

## Импульсные генераторы для накачки азотных лазеров низкого давления на частотах повторения импульсов до 10 кГц

*Б.А. Козлов\*, И.В. Логин*

*Рязанский Государственный Радиотехнический Университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия*

*\*kozlov.qe.ryazan@mail.ru*

**Аннотация.** Сообщается о создании высоковольтных импульсных генераторов для накачки азотных лазеров низкого давления на основе импульсных трансформаторов. Генераторы обеспечивают формирование импульсов напряжения амплитудой до 100 кВ с длительностью переднего фронта менее 70 наносекунд на частотах повторения импульсов до 10 кГц. Изучено влияние многозарядных искровых разрядников типа Р-30М1 на эффективность ввода энергии в разрядный промежуток на стадии пробоя.

**Ключевые слова:** азотный лазер низкого давления, импульсный генератор, высоковольтный импульс, напряжение пробоя, длительность переднего фронта, частота повторения импульсов.

### 1. Введение

Азотные лазеры низкого давления являются одним из эффективных лучевых инструментов, применяемых в промышленности для прецизионной обработки микро- и наноразмерных электронных компонентов [1]. В настоящее время наиболее мощными азотными лазерами, применяемыми в микро- и наноэлектронике, являются отечественные лазеры марки ЛГИ-505 и ЛГИ-511 [2, 3], работающие на частотах повторения импульсов до 1 кГц и обладающие средней мощностью излучения не менее 120–240 мВт. Однако распределение мощности лазерного излучения по сечению пучка имеет специфический вид. В центре лазерного пучка находится яркое пятно, вокруг которого располагается «ореол» в виде концентрических колец. В этом «ореоле» локализовано излучение с мощностью излучения, которая может достигать 30–40 % от общей мощности излучения в пучке [4, 5]. На расстоянии в 0.5 метра от резонатора лазера центральное пятно имеет диаметр 6 мм, а диаметр «ореола» достигает 10–12 мм. Такой пучок сложно сфокусировать в пятно с минимальными размерами и однородным распределением мощности излучения по сечению. Как результат – снижение качества обработки тонких пленок.

В [4, 5] было установлено, что распределение мощности излучения по сечению пучка определяется временными параметрами импульсов накачки (амплитуда и время нарастания), давлением азота и частотой повторения импульсов. Параметры накачки в свою очередь задаются типом генератора возбуждающих импульсов. Было также установлено, что при использовании в качестве генератора накачки кабельного импульсного трансформатора мощность излучения в «ореоле» уменьшается до уровня в  $\approx 5\text{--}7\%$  от общей мощности излучения в диапазоне частот повторения импульсов 0.1–1 кГц.

В настоящей работе сообщается о результатах исследований, направленных на создание импульсных генераторов на напряжения до 100 кВ, работающих на частотах повторения импульсов до 10 кГц и обеспечивающих генерацию УФ-излучения в лазере на молекулярном азоте с минимальной мощностью излучения в «ореоле».

### 2. Экспериментальная установка и конструкции импульсных генераторов

Для достижения поставленной цели должен быть решен целый комплекс взаимосвязанных электрофизических задач. Главными из них являются обеспечение необходимой амплитуды высоковольтных импульсов с минимальным временем нарастания, организация ввода энергии накачки в газовую среду за время  $\tau < 40$  наносекунд, возможность работы на частотах повторения импульсов до 10 кГц, способность передавать в активный элемент лазера средней электрической мощности в несколько киловатт.

Для промышленно выпускаемых азотных лазеров с длиной разрядного канала 350–500 мм напряжение пробоя достигает 100 кВ. При этом длительность переднего фронта импульсов напряжения находится на уровне 100–120 наносекунд.

Активный элемент азотного лазера с накачкой в продольном разряде и схема его возбуждения приведены на Рис.1. Активный элемент лазера представляет собой газоразрядную трубку из бериллиевой керамики длиной 350 мм и внутренним диаметром 4 мм. Разрядный канал закрыт с обеих сторон окнами Брюстера из кварца. Выделяющееся в разрядном канале тепло отводится проточной водой, проходящей через рубашку водяного охлаждения.

