

Д.В. Суворов, В.А. Коротченко

## ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ РАЗРЯДНОГО КОНТУРА И ПЛОЩАДИ ЭЛЕКТРОДОВ НА ПАРАМЕТРЫ ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА

*Методом численного моделирования исследовано влияние паразитной индуктивности разрядного контура и площади электродов на характеристики объемного разряда для условий азотного лазера. Установлено, что с уменьшением индуктивности разрядного контура от 200 до 2 нГн эффективность лазера существенно (в несколько раз) возрастает, а при дальнейшем уменьшении индуктивности она увеличивается лишь на 20%. С увеличением площади электродов до 5 см<sup>2</sup> максимально достигаемые значения инверсии и эффективности лазера возрастают примерно в два раза, а далее увеличиваются слабо.*

**Введение.** В конструкциях импульсных лазеров на молекулярных газах паразитную индуктивность разрядного контура стремятся свести к минимуму [1]. Индуктивность конструктивно во многом определяется параметрами промежутка и обострительного конденсатора. Повышение емкости конденсатора, как правило, приводит к увеличению его габаритов и собственной индуктивности [2]. В настоящее время отсутствуют точные количественные сведения о требованиях к индуктивности и о её максимально допустимом значении, выше которого эффективность лазера крайне мала. В литературе не приведены также данные о степени влияния площади электродов на параметры разряда.

Целью работы является определение влияния паразитной индуктивности разрядного контура и площади электродов на параметры объемного разряда и на эффективность лазера с поперечным разрядом на молекулярном азоте.

**Система формирования объемного разряда.** Исследовалась система на основе емкостного накопителя энергии [3], электрическая схема которой приведена на рисунке 1. Параметры схемы и разрядного промежутка соответствуют лазеру на молекулярном азоте с накачкой поперечным разрядом: давление – 760 Торр, межэлектродное расстояние – 1,5 см, состав газовой смеси – 95 % гелия и 5 % азота, обострительная емкость – 2 нФ, накопительная – 10 нФ, индуктивность контура накачки – 100 нГн, сопротивление разрядного контура – 10 мОм, начальное напряжение накопительной емкости – 20 кВ, материал катода – медь, коэффициенты вторичной ион-электронной эмиссии для ионов гелия и азота – 0,02 и 0,05 соответственно, начальная концентрация электронов –  $10^6$  см<sup>-3</sup>. Индуктивность разрядного контура варьировалась в пределах 1 – 500 нГн, площадь электродов –  $2 \cdot 10^{-5}$  –  $5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>.

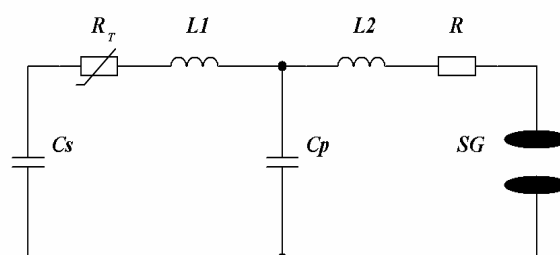


Рисунок 1 – Схема возбуждения объемного разряда:

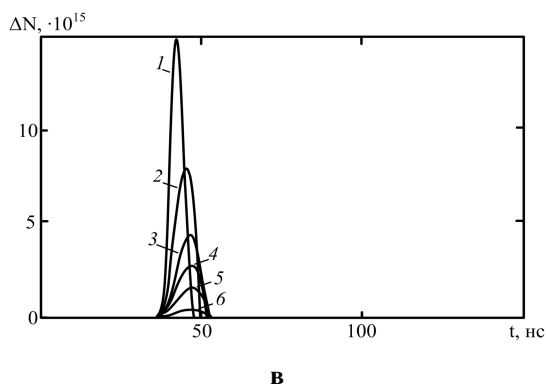
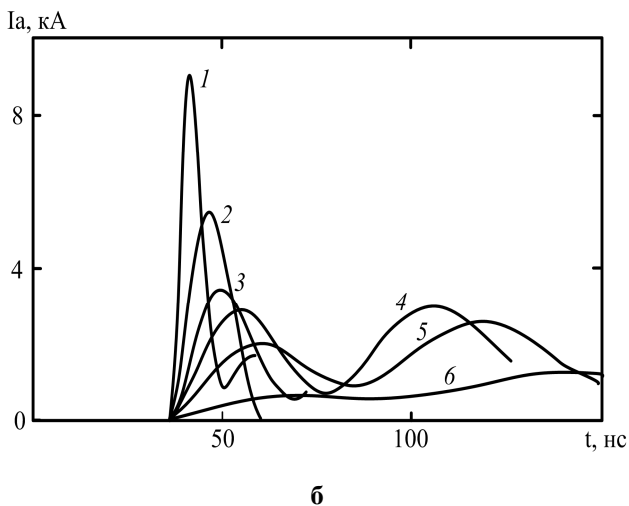
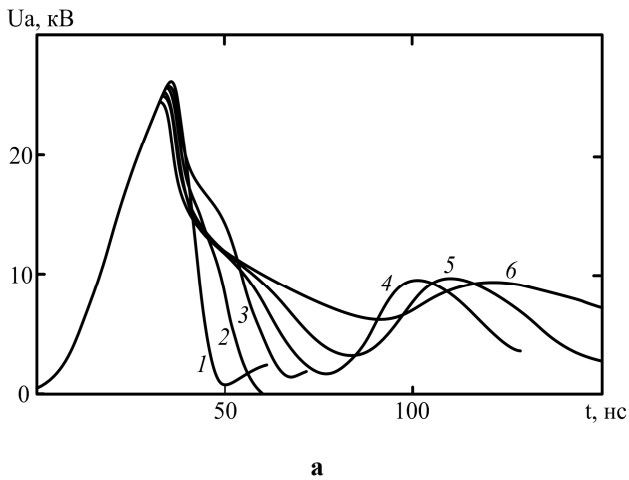
*SG* – разрядный промежуток; *Cs* и *Cp* – накопительная и обострительная ёмкости; *L1* – индуктивность контура накачки; *L2* – паразитная индуктивность разрядного контура; *Rt* и *R* – сопротивление коммутационного тиратрона и контура накачки соответственно

В данной схеме возбуждения разряда параметры переднего фронта импульса напряжения на электродах определяются цепочкой *Cs*-*L1*-*Cp*. Параметры импульса тока разряда в основном зависят от элементов *Cp*, *L2*, и *SG*.

**Влияние индуктивности контура накачки на характеристики разряда.** Методом численного моделирования исследовано влияние паразитной индуктивности разрядного контура на временные характеристики объемного разряда. Численная модель и методика моделирования подробно описаны в [4, 5]. В модели, кроме электрических параметров схемы, учитывались процессы движения заряженных частиц, ионизации, возбуждения, эмиссии электронов из катода и перераспределения потенциала под действием пространственного заряда.

Из результатов моделирования (рисунок 2) следует, что напряжение зажигания разряда (максимальное напряжение на промежутке на рисунке 2, а) практически не зависит от величины индуктивности. Это объясняется тем, что индуктивность оказывает влияние только после

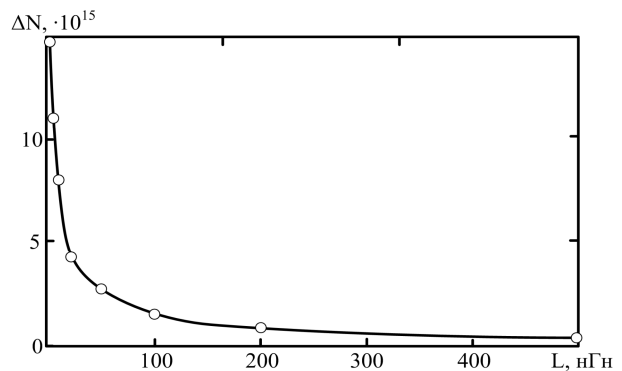
зажигания разряда, замедляя рост тока. После зажигания разряда напряжение на промежутке резко уменьшается за счет падения напряжения на индуктивности. Далее скорость уменьшения напряжения на промежутке снижается пропорционально индуктивности контура. Индуктивность замедляет рост тока в цепи и уменьшает скорость разряда обстрельной емкости.



**Рисунок 2 –** Временные диаграммы напряжения (а), тока разряда (б) и инверсии в объеме промежутка (в) при различных значениях индуктивности  $L_2$ : 1 – 1 ; 2 – 10 ; 3 – 20 ; 4 – 50 ; 5 – 100 ; 6 – 500 (нГн) Площадь электродов –  $5 \text{ см}^2$

При величине индуктивности разрядного контура  $L_2$ , сопоставимой с индуктивностью контура накачки  $L_1$  ( $L_2 \geq 0.5L_1$ ), наблюдается ярко выраженный затухающий колебательный процесс. Существует некоторый диапазон величин  $L_2$  (приблизительно 5-20 нГн), в котором возможно возникновение отрицательных полуволн тока (кривые 2 на рисунке 2, а и 2, б), неблагоприятно сказывающихся на стабильности разряда и долговечности электродов. Более точное определение границ этого диапазона и изучение возможности его смещения выходит за рамки данной работы.

