

УДК 621.382.02

Л.Н. Орликов, Н.Л. Орликов, С.И. Арестов, С.М. Шандаров

Управляемые генераторы ионных потоков

Рассматриваются способы управления генераторами ионных потоков за счет изменения формы потока плазмы, зарядности ионов, изменения импульсов давления и напряжения.
Ключевые слова: разряд, источник ионов, поток плазмы.

Введение. Электронные приборы пятого и шестого поколений на базе пьезоэлектриков типа ниобата лития реализуют ряд электронно-оптических эффектов, не наблюдаемых в приборах традиционной микроэлектроники. Из-за инертности к традиционным химическим методам обработки таких материалов пользуются ионно-плазменными методами. Интенсификация ионно-плазменной обработки усиливается при повышении концентрации и кратности заряда ионов.

Суть проблемы. Известны методы управления ионными источниками [1–5] изменением геометрических размеров (геометрическое управление), изменением тока и напряжения (электрическое управление), давления (параметрическое управление). Основную часть ионов известных источников составляют однозарядные ионы. Применение подобных источников ограничивается машиностроительными технологиями. Имеется потребность в реализации эффектов аморфизации, полимеризации или улучшения состава пленок, конверсии газов многозарядными ионами. Однако высокое напряжение на дуговых электродах в известных источниках приводит к уменьшению функции возбуждения и ионизации, что сопровождается потерей эффективности излучения многозарядных ионов, перспективных для стимулирования газофазных реакций.

Метод решения. В дополнение к известным методам управления нами предлагается управлять источником ионов путем изменения структуры потока плазмы (плазодинамическое управление), а также повышать зарядность резким изменением тока (di/dt), напряжения (dU/dt) или давления (dP/dt) и выделения высокочастотной составляющей электрического поля.

Проведенные исследования. На рис. 1 представлена схема источника ионов металлов.

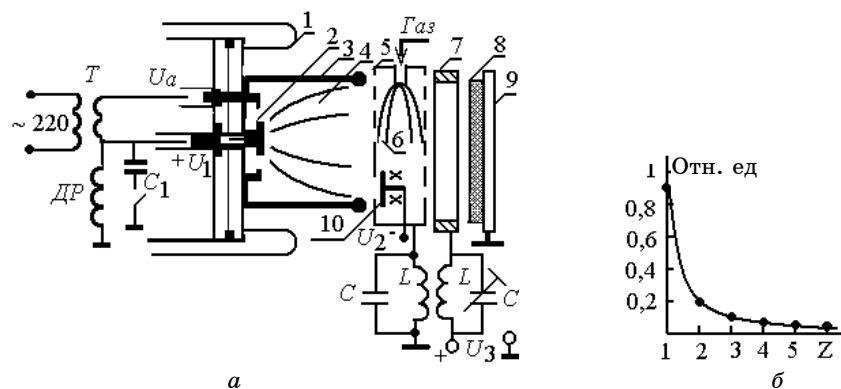


Рис. 1. Схема источника многозарядных ионов (а): 1 – изолятор; 2 – катод; 3 – анод; 4 – поток плазмы; 5 – экспандер; 6 – поток газа; 7 – кольцо; 8 – образец; 9 – подложка; 10 – магнетрон; б – зависимость доли ионов от кратности заряда

Генератор состоит из изолятора 1 с катодом 2 и анодом 3. Катод выполнен из сплава окиси алюминия с цинком. За анодом расположена решетчатая полость – экспандер 5. При обеспечении давления $\sim 0,01$ Па в рабочую камеру подается инертный газ (аргон). Между катодом 2 и анодом 3 в полости источника зажигается низковольтный дуговой разряд ($U_a \sim 80$ В, 50 А), инициируемый потоком плазмы магнетрона 10 (600 В, 0,2 А) или потоком электронов от автономного накаливаемого катода.

При коммутации емкости ($C_1 = 0,75$ мкФ, 5–70 кВ) происходит наложение высоковольтного импульса на дуговой разряд. Малая скорость ионов ($\sim 10^5$ м/с), высокие значения функции возбуждения и ионизации ($\sim 0,8$), переизлучение и другие элементарные процессы приводят к генерации многозарядных ионов. Обострение импульса для получе-

ния крутого фронта достигается обостряющим разрядником. Время изменения тока ($dI/dt \sim 10^9$ А/с), меньшее времени соударений второго рода (ионизация, рекомбинация, переизлучение и др. – меньше 1 мкс). Изменение состояния плазмы сопровождается генерацией паров, их частичной ионизацией и ускорением многозарядных ионов цинка и кислорода в направлении образца 8 с плотностью тока ~ 200 А/см². Дроссель ДР удерживает высоковольтный импульс в течение 5 мкс. Ионный поток и пары металлов проходят экспандер и попадают на образец 8, формируя пленку металла.