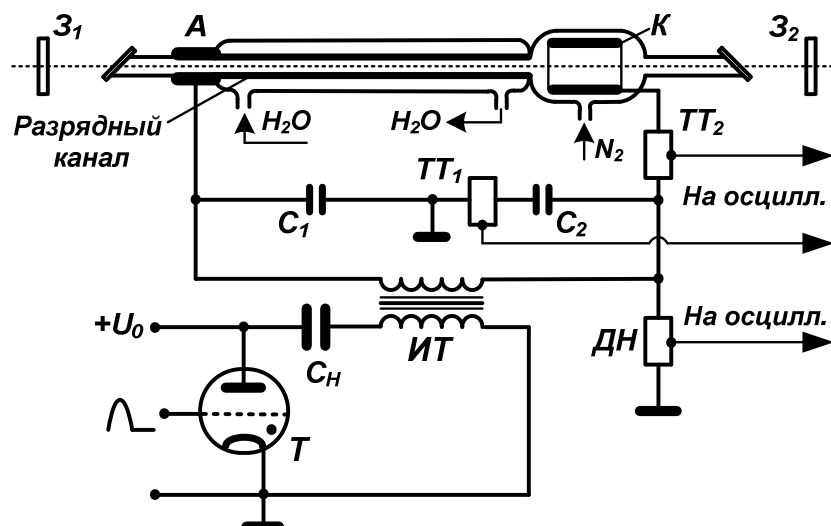


Рис.1. Активный элемент азотного лазера низкого давления и электрическая схема генератора накачки с измерительными цепями.

В настоящей работе в качестве генераторов накачки применялись низкоиндуктивные импульсные трансформаторы. Их выбор был обусловлен простотой конструкции, компактностью, возможностью легко изменять полярность высоковольтного импульса напряжения, а также использования только одного силовоточного коммутатора (тиратрона). Как показано на Рис.1, вторичная обмотка трансформатора подключена к двум «обостряющим» конденсаторам  $C_1$  и  $C_2$  с заземленной средней точкой. Такое подключение обеспечивает деление напряжения на разрядной трубке вдвое и на электродах формируются импульсы напряжения половинной амплитуды по отношению к заземленному корпусу. Заряженные от импульсного трансформатора до напряжения пробоя вторичные емкостные (обостряющие) накопители  $C_1$  и  $C_2$  разряжаются на трубку по контуру, обладающему минимальной индуктивностью. В этих условиях достигается максимальное значение амплитуды тока накачки при его минимальной длительности и обеспечиваются условия для наиболее эффективного возбуждения верхних лазерных уровней молекул азота.

Для изучения временного поведения импульсов напряжения на разрядной трубке и тока разряда применялись резистивный делитель напряжения ДН с коэффициентом деления 1:500, подключенный к катоду разрядной трубки, и два измерительных трансформатора тока ТТ<sub>1</sub> и ТТ<sub>2</sub> с коэффициентом преобразования 100 А·В<sup>-1</sup> [6, 7]. Трансформатор тока ТТ<sub>1</sub> включен в цепь у заземленной точки, и он позволяет регистрировать как ток заряда «обостряющих» конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , так и ток разряда этих накопителей на разрядную трубку. Измерительный трансформатор ТТ<sub>2</sub> включен в высоковольтную цепь непосредственно у катода, и он регистрирует только ток разряда. Типичные значения емкости накопительного конденсатора  $C_H$  были в пределах 3–5 нФ. Оптимальное значение

емкости обостряющих конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  составляло 100 пФ. Зарядное напряжение  $U_0$  не превышало 20 кВ.

Структура, принцип действия и расчет параметров формируемых высоковольтных импульсов напряжения наносекундной длительности подробно отражены в [8–10]. Магнитные свойства применявшихся ферритов представлены в [11]. Формирование высоковольтных импульсов с крутым передним фронтом обеспечивается в конструкциях импульсных трансформаторов, обладающих минимальными значениями индуктивности рассеяния. Таким требованиям в наибольшей степени отвечают «кабельные» трансформаторы и трансформаторы, у которых витки первичной и вторичной обмоток перемежаются и находятся в пределах одного слоя на одинаковом расстоянии от магнитопровода [10].

