

04

## Автоколебательный режим генерации электронного пучка в источнике с сетчатым плазменным эмиттером

© Н.В. Гаврилов, А.С. Каменецких

Институт электрофизики УрО РАН,  
620016 Екатеринбург, Россия  
e-mail: gavrilov@iep.uran.ru

(Поступило в Редакцию 9 января 2013 г.)

Проведены экспериментальные исследования плазменных процессов и особенностей генерации электронного пучка в источнике электронов с сетчатым плазменным катодом в условиях высокоэффективного извлечения электронов и существования интенсивного обратного ионного потока, следствием чего является нарушение сеточной стабилизации. Показано, что рост давления газа наряду с повышением потенциала эмитирующей плазмы приводит также к возникновению модуляции потенциала плазмы в диапазоне частот  $10^4$ – $10^5$  Hz. В автоколебательном режиме получен электронный пучок с постоянным током до 16 А и модулированной в пределах до 100% от уровня ускоряющего напряжения (100–300 В) энергией электронов. Предложено объяснение причины возникновения релаксационных автоколебаний, основанное на уменьшении частоты генерации ионов электронным пучком с ростом потенциала плазмы и существовании инерционной нелинейности системы, обусловленной запаздыванием изменения потенциала плазмы, создаваемого пространственным зарядом обратного ионного потока, относительно величины тока ионов, генерируемых электронным пучком.

### Введение

Источники электронов с плазменным эмиттером используются для генерации широких и сфокусированных электронных пучков с энергией до 150 keV и током от долей ампера до килоампера в импульсном режиме [1,2]. Устойчивое функционирование источников с плазменным катодом обеспечивается сеточной стабилизацией, при выполнении условий которой отбор электронов не влияет на параметры плазмы [3]. Ленгмюровские слои, формирующиеся в отверстиях сетки, создают потенциальный барьер или ограничивают площадь открытой поверхности плазмы, в результате чего ток эмиссии электронов стабилизируется на уровне, не превышающем величину тока разряда в плазменном катоде. Условия сеточной стабилизации выполняются при низких давлениях газа и достаточно высоких ускоряющих напряжениях [4]. При увеличении давления газа и снижении ускоряющего напряжения увеличивается частота ионизаций газа электронным пучком, и возрастает обратный поток ионов в эмитирующую плазму, что приводит к росту ее концентрации, увеличению эффективности извлечения электронов и величины эмиссионного тока. Дальнейшее повышение частоты ионизации газа в ускоряющем промежутке и области дрейфа пучка при определенных условиях может привести к лавинообразному развитию процессов и переключению разряда с анода на экстрактор [5].

Плазменные источники электронов, используемые для генерации плазмы электронным пучком, обычно работают при пониженном ускоряющем напряжении порядка нескольких сотен эВ и повышенном давлении газа (0.1–1 Па). Для повышения ресурса сетки в условиях

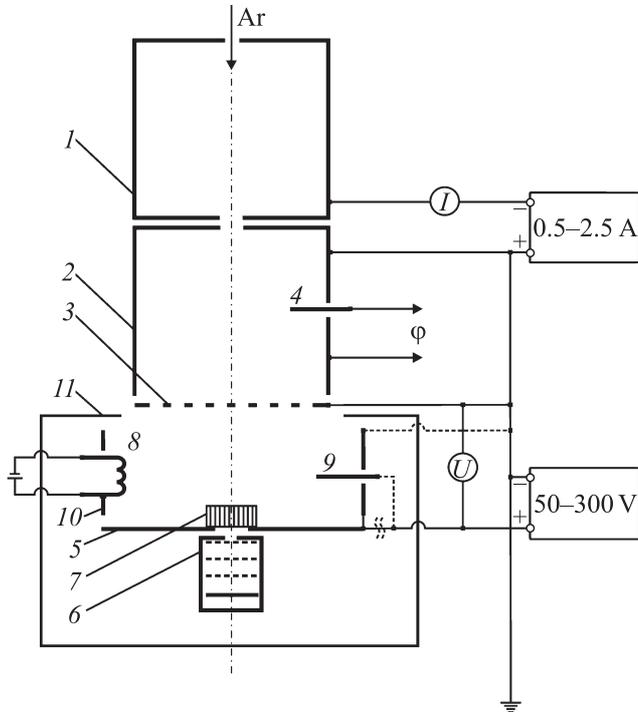
интенсивной ионной бомбардировки используют крупноструктурные сетки с размером отверстий в несколько миллиметров [6]. В таких условиях плазменный катод работает в режиме с близкой к 100% эффективностью извлечения электронов из плазмы и постоянным током эмиссии, обеспечиваемым стабилизацией тока разряда схемными методами. Высокоэффективное извлечение электронов из эмитирующей плазмы затрудняет компенсацию положительного заряда обратного ионного потока, поэтому с ростом давления газа и обратного ионного потока потенциал эмитирующей плазмы может возрастать до величин, сопоставимых с величиной ускоряющего напряжения [7].

