


ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

УТВЕРЖДАЮ  
Декан ЭФФ

  
Г.С. Евтушенко  
«17» ноября 2008 г.

**В.Ф. Лосев**

## **ГЕНЕРАЦИЯ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АЗОТНОМ ЛАЗЕРЕ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Мощные газовые лазеры» для магистрантов,  
обучающихся по магистерской программе 210106  
«Физическая электроника» направления 210100  
«Электроника и микроэлектроника»

Издательство  
Томского политехнического университета  
2008

УДК 621.373.826(07)

ББК 32.86-5я73

Л79

**Лосев В.Ф.**

Л79 Генерация наносекундных импульсов лазерного излучения в азотном лазере: методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Мощные газовые лазеры» для магистрантов, обучающихся по магистерской программе 210106 «Физическая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» / В.Ф. Лосев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 16 с.

ISBN 5-98298-368-3

УДК 621.373.826(07)


ББК 32.86-5я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы  
к изданию методическим семинаром кафедры  
сильноточной электроники ЭФФ  
« 1 » сентября 2008 г.

Зав. кафедрой СЭ  
член-корреспондент РАН

  
Н.А. Ратахин

Председатель учебно-методической  
комиссии

  
А.Н. Гормаков

*Рецензент*

Ведущий научный сотрудник ИСЭ СО РАН г. Томска  
*В.М. Орловский*

ISBN 5-98298-368-3

© Лосев В.Ф., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2008

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Азотный лазер является наиболее простым и дешевым импульсным газовым лазером. Он работает на электронно-колебательных переходах молекулы  $N_2$ . Этот лазер имеет наиболее сильную линию генерации на длине волны  $\lambda = 337$  нм (УФ) и относится к типу лазеров на самоограниченных переходах. Импульсный азотный лазер широко используется для накачки лазеров на красителях, в спектроскопии и для диагностики в медицине.

На рис.1 показана схема соответствующих энергетических уровней молекулы  $N_2$ . Генерация происходит на так называемой второй положительной системе полос, т. е. на переходе из состояния  $C^3P_u$  (будем далее называть его С-состоянием) в состояние  $B^3P_g$  (В-состояние). Предполагается, что возбуждение С-состояния обусловлено столкновениями молекул  $N_2$ , находящихся в основном состоянии, с электронами, образованными в электрическом разряде. Поскольку, как уровень С, так и уровень В, являются триплетными, переходы в них из основного состояния запрещены по спину. Однако согласно принципу Франка – Кондона можно ожидать, что сечение возбуждения колебательного уровня  $\nu = 0$  С-состояния будет больше, чем сечение возбуждения колебательного уровня  $\nu = 0$  В-состояния. Действительно, положение минимума потенциальной кривой В-состояния сдвинуто в область, соответствующую большему межъядерному расстоянию, чем в состоянии С. Время жизни (излучательное) С состояния равно 40 нс, тогда как время жизни В-состояния – 10 мкс. Поскольку время жизни верхнего уровня намного меньше времени жизни нижнего уровня, то лазер, очевидно, не может работать в непрерывном режиме. Однако в таком лазере возможна генерация в импульсном режиме при условии, что длительность возбуждающих электрических импульсов значительно меньше 40 нс.

