

Работоспособность источника ионов для получения наноструктур

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Харьковский университет радиоэлектроники*

Приведены результаты теоретического, экспериментально-теоретического и экспериментального исследований динамики температур и напряжений, а также перемещений элементов ионно-оптической системы в режиме запуска источника ионов на базе плазменно-ионного ускорителя.

Ключевые слова: плазменно-ионные ускорители, ионно-оптическая система.

Введение

В настоящее время еще нет достаточно эффективного источника ионов, позволяющего в периодическом режиме изменять энергии ионов в широком диапазоне энергий от сотен до десятков тысяч электрон-вольт (эВ) при достаточно большом размере обрабатываемой поверхности и обеспечении относительно равномерного распределения плотности тока. Таким источником может быть плазменно-ионный ускоритель со сферической ионно-оптической системой (ИОС), на электроды сетки которой могут подаваться чередующиеся импульсы напряжения. В то же время импульсная подача может приводить к разрушению фрагментов сетки и к существенному термоупругому деформированию сеток ионно-оптической системы. Исследованию импульсного действия привязки разряда на работоспособность технологического источника ионов посвящена эта работа.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины "Новые ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе" (подсекция 13), "Аэрокосмическая техника и транспорт" и по темам "Создание физико-технических основ повышения качества материала аэрокосмических конструкций" и "Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники и (подсекция 6) материаловедение тела", а также в рамках хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

1. Состояние вопроса

Исследованию работоспособности ионно-оптических систем плазменно-ионных ускорителей (ПИУ) посвящены работы [1, 2], но в них были проведены теоретические оценки, а экспериментальная проверка не проводилась. Все это говорит о важности сопоставления теории и эксперимента. Причем будут проведены сопоставления результатов теории и эксперимента, теории и экспериментально-теоретического исследования.

2. Оборудование и методика проведения исследования

Проводилось экспериментально-теоретическое исследование температур, перемещений и напряжений в молибденовой сетке ИОС ПИУ при его запуске, т.е. при режиме, когда реализуются максимальные по величине температурные напряжения. Температуры и перемещения измерялись экспериментально, а температурные напряжения (нормальные $\sigma_{\varphi\varphi}$ и касательные $\sigma_{r\varphi}$) рассчитывались по экспериментальным значениям температур и перемещений. Параллельно с такими исследованиями проводились расчеты всех исследуемых величин: напряжений, перемещений и температур по уточненной методике [1]. Такой подход к исследованию позволяет взаимно проверить экспериментальные и теоретические результаты.

В экспериментальной установке для моделирования режима запуска ИОС ПИУ тепловое действие частиц и излучения в режиме работы без привязок разряда моделируется излучателем–катодом, а привязка разряда моделируется электронным потоком, создаваемым электронной пушкой. Установка позволяет исследовать как сферическую, так и струнную оптические системы ПИУ.

При исследованиях контролируются: 1) температура сетки ИОС ПИУ вольфрам-рениевыми термодарами с относительной ошибкой не более 3%; 2) перемещения (стрела прогиба для сферической ИОС ПИУ и изменение длины для струнной ИОС ПИУ) – микронными индикаторами с точностью не хуже $(0,5...1,0) \cdot 10^{-6}$ м.

3. Исследование динамики температур, перемещений и напряжений в ИОС ПИУ для режима запуска

Для выяснения реальности моделируемых условий и условий в реальных ИОС ПИУ на методике нашей работы [1] были проведены расчеты динамики температур и максимальных перемещений и нормальных касательных температурных напряжений в молибденовой сетке в зависимости от момента времени для ряда мощностей ПИУ: кривые 1–2200 Вт; 2–1100 Вт; 3–900 Вт; 4–650 Вт (рис. 1). Расчеты проводились для сферической оптической системы с мидельным диаметром 0,1 м и толщиной $0,5 \cdot 10^{-6}$ м. Так, на рис. 1, а, б и 2, а б показаны теоретические 1- ; 2-- , 3-- , 4— и экспериментальные 2++ , 3++ зависимости максимальной температуры (рис. 2, а) и максимального перемещения сетки ИОС ПИУ от времени работы (рис. 1, б) нормальных температурных напряжений $\sigma_{\varphi\varphi}$ и касательных температурных напряжений $\sigma_{r\varphi}$.

Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей температуры сетки ИОС ПИУ от времени показывает, что величины температур и время выхода на стационарный режим близки как в теоретических расчетах, так и моделирующие экспериментах (рис. 1, а). Видно, что моделирующие тепловые потоки близки по величине к реализующимся в ПИУ с мощностью 1100 Вт (рис. 1), однако весь исследуемый теоретический диапазон мощностей экспериментальная установка обеспечить не может (мощность порядка 2200 Вт не может быть реализована), но снижением частоты следования (которая в эксперименте составляла 30 Гц) можно моделировать и менее теплонапряженные режимы (300 и 650 Вт), характер временных зависимостей как расчетной, так и опытной температуры идентичен, несколько более быстрый рост температуры в

моделирующем эксперименте по сравнению с теорией объясняется более локальным нагревом сетки в моделирующем эксперименте (рис. 1, а).

Анализ теоретических и экспериментальных зависимостей максимальных перемещений сетки ИОС ПИУ от времени (рис. 1, б) свидетельствует о том, что величины перемещений сетки и время выхода на стационарный режим по перемещениям близки как для теоретических расчетов, так и в экспериментальных моделирующих исследованиях близки. По перемещениям исследованные теоретические режимы перекрывают практически полностью полученные в эксперименте, а во времени для всех режимов их изменения отсутствуют достоверные данные, так как измеряемые перемещения по величине лежат в диапазоне величин погрешности измерений (рис. 1, б). Перекрываемый исследуемый теоретически диапазон мощностей ПИУ моделируется по перемещениям, а некоторые их отличия при исследовании температур, очевидно, связаны с более локальным теплоподводом в моделирующем эксперименте по сравнению с теоретической моделью, что приводит к более значительным перемещениям в моделирующем эксперименте.

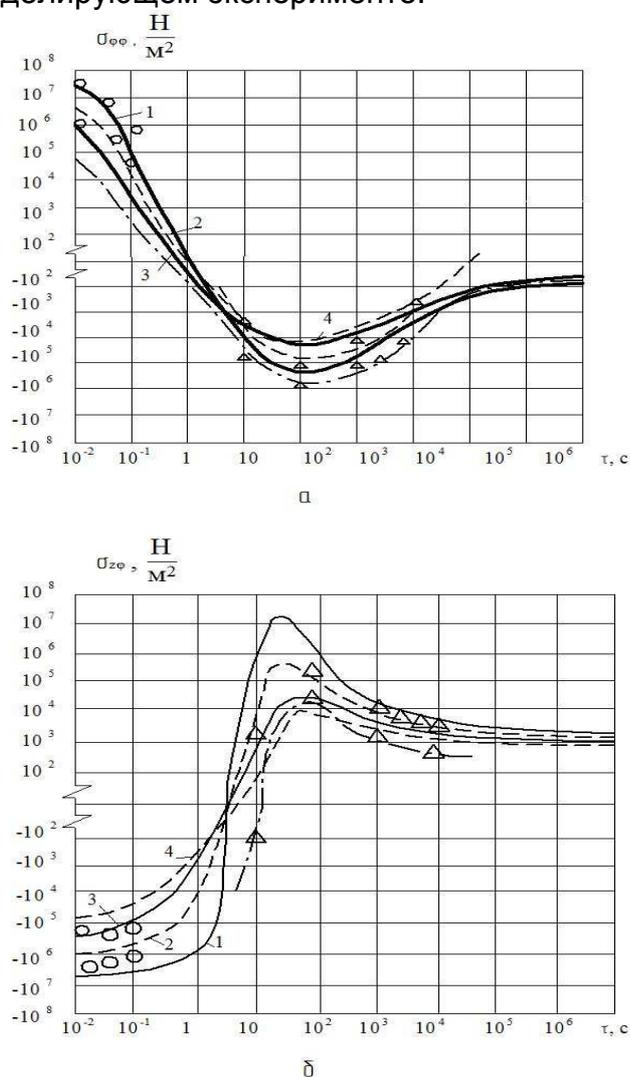


Рис. 1. Зависимость максимальных температурных (а) и перемещений (б) сетки ИОС от времени работы ПИУ при мощностях: 1 – 220 Вт, 2 – 1100 Вт, 3 – 900 Вт, 4 – 650 Вт – теоретические кривые и 2+ и 3+ – экспериментальные зависимости

На рис. 2, а показаны теоретические (полученные расчетом по методике [1]) и экспериментально-теоретические значения нормальных температурных напряжений $\sigma_{\phi\phi}$, полученных теоретически по опытным значениям температур (см. рис. 1, а) и перемещений (см. рис. 1, б). Теоретические значения получены для мощностей $N=2,2$ кВт – кривая 1, $N=1,1$ кВт – кривая 2, $N=0,95$ кВт – кривая 3 и $N=0,65$ кВт – кривая 4. Видно, что экспериментально-теоретические значения, полученные по экспериментальным значениям температур и перемещений, близки к теоретическим при мощности 2,2 кВт и 0,95 кВт, что говорит о реальности полученных значений напряжений расчетным и опытно-расчетным методами.