В настоящей работе исследования проводились со следующими типами импульсных трансформаторов – «традиционный», «одновитковый» и «кабельный». Для определения влияния перенапряжения на величину тока разряда накачки и энергии, вводимой в газоразрядный промежуток на стадии пробоя, последовательно с каждым высоковольтным выводом импульсного трансформатора подключались многозачерные искровые разрядники типа Р–30М1, способные работать на частотах повторения импульсов до 6.5 кГц («модифицированный» тип импульсного генератора). Однако коммутируемая этими разрядниками энергия не превышает 0.25 джоуля в импульсе.

В «традиционном» импульсном трансформаторе витки первичной обмотки укладывались между витками вторичной обмотки. В качестве проводников применялись высоковольтные провода марки ВЗМ–04 с изоляцией из фторопластовых лент и электропрочностью до 20 кВ. После пропитки их трансформаторным маслом электропрочность возрастает до 50 кВ. Применялось три первичных обмотки, включенных параллельно, и одна вторичная. Коэффициент трансформации подбирался равным  $K = 1:6$ . Для увеличения электропрочности трансформатора межвитковый зазор увеличивался на 1–2 мм с помощью хлопчатобумажных нитей.

В варианте одновиткового импульсного трансформатора первичная и вторичная обмотки выполнялись из медных полос. Первичная обмотка представляет один сплошной виток, разомкнутый в верхней части замкнутого магнитопровода. Вторичная обмотка представляла из себя шесть витков медной ленты. Между ними находился слой диэлектрика (фторопластовая лента), который обеспечивал необходимую электрическую прочность трансформатора.

В кабельном трансформаторе первичными обмотками служили отрезки внешней оболочки кабеля, а в качестве вторичной обмотки выступал центральный провод. Кабель имел посеребренную оплетку и центральную жилу. Изоляцией служила фторопластовая лента с общей толщиной 3 мм.

Во всех этих импульсных трансформаторах использовались замкнутые магнитопроводы из ферритовых колец марки 1000НН (125×80×12 мм). Все импульсные трансформаторы располагались в металлических контейнерах с маслом.

### 3. Результаты исследований

#### 3.1. Электрофизические параметры

Предварительные измерения параметров напряжения, тока и уровня передаваемой в нагрузку средней электрической мощности в зависимости от напряжения заряда накопительного конденсатора, его емкости и от частоты повторения импульсов проводились при использовании в качестве нагрузки набора низкоомных резисторов марки ТВО–60 с общим сопротивлением 1.5 кОм на среднюю электрическую мощность в 2.6 кВт.

Основное внимание при проведении испытаний импульсных трансформаторов было направлено на определение эффективности накачки и формирование излучения с «оптимальным» распределением мощности излучения по сечению пучка при их работе на активный элемент азотного лазера. Контролируемыми параметрами в последнем случае были форма импульсов напряжения и тока в зависимости от давления азота в активном элементе, напряжения заряда накопительного конденсатора в первичной цепи импульсного трансформатора, токи во вторичной цепи, ток разряда и пространственная структура лазерного излучения.

Результаты изучения электрических параметров показали, что каждый из описанных генераторов обеспечивает на холостом ходу формирование импульсов напряжения амплитудой до 100 кВ с временем нарастания от 40 до 100 нс на частотах повторения импульсов до 10 кГц. В режиме кратковременного включения генераторов на омическую нагрузку в нее могла передаваться средняя мощность до 6.5 кВт. При использовании в качестве нагрузки активного элемента лазера мощность, передаваемая в плазму разряда, ограничивалась уровне на 2.4 кВт. Такая мера исключала термическое разрушение активного элемента лазера.

Из всех созданных типов импульсных трансформаторов минимальную длительность переднего фронта высоковольтного импульса в 40 наносекунд при величине тока разряда более 1 кА обеспечивает только кабельный трансформатор. Слабым местом этого уникального типа импульсных трансформаторов является его низкая электрическая прочность в результате разрушения слоя фторопластовой изоляции толщиной всего в 3 мм. Кроме того, электрическая прочность резко уменьшается при увеличении частоты повторения импульсов.

