

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет
Кафедра общей физики
Ковальчук Иван Сергеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование характеристик согласования электрической схемы системы
возбуждения индукционного УФ азотного лазера**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19314

Научный руководитель:

Р.А. Ткаченко

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Д.Н. Капуста

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Лазер на колебательных переходах азота с длиной волны 337,1 нм представляет широкий интерес для промышленности, медицины и науки, применяется в фотохимии, спектроскопии, диагностике. Один из часто применяемых методов возбуждения УФ азотных лазеров электрическим разрядом обладает рядом недостатков, связанных с разрушением электродов и необходимостью замены элементов лазера. Поэтому актуальна задача исследования альтернативного метода накачки лазера - импульсного индукционного разряда, который лишен вышеперечисленных проблем.

Для выполнения поставленных задач проведено теоретическое исследование литературных данных по теме импульсного индукционного разряда и активной среды азотного лазера. Найдены параметры согласования электрической схемы возбуждения азотного лазера с ее индуктивно-емкостными параметрами. Подтверждено наличие максимума энергии генерации. Максимальное полученное значение энергии составило 0,44 мДж. Также изучена зависимость КПД лазера от зарядного напряжения.

Ключевые слова: индукционный разряд, УФ азотный лазер.

Оглавление

Введение	3
1 Теоретическая часть	4
1.1 Классификация безэлектродных разрядов	4
1.2 Индукционный разряд	5
1.3 Активная среда	6
2 Экпериментальная часть	8
2.1 Установка для эксперимента	8
3 Результаты и их обсуждение	10
3.1 Выводы про условия накачки	10
3.2 Изучение энергоэффективности установки	12
Заключение	14
Список использованных источников	15

Введение

Лазер на колебательных переходах азота с длиной волны 337,1 нм представляет широкий интерес для промышленности, медицины и науки, применяется в фотохимии, спектроскопии, диагностике.

Одним из часто применяемых методов возбуждения УФ азотных лазеров является накачка сильноточным импульсным электрическим разрядом. Однако, данный метод возбуждения имеет ряд недостатков, вызванных эрозией и разрушением электродов при протекании электрического разряда. В результате чего возникают катодные пятна и стримеры, приводящие к ухудшению качества лазерного пучка и необходимости замены активной смеси и элементов резонатора [1, 2].

Чтобы избежать данных недостатков предлагается альтернативный метод накачки - импульсный индукционный разряд. Данный тип разряда лишен вышеперечисленных проблем в следствии отсутствия электродов как таковых.

Целью работы являлся поиск оптимальных условий возбуждения активной среды путём изменения индуктивно-емкостных характеристик электрической схемы, для оптимизации системы накачки.

Задачи исследования включали в себя:

а) Поиск и изучение литературы по устройству азотных лазеров, схемам их питания, а также возбуждению в активных средах газовых разрядов.

б) Постановка и проведение серии экспериментов по генерации импульсного индукционного разряда в активной среде N_2 лазера на стендовой установке в ИЛФ СО РАН.

в) Анализ полученных данных, представленных в виде изменяемых в ходе эксперимента индуктивно-емкостных характеристик установки, соответствующих им осциллограмм напряжений на емкостях. Сравнение их с предсказаниями теории. А также изучение КПД установки.

1 Теоретическая часть

1.1 Классификация безэлектродных разрядов

Одной из первых работ по исследованию безэлектродных разрядов была работа Бабата [1], в которой он предложил два типа разряда, отличающихся способом возбуждения:

а) Емкостные безэлектродные разряды, создаваемые электрическим полем. В них ток проводимости не замкнут.

б) Вихревые (кольцевые) безэлектродные разряды, индуцируемые переменным магнитным полем. Объем, заполненный ионизованным газом, представляет собой как бы коротко замкнутый вторичный виток трансформатора (рис. 1.1).

