

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ВЧ ГЕНЕРАТОРА С УДАРНЫМ КОНТУРОМ В МЕТОДЕ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ

О.М. Швец¹, В.М. Береснев², П.В. Турбин⁴, В.В. Грудницкий²,
У.С. Немченко², Д.А. Колесников³

¹Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”,
Украина

²Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина,
Украина

³Белгородский государственный университет
Российская Федерация

⁴Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины (Харьков)
Украина

Поступила в редакцию 18.03.2011

Рассматривается импульсный высокочастотный генератор, применяемый с целью стимуляции осаждения и повышения качества покрытий, формируемых методом вакуумно-дугового осаждения. Принцип работы ВЧ генератора основан на возбуждении затухающих автоколебаний в цепи резонансного контура после пробоя разрядника. Изучены частотные характеристики генератора и рассмотрены варианты аппаратной реализации устройства с оптимальными параметрами.

Ключевые слова: импульсный ВЧ генератор, метод вакуумно-дугового осаждения, наноструктурированные покрытия.

Розглядається імпульсний високочастотний генератор, що застосовується з метою стимуляції осадження і підвищення якості покриттів, які формуються методом вакуумно-дугового осадження. Принцип роботи ВЧ генератора заснований на збудженні загасаючих автоколивань у ланцюзі резонансного контуру після пробоя розрядника. Вивчено частотні характеристики генератора і розглянуті варіанти апаратної реалізації пристрою з оптимальними параметрами.

Ключові слова: імпульсний ВЧ генератор, метод вакуумно-дугового осадження, наноструктуровані покриття.

The high-frequency pulsed, applied with the purpose of stimulation of deposition and upgrading of the coverages formed by the method of the vacuum-arc deposition, is examined. Principle of work HF generator based on excitation of attenuation self-excited oscillations in the chain of resonant contour after the hasp of spark-gap. Frequency descriptions of generator are studied and the different variants of hardware representation of device are considered with optimal parameters.

Keywords: impulsive HF generator, method of vacuum-arc deposition, nanostructured coverages.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений развития нанотехнологий и получения новых материалов является создание сверхтвердых нанокомпозитных покрытий, выяснение закономерностей формирования их структурно-фазовых состояний, а также природа высоких физико-механических свойств синтезированных покрытий. В работе [1] проведен обзор свойств покрытий обладающих высокой твердостью и связь их физико-механических свойств со структурой и способами получения. В данной работе и в [2] проанализирована основная

концепция создания сверхтвердых покрытий, основанная на термодинамическом разделении фаз, приводящем к образованию стабильной наноструктуры.

В настоящее время наиболее перспективными методами получения таких покрытий являются вакуумные ионно-плазменные методы [3, 4]. Это обусловлено их экологической безопасностью, высокой чистотой технологических процессов и качеством продукции. Также известно, что в ионизованном или возбужденном состоянии атомы и молекулы легче взаимодействуют друг с другом, делая

процесс нанесения покрытий более эффективным. Ионный пучок инициирует конденсацию плотных, сверхтвердых и износостойких покрытий на основе оксидов, нитридов, карбидов и других соединений с высокой адгезией на межфазных границах. Уникальной возможностью ионно-плазменных технологий получения покрытий является возможность осуществлять в одной установке предварительную ионную очистку, нанесение слоев и их бомбардировку ионами, что, по сути, является примером комбинированного синтеза материала посредством ионов и плазмы. Существует ряд широко распространенных технологий модификации структуры покрытий. Одной из таких технологий является бомбардировка поверхности покрытий высокоэнергетическими ионами в процессе формирования покрытий. При этом происходит приобретение покрытием аморфных свойств, измельчение зерна, образование новых химических соединений и квазипериодических структур, деформационное упрочнение и т.п. [5, 6]. Однако ионная бомбардировка может привести к нагреву материала системы покрытие-подложка. В связи с этим, в последнее время интенсивно разрабатываются импульсные ВЧ источники питания, позволяющие в процессе осаждения импульсно ионами воздействовать на структуру формируемых покрытий, и таким образом осуществлять ионное ассистирование [7]. Однако, в научной литературе работы, посвященные исследованию таких устройств, представлены недостаточно.

В представляемой работе исследуются импульсные режим работы ВЧ генератора на основе ударного контура применительно к методу вакуумно-дугового осаждения.