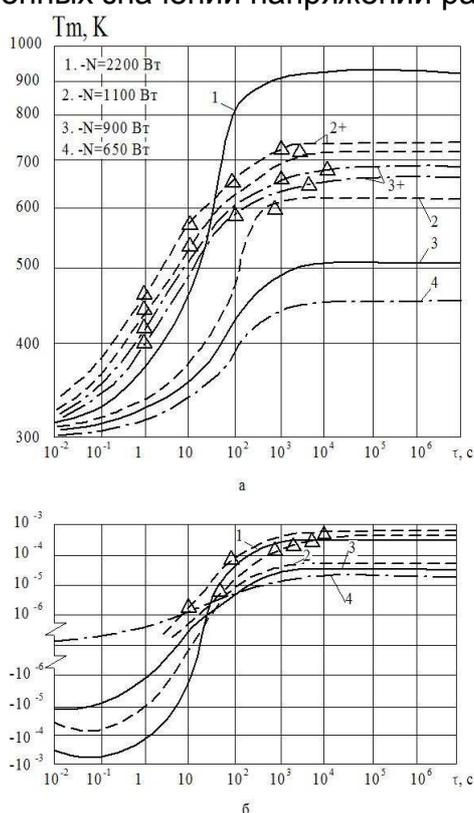


Рис. 2. Зависимость экспериментальных и теоретических значений нормальных $\sigma_{\phi\phi}$ (а) и касательных $\sigma_{z\phi}$ (б) напряжений от времени работы ПИУ (1 – 2,2 кВт; 2 – 1,1 кВт; 3 – 0,95 кВт; 4 – 0,65 кВт)

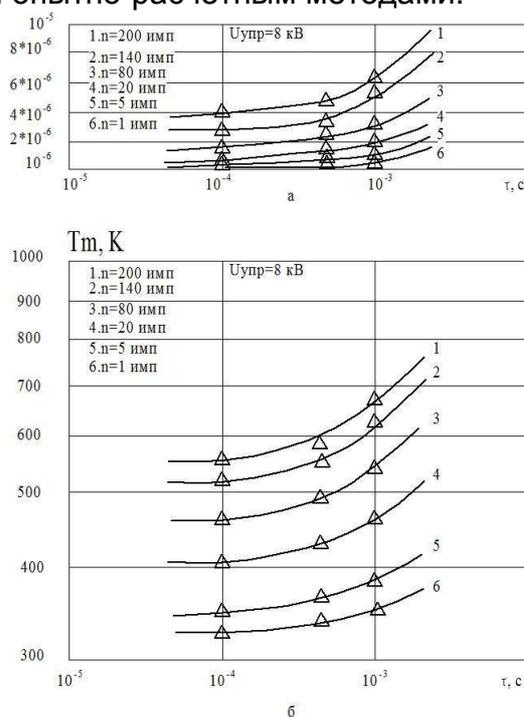


Рис. 3. Экспериментальные зависимости максимального перемещения (а) и максимальной температуры от времени действия электронного потока с частотой 0,5 Гц с различным числом срабатываний

Аналогичные зависимости касательных напряжений от времени показаны на рис. 2, б. Видно, что экспериментально-теоретические значения для касательных напряжений близки к теоретическим кривым 2, 3 и 4, т.е. к режимам с мощностью $N=1,1$ кВт, $N=0,95$ кВт и $N=0,65$ кВт, что может быть объяснено отличием характера распределения теплового потока в моделирующем эксперименте и в реальных условиях работы ИОС ПИУ, которые учтены в теоретической модели, но в моделирующих условиях они отличаются.

Действие привязки разряда, очевидно, также будет влиять на характер изменения температур, перемещений и напряжений в сетках ИОС ПИУ в режиме запуска, поэтому было проведено исследование перемещений, температур, нормальных и касательных температурных напряжений при моделировании

привязки разряда электронным пучком энергий электронов $10^3 \dots 10^4$ эВ и плотностью тока $10^4 \dots 7 \cdot 10^4$ А/м² и временем действия $10^{-6} - 10^3$ с (с частотой шлифования от 0,5...200 Гц.)

Исследование действия единичных потоков электронов при малой частоте срабатывания (0,5 Гц) показало существенное влияние времени действия потока электронов на величину максимального перемещения (рис. 3, а). Значительное влияние на максимальное перемещение оказывает число срабатываний. Наибольшие по величине перемещения (порядка $6 \cdot 10^{-6}$ м) реализуются при числе срабатываний $n = 200$.