Применение многозазорных искровых разрядников типа Р-30М1 в комбинации с импульсным трансформатором обеспечивает пробой разрядной трубки при напряжениях на  $\approx 10$  кВ выше, чем в случае их отсутствия. Малая допустимая величина коммутуруемой энергии (0.25 Дж) очень сильно ограничивает возможности коммутации типичных для азотных лазеров с указанной геометрией разрядного канала энергий на уровне 0.5–1 Дж. Исследования этого типа генераторов накачки проводилось в двух режимах. В одном из них величина коммутуруемой энергии увеличивалась до 0.5–0.7 Дж, но рабочая частота повторения импульсов не превышала 500 Гц. Во втором режиме коммутуруемая энергия поддерживалась на уровне 0.25 Дж, а рабочие частоты были увеличены до 5 кГц.

Проведённые исследования электрофизических параметров импульсных генераторов накачки дали следующие результаты:

1. «Традиционный» и «одновитковый» импульсные трансформаторы позволяют формировать высоковольтные импульсы напряжения с длительностью переднего фронта до 50 наносекунд и пропускать токи через разрядную трубку азотного лазера до 800 А за 20–25 наносекунд.

2. «Кабельные» импульсные трансформаторы обеспечивают минимальную длительность переднего фронта импульсов напряжения  $\tau \approx 40$  наносекунд и величину тока в газоразрядном промежутке 1 кА при длительности  $\approx 20$ –22 наносекунды.

3. Применение многосекционных разрядников типа Р-30М1 («модифицированный» импульсный генератор) позволяет увеличить напряжение пробоя газоразрядной трубки на  $\approx 10$  кВ и обеспечить ток разряда на уровне 1.2–1.4 кА. Длительность тока разряда на полувысоте составляет 18–20 наносекунд.

Длительная работа генераторов накачки обеспечивается только при использовании «традиционного» и «одновиткового» импульсных трансформаторов.

### 3.2. Генерационные характеристики азотного лазера при использовании различных типов импульсных трансформаторов

На Рис.2 приведена типичная зависимость средней мощности лазерного излучения от частоты повторения импульсов при использовании для целей накачки «традиционного» импульсного трансформатора. Давление азота в активном элементе составляло 18 Торр. Емкости накопительного  $C_H$  и обостряющего  $C_1$ – $C_2$  конденсаторов составляли 4 нФ и 100 пФ. Зарядное напряжение  $U_0$  было 16 кВ.

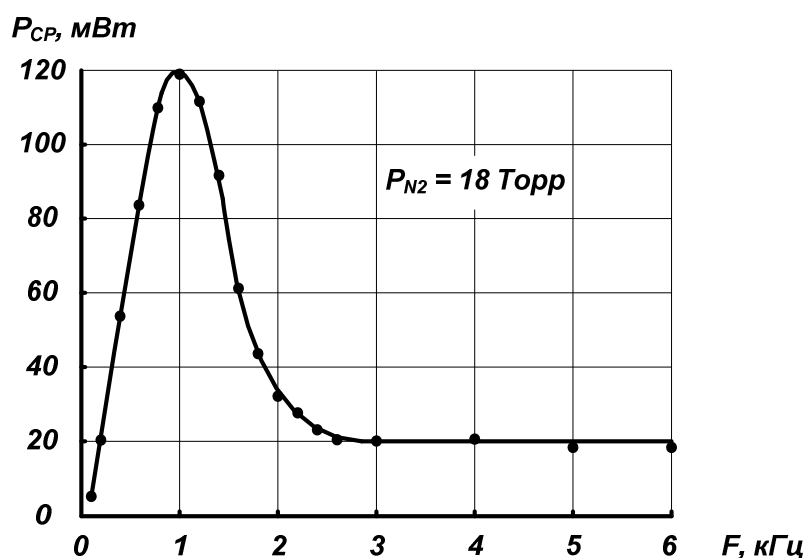


Рис.2. Зависимость средней мощности лазерного излучения от частоты повторения импульсов.