ВЧ ГЕНЕРАТОРЫ В МЕТОДЕ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО САЖДЕНИЯ

Известно, что при подаче отрицательного потенциала смещения на обрабатываемые ионно-плазменным потоком изделия, обеспечивается доускорение ионов плазмы вакуумно-дугового разряда. Однако при увеличении энергии формирующих покрытие ионов, возрастает интенсивность распыления материала, что приводит к снижению скорости нане-

сения покрытий. Поскольку управлять степенью ионизации потока материала мишени в вакуумно-дуговом разряде не представляется возможным, соответственно нельзя изменить скорость распыления покрытия при фиксированной энергии ионов.

В качестве дополнительного параметра управления потоком ионизированной компоненты на обрабатываемую поверхность может быть использована подача импульсного потенциала смещения на обрабатываемые изделия. Благодаря этому в зависимости от скважности импульсов можно варьировать средний по времени поток ускоренной компоненты ионов на поверхность роста покрытия. Следует отметить, что данным методом можно только снизить ускоренный поток ионов, но нельзя его увеличить. В присутствии ВЧ напряжения или импульсов с частотой повторения свыше 1 КГц ионы ускоряются средним по времени постоянным потенциалом ВЧ слоя. Однако поток ускоренных ионов можно снизить, по аналогии с методом импульсной подачи постоянного смещения на поверхность синтеза покрытия. Для этого достаточно применить импульсное ВЧ напряжение. В течение импульса ионы ускоряются на поверхность роста покрытия до необходимых энергий. В паузах, при отсутствии ВЧ напряжения, ионы ускоряются на поверхность синтеза покрытия за счет перепада напряжения в приэлектродном ВЧ слое порядка разности между потенциалом плазмы и плавающим потенциалом.

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНОГО ВЧ ГЕНЕРАТОРА В ПРОЦЕССЕ СТИМУЛЯЦИИ ОСАЖДЕНИЯ

Выбор частотных характеристик генератора должен производиться для каждой конкретной технологической задачи.

В процессе роста пленки возможна реализация двух предельных случаев: а) период повторения импульсов много меньше времени роста атомного монослоя пленки и б) период повторения импульсов много больше времени роста монослоя покрытия. В первом случае импульсная бомбардировка эквивалентна соответствующему постоянному потоку ионов. Во втором случае воздействие им-

пульсного потока ионов на поверхность приводит к неоднородной многослойной структуре покрытия, что также имеет большое значение, особенно в нанотехнологиях.

Таким образом, одним из характерных параметров при выборе частотных характеристик ВЧ генератора может служить время роста монослоя покрытия:

$$T_{\text{сл}} = \frac{h_{\text{сл}}}{V_{\text{пл}}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{сл}}$ – время роста монослоя покрытия; $h_{\text{сл}}$ – характерная толщина монослоя покрытия (соответственно – период кристаллической решетки); $V_{\text{пл}}$ – скорость нанесения покрытия.

Как следует из выражения (1), при скорости нанесения покрытия 0,5 мкм в минуту и толщине монослоя в 0,5 нм период роста монослоя покрытия составляет 1 мсек, что соответствует частоте повторения импульсов 1 кГц.

Тактовая частота генератора играет принципиальную роль в процессе формирования энергетического спектра ионов, ускоряемых в ВЧ слое [8]. Так, если время пролета ионов через ВЧ слой много больше периода ВЧ поля, ионы ускоряются средним по времени электрическим полем и имеют моноэнергетическую дельтаобразную функцию распределения ионов по энергии. В этом случае энергия ионов примерно равна амплитуде приложенного ВЧ потенциала в слое. Если время пролета ионов через ВЧ слой порядка периода ВЧ поля, то спектр ионов становится платообразным, с двумя пиками распределения в области минимальной и максимальной энергии спектра (в области верхней и нижней границы плато). Если время пролета ионов через ВЧ слой много меньше периода поля, то ионы ускоряются переменным ВЧ полем и их энергия приближенно равна мгновенному значению ВЧ напряжения в слое.

