

Д.В. Суворов, В.А. Коротченко

## ВЛИЯНИЕ КРУТИЗНЫ ФРОНТА НАПРЯЖЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА

*Численным моделированием в рамках гидродинамического приближения определена зависимость степени перенапряжения, достигаемой в объемном газовом разряде, от крутизны фронта нарастания напряжения. Для условий, соответствующих азотному лазеру с поперечным разрядом, установлено, что рост максимума инверсий уровней  $S^3P_u - B^3P_g$  существенно (в 2 - 3 раза) замедляется с увеличением крутизны фронта напряжения в диапазоне  $10^{11} - 10^{13}$  В/с или значения обострительной емкости от 1 до 10 нФ. Показано существование оптимальной скорости нарастания напряжения на промежутке, при которой эффективность лазера максимальна.*

**Введение.** Объемный высоковольтный разряд [1, 2] находит широкое применение в системах накачки импульсных газовых лазеров УФ и ВУФ диапазонов. Энергия импульса излучения является одним из важнейших параметров лазера. Она пропорциональна инверсии - разности числа частиц газа, находящихся на верхнем и нижнем лазерных уровнях [3, 11]. Поскольку время жизни верхнего уровня лазеров составляет, как правило, единицы – десятки наносекунд, чем физически ограничено время накачки, то система накачки должна обеспечивать максимальную инверсию за указанный интервал времени. Для решения этой задачи используют газоразрядные системы с большой степенью перенапряжения, достигаемой уменьшением переднего фронта импульса напряжения до единиц - десятков наносекунд [2, 4]. Вопрос о влиянии длительности фронта на характеристики разряда изучен недостаточно и поэтому является целью настоящей работы.

### 1. Самосогласованная модель разряда.

Разработанная модель объемного разряда [12] основана на гидродинамическом приближении, согласно которому балансы заряженных частиц описываются уравнениями непрерывности, аналогичными по форме уравнениям газовой динамики [5, 6].

На начальном этапе развития объемного разряда существует стадия, в течение которой основным вторичным процессом является фотоэмиссия электронов с катода [7]. Для расчета фотопроцессов на катоде в работе [7] использован интегральный коэффициент фотоэмиссии, значение которого варьировалось в широких пределах порядка  $10^{-4} - 10^{-6}$ . Отличительной особенностью модели, использованной в настоящей работе, является учет фотоэмиссии электронов с катода через расчет динамики спонтанного излучения разряда отдельно для каждой спек-

тральной линии и спектральный квантовый выход материала катода [8]. Такой подход позволяет более точно моделировать динамику реальных физических процессов.

Существенным отличием использованной модели является расчет электрического поля в промежутке через уравнение сохранения полного тока совместно с уравнениями внешней цепи. Этот момент представляется важным, поскольку в условиях, соответствующих объемному разряду, численный алгоритм модели с расчетом поля по уравнению Пуассона является неустойчивым, что вынуждает исследователей прибегать к допущениям и искусственно задавать разность потенциалов на электродах некоторой функцией от времени [13].

**2. Схема замещения контура накачки.** Для изучения влияния фронта нарастания напряжения на характеристики объемного разряда реальная схема контура накачки преобразована к виду, представленному на рисунке 1.

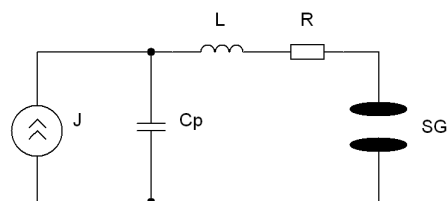


Рисунок 1 – замещения контура накачки: SG - разрядный промежуток,  $C_p$  - обострительная емкость, L - паразитная индуктивность, R - сопротивление контура, J - источник тока

Электрические процессы в схеме описываются системой уравнений:

$$U_a(t) = U_{C_p}(t) - I_D(t)R - L \frac{dI_D(t)}{dt}, \quad (1)$$

$$U_{Cp}(t) = \frac{1}{Cp} \int (J - I_D(t)) dt$$

при начальном условии:  $U_{Cp}(0) = 0$ , где  $U_{Cp}$  – напряжение на обострительной емкости,  $U_a$ ,  $I_D$  – напряжение и ток разрядного промежутка.