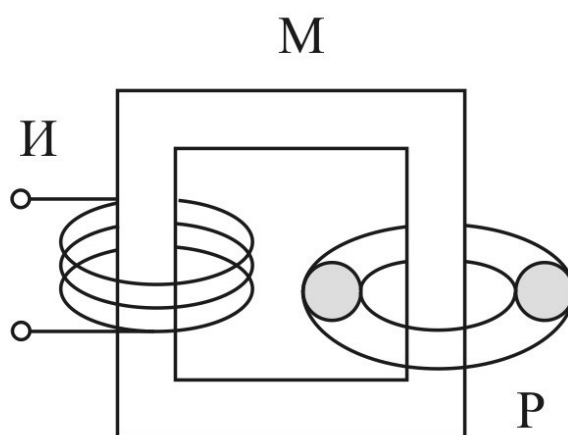


Рисунок 1.1 — Схематичное представление вихревого разряда.

И – индуктор, М – магнитопровод, Р – разряд.

Такое деление безэлектродных разрядов имеет смысл, только пока длина электромагнитной волны, возбуждающей разряд, больше размеров разрядного пространства и когда в колебательном контуре имеются явно выраженные самоиндукция и емкость, посредством которых может быть возбужден тот или иной тип разряда. Но когда размеры разрядного пространства становятся одного порядка или больше длины волны, такое разделение безэлектродных разрядов теряет смысл.

Для высоких и низких частот электромагнитной волны, участвующей в возбуждении разряда, пригодна следующая классификация:

а) E -разряды – разряды в которых элементарные токи проводимости не замкнуты, а продолжают в виде токов смещения.

б) H -разряды – разряды, в которых элементарные токи проводимости образуют замкнутые кривые.

В данной работе наблюдается индукционный H -разряд, поэтому остановимся на его более подробном изучении.

1.2 Индукционный разряд

Индукционным разрядом обычно называется индукционно связанная плазма, созданная вихревыми электрическими токами в результате электромагнитной индукции, вызванной переменным магнитным полем в газовой среде.

Данный разряд имеет пороговый характер и зажигается в определенном диапазоне давлений, который зависит от параметров схемы возбуждения. Как правило чем выше давление, тем большую мощность нужно затратить, чтобы зажечь безэлектродный разряд. Однако при высоком вакууме ($p < 10^{-3}$ torr) индукционные разряды не могут существовать [3].

Также из условий баланса ионизации и уравнений Максвелла следует существование минимального порога мощности для зажигания такого разряда [4, 2].

Для прохождения тока в газе должен существовать определенный градиент напряженности на разрядном пути [1]. В данном случае градиент вихревого электрического поля, создаваемого проводником, несущим переменный ток, пропорционален силе тока и его частоте

$$E \sim I\omega.$$

Чем выше частота тока, тем меньше может быть сила тока в индукторе (а следовательно, и в газе), необходимая для получения требуемого градиента напряженности поля.

В данной работе разрядная колба была помещена внутри цилиндрического индуктора, отношение диаметра колбы к диаметру индуктора близко к единице. При таких условиях разряд обычно является устойчивым при мощностях тока, значительно превышающих мощность, потребляемую в самом индукторе. Разряд концентрируется вблизи внутренней поверхности разрядной трубки, приобретая форму цилиндра [1].

1.3 Активная среда

Для достижения режима лазерной генерации на длине волны 337.1 нм в активной среде N_2 необходимо образовать инверсию населенности между уровнями $C^3\Pi_u$ и $C^3\Pi_u$ (рис. 1.2). Механизм образования инверсии основан на прямом возбуждении молекулы азота электронным ударом из основного состояния $X^1\Sigma_g^+$, при котором происходит заселение верхних уровней.

В обычных условиях на переходе $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ не может быть стационарной инверсии. Она возможна лишь в нестационарном режиме на фронте импульса возбуждения, при условии, что скорость возбуждения верхнего уровня выше, чем нижнего (т.н. самоограниченный переход). Поэтому необходимо создать индукционно-связанную плазму с параметрами, обеспечивающими реализацию этого механизма, а именно, достижение в начальной стадии разряда концентрации электронов $10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ с энергией около 12 – 16 эВ [2].