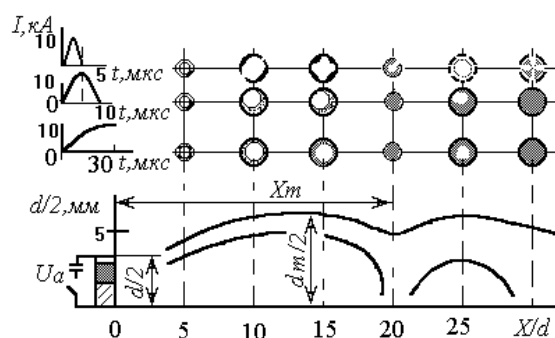
При травлении материала для снятия поверхностного и объемного зарядов с пьезоэлектрика нами используются высокочастотные электромагнитные колебания, выделяемые из плазмы газового разряда.

При напуске газа в экспандер за счет перепада давления формируется турбулентный поток газа, который взаимодействует с отверстиями экспандера. Это вызывает пульсации давления и перезажигание разряда с генерацией высокочастотного излучения. Система: кольцо 7, образец 8 и подложка 9 – образует контур. Напряжение U_3 (~ 600 В, 100 мА) обеспечивает поддержку разряда в контуре на пути дрейфа ионов.

Измерения показывают, что около 30% мощности тлеющего разряда вкладывается в высокочастотные колебания, выделяемые колебательным контуром в цепи подложки на частоте 5 МГц. Высокочастотные колебания способствуют снятию поверхностного заряда с катода лития за счет токов смещения и перезарядки. Таким образом создается падающий режим напыления пленки окиси цинка на пьезоэлектрик, не допускающий его разрушения. Постоянное облучение катода плазмой магнетрона или потоком электронов поддерживает иницирование дуги и предотвращает ее погасание при отборе тока.

Управление по импульсному давлению. Наибольший интерес представляют пульсации давления, возникающие на частотах ~ 10 кГц, стимулирующие перезажигание основного разряда и генерацию многозарядных ионов. Такие пульсации возникают за счет взаимодействия напускаемой струи газа с преградой в виде решетки экспандера. Принудительно такие пульсации могут провоцироваться дополнительной разрядной системой с пробоем по диэлектрику, изменением поперечных размеров сеточной полости, преградой на пути напускаемого газа, использованием струйного генератора и др.

Плазмодинамическое управление. В первом приближении плазму можно рассматривать как ионизованный нагретый газ с показателем адиабаты $k=1,2$. При иницировании разряда по диэлектрической вставке из нее происходит импульсное выделение газа с давлением, на 2–3 порядка превышающим давление в окружающей среде. При таких перепадах давления газоплазменный поток формируется волнообразно в виде полой струи, угол раствора которой зависит от тока дуги.



На рис. 2 представлено обобщение статистики оплавлений полимерных волосяных зондов в полости сильноточного ионного источника при токе дуги 10 кА, генерируемой с различной длительностью.

Рис. 2. Схема формирования потока плазмы в полости сильноточного источника в зависимости от расстояния

Анализ картины течения показывает, что в отсутствие значительных электрических и магнитных полей плазменные потоки имеют структуру с максимальным и минимальным сечением, принципиально не отличающуюся от модели течения газовых потоков при перепадах давления. Это является новым в представлениях о формировании потока плазмы.

Время установления стационарной структуры составляет от 5 до 40 мкс в зависимости от материала электродов и полярности. Минимально время формирования наблюдается при отрицательной полярности на центральном электроде. При коротких импульсах (менее 10 мкс) в структуре потока проявляется неравномерность.

Диаметр плазменного потока d_m в зависимости от тока дуги I сильноточного источника в диапазоне токов до 30 кА/см² описывается выражением

$$d_m \approx dI^{1/3} (kP_j / P_K)^{0,5}, \quad (1)$$

где I – ток, кА; d – диаметр диэлектрической вставки, мм; P_K – давление в вакуумной камере; P_j – давление на срезе дуговых электродов. (Для источника с пробоем по диэлектрической вставке $k=1,3$; $P_j=1$ Па).

$$P_j = P_K [1 - (k-1)/(k+1)]^{k/(k-1)}. \quad (2)$$

Изменение продольных размеров потока описывается выражением [6]

$$X_m = (0,7 - 1,34)d (kP_j/P_K)^{0,5}. \quad (3)$$

В эксперименте оценивались величины, связанные с критериями подобия течений плазменного потока течениям нейтрального газа (число Рейнольдса, число Альфвена и др.) по соотношениям [6].

Число Рейнольдса:

$$Re = dV\rho/\eta, \quad (4)$$

где: ρ – плотность; η – вязкость; V – скорость.