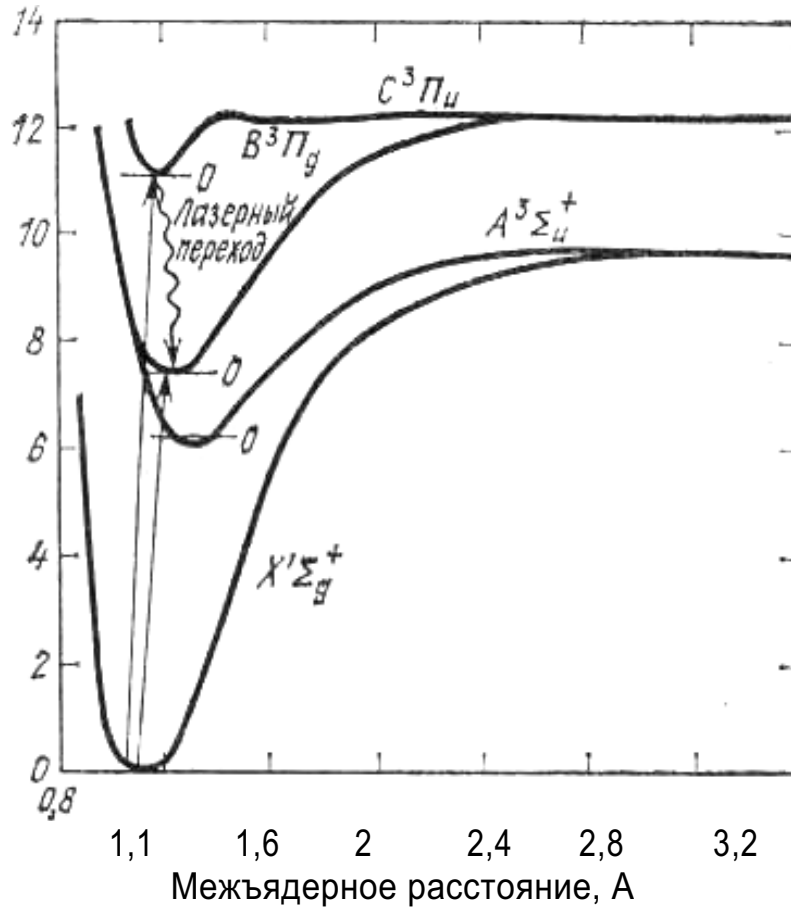


Рис. 1. Энергетические уровни молекулы  $N_2$ .  
 Ради простоты для каждого электронного состояния показан  
 лишь самый нижний колебательный уровень ( $v = 0$ )

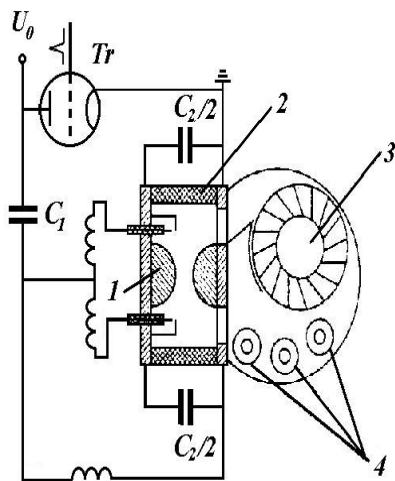


Рис. 2. Схема лазера:  
 1 – разрядные электроды,  
 2 – диэлектрическая камера,  
 3 – вентилятор,  
 4 – холодильник

Генерация происходит преимущественно на нескольких вращательных линиях колебательного перехода  $v \gg (0) - v'(0)$ , соответствующего  $\lambda = 337,1$  нм. Помимо того, что данный переход находится, как уже упоминалось, в благоприятных условиях по отношению к процессу накачки, он имеет наибольший фактор Франка – Кондона. Генерация имеет место, хотя и с меньшей интенсивностью, также на колебательных переходах  $v \gg (0) - v'(1)$  ( $\lambda = 357,7$  нм) и  $v \gg (1) - v'(0)$  ( $\lambda = 315,9$  нм).

Наиболее часто используемая принципиальная конструкция и электрическая схема  $N_2$ -лазера очень близка к той, что изображена на рис. 2. Поскольку в этом

случае внешнее электрическое поле имеет высокую напряженность ( $E > 10$  кВ/см для типичной смеси  $N_2$  при давлении  $\sim 40$  мбар и He при 960 мбар), обычно применяется поперечная (TE) схема накачки. То есть разряд зажигается поперек оптической оси лазера. Чтобы обеспечить требуемый короткий разрядный импульс (5–10 нс), индуктивность разрядного контура должна быть как можно меньше. Чтобы добиться этого, разрядный конденсатор  $C_2$  на рис. 2 фактически делают в виде ряда малоиндуктивных конденсаторов, смонтированных вдоль разрядной камеры как можно ближе к электродам разряда. Для прокачки газа в межэлектродном промежутке используется диаметральный вентилятор 3, а для охлаждения газа – водяной холодильник 4. В настоящее время разработаны  $N_2$ -лазеры, работающие при атмосферном давлении. Благодаря возросшему усилению на единицу длины и малому времени разряда, лазеры этого типа обычно работают без зеркал. Длину активной среды можно сделать очень короткой (10–50 см) и, как следствие, получить выходные импульсы меньшей длительности ( $\sim 100$  пс при пиковой мощности 100 кВт).

Проблему возникновения дугового разряда обычно предотвращают уменьшением длительности импульса напряжения (до  $\sim 5-10$  нс). Вторым путем для решения проблемы однородности разряда накачки является использование предварительной ионизации разрядного промежутка. Частичного повышения однородности создаваемой плазмы можно добиться также путем секционирования одного из электродов, обычно катода (рис. 3, а).