Условия численного эксперимента выбраны в соответствии с параметрами азотного лазера с поперечным разрядом. Величина обострительной емкости варьировалась в пределах 1 - 8 нФ. Крутизна переднего фронта задавалась источником тока  $J$  и изменялась в пределах  $10^{11}$  -  $10^{13}$  В/с (максимальная величина тока  $J$  ограничивается параметрами газоразрядных коммутаторов на уровне единиц-десятков килоампер). Индуктивность разрядного контура – 1 нГн, сопротивление – 10 мОм. Параметры разрядного промежутка: площадь электродов –  $5,4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>, давление – 760 Торр, межэлектродное расстояние – 1,5 см, состав газовой смеси – 95% гелия и 5% азота, материал катода – медь, коэффициенты вторичной ион-электронной эмиссии для гелия и азота полагались равными 0,02 и 0,05 соответственно, начальная концентрация электронов –  $10^7$  см<sup>-3</sup>.

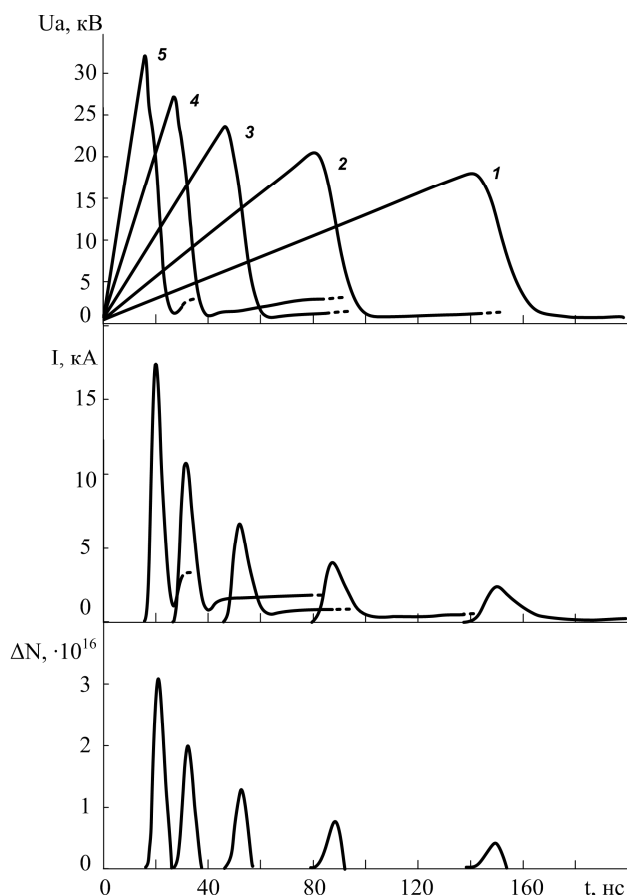
**3. Влияние скорости нарастания напряжения на электродах и величины обострительной емкости на электродинамические характеристики разряда.** Степень перенапряжения  $\Lambda$  вычисляется по соотношению:

$$\Lambda = \frac{U - U_C}{U_C} \quad (2)$$

где  $U$  и  $U_C$  – напряжение на промежутке и статическое напряжение зажигания разряда.

Величина перенапряжения определяет максимальную приведенную напряженность электрического поля в объеме  $E/p$ , функциями которой являются частоты основных элементарных процессов (упругих соударений, возбуждения и ионизации), определяющих эффективность той или иной газоразрядной системы.

На переднем фронте импульса напряжения степень перенапряжения нарастает до того момента, когда ток разряда достигает величины, превышающей ток заряда обострительной емкости, и напряжение между электродами соответственно уменьшается. Степень достигаемого перенапряжения увеличивается с ростом крутизны переднего фронта импульса. В результате численного эксперимента получены временные диаграммы напряжения, тока и инверсии заселенностей уровней  $S^3P_u - V^3P_g$  в промежутке для различных скоростей нарастания напряжения между электродами (рисунок 2).