С уменьшением индуктивности разрядного контура увеличиваются амплитуда импульса тока разряда (рисунок 2, б) и скорость ввода энергии в разряд. Последнее объясняет наблюдаемый рост максимума достигаемой инверсии в промежутке при уменьшении индуктивности (рисунок 2, в). Величина максимума сильно зависит от индуктивности разрядного контура в диапазоне 1-50 нГн, а при индуктивности более 100 нГн крутизна этой зависимости существенно уменьшается (рисунок 3).



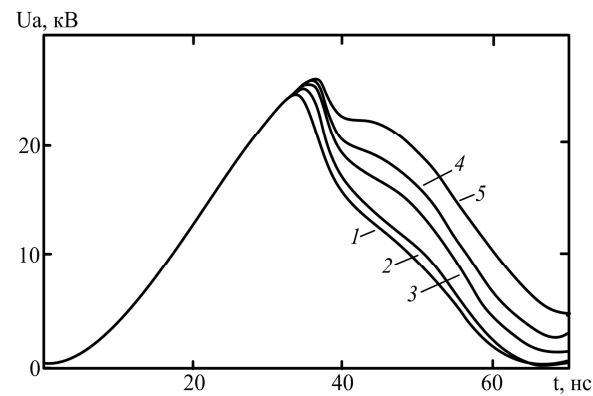
**Рисунок 3 –** Зависимость максимально достигаемой инверсии лазерных уровней  $\text{C}^3\text{P}_u - \text{B}^3\text{P}_g$  в объеме промежутка от величины индуктивности разрядного контура

Эффективность системы накачки лазера, на наш взгляд, целесообразно характеризовать отношением максимально достигаемой инверсии в промежутке к энергии, запасенной в накопительном конденсаторе. Поскольку эта энергия является постоянной, из рисунка 3. следует, что эффективность растет с уменьшением индуктивности разрядного контура. В рассматриваемых условиях при изменении индуктивности от 50 до 1 нГн эффективность лазера возрастает в 6 раз.

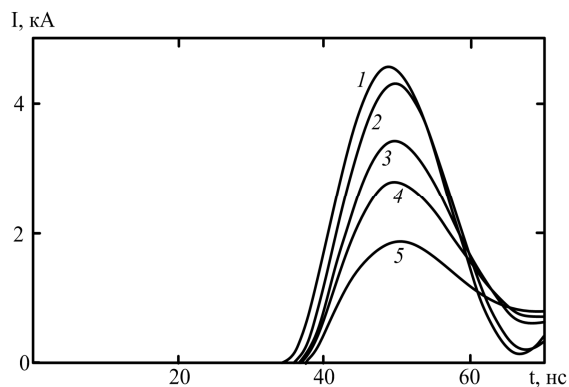
При нулевом значении индуктивности (идеальный случай) максимальное значение инверсии в объеме промежутка равно  $1,58 \cdot 10^{16}$ , что близко к максимуму инверсии при индуктивности 1 нГн –  $1,5 \cdot 10^{16}$ . Таким образом, при величине индуктивности в диапазоне 1..5 нГн практически

достигается теоретически возможный максимум инверсии в объеме промежутка и эффективности системы накачки лазера. Поэтому значительные усилия, направленные на снижение индуктивности менее 1 – 5 нГн, не являются оправданными.

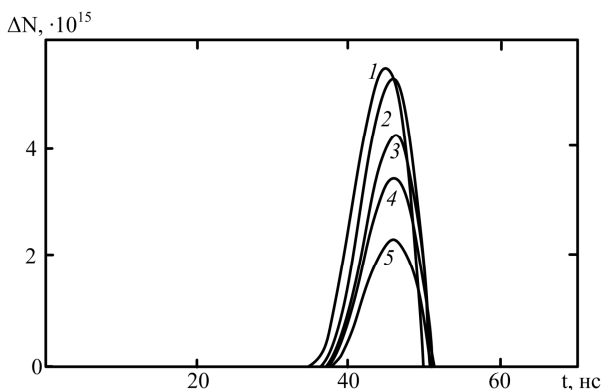
**Влияние площади электродов промежутка на характеристики разряда.** Численно исследованы временные зависимости тока разряда, напряжения на промежутке и инверсии при различных значениях площади электродов в диапазоне 0,2-50 см<sup>2</sup> (рисунок 4).