Заключительным этапом роста потенциала эмитирующей плазмы и соответствующего снижения ускоряющего напряжения должен быть переход системы из режима генерации электронного пучка в режим горения разряда на коллектор. Однако большие потери ионов на перекрывающую разрядный промежуток сетку с достаточно высоким отрицательным потенциалом относительно плазмы в сочетании с падением ионизирующей способности электронов при уменьшении разности потенциалов между эмитирующей и пучковой плазмами могут затруднить переключение электронного тока разряда на удаленный коллектор.

Целью настоящей работы является изучение плазменных процессов в источнике электронов с сетчатым плазменным катодом и особенностей генерации низкоэнергетических электронных пучков в условиях нарушения сеточной стабилизации в результате высокоэффективного извлечения электронов и формирования интенсивного обратного ионного потока.

## Техника эксперимента

В экспериментах использовались плазменные источники электронов на основе тлеющего разряда с полым катодом (0.5–2.5 А) и разряда с самонакаливаемым полым катодом (3–16 А). Электродная система источника первого типа (рис. 1) состоит из полого катода 1 (с диаметром и высотой 200 мм) с диаметром выходной апертуры 8 мм и полого анода 2 (с диаметром и высотой 100 мм). На торце полого анода устанавливался сеточный электрод 3, в качестве которого использовалась плетеная сетка с ячейками  $12 \times 1.2$  мм, либо пластина толщиной 2 мм с отверстиями диаметром 4 мм, расположенными в области диаметром 80 мм. Сетка была электрически изолирована от цилиндрической части анода, что позволяло раздельно измерять токи на эти электроды. В анодной полости на расстояниях 40 мм от стенки и 50 мм от сетки устанавливался ленточный зонд 4, изготовленный из W проволоки диаметром 0.3 мм и длиной 5 мм. На расстоянии 70 мм от сеточного электрода был установлен коллектор электронного пучка 5. Источник стабилизированного постоянного тока позволял регулировать ток разряда  $I$  в пределах 0.5–2.5 А. Стабилизированное ускоряющее напряжение  $U$  регулировалось в диапазоне 50–300 В с помощью источника питания, подключаемого между



**Рис. 1.** Электродная схема газоразрядной системы: 1 — полой катод, 2 — полой анод, 3 — сетка, 4 — зонд, 5 — коллектор, 6 — энергоанализатор, 7 — коллиматор, 8 — термокатод, 9 — стержневой анод, 10 — стенки, ограничивающие область дрейфа пучка, 11 — вакуумная камера. Штриховыми линиями показаны соединения при использовании вспомогательного разряда с термокатодом.

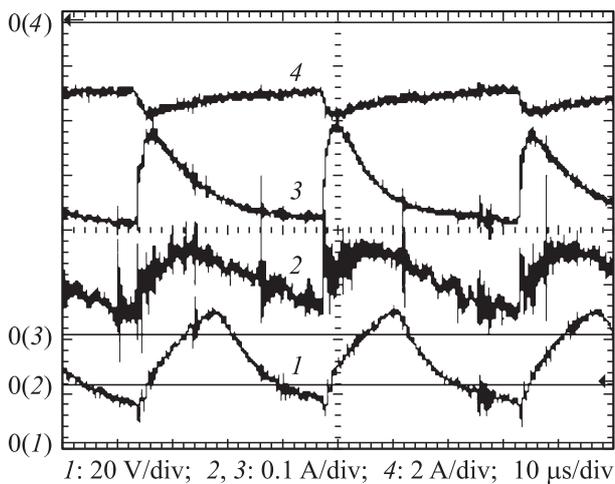
заземленной сеткой и коллектором. Рабочий диапазон давлений  $p$  рабочего газа аргона, напускавшегося через катодную полость, в области дрейфа пучка составлял 0.1–0.8 Па при использовании электрода с отверстиями диаметром 4 мм и 0.2–3 Па при использовании сетки с ячейками  $1.2 \times 1.2$  мм. При работе источника в объеме между сеткой и коллектором создавалась пучковая плазма. Электроны из анодной плазмы тлеющего разряда извлекались через отверстия в сетке и ускорялись в слое пространственного заряда между эмитирующей и пучковой плазмами. В источнике на основе разряда с самонакаливаемым катодом, подробно описанном в работе [8], использовался полый катод из нитрида титана в форме трубки с внутренним диаметром 8 мм и длиной 70 мм.