В соответствии с выше изложенным для тактовой частоты ВЧ генератора можно ввести характерное значение частоты, относительно которой определяются условия формирования энергетического спектра ионов. В качестве такого характерного значения частоты была выбрана частота ВЧ генератора, для которой время пролета ионов через ВЧ приэлектродный слой примерно равно периоду ВЧ поля:

$$f_{\text{гр}} = \frac{\bar{V}_i}{h_{\text{сл}}}, \quad (2)$$

$$\bar{V}_i = \sqrt{\frac{e_0 U_{\text{сл}}}{M_i}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{гр}}$ – характерная частота ВЧ поля; \bar{V}_i – средняя скорость ионов в слое; $h_{\text{сл}}$ – толщина слоя (определяется из выражений 2 и 3)); $U_{\text{сл}}$ – амплитуда ВЧ напряжения в слое; M_i – масса иона; e_0 – элементарный заряд.

Оценка граничной частоты для ионов азота, сделанная для случая ВЧ слоя при $U_{\text{сл}} = 1000$ В, плотности тока 1 мА/см², дает величину порядка 12,5 МГц.

При росте покрытия абсолютная величина длительности ВЧ импульса имеет значение только в случае синтеза многослойных покрытий, когда период повторения импульсов превышает $T_{\text{сл}}$. Для однослойных покрытий длительность ВЧ импульсов особой роли не играет. Большой интерес представляет среднее значение потока ионов, ускоренных на поверхность покрытия. В конечном счете, средний ионный ток на поверхность синтеза определяется средней по времени ВЧ мощностью, а не пиковой ВЧ мощностью в импульсе.

Учитывая факт, что с увеличением мгновенной мощности ВЧ напряжения растет электронная температура, которая увеличивает эффективность запираания микрочастиц в слое и энерговыделение на поверхности частицы, определенный интерес представляют режимы ВЧ генератора с максимальной импульсной мощностью.

Стандартные ВЧ генераторы, рассчитанные на стационарную работу, позволяют использовать их в качестве импульсных генераторов, но с одним замечанием: ВЧ мощность в импульсе не может сильно отличаться от предельно допустимой мощности в стационарном режиме. Другими словами, увеличение скважности импульсов приводит к существенному снижению максимально возможной средней ВЧ мощности, вкладываемой в разряд.

Основное назначение генераторов с ударным контуром – это создание однократного импульса большой мощности чаще всего на

низкоимпедансную нагрузку, т.е., другими словами, работа в режиме “короткого замыкания”. Достоинствами данного типа генераторов является то, что работа подобных генераторов слабо зависит от изменения импеданса нагрузки, что имеет принципиальное значение для работы в импульсном режиме на плазменной нагрузке.

Однако использование подобного типа генераторов также требует серьезной адаптации электрической схемы для работы на нагрузку в виде ВЧ разряда.

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ УДАРНОГО ВЧ ГЕНЕРАТОРА

Известно, что ВЧ генераторы, содержащие индуктивность L и емкость C имеют резонансную частоту

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L-C}}. \quad (4)$$

При этом более точная резонансная частота определяется выражением

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - R_1^2}{L/C - R_2^2}}, \quad (5)$$

где R_1, R_2 – сопротивления в цепи индуктивности и емкости, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота или

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \quad (6)$$

На рис. 1 изображена схема высокочастотного контура, являющегося принципиальной составляющей ударного ВЧ генератора.

Если заряженный конденсатор включить на индуктивность, возникнет колебательный процесс – переход электрической энергии конденсатора

$$w_c = \frac{CU^2}{2} \quad (7)$$

в магнитную энергию индуктивности

$$w_l = \frac{LI^2}{2}. \quad (8)$$

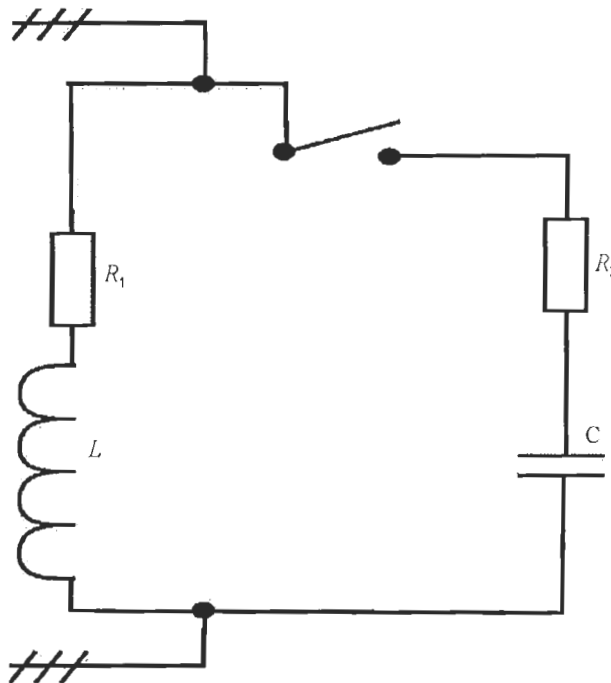


Рис. 1. Высокочастотный контур импульсного ВЧ генератора.