а



б



в

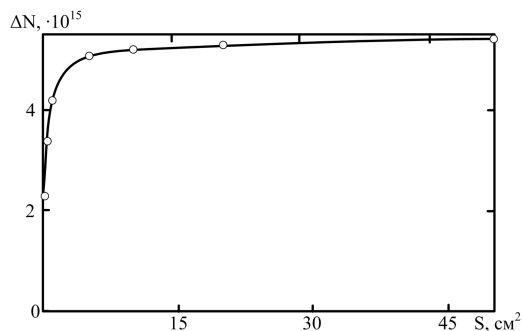
**Рисунок 4 – Временные диаграммы напряжения (а), тока разряда (б) и инверсии в объеме промежутка (в) при различных значениях площади электродов: 1 – 50; 2 – 5; 3 – 1; 4 – 0,5; 5 – 0,2 (см<sup>2</sup>); индуктивность контура – 20 нГн**

Моделирование показало, что при неизменной индуктивности контура увеличение площади до 5 см<sup>2</sup> существенно влияет на параметры разряда: замедляется спад напряжения на электродах, увеличиваются амплитуда импульса тока разряда и величина максимума инверсии (кривые 3,4,5 на рисунке 4). Это обусловлено тем, что при малой площади электродов рост тока разряда ограничивается динамикой ионизационных процессов, а влияние параметров внешней цепи, прежде всего индуктивности контура, уходит на второй план. Малые значения площади электродов соответствуют высокой плотности тока и энергии, вводимой в разряд. В результате увеличивается концентрация заряженных частиц, и на стадии формирования разряда они раньше искажают поле, изменяя электродинамику разряда.

Увеличение площади электродов в диапазоне от 5 до 50 см<sup>2</sup> практически не влияет на интегральные характеристики разряда (кривые 1, 2 на рисунке 4). В этих условиях основным фактором, влияющим на электродинамику разряда, являются параметры внешней цепи (индуктивность разрядного контура).

Максимально достигаемая инверсия с ростом площади электродов до 5 см<sup>2</sup> резко увеличивается (рисунок 5), а далее растет слабо (при увеличении площади до 50 см<sup>2</sup> возрастает примерно на 5 %).

Зависимость показывает, что для достижения максимальной эффективности лазера необходимо, чтобы площадь электродов была выше некоторой пороговой величины (при прочих равных условиях). В рассматриваемом случае она равна примерно 5 см<sup>2</sup>.



**Рисунок 5 – Зависимость максимально достигаемой инверсии в объеме промежутка от площади электродов**

**Заключение.** Проведенные исследования показали, что уменьшение индуктивности разрядного контура в диапазоне 1-50 нГн существенно увеличивает амплитуду тока разряда, скорость ввода энергии в разряд и способствует повышению эффективности азотного лазера. При

индуктивности более 100 нГн эффективность лазера крайне низка вследствие малой скорости ввода энергии в разряд. В случае, когда индуктивность уменьшена до 2 нГн, инверсия составляет примерно 80 % от теоретически возможного максимума при нулевой индуктивности разрядного контура. Если индуктивность разрядного контура сопоставима с индуктивностью контура накачки, наблюдается ярко выраженный затухающий колебательный процесс, в результате которого возможно возникновение отрицательных полуволн тока.

Увеличение площади электродов до 5 см<sup>2</sup> существенно влияет на параметры разряда: замедляется спад напряжения на электродах, возрастают амплитуда импульса тока разряда и величина максимума инверсии (при неизменной индуктивности контура). Дальнейшее увеличение площади электродов до 50 см<sup>2</sup> слабо влияет на интегральные характеристики разряда.

Максимально достигаемая инверсия с ростом площади электродов до 5 см<sup>2</sup> резко увеличи-

вается, а далее растет слабо. Таким образом, для достижения максимальной эффективности лазера при прочих равных условиях необходимо, чтобы площадь электродов была выше некоторой пороговой величины.

#### **Библиографический список**

1. Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. Импульсные газовые лазеры. М.: Наука, 1991. 272 с.
2. Тарасенко В.Ф. Эффективность азотного УФ лазера с накачкой самостоятельным разрядом // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 6. С. 489-494.
3. Осипов В.В., Лисенков В. В. Формирование самостоятельного объемного газового разряда // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып.4. С. 27-33.
4. Коротченко В.А., Суворов Д.В. Самосогласованная модель формирования объемного разряда. I. Физико-математическая основа модели. Вестник РГРТА, вып. 20, Рязань: РГРТУ, 2007.
5. Коротченко В.А., Суворов Д.В. Самосогласованная модель формирования объемного разряда. II. Численная модель формирования разряда. Вестник РГРТА, вып. 21, Рязань: РГРТУ, 2007.