткоимпульсный поток ионов формируют приложением к держателю образца импульсного отрицательного потенциала смещения от источника с параметрами: длительность импульсов 0,1-10 мкс с заполнением импульсов, лежащих в пределах от среднего значения до верхней границы диапазона, а именно в пределах 50-99% при ускоряющем напряжении 1-10 кВ. Ускоряющее напряжение и заполнение импульсов выбирают в зависимости от материала и массы образцов. Данный способ обеспечивает возможность ионной очистки поверхности непроводящих образцов без риска вызвать их пробой за счет накопления заряда. Для этого в рабочую камеру вводится плазма от дополнительных источников. Поэтому на образце как во время действия импульсов смещения, так и во время облучения образца длинноимпульсной ионной составляющей будет присутствовать короткоимпульсная плазменная составляющая, обеспечивающая нейтрализацию заряда, накопленного на поверхности диэлектрического образца за время ионного облучения. Амплитуду импульсов напряжения, подаваемого на держатель образцов из диэлектрика, выбирают в зависимости от толщины диэлектрика и частоты следования импульсов таким образом, чтобы средняя энергия ионов, попадающих на образец с учетом энергии ионов в плазме, находилась в диапазоне 100-500 эВ. В альтернативном варианте режим ионной очистки может быть реализован за счет применения переменного, т.е. биполярного потенциала смещения. При этом образцы располагают на двух держателях, к выводам которых подключают высокочастотный 10^4-10^7 Гц источник переменного напряжения. Изменение режимов обработки на разных стадиях процесса осуществляют регулировкой амплитуды высокочастотного напряжения в диапазоне 10^2-10^4 В [Патент RU 2238999, C23C 14/48, 19.02.2003].

Способ-прототип имеет ряд ограничений. При обработке диэлектриков или проводящих материалов с диэлектрической пленкой или диэлектрическими включениями учитывается только соотношение ионной и плазменной составляющей на образец. При этом выбор длительности и частоты следования импульсов напряжения смещения не рассмотрен в зависимости от концентрации плазмы и скорости ее направленного движения. Также не учтена концентрация плазмы и в рассмотрении процесса нейтрализации накапливаемого в диэлектрике положительного заряда. Без учета этих параметров эффективность метода при реализации ионной очистки будет существенно снижается.

При плазменно-иммерсионном подходе к формированию ионного потока вблизи диэлектрика принципиально важным является решение вопроса о компенсации заряда на его поверхности. В условиях непрерывности плазменного потока, после отключения потенциала смещения, между заряженной ионами поверхностью диэлектрика и плазмой появляется электрическое поле, благодаря которому из плазмы извлекаются уже не ионы, а электроны. Ток и подвижность электронов существенно выше тока и

подвижности ионов, поэтому согласно известному способу-прототипу процесс компенсации заряда на поверхности диэлектрика будет происходить в течение нескольких наносекунд. Этот подход имеет ряд ограничений. Например, его применение сильно ограничивается в случае обработки изделий из проводящих материалов с диэлектрическими включениями. При низкой концентрации плазмы накопленный в диэлектрических включениях положительный заряд не будет компенсироваться, следовательно, возникает вероятность инициирования взрывоэмиссионных процессов, сопровождающихся кратерообразованием на поверхности образцов. Кроме того, нейтрализация накапливаемого заряда будет крайне неэффективна в случае тонких диэлектрических пленок.

Описанный в способе-прототипе подход к нейтрализации заряда с использованием биполярных потенциалов не учитывает соотношение плотности ионного и электронного токов. При этом электронный ток, многократно превышающий ионный, при равенстве амплитудного значения напряжения может приводить к интенсивному и неконтролируемому нагреву обрабатываемых изделий, что в большинстве технологий ионно-плазменной обработки недопустимо. Кроме того, описанная в прототипе возможность обработки изделий биполярными импульсами применима только для электрически разделенных группы держателей образцов. Этот подход ограничивает обработку одиночных изделий, в том числе крупногабаритных.