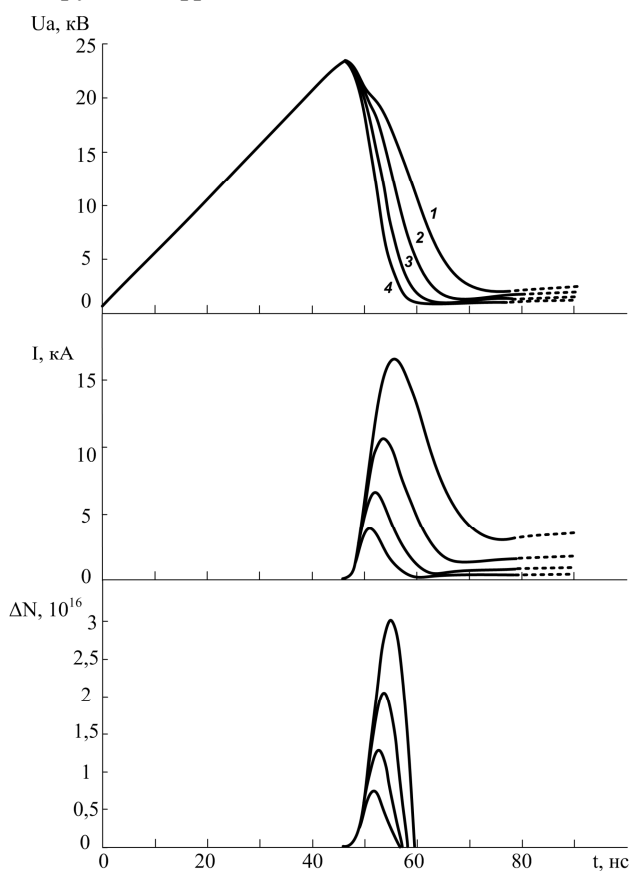


**Рисунок 2 – Напряжение, ток и инверсия в промежутке при различных скоростях нарастания напряжения (В/с): 1 –  $1,25 \cdot 10^{11}$ ; 2 –  $2,5 \cdot 10^{11}$ ; 3 –  $5 \cdot 10^{11}$ ; 4 –  $10^{12}$ ; 5 –  $2 \cdot 10^{12}$ . Обострительная емкость – 2 нФ, инверсия  $\Delta N$  – абсолютная разность количеств частиц в объеме промежутка на верхнем и нижнем лазерных уровнях возбуждения**

Из временных диаграмм, представленных на рисунке 2, следует, что с ростом крутизны фронта достигаемое напряжение на электродах увеличивается. Степень перенапряжения определяется динамикой роста проводимости промежутка за счет ионизации. В условиях экспоненциального размножения электронов во времени при ударной ионизации проводимость промежутка увеличивается по такому же закону. В показателе экспоненты присутствует коэффициент ионизации, зависящий от приведенной напряженности электрического поля, пропорциональной на стадии формирования разряда напряжению между электродами. В случае крутого фронта уровень проводимости, достаточный для прекращения заряда обострительной емкости, достигается при более высоком напряжении, но за меньший интервал времени. Отметим, что до начала спада напряжения на промежутке электрическое поле

внутри него искажается пространственным зарядом ионов незначительно и остается практически однородным.

С увеличением крутизны фронта растет амплитудное значение тока разряда, что связано с увеличением достигаемого напряжения и соответственно - с ростом напряженности поля внутри промежутка, коэффициента ионизации и скорости движения электронов. На временных диаграммах видно, что длительность спада напряжения, а также длительность импульса тока на полувысоте слабо увеличиваются с уменьшением крутизны фронта.

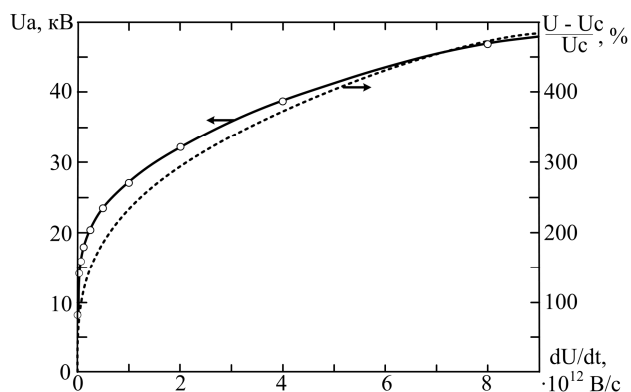


**Рисунок 3 – Напряжение, ток и инверсия в промежутке при различных величинах обострительной емкости, нФ: 1 – 8, 2 – 4, 3 – 2, 4 – 1 (крутизна фронта напряжения -  $5 \cdot 10^{11}$  В/с).**

Получены временные диаграммы напряжения, тока и инверсии в промежутке при ряде значений обострительной емкости (рисунок 3). Из диаграмм следует, что при постоянной скорости нарастания напряжения вариации емкости не приводят к изменению достигаемого перенапряжения. С ростом величины обострительной емкости увеличивается длительность спада напряжения на промежутке. Это обусловлено тем, что амплитудное значение тока и его длительность на полувысоте увеличиваются не пропор-

ционально емкости и для её разряда необходимо больше времени.

