

роорганізмів. Ці порівняння підтверджують також статус рівняння (7) як визначального рівняння напруженого стану у довільних градієнтних течіях розведеної суспензії вірусів у воді. Отже, рівняння (7)–(9) можуть бути математичною моделлю реологічного вивчення вірусів замість моделі Саїто–Шерага [2, 3] при використанні віскозиметрів з різною геометрією течії у їх робочій зоні.

1. Yang J. T. Non-Newtonian viscosity and flow birefringence in dilute suspension of rigid particles: tobacco mosaic virus // J. Amer. Chem. Soc. – 1961. – **83**. – P. 1316–1324.
2. Saito N. The effect of the Brownian motion on the viscosity of solution of macromolecules. I. Ellipsoid of revolution // J. Phys. Soc. Japan. – 1951. – **6**. – P. 296–302.
3. Sheraga H. A. Non-Newtonian viscosity of solutions of ellipsoidal particle // J. Chem. Phys. – 1951. – **23**. – P. 1526–1532.
4. Таран Е. Ю. Структурно-феноменологическая реология разбавленных суспензий: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.05. – Харьков, 1994. – 346 с.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. – Москва: Гостехиздат, 1954. – 795 с.
6. Jeffery G. B. The motion of ellipsoidal particles immersed in a viscous fluid // Proc. Roy. Soc. – 1922. – **A102**. – P. 161–169.
7. Peterlin A. Über die Viskosität von verdünnten Lösungen und Suspensionen in Abhängigkeit von der Teilchenform // Z. Physik. – 1938. – **19**. – S. 289–306.
8. Einstein A. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen // Ann. Physik. – 1906. – **19**. – S. 289–306.

Київський національний університет
ім. Тараса Шевченка

Надійшло до редакції 02.04.2008

УДК 537.533

© 2008

В. А. Гутык

Исследование явления запаздывания зажигания высоковольтного тлеющего разряда для повышения рабочего давления газоразрядных электронных пушек

(Представлено академиком НАН Украины М. И. Гасиком)

The results of studies of the time of retardation t_r of the ignition of a high-voltage glow discharge on the operation of low-vacuum gas-discharge electronic guns (LGEG) with a hollow anode in the pulse mode are given. It is shown that the time t_r consists of the statistical time of retardation t_s and the time of formation t_f . Dependences of the time t_r on various parameters are found. The method of using the time of retardation to increase the working pressure of LGEG by a diminution of the steepness of their volt-ampere characteristics $S = \Delta I / \Delta U$ is offered and experimentally confirmed at the high-voltage pulse length $t_p < t_r$.

Електронні пушки ефективно преобразовують електричну енергію в інші види енергії: теплову, радіаційну і мікрохвильову, дозволяючи отримувати на поверхні матеріалів високі удельні потужності 10^8 – 10^{11} Вт/м² [1, 2]. Ці властивості електронних пушок відкрили можливість використання їх в різних електронно-лучевих технологіях (ЕЛТ) в високому вакуумі для рішення багатьох технічних завдань [1–5]. В останнє

десятилетие ЭЛТ начинают использовать в среднем и низком вакууме для получения покрытий в среде реакционного газа, выращивания кристаллов, накачки лазеров, модификации поверхности и ряда других. При этом получение электронных пучков осуществляется в высоком вакууме, а их использование — в низком [1, 3–5, 7]. Существующие электронные пушки работают при давлениях до 10 Па и не позволяют реализовывать ЭЛТ в среднем и низком вакууме без использования специальных устройств вывода электронных пучков в технологическую камеру [1, 3]. Однако эти устройства усложняют используемое оборудование, увеличивают его вес, стоимость и энергопотребление. Это ограничивает применение электронных пучков в низковакуумных технологиях и приводит к проблеме создания низковакуумных электронных пушек. Решение ее открывает возможность реализации целого направления низковакуумных ЭЛТ и является актуальным. Перспективным направлением решения проблемы является создание низковакуумных газоразрядных электронных пушек (НГЭП) на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) для работы в диапазоне давлений 10–1000 Па [6–9]. Импульсный режим работы НГЭП, как показывают исследования [8], имеет свои специфические особенности, которые предлагается использовать для решения поставленной проблемы.