Таким образом, задачей изобретения является создание высокопроизводительного способа ионной очистки поверхности диэлектрических материалов и проводящих материалов с диэлектрическими покрытиями или включениями за счет оптимизации амплитудно-частотных характеристик импульсно-периодических потенциалов смещения.

Технический результат, достигаемый изобретением, заключается в повышении энергетической эффективности метода короткоимпульсной, высокочастотной ионной обработки за счет формирования ионного потока с энергией, приближающейся к амплитудному значению импульсного потенциала смещения.

Указанный технический результат достигается тем, что в способе импульсно-периодической ионной очистки поверхности изделий из диэлектрического материала или проводящего материала с диэлектрическими включениями, включающем их размещение на проводящем держателе, генерацию плазмы с импульсно-периодическим ускорением ее ионов путем прохождения плазменного потока через ускоряющий зазор и с обеспечением поочередного облучения поверхности изделий потоком ускоренных ионов и плазмой при подаче на проводящий держатель высокочастотных короткоимпульсных потенциалов смещения длительностью 0,1-10 мкс, с коэффициентом заполнения импульсов 50-99% и амплитудой потенциала 1-10 кВ, облучение поверхности изделий ведут при длительности импульса потенциала смещения, которая меньше времени зарядки емкости конденсатора, образованного проводящим держателем и эмиссионной границей плазмы, и при длительности паузы между импульсами ускоряющего напряжения, которая меньше времени прохождения плазменного потока через ускоряющий зазор.

Целесообразно поочередное облучение поверхности изделия потоком ускоренных ионов и плазмой осуществлять при следующем условии:

$(T-\tau_И)/\tau_И \ll Q$,

где $\tau_И$ - длительность импульсов потенциала смещения, мкс;

T - период их повторения, мкс;

Q - коэффициент ионного распыления материала.

Целесообразно плазму генерировать посредством непрерывного вакуумно-дугового

разряда.

Целесообразно плазму генерировать с использованием катода.

Целесообразно плазму генерировать с использованием дополнительных источников газовой и/или металлической плазмы.

Целесообразно генерировать плазму тлеющего разряда, инициируемого подаваемыми на изделие высокочастотными, короткоимпульсными потенциалами смещения.

Целесообразно в паузах между импульсами потенциала смещения осуществлять нейтрализацию положительного заряда с помощью потока электронов, формируемого при подаче на изделие постоянного положительного потенциала смещения амплитудой 30-100 В.

Целесообразно амплитуду потенциала смещения изменять с обеспечением дополнительного нагрева изделия и поддержания температурного режима очистки поверхности.

Изобретение иллюстрируется графическими материалами. На фиг.1 показана принципиальная схема примера выполнения установки для реализации способа: 1 - рабочая камера, 2 - вакуумно-дуговой генератор металлической плазмы с плазменным фильтром и катодом из титана; 3 - вакуумно-дуговой генератор металлической плазмы с плазменным фильтром и катодом из различных химических элементов; 4 - обрабатываемый образец; 5 - генератор газовой плазмы; 6 - проводящий держатель; 7 - высокочастотный короткоимпульсный источник напряжения смещения; 8 - источник постоянного напряжения смещения; 9 - газовый натекатель.

На фиг.2 приведена схема формирования потока ускоренных ионов из плазмы на мишень: $U_{см}$ - амплитуда потенциала смещения, $\tau_и$ - длительность импульса потенциала смещения, T - период импульса потенциала смещения, $\tau_{пл}$ - время воздействия плазмы на мишень между импульсами смещения.

На фиг.3 показаны осциллограммы импульсов потенциала на поверхности мишени из стекла для различной концентрации плазмы ($п_{пл}$): 10-4·10^{15} ион/$м^{-3}$, 11-10^{15} ион/$м^{-3}$, 12 - холостой ход. Развертка 2 мкс/дел, 400 В/дел.