При наличии потерь в контуре колебания затухают (рис. 2). Время затухания определяется добротностью

$$Q_0 = \frac{\dot{\omega}_{рез}}{R/L} = \frac{\omega_p}{\Delta\Omega} = \frac{\rho}{R} = \frac{\omega L}{R}, \quad (9)$$

где R – последовательно включенное сопротивление, эквивалентное параллельное сопротивление выражается формулой

$$R = \frac{\rho^2}{r}. \quad (10)$$

Ключом (коммутатором) может быть полупроводниковый прибор, тиристор и т. п.

Однако при работе с большим напряжением и большой емкостью (большим током) простым и надежным коммутатором может служить специальный разрядник.

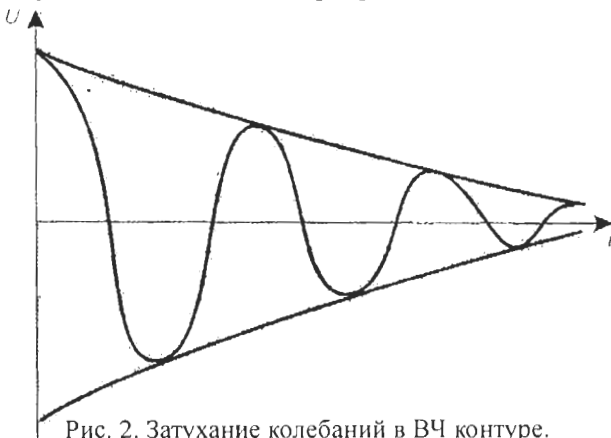


Рис. 2. Затухание колебаний в ВЧ контуре.

Искровое сопротивление разрядника по Теплеру определяется формулой

$$R_F = \frac{k l_{[см]}}{Q_{[кул]}} \quad (11)$$

где $k = 0,8 \cdot 10^{-3}$ для воздуха, $l_{[см]}$ – пробойный промежуток, $Q_{[кул]} = C_{[Ф]} \cdot U_{[В]}$ – [А·сек] = кулон. Используя зависимость напряжения пробоя U от зазора $lU/l \approx \text{tg}\alpha$, формулу Теплера можно упростить

$$R_F = 2,5 \cdot 10^{-8} \frac{1}{C} \quad (12)$$

Для периодического (колебательного) разряда также необходимо, чтобы

$$\rho = \omega L = \frac{1}{\omega C} > R_H \quad (13)$$

(для аperiodического разряда $\rho < R_H$), где R_H – внесенное в контур сопротивление нагрузки и R_F . Тогда, при внесенном сопротивлении только разрядника R_F имеем

$$Q_0 = \frac{\rho}{R_F} = \frac{1/\omega_0 C}{2,5 \cdot 10^{-8}/C} = \frac{4 \cdot 10^7}{\omega_0} \quad (14)$$

т. е. зависимость наблюдается только от частоты ω_0 .

Рассматривая аperiodический режим при $Q_0 \leq 0,5$, т. е. $\omega_0 \leq 8 \cdot 10^7$, имеем максимальную частоту колебаний

$$f_{0\max} = \frac{8 \cdot 10^7}{2\pi} = 12,7 \cdot 10^6 \text{ Гц.} \quad (15)$$

Чтобы контур “звенел” с добротностью Q_0 необходимо работать на частоте

$$f = \frac{4 \cdot 10^7}{2\pi \cdot Q_0} = \frac{6,4 \cdot 10^6}{Q_0} \quad (16)$$

при этом Q_0 определяет число колебаний

“звона” – $N \approx Q_0 \ln \frac{A_0}{A_n}$ (при спаде амплитуды в l раз $N = Q_0$).

Коммутатор – разрядник с хорошими параметрами, обеспечивающими коммутацию и регулировку больших напряжений и токов, стабильность срабатывания – был разработан, изготовлен и опробован. Схема разрядника представлена на рис. 3.