Целью работы является установление новых закономерностей при работе НГЭП на основе ВТР в импульсном режиме и использование их для повышения рабочего давления.

Методы. Исследования проводились на вакуумной установке с применением НГЭП типа ЭПП-6 [8, 9]. Газоразрядная электронная пушка на основе ВТР имела плоский холодный алюминиевый катод диаметром $d_k = 10^{-2}$ м, межэлектродное расстояние — $L_{ак} = 2 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр анодного отверстия — $d_a = 8 \cdot 10^{-3}$ м. Применялась схема и методика измерений характеристик НГЭП в импульсном режиме, описанная ранее в [8, 11].

Исследования проводились в импульсном режиме с использованием тиристорного, высоковольтного, импульсного генератора (ВИГ). Длительность импульса напряжения — 1 мкс, 5 мкс, 10 мкс, 20 мкс и задавалась сменой LC линии, частота следования — 100 Гц. Была предусмотрена моноимпульсная работа ВИГ. Измерение высоковольтного импульса напряжения и тока производилось осциллографическим методом. Сигнал снимался с безындуктивных сопротивлений на двуканальный осциллограф типа Tektronix TDS 210 с выходом на принтер. На катод пушки через балластное сопротивление $R_б$ подавался высоковольтный импульс напряжения отрицательной полярности. Анодный узел пушки был заземлен через мало индуктивный коаксиальный шунт, служащий для измерения тока разряда. В заанодном пространстве электронный пучок попадал в коллектор. Через иллюминатор, расположенный на боковой стенке вакуумной камеры, с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-29 измерялись параметры ЭП при его движении к коллектору. Энергетические параметры ЭП и пушки измерялись с использованием калориметрического устройства [9].

Результаты исследований и их обсуждение. Повышение давления ($P_2 > P_1$) при работе НГЭП приводит к росту тока ΔI при постоянном изменении ускоряющего напряжения $\Delta U = \text{const}$ и к возрастанию крутизны $S = \Delta I / \Delta U$ вольт-амперных характеристик (ВАХ) пушки (рис. 1), так как с увеличением давления $S_2 = \Delta I_2 / \Delta U > S_1 = \Delta I_1 / \Delta U$. Поэтому проблема повышения рабочего давления НГЭП может быть решена путем снижения крутизны S ВАХ с увеличением давления P за счет уменьшения или ограничения тока ΔI при напряжении $U = \text{const}$ высоковольтного источника питания.

При экспериментальном исследовании НГЭП в импульсном режиме обнаружено наличие времени запаздывания импульса тока после подачи импульса напряжения. Измерение

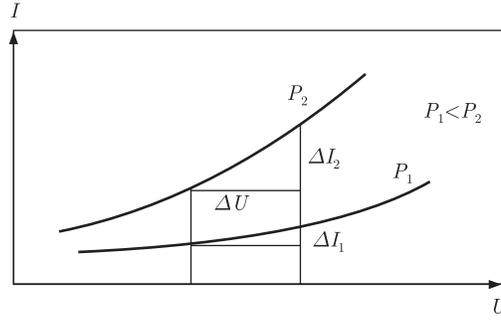


Рис. 1. ВАХ для газоразрядной электронной пушки с полым анодом на основе высоковольтного тлеющего разряда при различных давлениях

времени запаздывания t_3 производилось по осциллограммам импульсов напряжения U и тока I на уровне импульса напряжения $U_{из} = 0,707U_{max}$.

Теоретический анализ результатов исследований показал, что время запаздывания $t_3 = t_c + t_\Phi$ включает две составляющие: статистическое время запаздывания t_c импульса тока после подачи импульса напряжения и время формирования t_Φ импульса тока до установившегося значения.