На фиг.4. показан фрагмент осциллограммы тока с коллектора для ионов с зарядовым состоянием Ti^{+2} для ускоряющего напряжения $U_{уск}$=-1,5 кВ при $п_{пл}$=10^{15} ион/$м^3$.

На фиг.5 приведен энергетический спектр ионов Ti^{+2} при различной длительности импульсов напряжения смещения амплитудой $U_{уск}$=-1,5 кВ при $п_{пл}$=10^{15} ион/$м^3$.

На фиг.6 представлена схема формирования потока ускоренных ионов из плазмы на мишень в условиях дополнительной подачи на мишень постоянного положительного потенциала смещения.

Согласно заявленному способу изделия помещают в вакуумную камеру, оснащенную источником плазмы. Для эффективной реализации режима ионного распыления источник вакуумно-дугового плазмы оснащается фильтром для очистки от микрокапельной фракции. В частности, можно использовать фильтры, конструкция которых описана в патентах RU 2097868, RU 2108636 или RU 2107968. Изделия из диэлектрических материалов размещают на проводящем держателе, полностью экранированном от попадания плазмы и ускоренных ионов (фиг.1). Камеру откачивают до рабочего вакуума (не менее 6,57·10^{-3} Па). Как и в прототипе, производят генерацию плазмы, импульсно-периодически ускоряют ионы из этой плазмы и поочередно облучают образцы ионами и плазмой с регулировкой соотношения доз облучения ускоренными ионами и плазмой.

Короткоимпульсные ионные потоки согласно изобретению формируют из плазмы дугового или тлеющего разряда путем приложения к держателю образца импульсов напряжения отрицательной полярности (фиг.2).

На стадии ионной очистки поверхности диэлектрического образца амплитуду импульсного потенциала смещения для планарной геометрии выбирают исходя из выражения:

$$U = U_{см} - \frac{d}{\varepsilon\varepsilon_0 S}\int_0^t (I_{см} + I_i + I_{вэ})\,dt ,$$

где $U_{см}$ - амплитуда потенциала смещения на проводящем электроде, В;

d - толщина диэлектрика, м;

ε - диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

ε_0 - диэлектрическая постоянная;

S - площадь диэлектрического образца, $м^2$;

$I_{см}$ - ток смещения электронов, А;

I_i - ток ускоренных ионов, А;

$I_{вэ}$ - ток вторичных электронов, А,

t - время, с.

При этом вблизи образца формируется слой разделения зарядов, являющийся ускоряющим зазором для ионов плазмы. Ионная очистка производится при подаче на образцы отрицательного потенциала смещения с коэффициентом заполнения импульсов 0,5-0,99, с амплитудой, обеспечивающей формирования ионного потока с энергией 0,5-5 кэВ.

При обработке ионным потоком диэлектрика формируется система типа конденсатора, обкладками которого являются с одной стороны потенциальный проводящий электрод, а с другой стороны - плазма. При высокой плотности плазмы процесс зарядки емкости завершится достаточно быстро. Поэтому использование импульсов потенциала смещения длительностью, превышающей время зарядки диэлектрической поверхности, считают не целесообразным. Например, при обработке образца из стекла толщиной 5 мм потоком ионов из плазмы с концентрацией 10^{15} ион/$м^{-3}$, сформированным приложением к держателю мишени потенциала 1,5 кВ, время зарядки составляет порядка 1 мкс (фиг.3).

Таким образом, для случая использования диэлектрической мишени принципиально важным является выбор концентрации плазмы, длительности импульса потенциала смещения в зависимости от характеристик диэлектрической мишени (диэлектрическая проницаемость, толщина диэлектрика), в том числе с учетом динамики изменения ускоряющего напряжения вблизи поверхности диэлектрика. Оптимизация совокупности данных параметров должна обеспечить условия, при которых за время действия импульса потенциала смещения не произойдет существенного уменьшения потенциала на поверхности диэлектрика.