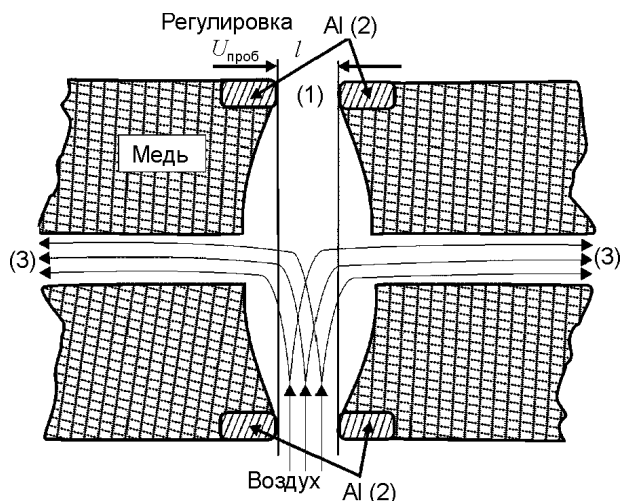


Рис. 3. Разрядник: (1) – зона регулировки напряжения разряда; (2) – кольца из Al, предназначенные для стабилизации “старта”; (3) – отверстия для продувки воздуха, использующиеся при работе с большими мощностями.

Разряд начинается на алюминиевых кольцах и перемещается (пингируясь) на медные электроды с хорошей теплопроводностью. Импульсные (“звонящие”) ВЧ генераторы могут работать как на повышение, так и на понижение выходного напряжения (см. рис. 4а, б).

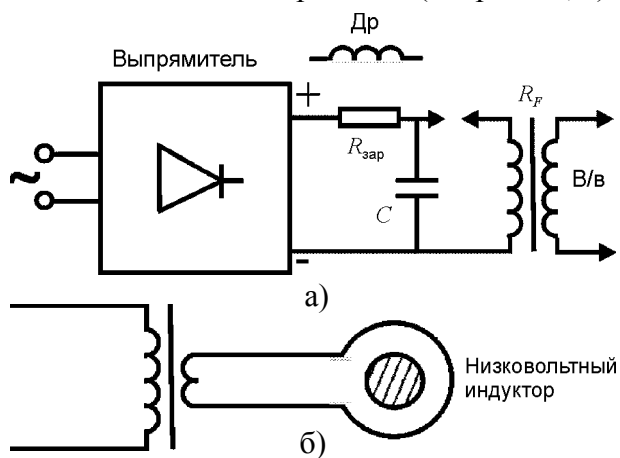


Рис. 4. Импульсный высокочастотный генератор: а) – работа на повышение; б) – работа на понижение.

Генератор может работать без выпрямителя – от напряжения с частотой $f = 50 \div 100$ Гц

$$\text{(рис. 5), частота повторения – } f = \frac{1}{\sqrt{L_{др} C_1}} \cdot$$

Частота повторения может быть высокой, вплоть до $F \sim 100$ кГц, ее необходимо согласовать с f_0 и длительностью “звона”. Изго-

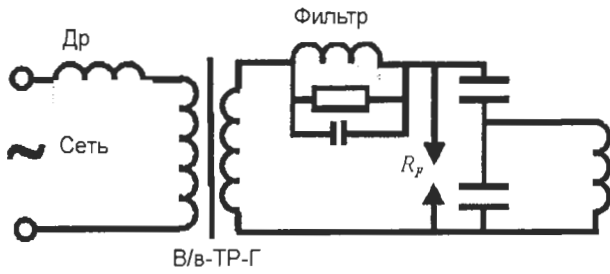


Рис. 5. Импульсный высоковольтный генератор без выпрямителя: Др – зарядный дроссель.

товлен и испытан ВЧ генератор (рис. 6) на

$$f_0 = 300 \text{ кГц}; R = \frac{1}{2\pi f C} = 10 \text{ ом}; C = 50 \text{ т-пФ};$$

$L = 5 \text{ мкГ}; U_0 = 10 \text{ кВ}; t_{\text{имп}} = 30 \text{ мкс}$. Запасенная энергия конденсатором

$$w = \frac{CU^2}{2} = \frac{50 \cdot 10^3 \cdot 10^{-12} (10 \cdot 10^3)^2}{2} = 2,5 \text{ Дж.} \quad (17)$$

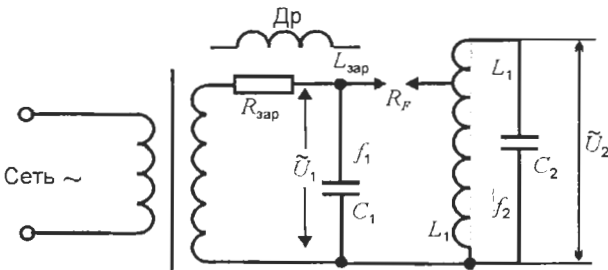


Рис. 6. Импульсный высокочастотный генератор с $f_0 = 300 \text{ кГц}$.