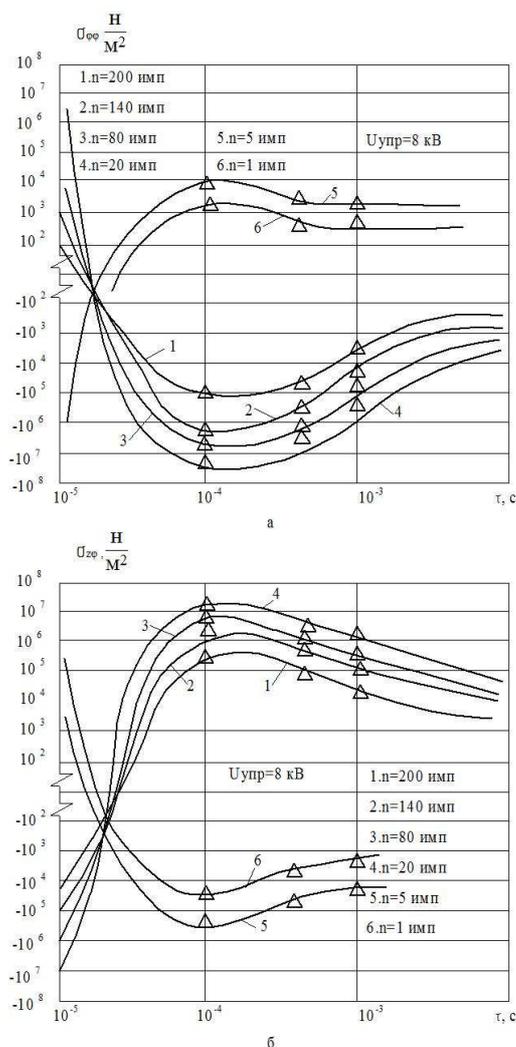


Рис. 4. Зависимость максимальных нормальных $\sigma_{\phi\phi}$ (а) и касательных $\sigma_{z\phi}$ (б) напряжений, полученных экспериментально-теоретическим методом, от времени действия работы ПИУ (1 – 2,2 кВт; 2 – 1,1 кВт; 3 – 0,95 кВт; 4 – 0,65 кВт)

При этом температура в месте действия электронного потока (рис. 3, б) также зависит от времени действия и числа срабатываний электронной пушки. Максимальные температуры реализуются при длительности импульса 10^{-3} с и наибольшем числе срабатываний электронного источника $n = 200$ (рис. 3, б), когда максимальные значения температур достигают значений порядка 850 К.

Температурные напряжения как нормальные, так и касательные определялись теоретическим методом по величине температур и перемещений.

Так, на рис. 4, а, показаны нормальные $\sigma_{\text{фф}}$ температурные напряжения при различных временах действия электронного потока с постоянной частотой 0,5 Гц и различным числом срабатываний: 1 – $n = 200$ имп, 2 – $n = 100$ имп, 3 – $n = 40$ имп, 4 – $n = 5$ имп, 5 – $n = 1$ имп.

Видно, что при большом числе срабатываний нормальные напряжения значительные по величине и отрицательные по знаку, при малом числе импульсов они положительны и незначительны по величине, так как они локализованы в малом объеме и не существенно влияют на процесс макродеформирования.

Для касательных температурных напряжений характер распределения близок, но при большом числе срабатываний реализуются растягивающие ее напряжения, а при малом – сжимающие (рис. 4, б). Величины напряжения приближаются к 10^7 н/м², что говорит о возможности реализации термоусталостных эффектов при длительном их действии.

Выводы

Показана адекватность теоретического и экспериментального исследования, наибольшее совпадение результатов реализуется для экспериментально-теоретического исследования как при сравнении с теорией, так и практическими результатами, что говорит о жизненности предложенной модели.

Список литературы

1. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] Кн. 1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. — 596 с.
2. Костюк, Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст] Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования / Г.И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. — 482 с.
3. Белан, Н.В. Физические основы стойкости электродов плазменных ускорителей и технологических плазменных устройств [Текст]: учеб. для вузов / Н.В. Белан, Г.И. Костюк, Е.П. Мышелов – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1986. – 206 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Поступила в редакцию 07.06.2013

Працездатність джерела іонів для отримання наноструктур

Наведено результати теоретичного, експериментально-теоретичного і експериментального досліджень динаміки температур і напружень, а також переміщень елементів іонно-оптичної системи в режимі запуску джерела іонів на базі плазмово-іонного прискорювача.

Ключові слова: плазмово-іонні прискорювачі, іонно-оптична система.

The efficiency of the ion source to produce nanostructures

The results of theoretical, experimental, theoretical and experimental studies of the dynamics of temperature and stresses and displacements of the ion optical system from the start of the ion source based on plasma-ion accelerator.

Keywords: plasma-ion accelerators, ion-optical system.