Магнитное число Рейнольдса:

$$Re_m = \mu \delta \cdot rV, \quad (5)$$

где μ – динамическая вязкость плазмы; δ – проводимость плазмы (См/м); r – радиус анодной полости источника.

Число Альфвена (отношение магнитных сил к кинетическим):

$$A = B/V(\mu/\rho)^{0,5}, \quad (6)$$

где B – индукция магнитного поля.

В режимах практических применений ($U_1 \sim 100$ кВ, $I \sim 30$ кА, $\mu \sim 10^{-5}$ – зависит от температуры и не зависит от давления, $\delta \sim 10^2$, $r \sim 0,1$, $B = 0,3$ Тл, $V \sim 10^3$ м/с).

Значения $Re \sim 250-300$, $Re_m \ll 1$, $A \ll 1$ свидетельствуют о подобию формирования потока плазмы и нейтрального газа, а также об отсутствии вращения плазмы за счет собственных магнитных полей. Это подтверждает гидродинамическую модель формирования потока плазмы, представленную на рис. 2.

Анализ углов разлета плазмы позволяет улучшить равномерность за счет перемешивания отраженных потоков. В экспериментах полуугол разлета потока плазмы при токах на дуговых электродах до 24 кА/см² не превышал 30°.

Профиль поперечного сечения потока плазмы на момент извлечения частиц повторяет профиль распределения тока на мишени. Это обстоятельство необходимо учитывать при конструировании источников с несколькими катодными узлами или в источниках с пробоем по диэлектрической вставке полным приложенным напряжением.

Распределение тока ионов на мишени определяется формой потока плазмы на момент извлечения частиц.

Полученные результаты и выводы. Исследования показали, что для повышения зарядности важен эффект скачкообразного изменения параметров плазмы за времена, меньшие ионизационных и рекомбинационных процессов. Учет динамики плазменного потока позволяет увеличить энерговыход при уменьшении тока дуги и ускоряющего напряжения по сравнению с режимом, если не учитывать этот фактор.

Заключение. Получены покрытия окиси цинка на ниобате лития, пригодные для оптической электроники, которые имеют ограниченные возможности формирования на типовых вакуумных установках. Показано, что под конкретную технологическую операцию (травление материала, аморфизация поверхности пленок, полимеризация и др.) необходимо выбирать наиболее эффективный способ управления параметрами источников ионов.

Работа выполнена при поддержке гранта 08-02-99-02 Р-ОФИ; проектов 2гб и 28/10х/д.

Литература

- Орликов Л.Н. Плазмодинамическое повышение эффективности вакуумно-дуговых генераторов // Тезисы 4-й Всерос. конф. по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц. Томск, 13–16 мая 1996 г. – Томск: Аудит Информ, 1996. – С. 246–247.
- Орликов Л.Н. Динамическое управление сильноточными ионно-электронными источниками микросекундной длительности // Труды 4-й Междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-98». Новосибирск, сент. 23–26, 1998 г. – Новосибирск, 1998. – С. 198–199.

3. Орликов Л.Н. Оптимизация управления потоком плазмы в сильноточном источнике частиц / Л.Н. Орликов, Н.Л. Орликов, С.М. Шандаров // Известия вузов. Физика. – 2007. – № 9. – Приложение. – С. 260–263.

4. Патент 2187168 РФ, МПК7 H05H1/34. Устройство для ионной обработки материалов / Л.Н. Орликов, Н.Л. Орликов, С.М. Шандаров. – Заявл. 18.12.2000; опубл. 10.08.2002. Бюл. № 22.

5. Orlikov L.N., Orlikov N.L., Shandarov S.M. Gas Discharges Generators of Ultra Freguenzy a Metall- Bearing Plasma to Etching of Piezoelectrics / L.N. Orlikov, N.L. Orlikov, S.M. Shandarov // Proceedings of the IEEE– Russia conference «1999 High-power microwave electronics» (MIA-ME99), September 21–23, 1999. – Novosibirsk, 1999. – P. III.22–III.23.

6. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1976. – 808 с.

Орликов Леонид Николаевич

Д-р техн. наук проф. каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-87, 8-913-841-68-59

Эл. адрес: Oln4@Yandex.ru, ong@ef.fet.tusur.ru

Орликов Николай Леонидович

Ст. науч. сотрудник научно-исследовательского института полупроводниковых приборов

Тел.: (382-2) 54-28-80

Арестов Сергей Иннокентьевич

Аспирант каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-87

Шандаров Станислав Михайлович

Зав. каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-87

Orlikov L.N., Orlikov N.L., Arestov S.I., Shandarov S.M.

Controlled sources of ion flux

The means for control of ion flux sources by changing the plasma flow form, ion charge, pulses of pressure and voltage are considered.

Keywords: discharge, ion source, plasma flow.