Импульсная мощность

$$\tilde{P}_{\text{имп}} = w \frac{1}{t_{\text{имп}}} = \frac{2,5}{30 \cdot 10^{-6}} = 83 \text{ кВт.} \quad (18)$$

При аperiodическом разряде

$$t_{\text{имп}} = \pi \sqrt{LC} = 1,5 \text{ мкс} \quad (19)$$

и
$$\tilde{P}_{\text{имп}} = \frac{2,5}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 1,6 \text{ МВт.} \quad (20)$$

При частоте повторения $F \leq 3,0 \text{ кГц}$ ($T_{\text{повтор}} \sim 330 \text{ мкс}$) средняя мощность составляла $\bar{P} = w \cdot F = 2,5 \cdot 3,0 \cdot 10^3 = 7,5 \text{ кВт}$. Ток в

разрядном контуре $I = \frac{U}{\rho} = \frac{10 \cdot 10^3}{10} = 10^3 \text{ А}$.

При этом $R_{\text{зар}} = \frac{1}{2FC}$ или при зарядке с помо-

щью $L_{\text{зар}}$, имеем $L_{\text{зар}} = \frac{1}{\pi^2 F^2 C}$.

Полоса частот, излучаемых “звонящим”

контуром $\Delta f = \frac{f_0}{Q_0}$ изображена на рис. 7.

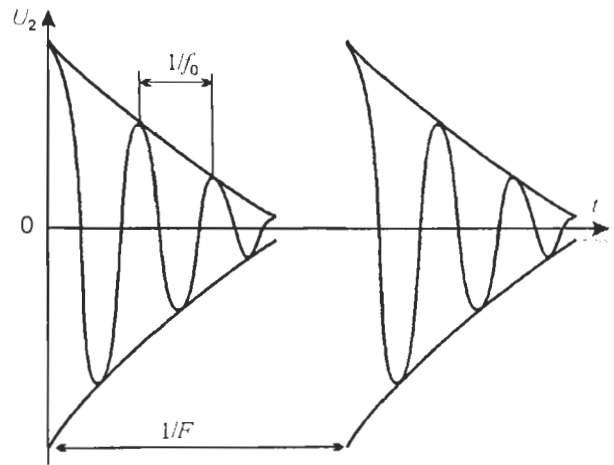


Рис. 7. Полоса частот, излучаемых контуром.

При этом необходимо учитывать, что при работе без выпрямителя частота повторения импульсов F зависит от амплитуды сетевого (В/в) напряжения (см. рис. 8).

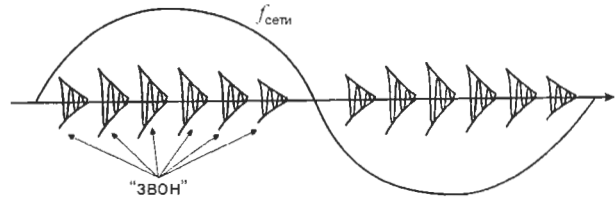


Рис. 8. Зависимость частоты повторения импульсного ВЧ генератора от сетевого напряжения.

При нагрузке ВЧ генератора на антенну, создающую плазму, возможны два варианта включения (рис. 9): 1) с открытым (присутствует омическая цепь антенна – земля) и 2) с закрытым входом – антенна отделена от “земли” конденсатором.

Заряженные частицы плазмы в электрическом ВЧ поле антенны \tilde{E} приобретают скорость

$$V_{\text{max}} = \frac{eE}{m\omega_0}, \quad (21)$$

где e – заряд частицы, m – масса частицы, $\omega_0 = 2\pi f_0$ – циклическая частота генератора. Пробег заряженных частиц в поле \tilde{E} при частоте ω_0 будет

$$Z_{\text{max}} = \frac{eE}{m\omega_0^2}. \quad (22)$$

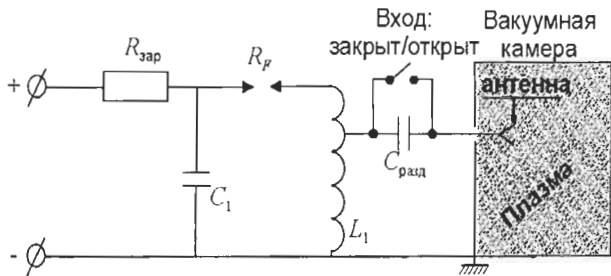


Рис. 9. Варианты включения ВЧ генератора.