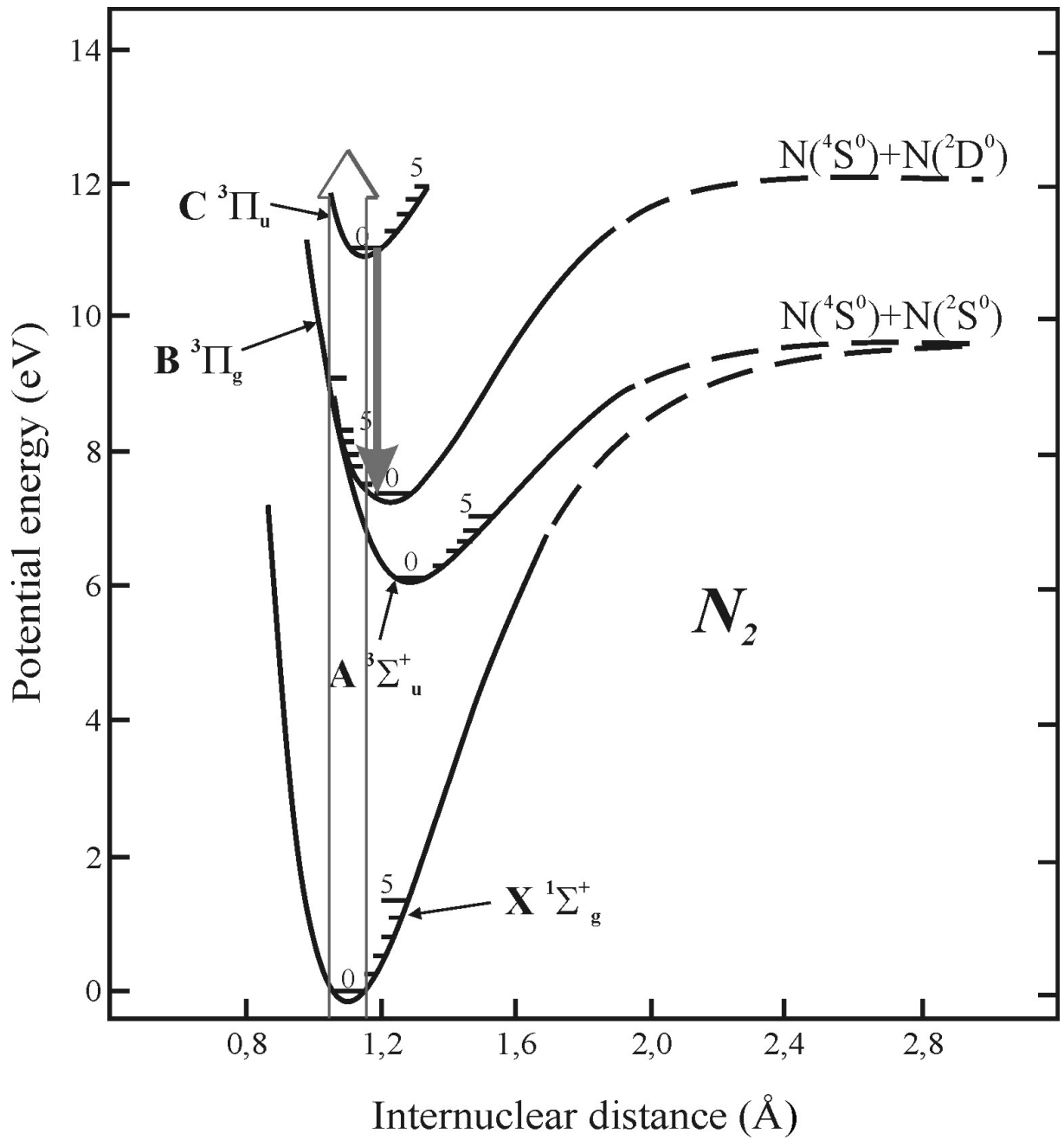


Рисунок 1.2 — Энергетические уровни азота

2 Экспериментальная часть

2.1 Установка для эксперимента

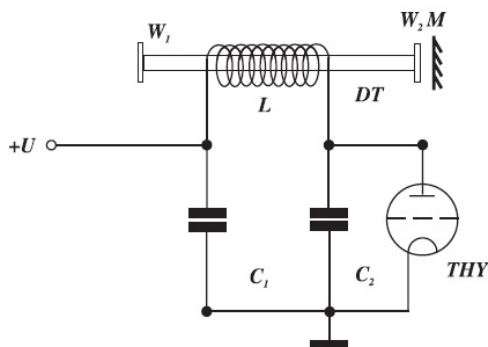


Рисунок 2.1 — Схема установки

На (рис. 2.1) представлена схема высоковольтной системы возбуждения, разработанной на основе схемы Блюмлейна. Основной ее задачей является усиление и преобразование зарядного напряжения, подаваемого с внешнего источника питания, в напряжение разряда на соленоиде индуктивности L .