Плавающий потенциал зонда и ток в цепи коллектора электронного пучка измерялись с помощью цифрового осциллографа TPS 2024 Tektronix, имеющего полосу пропускания 200 МГц. Определение энергетического спектра электронов проводилось методом задерживающего потенциала с использованием трехсеточного электростатического энергоанализатора 6 с коллиматором 7, установленным на входе в анализатор. Поскольку методом задерживающего поля измеряют только продольную составляющую скорости, коллиматор необходим для отсеки электронов, получивших значительную поперечную составляющую скорости вследствие кривизны плазменной границы или в результате взаимодействия с пучковой плазмой. Соотношение диаметра и длины каналов коллиматора ограничивало углы входа электронов в анализатор на уровне  $\leq 3^\circ$ . Кривые задержки электронов регистрировались с помощью цифрового многоканального самописца Hioki 8835 в режиме реального времени. Энергетические спектры электронов определялись путем математического дифференцирования кривых задержки. Калибровка анализатора проводилась с использованием термоэмиссионного катода при давлении остаточного газа в вакуумной камере  $2 \cdot 10^{-3}$  Па. Энергетическое разрешение анализатора на уровне половины максимума функции распределения (ПШПВ) составило  $\sim 5\%$  от величины ускоряющего напряжения.

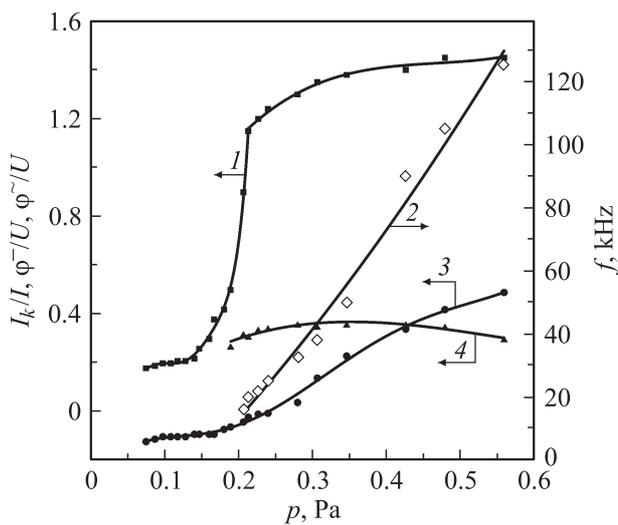
В ряде экспериментов для повышения плотности плазмы в области дрейфа электронного пучка использовался вспомогательный разряд между термоэмиссионным катодом 8 и стержневым анодом 9. В этом случае термокатод, коллектор пучка и ограничивавшие область дрейфа пучка стенки 10 имели потенциал сетки плазменного катода. Ускоряющее напряжение прикладывалось между стержневым анодом и сеткой.

## Результаты эксперимента

На рис. 2 приведены осциллограммы плавающего потенциала зонда в эмитирующей плазме, тока в цепи коллектора пучка и токов в цепях полого анода



**Рис. 2.** Осциллограммы плавающего потенциала зонда (1), тока в цепи полого анода (2), тока в цепи сетки (3), тока в цепи коллектора (4):  $p = 0.25$  Pa,  $I = 2$  A,  $U = 200$  V. Диаметр отверстий сетки 4 mm.