Время запаздывания t_c в НГЭП рассчитывалось по следующей формуле:

$$t_c = \Phi^{-1} v_e^{-1} = \left\{ 1 - \left\{ \gamma \left[\exp \left(\int_0^{x_0} \alpha dx \right) \right] \right\}^{-1} \right\}^{-1} \left[t^{-1} \ln \left(\frac{K}{k} \right) \right]^{-1} \approx$$

$$\approx [1 - \{1 + [\gamma_a (\exp(\eta_a U_a) - 1) - \gamma_3 (\exp(\eta_3 U_3) - 1)]\}^{-1}]^{-1} \left[t^{-1} \ln \left(\frac{K}{k} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где Φ — вероятность зажигания ВТР; $v_e = t^{-1} \ln(K/k)$ — скорость образования первичных электронов; α — коэффициент объемной ионизации электронов; γ — коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии материала; γ_a и γ_3 — соответственно коэффициенты вторичной ионно-электронной эмиссии для анодного напряжения U_a и напряжения зажигания U_3 ; η_a — коэффициент ионизации электронами при анодном напряжении U_a ; η_3 — коэффициент ионизации электронами при напряжении зажигания U_3 ; X — расстояние, пройденное электроном; t — время начала зажигания ВТР; K — общее число испытаний; k — число испытаний, когда вероятность появления $t_c > t$ равна k/K . За $x_0 = (1/\alpha) \ln(1 + 1/\gamma)$ принималось минимальное расстояние от катода по осевой линии, где выполняется условие зажигания ВТР и будет располагаться виртуальный анод.

Для оценки зависимости t_c от ускоряющего напряжения U_a использовалась полученная из выражения (1) функция

$$t_c = t_{c0} \exp \left[-A \left(\frac{U_a}{U_3} - 1 \right) \right], \quad (2)$$

где t_{c0} — статистическое время запаздывания при $U_a = U_3$; A — постоянная, зависящая от геометрических размеров и формы электродов НГЭП. Численное значение постоянной для исследуемой электронной пушки составляло $A = 0,239$.

Проводились экспериментальные исследования влияния давления и рода газа на статистическое время запаздывания t_c зажигания ВТР. На рис. 2 построены экспериментальные

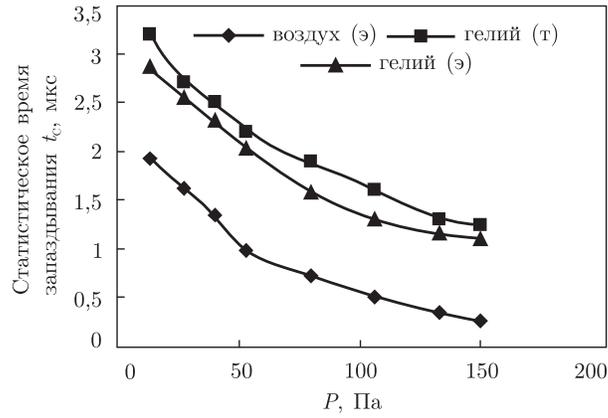


Рис. 2. Зависимости времени запаздывания t_c от давления и рода газа ($t_{и} = 20$ мкс; $U_a = 15$ кВ; (т) — теретическая и (э) — экспериментальные зависимости $t_c = f(P)$)

кривые изменения времени t_c для НГЭП в диапазоне давлений 20–150 Па в гелии и в воздухе. Амплитуда импульса напряжения поддерживалась постоянной и составляла $U_a = 15$ кВ. Экспериментально было подтверждено наличие статистического времени запаздывания t_c в НГЭП. В диапазоне давлений 20–150 Па для гелия величина t_c изменялась в диапазоне 2,8–1,2 мкс, а для воздуха — 1,9–0,3 мкс. Уменьшение статистического времени запаздывания наблюдалось при увеличении давления P , ускоряющего напряжения U_a и массы молекул рабочего газа. Это связано с ростом α при $U_a = \text{const}$, что приводит к увеличению Φ и v_e , а, согласно (1), и к уменьшению t_c . Теоретически рассчитанная зависимость $t_c = f(P)$ для условий эксперимента (кривая “гелий (т)” на рис. 2) удовлетворительно совпадает с экспериментальной кривой (“гелий (э)”).

Снижение t_c может быть достигнуто путем увеличения скорости образования первичных электронов v_e за счет: конструкции пушки, выбора рабочего газа или использования внешнего ионизатора.