На фиг.4 приведена динамика изменения импульсов тока ионов Ti на выходе плазменно-иммерсионного времяпролетного спектрометра при длительностях импульса

потенциала смещения 0,1-1,1 мкс для плазмы с концентрацией 10^{14} ион/м^3. При малой длительности импульса ионы, проходя ускоряющий зазор, приобретают энергию меньшую, чем произведение амплитуды ускоряющего напряжения и заряда иона. Увеличение длительности приводит к повышению амплитуды сигнала всех пиков и меньшему смещению максимума вправо. Это означает, что расширение зазора приближается к его стационарному состоянию, определяемому законом Чайльд-Ленгмюра. Данные по ионному току, соответствующие длительности импульса 400 и 450 нс, свидетельствуют о том, что формирование зазора практически закончено и положение максимума пика почти не меняется. Ионы, пересекающие ускоряющий зазор после стабилизации эмиссионной границы, ускоряются в установившемся электрическом поле и приобретают полную энергию, формируя пик, соответствующий приложенной к промежутку разности потенциалов. Следовательно, использовать импульсы напряжения смещения длительностью менее 400-450 нс для данной концентрации плазмы не целесообразно, так как ионы не будут приобретать полной энергии.

Анализ энергетического спектра ионов (фиг.5), извлекаемых из плазмы вакуумно-дугового разряда, свидетельствует о том, что на поверхность воздействуют частицы в широком диапазоне изменения энергии. Это обусловлено физическими процессами формирования слоя разделения зарядов, а также наличием в плазменном потоке многозарядных ионов. При реализации режима очистки образцов короткими импульсами эта особенность формирования ионного потока имеет, в большинстве случаев, отрицательное значение, приводящее к снижению эффективности заявляемого способа. При малых энергиях процесс ионного распыления будет сопровождаться осаждением покрытия из плазмы. А при высоких потенциалах, с учетом многозарядности ионов в дуговой плазме, конкурирующим процессом станет внедрение ионов в поверхностный слой.

Расширение энергетического спектра ионов, обусловленное наличием многозарядных ионов, может быть компенсировано использованием, например, газоразрядной плазмы, где зарядовое состояние ионов, как правило, составляет 1^+. Разброс ионов по энергиям может быть уменьшен и при условии, что длительность паузы между импульсами ускоряющего напряжения ($\tau_п$) будет много меньше времени прохождения плазменного потока через ускоряющий зазор шириной ($d_з$):$\tau_п \ll d_з/\upsilon_{пл}$, где $\upsilon_{пл}$ - скорость распространения плазменного потока. При выполнении этого условия эмиссионная граница плазмы незначительно изменит свое положение между импульсами напряжения смещения.

Следовательно, при последующем импульсе процесс ускорения ионов начнется практически с положения, соответствующего установившемуся значению в соответствии с законом Чайльд-Ленгмюра, а энергия извлекаемых из плазмы ионов будет приближаться к энергии ионов, прошедших максимальную разность потенциалов. Сущность изобретения поясняется на примерах.

Пример 1. Рассмотрим случай формирования ионного потока вблизи поверхности стеклянного образца толщиной 5 мм ионами Al. Характерная скорость распространения плазмы, сформированной в вакуумно-дуговом источнике - $2\cdot10^4$ м/с. В соответствии с законом Чайльд-Ленгмюра при концентрации плазмы 10^{15} ион/м^3 и потенциале смещения 2,5 кВ, ширина ускоряющего промежутка в планарной геометрии составит $1\cdot10^{-2}$ м. Следовательно, в отсутствие импульса ускоряющего напряжения плазма достигнет поверхности через 0,5 мкс. В соответствие с предложенным подходом выберем $\tau_п$=0,1

мкс. При длительности импульсов 1 мкс и коэффициенте их заполнения 0,91 частота следования импульсов составит 910 кГц.