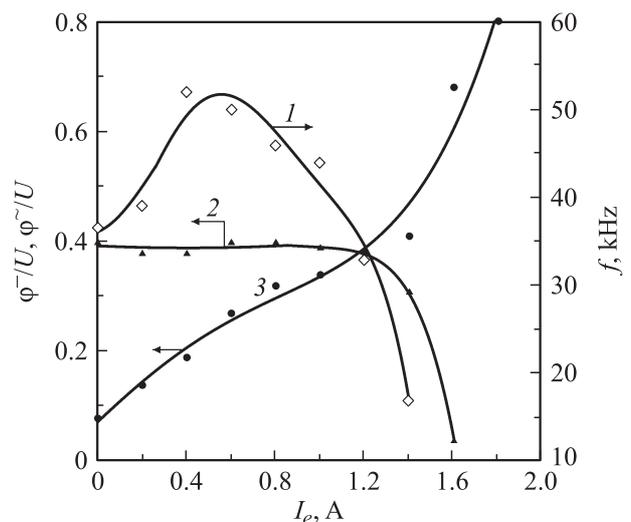


**Рис. 3.** Зависимости тока в цепи коллектора (1), частоты колебаний (2), относительной величины постоянной (3) и переменной (4) составляющих плавающего потенциала зонда от давления газа.  $I = 1$  A,  $U = 100$  V. Диаметр отверстий сетки 4 mm.

разряда и сеточного электрода. Как известно, плавающий потенциал зонда  $\phi$  в плазме с максвелловским распределением электронов определяется соотношением  $e\phi/kT_e \approx \ln(0.77(M/m)^{1/2})$  и в аргоновой плазме составляет  $\sim 5.6kT_e$  [9]. При измеренных в условиях эксперимента значениях электронной температуры 3–5 eV разница между плавающим потенциалом зонда и потенциалом плазмы составляет 20–30 V. Как следует из рис. 2, плавающий потенциал (1) имеет постоянную и переменную составляющие. С ростом давления газа частота модуляции потенциала плазмы возрастает. Токи на анод (2) и на сетку (3) являются преимущественно

ионными, наблюдается скачок ионного тока на сетку в момент начала роста потенциала плазмы, изменения ионного тока на анод и плавающего потенциала имеют примерно одинаковый характер. Электронный ток в цепи коллектора пучка (4) слабо модулирован (глубина модуляции 0.2–0.3). Зависимости составляющих плавающего потенциала и токов на электродах от давления газа показаны на рис. 3. Ток в цепи коллектора (1), на который замыкается и ток вторичных электронов, генерируемых в результате ионизации газа электронным пучком, резко возрастает при увеличении давления до 0.2 Pa, затем входит в насыщение. В момент резкого роста тока, соответствующего переходу плазменного катода в режим вынужденной эмиссии со 100% эффективностью отбора электронов, возникает модуляция потенциала плазмы, частота (2) которой линейно растет с давлением газа. Постоянная составляющая потенциала плазмы (3) также растет с давлением, переменная составляющая (4) меняется незначительно.

Изменение составляющих плавающего потенциала зонда в анодной плазме и частоты его колебаний при зажигании в области дрейфа пучка вспомогательного разряда с термоэмиссионным катодом показаны на рис. 4. С ростом тока разряда частота (1) и переменная составляющая плавающего потенциала зонда (2) меняются немонотонно и с ростом тока обращаются в нуль. Постоянная составляющая (3) при этом возрастает до значений, близких к ускоряющему напряжению. Изменения токов в цепях электродов плазменного катода и стреевкового анода вспомогательного разряда в функции тока эмиссии термокатода и напряжения между электродами показаны на рис. 5. Рост тока и напряжения ведет к увеличению ионного тока на анод



**Рис. 4.** Зависимости частоты колебаний (1), относительной величины переменной (2) и постоянной (3) составляющих плавающего потенциала зонда от тока эмиссии термокатода.  $p = 0.25$  Pa,  $I = 1$  A,  $U = 100$  V. Диаметр отверстий сетки 4 mm.

(1, 2) и сетку (3, 4) плазменного катода и электронного тока на анод вспомогательного разряда (5, 6).

Результаты измерения энергетических спектров электронов с использованием электростатического энергоанализатора и их изменение с давлением, током разряда и ускоряющим напряжением подробно описаны в [10]. Смещение максимума пиков и степень их уширения находятся в хорошем соответствии с данными зондовых измерений (рис. 6).