Для применения существующей теории расчета времени формирования t_f разряда [9, 10] к НГЭП предложено вводить в расчеты виртуальный анод, располагающийся на расстоянии x_0 .

Общий ток катода $i(t)$ в момент времени t после подачи напряжения U_a определяется выражением

$$i(t) = i_0 + \gamma[\exp(\eta_i U_a) - 1]i(t - \tau_i) = i_0 + (G + 1)i(t - \tau_i), \quad (3)$$

где i_0 — ток первичных электронов, выходящих из катода; η_i — коэффициент ионизации; τ_i — среднее время движения положительного иона от анода к катоду; $G = \gamma[\exp(\eta_i U_a) - 1] - 1$.

Для времени $t \gg \tau_i$ общий электронный ток из катода равен

$$i(t) \approx i_0 + (G + 1) \left[i(t) - \frac{di(t)}{dt} \tau_i \right] \Rightarrow \int_{i_0}^{i(t)} \frac{di(t)}{i_0 + Gi(t)} = \int_0^t \frac{dt}{(1 + G)\tau_i} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ln \left[\frac{i_0 + Gi(t)}{(1 + G)i_0} \right] = \frac{G}{G + 1} \frac{t}{\tau_i}. \quad (4)$$

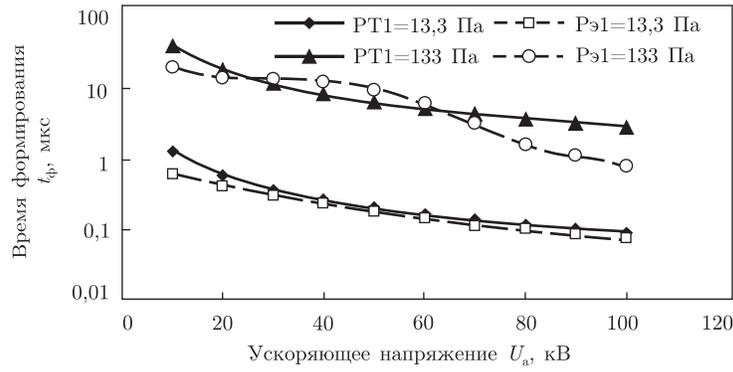


Рис. 3. Зависимости времени формирования t_{ϕ} от напряжения U_a и давления P гелия, где P_T — теоретически рассчитанные кривые, а P_{Σ} — экспериментально измеренные кривые при $t_{и} = 20$ мкс

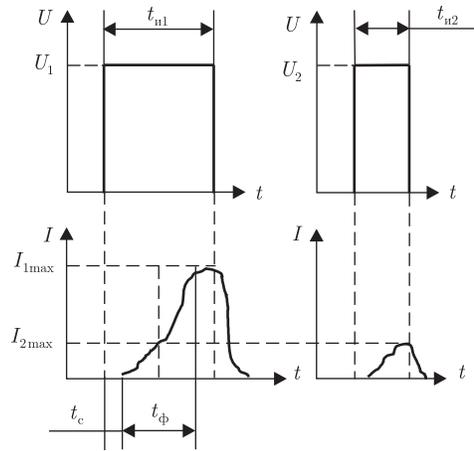


Рис. 4. Метод повышения рабочего давления НГЭП, основанный на уменьшении амплитуды импульса тока ($I_{2\max} \ll I_{1\max}$) при работе с длительностью импульса ускоряющего напряжения $t_{и2} < t_c + t_{\phi}$

Период времени, необходимый для нарастания тока разряда от i_0 до i_N , обозначим через t_{ϕ} и из (4) находим выражение, описывающее это время:

$$t_{\phi} = \frac{\tau_i}{G} \ln \left(1 + G \frac{i_N}{i_0} \right). \quad (5)$$

С применением этой теории было рассчитано время формирования разряда t_{ϕ} для НГЭП, работающей в гелии для диапазона ускоряющих напряжений от 10–100 кВ (рис. 3). Результаты расчетов показывают, что повышение ускоряющего напряжения U_a приводит к снижению времени формирования t_{ϕ} ВТР.