Результаты моделирования (рисунки 2, 3) показывают, что достигаемая степень перенапряжения, в основном, определяется скоростью нарастания напряжения независимо от накопительной емкости. Зависимости максимального напряжения и степени перенапряжения от крутизны фронта представлены на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Зависимости максимального напряжения на промежутке и степени перенапряжения (пунктир) от крутизны фронта**

Зависимость степени перенапряжения от крутизны фронта в диапазоне  $10^{11}$  -  $8 \cdot 10^{12}$  В/с, с погрешностью не более 2 %, может быть аппроксимирована простым соотношением:

$$\frac{U - U_c}{U_c} = 2,35 \cdot 10^{-4} \sqrt[3]{\frac{dU}{dt}} \quad (3)$$

Временная зависимость энергии, вводимой в разряд (интеграл произведения тока на напряжение), содержит области резкого и медленного роста энергии. За границу раздела областей прием точку, в которой крутизна зависимости уменьшается на порядок. Точка соответствует завершению спада напряжения и тока разряда. Значение энергии в точке фактически равно энергии формирования разряда. Эту величину целесообразно использовать для оценки эффективности газоразрядной системы.

**4. Влияние скорости нарастания напряжения на электродах и величины обострительной емкости на характеристики лазера на молекулярном азоте.** Основным техническим приложением объемного разряда являются системы накачки импульсных газовых лазеров [9, 10]. Одним из важнейших параметров лазера является энергия импульса лазерного излучения. Она пропорциональна максимальному значению инверсии. В лазере на молекулярном азоте основная генерация излучения происходит на переходах  $C^3P_u - B^3P_g$  (вторая положительная сис-

тема азота). В настоящей работе исследована динамика инверсной заселенности этих уровней.

Другим важным параметром лазера является его КПД. В общем случае для вычисления КПД лазерной системы необходим расчет распространения излучения в оптическом резонаторе, а также динамики взаимодействия с зеркалами и средой, что выходит за рамки настоящей работы. Поэтому ограничимся определением эффективности системы накачки, в качестве которой прием отношение временного максимума плотности инверсии к энергии формирования объемного разряда.

Из приведенных выше временных диаграмм (рисунок 3) видно, что увеличение обострительной емкости при постоянной скорости нарастания напряжения на промежутке ( $5 \cdot 10^{11}$  В/с) приводит к росту максимума инверсии. Однако эта зависимость (рисунок 5) существенно нелинейна: при увеличении емкости в 2 раза (от 4 до 8 нФ) максимум возрастает всего в 1,45 раза. Поэтому с увеличением емкости существенно уменьшается и эффективность системы накачки. Характер зависимостей, представленных на рис. 5, обусловлен тем, что с увеличением емкости, с одной стороны, возрастает энергия, вводимая в разряд, что приводит к увеличению достигаемой инверсии, а с другой - увеличивается длительность импульса накачки, что приводит к снижению инверсии.

С ростом крутизны переднего фронта при постоянной емкости максимальное значение инверсии увеличивается (рисунок 2), и зависимость также является нелинейной (рисунок 6). Особый интерес представляет зависимость эффективности системы накачки от скорости нарастания напряжения. С увеличением крутизны фронта до  $1 \cdot 10^{12}$  В/с эффективность системы накачки резко растет, достигает максимума в области  $1-2 \cdot 10^{12}$  В/с (что соответствует степени перенапряжения 200-300%), а далее уменьшается. Данная зависимость объясняется действием ряда противоположно направленных факторов. С одной стороны, с ростом скорости нарастания увеличивается достигаемая степень перенапряжения, возрастают напряжение заряда емкости и запасаемая энергия, уменьшается длительность импульса накачки, что приводит к увеличению эффективности накачки. С другой стороны повышение напряжения на промежутке приводит к увеличению приведенной напряженности поля  $E/\rho$  и смещению преимущественного энерговклада от процессов возбуждения к ионизации. Соответственно уменьшается эффективность накачки лазерной системы.