Увеличение тока разряда при постоянном давлении газа приводит к возникновению модуляции потенциала плазмы (рис. 7). С увеличением давления газа переход

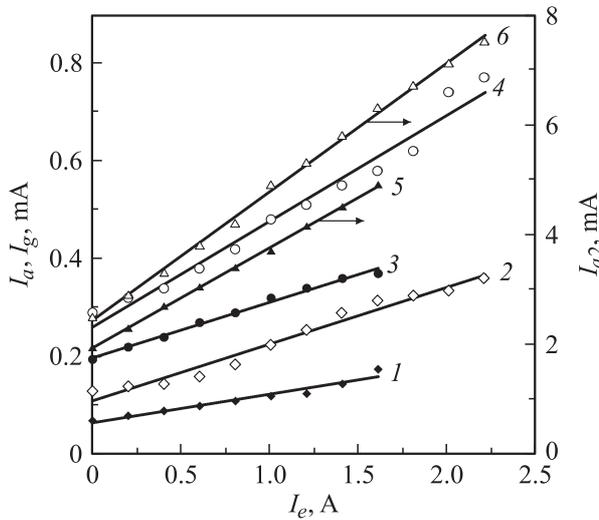


Рис. 5. Зависимости тока в цепи анода (1, 2), сетки (3, 4) и анода вспомогательного разряда (5, 6) от тока эмиссии термодатода.  $U = 100$  (1, 3, 5),  $200$  V (2, 4, 6).

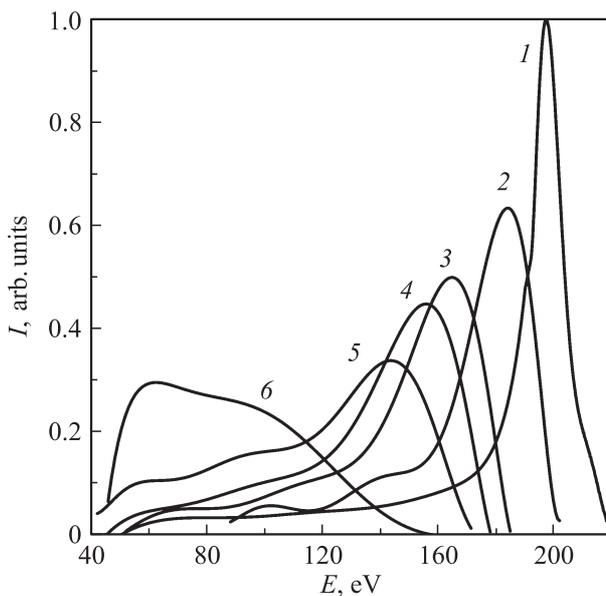


Рис. 6. Энергетические спектры электронов пучка.  $p = 0.12$  (1),  $2.2$  (2),  $2.8$  (3),  $3.6$  (4),  $5.2$  (5),  $0.76$  Pa (6).  $I = 2$  A,  $U = 200$  V.

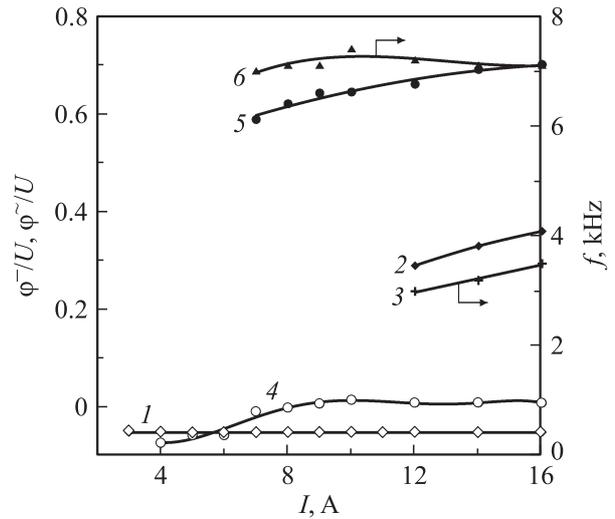


Рис. 7. Зависимости относительной величины постоянной (1, 4) и переменной (2, 5) составляющих плавающего потенциала зонда, частоты колебаний (3, 6) от тока разряда.  $p = 0.2$  (1, 2, 3),  $2.6$  Pa (4, 5, 6).  $U = 100$  V.