Экспериментально измеренные зависимости времени формирования t_{ϕ} от ускоряющего напряжения U_a при различных давлениях гелия P для длительности импульса $t_{и} = 20$ мкс приведены на рис. 4. Время формирования рассчитывалось по осциллограммам импульса тока. Оно соответствовало времени, в течение которого изменение тока происходило в диапазоне $(0,1-0,9)I_a$ амплитудного значения импульса тока.

Экспериментальные измерения показали следующее. Увеличение времени формирования t_{ϕ} наблюдается при уменьшении U_a и γ , а также при росте давления P .

Исследование существования времени запаздывания $t_3 = t_c + t_\phi$ при работе НГЭП, обоснованное теоретически и подтвержденное экспериментально, открывает направление повышения рабочего давления электронных пушек этого типа, основанное на снижении крутизны $S = \Delta I / \Delta U$ ВАХ путем работы при длительностях импульса ускоряющего напряжения $t_n < t_c + t_\phi$. Так, при работе НГЭП в режиме с длительностью импульса напряжения $t_n = 5$ мкс, меньшей, чем время запаздывания разряда $t_3 = 8,4$ мкс при $P = 390$ Па в гелии удавалось снизить более чем на порядок амплитудное значение тока. Полученное экспериментально ограничение амплитудного значения импульсного тока при работе ЭГП очевидно связано с тем, что ВТР за указанный промежуток времени не успел сформироваться.

В заключение отметим основные результаты работы.

1. При работе газоразрядных электронных пушек с полым анодом и холодным катодом наблюдается время запаздывания зажигания ВТР $t_3 = t_c + t_\phi$, состоящее из статистического времени запаздывания t_c и времени формирования t_ϕ . Область значений t_3 для рассмотренных условий находится в диапазоне 10^{-8} – 10^{-4} с. Она зависит от величины ускоряющего напряжения, давления и рода газа, конструктивных параметров электронной пушки и ряда других. Приведенные методы расчета времен t_c и t_ϕ позволяют определять и управлять их значением при конструировании НГЭП.

2. Предложен и экспериментально обоснован метод повышения рабочего давления НГЭП за счет снижения крутизны $S = \Delta I / \Delta U$ ВАХ с ростом давления путем работы с длительностями импульса ускоряющего напряжения $t_n < t_c + t_\phi$, меньше суммы статистического времени и времени формирования тока разряда.

Работа выполнена под научным руководством акад. НАН Украины М. И. Гасика.

1. Миллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология / Пер. с нем. – Москва: Энергия, 1980. – 528 с.
2. Патон Б. Е., Тригуб М. П., Козлятин Д. А. и др. Электронно-лучевая плавка. – Киев: Наук. думка, 1997. – 265 с.
3. Мощные электронные пушки для электронно-лучевой технологии и системы питания к ним: Сб. статей. Тр. ВЭИ. Вып. 80. – Москва: Энергия, 1970. – 272 с.
4. Новиков А. А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
5. Молоковский С. И., Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. – Ленинград: Энергия, 1972. – 274 с.
6. Ульянов К. Н. Теория высоковольтного тлеющего разряда // Теплофизика выс. температур. – 1978. – 16, № 6. – С. 1121–1129.
7. Ruzhin Yu. Ya., Oraevsky V. N., Tutyk V. A. The active experiments in the stratosphere with the electron beams injection // Adv. Space Res. – 1993. – 13, No 10. – P. 122–124.
8. Тутык В. А. Импульсный режим работы электронных газоразрядных пушек с полым анодом // Системные технологии. – 2003. – Вып. 3(26). – С. 151–160.
9. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. – Москва; Ленинград: Гостехиздат, 1952. – 432 с.
10. Acton J. R., Swift J. D. Cold cathode discharge tubes. – New York: Acad. Press, 1963. – 489 p.
11. Тутык В. А., Гасик М. И. Энергетические параметры газоразрядных электронных пушек, используемых для оплавления поверхности изделий // Электротехнология. – 2007. – № 10. – С. 24–30.

Национальная металлургическая академия Украины, Днепрпетровск

Поступило в редакцию 31.03.2008