Пример 2. Рассмотрим случай обработки идентичного с предыдущим примером, стеклянного образца ионами Ar, генерируемыми в тлеющем разряде. При концентрации плазмы 10^{15} ион/м^3 и ускоряющем напряжении 2,5 кВ эмиссионная граница плазмы сформируется на расстоянии $0{,}73\cdot10^{-2}$ м от потенциальной поверхности. После окончания импульса напряжения смещения при средней скорости распространения $3{,}6\cdot10^3$ м/с плазма достигнет поверхности через 2 мкс. Приемлемое значение паузы между импульсами порядка 0,4 мкс. При длительности импульсов 1 мкс и коэффициенте заполнения 0,7 частота их следования составит 700 кГц. Высокая частота следования импульсов, в совокупности с большим коэффициентом заполнения импульсов, значительно повышают производительность предлагаемого способа.

Для случая металлической плазмы уменьшение паузы между импульсами будет также препятствовать формированию пленки на поверхности образцов, что значительно повышает эффективность метода. При выбранной длительности частота следования импульсов потенциала смещения фактически определяет соотношение потока ускоренных ионов на мишень и потока ионов из плазмы в отсутствие ускоряющего напряжения. Исходя из предположения, что соотношение между потоком ускоренных ионов и потоком ионов из плазмы будет определяться длительностью импульсов ($\tau_и$) и периодом их повторения (T), а время перемещения плазменной границы будет незначительно по сравнению с длительностью импульса, условие выполнения режима ионного распыления можно качественно описать выражением: $(T-\tau_и)/\tau_и<<Q$, где Q - коэффициент ионного распыления материала. Использование импульса потенциала смещения микросекундной длительности и паузы наносекундного диапазона позволяет увеличить коэффициент заполнения импульсов практически до единицы.

Для увеличения производительности ионной очистки поверхности образцов могут быть использованы дополнительные источники металлической или газовой плазмы, включая магнетронные распылительные системы и др. При этом плазма дополнительных источников может как совпадать, так и отличаться по составу от плазмы основного источника. Дополнительные источники плазмы увеличивают концентрацию плазмы, а соответственно и интенсивность короткоимпульсного ионного потока, формируемого у образца.

Расширить технологические возможности заявленного способа путем обеспечения эффективной компенсации, накапливаемого в диэлектрике или диэлектрических включениях на проводящем образце положительного заряда, можно при подаче на образцы постоянного потенциала смещения, положительного по отношению к плазме (фиг.6). Этот подход может быть эффективно реализован при потенциалах постоянного смещения 30-100 В, что заведомо превышает энергию электронов как в газоразрядной, так и металлической плазме дугового разряда. Энергетические потери ионов при этом могут быть скомпенсированы увеличением амплитуды отрицательных импульсов смещения. При этом изменение амплитудного значения постоянного отрицательного смещения предоставляет возможность управлять температурой образца, облучая его поверхность в паузах между импульсами потоком электронов. В отличие от описанного в прототипе способе использования биполярных потенциалов смещения предлагаемый подход позволяет обрабатывать не только электрически разделенные группы, но и одиночные образцы, в том числе крупногабаритные.

Таким образом, предлагаемый способ выгодно отличается от известных.

Во-первых, он обеспечивает возможность оптимизировать режимы ионной очистки, нагрева и активации поверхности различных материалов: металлов, диэлектриков и полупроводников, без использования дорогостоящих ионных источников. Во-вторых, появляется возможность эффективной нейтрализации накапливаемого на поверхности диэлектрика или диэлектрических включений положительного заряда даже в условиях стабилизации эмиссионной границы плазмы с возможностью поддержания необходимого температурного режима.

Формула изобретения

1. Способ импульсно-периодической ионной очистки поверхности изделий из диэлектрического материала или проводящего материала с диэлектрическими включениями, включающий их размещение на проводящем держателе, генерацию плазмы с импульсно-периодическим ускорением ее ионов путем прохождения плазменного потока через ускоряющий зазор и с обеспечением поочередного облучения поверхности изделий потоком ускоренных ионов и плазмой при подаче на проводящий держатель высокочастотных короткоимпульсных потенциалов смещения длительностью 0,1-10 мкс с коэффициентом заполнения импульсов 50-99% и амплитудой потенциала 1-10 кВ, при этом облучение поверхности изделий ведут при длительности импульса потенциала смещения, которая меньше времени зарядки емкости конденсатора, образованного проводящим держателем и эмиссионной границей плазмы, и при длительности паузы между импульсами ускоряющего напряжения, которая меньше времени прохождения плазменного потока через ускоряющий зазор.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что поочередное облучение поверхности изделия потоком ускоренных ионов и плазмой осуществляют при следующем условии:

$(T-\tau_и)/\tau_и<Q$,

где $\tau_и$ - длительность импульсов потенциала смещения, мкс;

T - период повторения импульсов потенциала смещения, мкс;

Q - коэффициент ионного распыления материала.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что плазму генерируют посредством непрерывного вакуумно-дугового разряда.

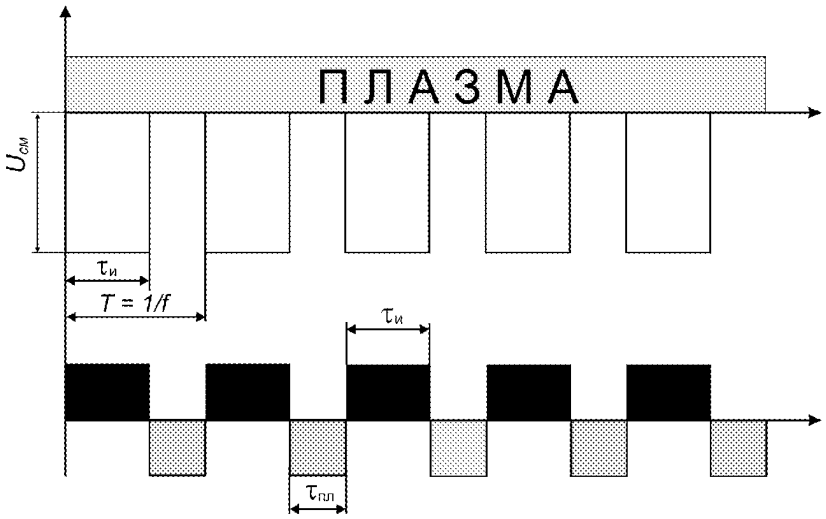
4. Способ по любому из пп.1-3, отличающийся тем, что плазму генерируют с использованием катода.

5. Способ по п.1, отличающийся тем, что плазму генерируют с использованием дополнительных источников газовой и/или металлической плазмы.

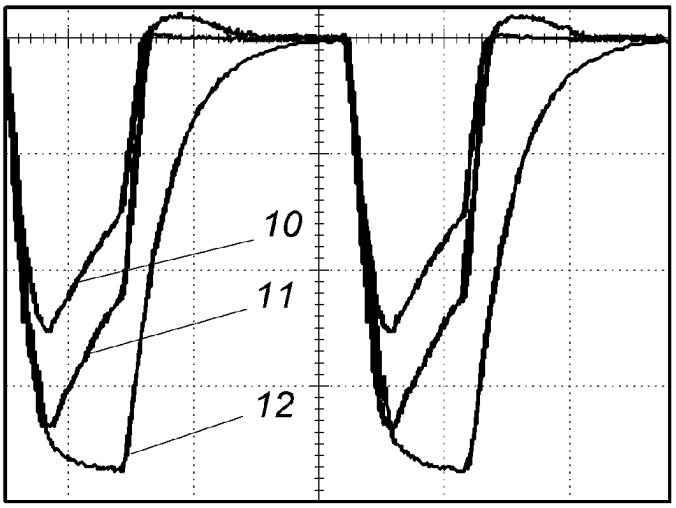
6. Способ по п.1, отличающийся тем, что генерируют плазму тлеющего разряда, инициируемого подаваемыми на изделие высокочастотными, короткоимпульсными потенциалами смещения.

7. Способ по п.1, отличающийся тем, что в паузах между импульсами потенциала смещения осуществляют нейтрализацию положительного заряда с помощью потока электронов, формируемого при подаче на изделие постоянного положительного потенциала смещения амплитудой 30-100 В.