В работе использовалась керамическая газоразрядная трубка DT с внутренним диаметром 41 мм. Индуктор L представляет собой соленоид, состоящий из 32 катушек, общая длина 66 см. Это же значение считается длиной активной среды. Схема разрядной трубки представлена на (рис. 2.2). По краям трубы установлены герметичные плоскопараллельные окна W_1 и W_2 сделанные из CaF_2 .

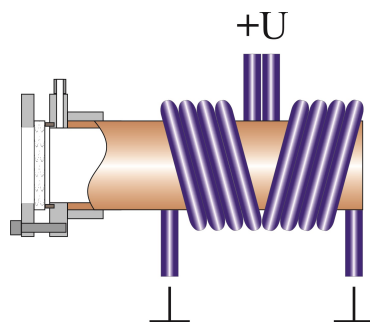


Рисунок 2.2 — Схема юстировочного узла разрядной трубки

В схему входили две батареи параллельно соединенных конденсаторов, обозначенных как C_1 и C_2 , которые заряжались от импульсного источника питания до напряжения 25–29 кВ. В результате на катушке

индуктивности L наблюдалось падение напряжения, которое на 20-25% выше зарядного.

Накопительная емкость C_1 на протяжении эксперимента не изменялась и равнялась 28,6 нФ. Вторая же емкость увеличивалась от 36,4 до 52 нФ. Для снятия осциллограмм с емкостей использовался осциллограф Tektronix TDS2014B.

Мощность и энергия измерялись универсальным измерителем мощности StarBright с фотодиодным датчиком.

Относительная интенсивность излучения отслеживалась при помощи цифрового профилометра Ophir Spiricon L110059.

3 Результаты и их обсуждение

3.1 Выводы про условия накачки

Поиск оптимальных условий накачки активной среды азота производился путем изменения индуктивно-емкостных характеристик системы возбуждения. Под оптимальным условием понимается максимальная энергия генерации азотного лазера (т.е. максимальная энергия излучения).

Для изучения работы схемы возбуждения, с емкостями C_1 и C_2 были сняты осциллограммы при разных значениях C_2 (рис. 3.1, 3.2, 3.3). Наблюдался рост напряжения зарядки (первый минимум на синей линии увеличивает амплитуду).

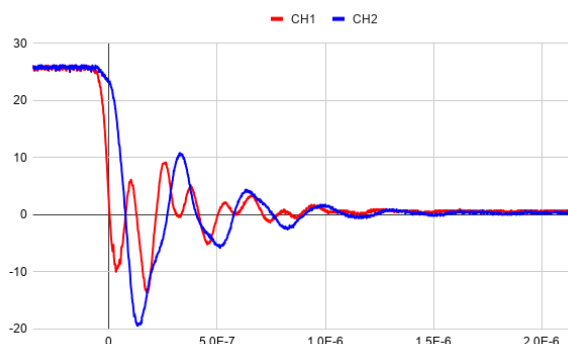


Рисунок 3.1 — Осциллограммы емкостей, $C_2 = 36,4$ нФ.

CH1 — $U(t)$ для C_1 , CH2 — $U(t)$ для C_2

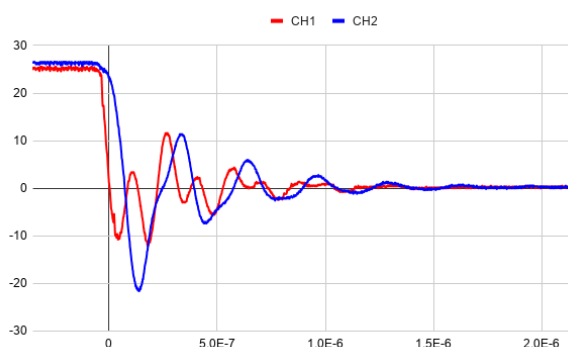


Рисунок 3.2 — Осциллограммы емкостей, $C_2 = 44,2$ нФ.