Максимальное значение средней мощности излучения 120 мВт достигается на частотах повторения импульсов в области 1000 Гц. Дальнейшее увеличение частоты повторения импульсов при сохранении энергии возбуждения на прежнем уровне приводит к резкому снижению средней мощности до уровня в 20 мВт. Этот уровень средней мощности излучения сохраняется вплоть до частоты повторения импульсов в 6 кГц. Дальнейшее увеличение частоты повторения импульсов могло осуществляться только при условии снижении значения энергии накачки (уменьшение емкости накопительного конденсатора или величины напряжения заряда  $U_0$ ) или при использовании режима кратковременного включения лазера.

Представленная зависимость имеет три характерных участка. На первом из них (диапазон частот повторения импульсов 0.1–1 кГц) происходит быстрое нарастание мощности излучения до максимального значения в 120 мВт.

Затем (диапазон частот повторения импульсов 1–2.5 кГц) наблюдается быстрый спад до уровня в  $\approx 20$  мВт и в диапазоне частот повторения импульсов от 2.5 до 6 кГц средняя мощность излучения не изменяется. Это означает, что энергия лазерного излучения в импульсе изменяется обратно пропорционально частоте повторения импульсов.

Распределение излучения по сечению лазерного пучка на частотах повторения импульсов до 800 Гц имеет как центральную часть с повышенной интенсивностью, так и заметный «ореол» с мощностью до 20–40 % от всей мощности излучения. На частотах повторения импульсов более 800 Гц «ореол» становится мало значимым и его мощность уменьшается до 5–7% от всей мощности излучения. В диапазоне частот повторения импульсов от 1 до 6 кГц лазерное пятно оказывается сконцентрированным в пятне с диаметром 5 мм на расстоянии 0.5 м от выходного зеркала лазера.

#### 4. Заключение

1. Реализована задача по созданию высоковольтных импульсных генераторов для эффективной накачки азотных лазеров низкого давления на частотах повторения импульсов до 10 кГц. На максимальной частоте повторения импульсов осуществлена передача в активную нагрузку 6.5 кВт средней электрической мощности.

2. Достигнут уровень средней электрической мощности, передаваемой в активный элемент азотного лазера, в 2.4 кВт на частоте повторения импульсов 6 кГц.

3. Определены границы по частоте повторения импульсов, выше которых излучение азотного лазера формируется в виде одного центрального пятна с минимальной мощностью излучения в ореолах.

4. Установлено, что главную роль в получении излучения без ореолов играет скорость нарастания напряжения на разрядном промежутке до момента пробоя.

#### 5. Список использованной литературы

- [1] Вейко В.П., *Лазерные микро- и нанотехнологии в микроэлектронике*. (Санкт-Петербург: НИУИТМО, 2012).
- [2] Кюн В.В., Самородов В.Г., Токунов Ю.М., *Лазеры на молекулярном азоте. Обзоры по электронной технике*. (Москва: ЦНИИ «Электроника», 1991).
- [3] Азотные лазеры АО «Плазма» [online]; <https://www.plasmalabs.ru/category/index/id/18>
- [4] Deev M.E., Kozlov B.A., Pelikov P.A., Shuvarikov Yu.S., Yastrebkov A.B., *Conference Abstracts. XII International Conference AMPL-2015*, Tomsk, Russia, 39, 2015.
- [5] Kozlov B.A., Stepanov A.P., *IEEE*, 106, 2018; doi: 10.1109/LO.2018.8435715
- [6] Шваб А., *Измерения на высоком напряжении*. (Москва: Энергоатомиздат, 1983).
- [7] Anderson J.M., *Rev. Sci. Instruments*, **42**(7), 915, 1971; doi: 10.1063/1.1685307
- [8] Месяц Г.А., Насибов А.С., Кремнев В.В., *Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения*. (Москва: Энергия, 1970).
- [9] Месяц Г.А., *Импульсная энергетика и электроника*. (Москва: Наука, 2004).
- [10] Вдовин С.С., *Проектирование импульсных трансформаторов*. (Ленинград: Энергоатомиздат, 1991).
- [11] Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В. (ред.), *Справочник по конструкционным материалам*. (Москва: Издательство МГТУ им. Э.Н. Баумана, 2006).