плазменного катода в автоколебательный режим эмиссии происходит при меньших значениях тока разряда. Частота колебаний, постоянная и переменная составляющие плавающего потенциала слабо меняются при увеличении тока разряда.

### Обсуждение результатов

Изменение потенциала плазмы влияет на толщину ленгмюровских слоев в отверстиях сетки, что может приводить к расщеплению колебаний, однако оценки постоянной времени установления ионного слоя в апертурах сетки ( $\sim 10^{-7}$  s) не соответствуют наблюдаемой в экспериментах частоте колебаний потенциала. Автоколебательный процесс с длительностью цикла  $\sim 10 \mu s$  и более обусловлен действием факторов, меняющихся с большей постоянной времени. Из экспериментов со вспомогательным разрядом, проводившихся при постоянных значениях давления газа и тока эмиссии электронов, следует, что рост обратного ионного тока приводит к увеличению потенциала плазмы, прекращению автоколебаний и переходу системы из режима генерации пучка в режим горения разряда на коллектор. Это свидетельствует о том, что рост потенциала плазмы обусловлен недостаточной компенсацией обратного ионного потока. Невысокая электронная температура плазмы ( $2-5$  eV) не может обеспечить поддержание высокого потенциала плазмы (сотни вольт).

При низких ускоряющих напряжениях ( $100-300$  V), используемых в эксперименте, рост потенциала эмитирующей плазмы приводит к существенному уменьшению разности потенциалов между плазмами и снижению ионизирующей способности электронов пучка. В результате, рост потенциала плазмы, обусловленный увели-

чением обратного ионного потока, является фактором, приводящим к уменьшению ионного потока. Однако существующая отрицательная обратная связь не приводит к возникновению установившегося состояния, так как она имеет запаздывающий характер. Поскольку время жизни иона от момента его генерации в пучковой плазме до ухода из анодной плазмы на анод или сетку в режиме многократных перезарядок составляет десятки мкс, то момент времени, при котором частота генерации ионов в пучковой плазме максимальна, не соответствует моменту достижения максимального потенциала плазмы. Система с запаздывающей обратной связью переходит в режим автоколебаний [11].

В высоковольтном режиме генерации электронного пучка с энергией в несколько десятков килоэлектронвольт с ростом давления и тока эмиссии в [12] наблюдалось возникновение „плазменного“ пробоя, который объяснялся проникновением плазмы из разрядной области в ускоряющий промежуток в результате роста интенсивности обратного ионного потока, повышения концентрации эмитирующей плазмы, роста эмиссионного тока и дальнейшего усиления интенсивности ионизации газа электронным пучком, что приводит к лавинообразному росту тока эмиссии и пробоем промежутка [13].

В отличие от исследуемого низковольтного режима в высоковольтном режиме генерации пучка повышение потенциала плазмы слабо влияет на величину ускоряющего напряжения и величину обратного ионного тока. Однако в газоразрядной системе с электронной стабилизацией тока разряда рост концентрации эмитирующей плазмы под действием потока обратных ионов может обеспечить повышение эффективности извлечения электронов и тока эмиссии только до значений, близких к току разряда. Для лавинообразного роста тока пучка необходима дополнительная эмиссия электронов с поверхности электродов, что может обеспечиваться зажиганием тлеющего разряда в анодной полости в результате повышения потенциала плазмы и его переходом в дугу.

В автоколебательном режиме генерации ток электронного пучка остается практически постоянным, а энергия электронов меняется с частотой в несколько десятков килогерц, зависящей, главным образом, от давления газа, в широком интервале, сопоставимом с величиной ускоряющего напряжения. Подобный эффект наблюдался в работе [14], в которой исследовалось поведение собирающего ленгмюровского зонда при положительном потенциале. При увеличении напряжения на зонде до определенных значений, зависящих от давления газа, зонд переходил в режим анода, при этом на падающей части вольт-амперной характеристики зонда возникали колебания в том же диапазоне частот, если ток в цепи зонда ограничивался последовательно включенным резистором.

Автоколебательный режим генерации электронного пучка в источниках с плазменным катодом может быть успешно применен для генерации плазмы в ряде техно-

логических, требующих более высоких давлений, чем те, при которых работают традиционные генераторы плазмы с термокатодом, в частности, при ионноплазменном нанесении покрытий с ионным сопровождением, плазмохимическом осаждении покрытий, в том числе алмазоподобных и наноструктурных, а также при азотировании в плазме электронного пучка.