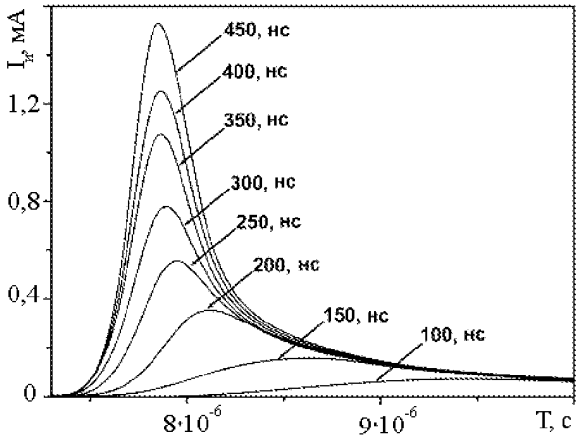
8. Способ по п.7, отличающийся тем, что амплитуду потенциала смещения изменяют с обеспечением дополнительного нагрева изделия и поддержания температурного режима очистки поверхности.



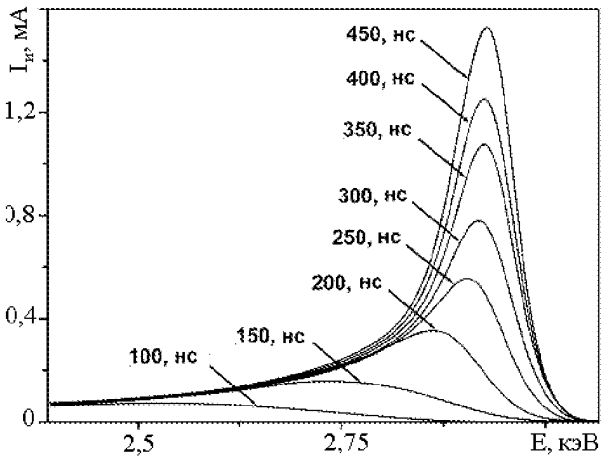
Фиг. 2



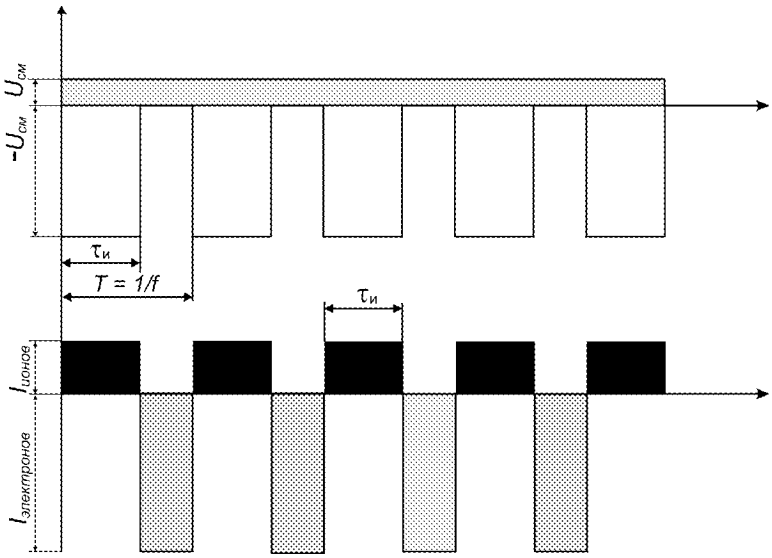
Фиг. 3



Фиг. 4


$I_и$, мА
1,2
0,8
0,4
0
2,5
2,75
E, кэВ
450, нс
400, нс
350, нс
300, нс
250, нс
200, нс
150, нс
100, нс

Фиг. 5


$U_{см}$
$-U_{см}$
$\tau_и$
$T = 1/f$
$\tau_и$
$I_{ионов}$
$I_{электронов}$

Фиг. 6