При выборе \tilde{E} и f_0 такими, при которых пробег электрона будет несколько сантиметров, в то время как ионы, практически “неподвижны”, происходит детектирование ВЧ напряжения антенны плазмой. При закрытом входе антенна заряжается отрицательно, а при открытом входе электроны уходят из зоны проникновения поля антенны (без внешнего магнитного поля это зона

$$\Delta = \frac{c}{\omega_{pl}}, \quad (23)$$

где c – скорость света, ω_{pl} – ленгмюровская электронная частота, n – плотность плазмы (см. рис. 10)). Образуется положительная потенциальная яма, в которой ионы приобретают энергию направленного движения и бомбардируют или антенну (при закрытом входе) или внутреннюю поверхность вакуумной камеры (и все, что в нее помещено). Происходит эффективная чистка поверхностей антенны, камеры и прочее. Управлять энергией ионов (потенциальной ямы) можно отводя часть зарядов с антенны подключив сопротивление. При необходимости энергию ионов можно увеличить до сотен вольт и выше, при этом будет происходить распыление материалов.

Генераторы с ударным контуром рассчитаны на работу в режиме “короткого замыкания”, т.е. в режиме с низким выходным напряжением и большим выходным током. Однако для поддержания ВЧ разряда необходимо высокое напряжение, которое имеет тенденцию к возрастанию с увеличением поглощаемой ВЧ мощности в разряде. Принцип работы ВЧ генератора основан на возбуждении затухающих автоколебаний в цепи резонансного контура после пробоя разрядника. Расчет показал, что при разряде

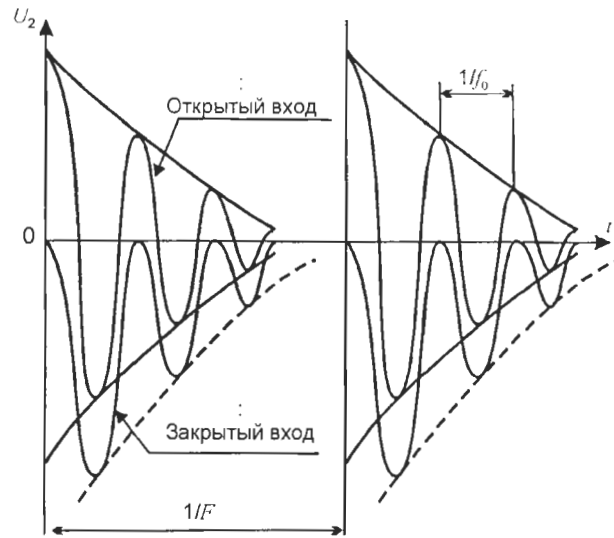


Рис. 10. Процесс зарядки антенны.

емкости $C = 60 \cdot 10^3$ пф сопротивление разрядника составляет $R_p = 0,4$ Ом. Недостатком является шум при работе, яркое свечение, при высоких напряжениях – мягкое рентгеновское излучение.

Оценка средней выходной ВЧ мощности генератора $P_{ср}$ и выходной мощности в импульсе $P_{имп}$ проводилась по формулам:

$$P_{имп} \approx \frac{C(U_2^2 - U_1^2)}{2 \cdot t_{имп}}; \quad (24)$$

$$P_{ср} \approx P_{имп} / \gamma, \quad (25)$$

где γ – скважность повторения импульсов; C – полная емкость резонансного контура; U_2 , U_1 – напряжения на емкости колебательного контура в момент срабатывания разрядника и в момент погасания ВЧ напряжения соответственно; $t_{имп}$ – длительность импульса.

Произведенная оценка $P_{имп}$ и $P_{ср}$ показала, что средняя мощность ВЧ генератора соизмерима с мощностью дуги в установках “Булат”, однако мощность в импульсе может достигать 60 кВт при длительности 10 мкс.