## Заключение

Осциллографическими измерениями потенциала эмитирующей плазмы и тока пучка в источнике с сетчатым плазменным катодом, работающим в условиях высокоэффективного извлечения электронов и генерации интенсивного обратного ионного потока, показано, что при невысоких ускоряющих напряжениях (100–300 В) увеличение давления газа свыше 0.2 Па приводит к переходу источника электронов в автоколебательный режим с высокой частотой ( $10^4$ – $10^5$  kHz) модуляции энергии электронов в пучке (до 100%), при этом глубина модуляции тока пучка меняется в пределах 0.2–0.3.

Смещение максимума и уширение энергетического спектра электронов в пучке источника при его переходе в автоколебательный режим, измеренные методом задерживающего потенциала, подтверждают результаты, полученные осциллографированием потенциала эмитирующей плазмы.

Эксперимент по увеличению обратного ионного потока повышением плотности плазмы в области дрейфа пучка с помощью несамостоятельного разряда с термоэмиссионным катодом показал, что увеличение обратного ионного потока при постоянном давлении газа и токе эмиссии электронов приводит к пропорциональному росту потенциала плазмы. Это свидетельствует о том, что рост потенциала плазмы при высокоэффективном отборе электронов обусловлен затрудненной нейтрализацией положительного заряда обратного потока ионов. Рост потенциала плазмы завершается переключением системы из режима генерации пучка в режим горения разряда на коллектор. Контролируемое увеличение обратного ионного потока с помощью дополнительного разряда уменьшает частоту и амплитуду колебаний потенциала плазмы в процессе перехода.

Причиной возникновения автоколебательного режима является то, что изменение потенциала плазмы происходит в противофазе с ускоряющим напряжением, в результате чего одновременно с ростом потенциала плазмы уменьшаются частота ионизаций газа и величина обратного ионного потока. Стабилизация параметров системы под действием обратной связи не наступает из-за запаздывания изменения потенциала плазмы, создаваемого пространственным зарядом обратного ионного потока, относительно изменения тока ионов, генерируемых электронным пучком.

Частота автоколебаний определяется временем роста потенциала плазмы до значений, при которых обратный

ионный поток становится недостаточным для поддержания роста потенциала. Скорость изменения пространственного заряда ионов в плазме определяется их динамикой и относительно невысока из-за большого времени жизни ионов с момента их возникновения в пучковой плазме до ухода в режиме многократной перезарядки на анод или сетку плазменного катода.

Работа выполнена при частичной поддержке программы фундаментальных исследований президиума РАН (проект № 12-П-2-1046) и РФФИ (проект № 12-08-31142-а-мол).

## Список литературы

- [1] Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- [2] Коваль Н.Н., Крейндель Ю.Е., Щанин П.М. // ЖТФ. 1983. Т. 53. Вып. 9. С. 1846–1848.
- [3] Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Тюрюканов П.М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 1. С. 66–71.
- [4] Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Тюрюканов П.М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 4. С. 687–693.
- [5] Бурачевский Ю.А., Бурдовицин В.А., Мытников А.В., Окс Е.М. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 2. С. 48–50.
- [6] Гаврилов Н.В., Каменецих А.С. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 3. С. 12–16.
- [7] Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р., Каменецих А.С. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 10. С. 59–64.
- [8] Гаврилов Н.В., Меньшаков А.И. // ПТЭ. 2011. № 5. С. 140–148.
- [9] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [10] Гаврилов Н.В., Каменецих А.С., Меньшаков А.И. Плазменная эмиссионная электроника. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2012. С. 7–13.
- [11] Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Основы теории колебаний. М.: Наука, 1988. 390 с.
- [12] Бурдовицин В.А., Куземченко М.Н., Окс Е.М. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 7. С. 134–136.
- [13] Бурдовицин В.А., Горев А.К., Климов А.С., Зенин А.А., Окс Е.М. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 8. С. 62–66.
- [14] Клярфельд Б.Н., Тимофеев А.А., Неретина Н.А., Гусева Л.Г. // ЖТФ. 1955. Т. 25. Вып. 9. С. 1581–1596.