CH1 — $U(t)$ для C_1 , CH2 — $U(t)$ для C_2

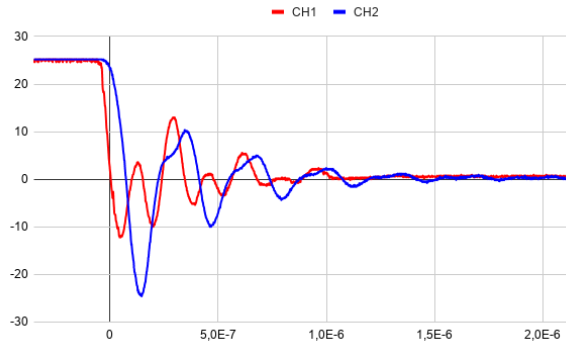


Рисунок 3.3 — Осциллограммы емкостей, $C_2 = 52$ нФ.
 CH1 – $U(t)$ для C_1 , CH2 – $U(t)$ для C_2

Результаты обработки измерений энергии генерации азота представлены на рис. 3.4. С ростом емкости происходил рост запасаемой энергии, что приводило к увеличению вложенной энергии в разряд и увеличению количества возбужденных частиц.

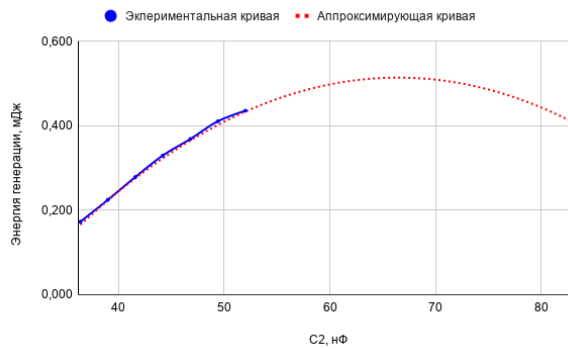


Рисунок 3.4 — Зависимость энергии генерации от емкости C_2 .
 Аппроксимирующая кривая имеет максимум.

Экспериментальная кривая аппроксимируется полиномом второй степени, что означает наличие максимума функции энергии генерации. Это сходится с теорией, согласно которой запасаемая в рабочей среде энергия ограничена и при достижении ее предела дальнейшее увеличение подводимой энергии не приведет к увеличению энергии генерации [1].

Кроме того, произведен параллельный контроль роста энергии генерации азота при изменении накопительных емкостей при помощи цифрового профилометра Ophir Spiricon L110059 (типичный вид пучка показан на рис. 3.5). А именно, увеличение запасаемой энергии приводило к

пропорциональному увеличению интенсивности излучения, регистрируемой профилометром.

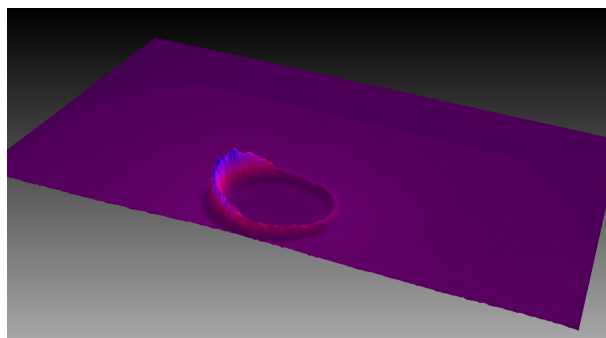


Рисунок 3.5 — 3D вид пространственного распределения излучения азота на длине волны 337.1 нм.

Неоднородность интенсивности излучения азота по кольцу генерации (рис. 3.5) вызвана неоднородностью намотки индуктора на разрядную трубку. В данном случае области кольца генерации с большей интенсивностью излучения соответствовали более плотной намотке индуктора.

3.2 Изучение энергоэффективности установки

Были изучены зависимости энергии генерации и КПД УФ лазера от зарядного напряжения, полученные результаты представлены на рис. 3.6, 3.7. С ростом зарядного напряжения энергия генерации увеличивается, но при этом КПД лазера уменьшается. Видимо это связано с тем, что свойства активной среды ограничены и у неё существует порог накачки.