С целью оценить вклад ВЧ мощности в процесс осаждения покрытий ВЧ напряжение подавалось на подложку. Эксперименты проводились при рабочем давлении 1 Па, рабочий газ – азот. При подаче ВЧ напряжения от импульсного генератора с частотой 10 КГц на подложку через разделительную емкость в рабочей камере создавалась плазма, поддерживаемая средней ВЧ мощностью 12,5 кВт. Величина отрицательного автосмещения

потенциала на подложке, благодаря ВЧ ди-одному эффекту, составляла 2 кВ в начале импульса (после срабатывания разрядника) и снижалась до 300 В в конце импульса (перед срабатыванием разрядника).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований была разработана новая технологическая схема получения покрытий с использованием импульсного ВЧ генератора. Затухающие ВЧ колебания в течение одного импульса создают условия для очистки (бомбардировки) обрабатываемой поверхности энергетическими ионами в начале импульса, а затем и осаждения их на поверхность при соответствующей в течение импульса величине спадающего напряжения. Таким образом, в течение одного импульса автоматически появляются условия для нанесения покрытий, независимо от рабочих характеристик установки (парциального давления рабочего газа, режима работы источника плазмы и т. п.).

Работа частично выполнена по теме НИР, финансируемой Министерством образования и науки, молодежи и спорта Украины, государственный регистрационный № 0110U001257.

ЛИТЕРАТУРА

1. Veprek S., Maritz G.J., Veprek-Heijman M.G.J., Kavankova P, Prochazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites// Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 476. – P. 1-29.
2. Погребняк А.Д., Шпак А.П., Азаренков Н.А., Береснев В.М. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий //УФН. – Т. 179, № 1. – P. 35-64.
3. Андреев А.А., Саблев Л.П., Григорьев С.Н. Вакуумно-дуговые покрытия. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2010. – 317 с.
4. Берлин Е.В., Сайдман Л.А., Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. – М.: Техносфера, 2010. – 528 с.
5. Pilletier J., Anders A. Plasma-based ion implantation and deposition: A review of physics, technology and applications//IEEE Transactions on Plasma Science. – 2005. – Vol. 33, No. 6. – P. 1944-1959.

6. Perry A.J., Treglio J.R., Tian A.F. Low-temperature deposition of titanium nitride//Surface and Coatings Technology. – 1995. – Vol. 76-77. – P. 815-820.
7. Musil J. Hard and superhard nanocomposite coatings//Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 125. – P. 322-330.
8. Будянский А.М.: Оптимизация систем ионно-лучевого и плазмохимического травления на базе высокочастотного разряда/Автореферат канд. дис. техн. наук: 01.04.20. – Рук., 1996. – 16 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Veprek S., Maritz G.J., Veprek-Heijman M.G.J., Kavankova P, Prochazka J. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites//Thin Solid Films. – 2005. – Vol. 476. – P. 1-29.
2. Pogrebnyak A.D., Shpak A.P., Azarenkov N.A., Beresnev V.M. Struktura i svoystva tverdykh i sverkhтвердыkh nanokompозитnykh pokrytyy//UFN. – Т. 179, № 1. – R. 35-64.
3. Andreyev A.A., Sablev L.P., Grigoryev S.N. Vakuumno-dugovyye pokrytiya. – Kharkov: NNTs KhFTI, 2010. – 317 s.
4. Berlin Ye.V., Saydman L.A., Ionno-plazmennyye protsessy v tonkoplenochnoy tekhnologii. – М.: Tekhnosfera, 2010. – 528 s.
5. Pilletier J., Anders A. Plasma-based ion implantation and deposition: A review of physics, technology and applications//IEEE Transactions on Plasma Science. – 2005. – Vol. 33, No. 6. – P. 1944-1959.
6. Perry A.J., Treglio J.R., Tian A.F. Low-temperature deposition of titanium nitride//Surface and Coatings Technology. – 1995. – Vol. 76-77. – P. 815-820.
7. Musil J. Hard and superhard nanocomposite coatings//Surface and Coatings Technology. – 2000. – Vol. 125. – P. 322-330.
8. Budyanskiy A.M.: Optimizatsiya sistem ionno-luchevogo i plazmokhimicheskogo travleniya na baze vysokochastotnogo razryada/Avtoreferat kand. dis. tekhn. nauk: 01.04.20. – Ruk., 1996. – 16 s.