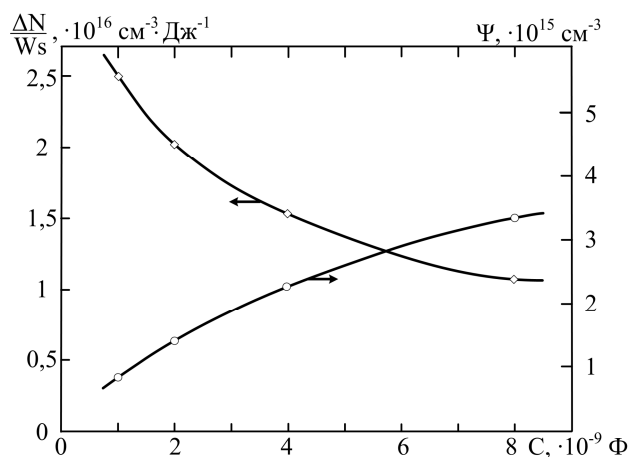


Рисунок 5 – Зависимость максимальной плотности инверсии  $\psi$  и эффективности системы накачки  $\Delta N/W_s$  от величины обострительной емкости при постоянной крутизне фронта  $5 \cdot 10^{11}$  В/с

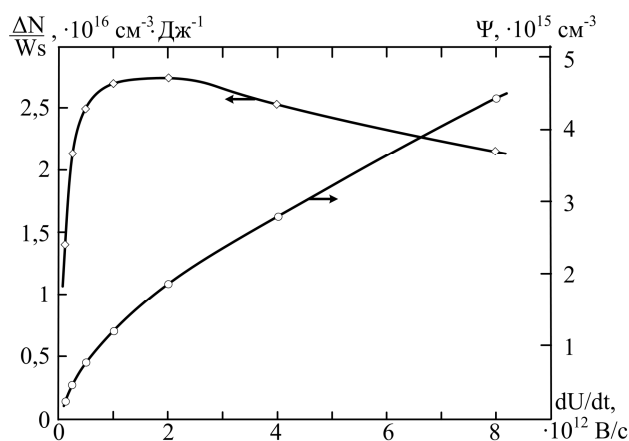


Рисунок 6 – Зависимость максимальной плотности инверсии  $\psi$  и эффективности лазера  $\Delta N/W_s$  от скорости нарастания напряжения на промежутке при постоянном значении емкости – 1 нФ

**Заключение.** Методом численного моделирования установлено, что степень достигаемого перенапряжения является функцией скорости нарастания напряжения на электродах и не зависит от величины разрядной (обострительной) емкости. Предложена аналитическая аппроксимация этой функции.

Полученные расчетные данные позволяют сделать вывод о том, что для повышения эффективности (КПД) лазера целесообразно уменьшать величину обострительной емкости при одновременном увеличении напряжения заряда для сохранения накапливаемой в емкости энергии. Показано, что при постоянной величине обострительной емкости увеличение скорости нарастания напряжения на электродах приводит к повышению энергии излучения. Установлено существование оптимальной скорости нарастания напряжения, при которой эффективность лазера максимальна.

**Библиографический список**

1. Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. Импульсные газовые лазеры. - М.: Наука, 1991. - 272 с.
2. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. - М.: Наука, 2004. - 704 с.
3. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Физические процессы в газовых лазерах. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 152 с.
4. Бакиш Е.Х., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Азотный лазер с накачкой продольным разрядом от индуктивного и емкостного накопителей энергии // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. №12. - С. 1087-1090.
5. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. М.: Атомиздат, 1977. - 384 с.
6. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. - М.: МФТИ, 1997. - 320 с.
7. Осипов В. В., Лисенков В. В. Формирование самостоятельного объемного газового разряда // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып.4. - С. 27-33.
8. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. - М.: Эдиториал УРСС, 2001. - 896 с.
9. Тарасенко В.Ф. Эффективность азотного УФ лазера с накачкой самостоятельным разрядом // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. №6. - С. 489-494.
10. Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. N<sub>2</sub> лазер с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. №5. - С. 441-442.
11. Смит К., Томсон Р. Численное моделирование газовых лазеров -. М.: Мир, 1981. - 515 с.
12. Коротченко В.А., Суворов Д.В. Самосогласованная модель формирования объемного разряда. I. Физико-математическая основа модели // Вестник РГРТА. Вып. 20. - Рязань: РГРТУ, 2007.
13. S. Macheret, M. Shneider, R. Miles. Modeling of Air Plasma Generation by Repetitive High-Voltage Nanosecond Pulses // IEEE Transactions on plasma science. Vol. 30. N. 3. June 2002. - P. 1301-1314.