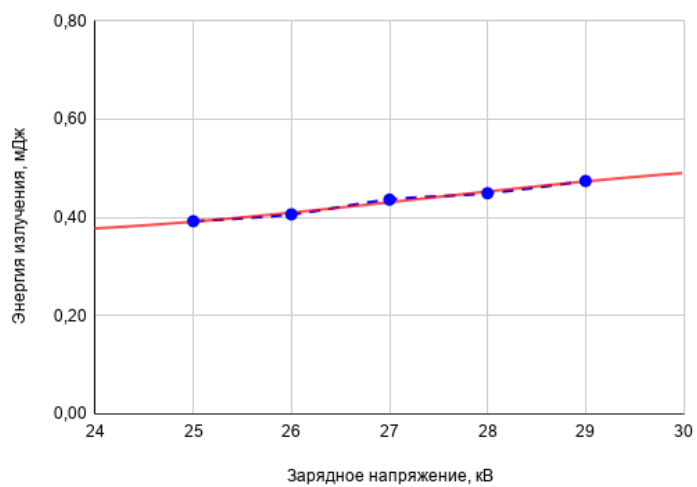


Рисунок 3.6 — Зависимость энергии генерации от зарядного напряжения.

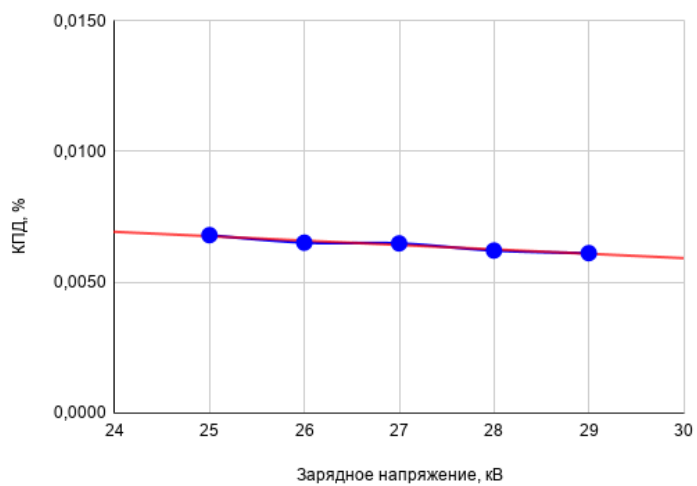


Рисунок 3.7 — Зависимость КПД от зарядного напряжения.

Заключение

В ходе изучения литературы были выявлены условия формирования импульсного индукционного разряда в активных средах лазеров.

Проведены две запланированные серии экспериментов. Одна с увеличением емкостных характеристик батареи конденсаторов, диапазон значений включал в себя 36,4–52 нФ. Вторая с изменением зарядного напряжения, которое менялось в диапазоне 25–29 кВ.

Полученные данные были проанализированы: найдены оптимальные условия возбуждения активной среды для оптимизации системы накачки и проведено их сравнение с теорией. Наиболее близкими к оптимальным с точки зрения теории оказались значения емкостей $C_1 = 28,6$ нФ, $C_2 = 52$ нФ. Энергия генерации при этом составила 0,44 мДж. Согласно теоретической модели максимум энергии генерации 0,52 мДж следует ожидать при емкости $C_2 = 66,5$ нФ. Однако по техническим причинам не было возможности достичь этого максимума.

При анализе КПД УФ лазера выявлено, что в рассмотренном диапазоне напряжений 25–29 кВ, при росте зарядного напряжения энергия генерации растет, а КПД системы падает.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Бабат, Г. И.* Безэлектродные разряды и некоторые связанные с ними вопросы / Г. И. Бабат // *Вестник электропромышленности*. — 1942. — № 2. — С. 1–12.
2. *Ражев, А. М.* Индукционный ультрафиолетовый азотный лазер / А. М. Ражев, Д. С. Чуркин // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2007. — Т. 86, № 6. — С. 479–483.
3. *Piejak, R. B.* A simple analysis of an inductive RF discharge / R. B. Piejak, V. A. Godyak, B. M. Alexandrovich // *Plasma sources science and technology*. — 1992. — Vol. 1, no. 3. — P. 179.
4. *Кралькина, Е. А.* Индуктивный высокочастотный разряд низкого давления и возможности оптимизации источников плазмы на его основе / Е. А. Кралькина // *Успехи физических наук*. — 2008. — Т. 178, № 5. — С. 519–540.