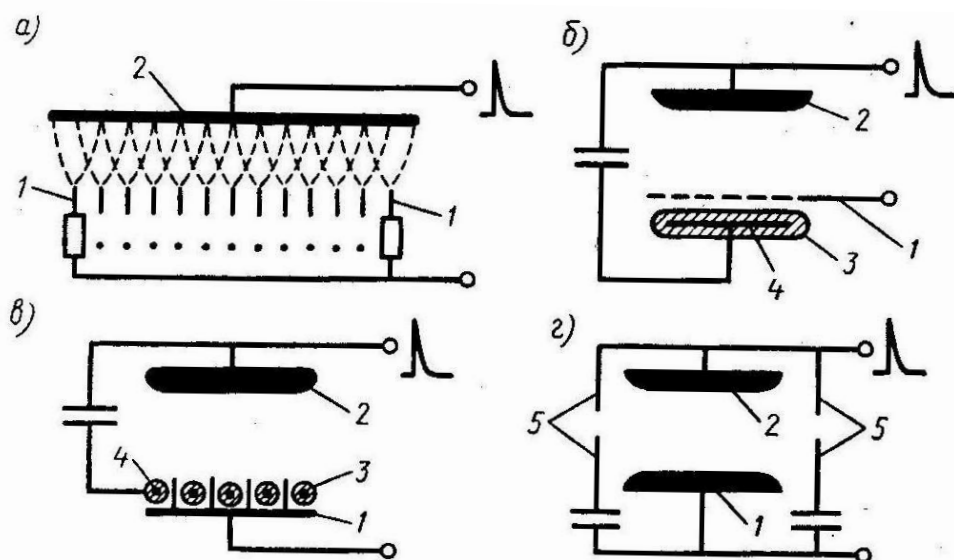


Рис. 3. Схемы предварительной ионизации разрядного промежутка для получения однородного электрического разряда при повышенных давлениях газовой смеси

Однако наиболее эффективным способом создания однородного импульсного разряда при повышенных давлениях является предварительная фотоионизация разрядного промежутка с помощью ультрафиолетового излучения специально создаваемых дополнительных искровых разрядов.

Обычно эти искровые разряды зажигаются:

1) между сетчатым катодом 1 основного промежутка и поверхностью диэлектрика 3, покрывающего вспомогательный электрод 4 (рис. 3, б);

2) между выступающими участками профилированного катода и поверхностью расположенных на катоде изоляторов 3, внутри которых располагается проводник 4, соединенный через небольшую емкость с анодом 2 (рис. 3, в);

3) между вспомогательными электродами 5, расположенными вблизи основного разрядного промежутка (рис. 3, г).

При этом для уменьшения неоднородностей электрического поля в разрядном промежутке электроды делают специальной формы, с определенным профилем. Наибольшее распространение получили профили Роговского и Чанга. Показанные на рис. 3, (а-в) варианты предыонизации естественно не охватывают все практические системы предыонизации, используемые в технологических лазерах. Иногда для предыонизации используют поверхностный разряд по диэлектрику, зажигаемый между кромками металлической фольги или другие схемы. Однако основное назначение всех этих систем одно и то же – обеспечить создание однородной и по возможности достаточно интенсивной ионизации газа в разрядном промежутке. Для зажигания объемного разряда в больших объемах обычно используют предыонизацию рентгеновским излучением или пучком ускоренных электронов.

Вследствие высокого коэффициента усиления самоограниченного перехода генерация представляет собой усиленное спонтанное излучение, и, в принципе, лазер может работать вообще без зеркал. Однако с целью уменьшения пороговой электрической мощности накачки, повышения выходной мощности, а также получения однонаправленного излучения, в этом лазере с одной стороны активной среды устанавливают зеркало полного отражения. Второе выходное зеркало обычно имеет малый коэффициент отражения. Обычно в качестве выходного зеркала используется плоскопараллельное выходное окно из плавленого кварцевого стекла, рис. 4. При этом существенно уменьшается расходимость выходного пучка, которая становится примерно равной отношению поперечного размера разряда к удвоенной длине резонатора  $Q \sim d_0/2L$ . Такие лазеры позволяют получать пиковые мощности вплоть до  $\sim 1$  МВт в импульсах

длительностью  $< 10$  нс при частоте повторения до 100 Гц. Частота повторения работы лазера ограничивается в основном тепловыми эффектами.

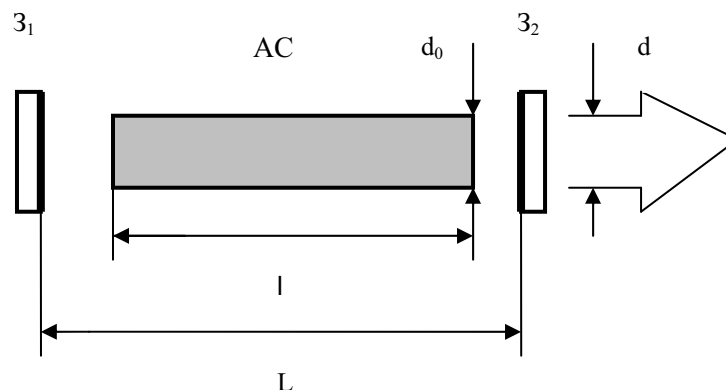


Рис. 4. Оптическая схема плоскопараллельного резонатора азотного лазера

Азотные лазеры как с большой ( $\sim 10$  нс), так и с малой ( $\sim 100$  пс) длительностью импульсов широко применяются как для накачки лазеров на красителях, так и для многих научных приложений, главным образом в спектроскопии.

## 2. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА АЗОТНЫХ ЛАЗЕРОВ

К основным компонентам и узлам азотных лазеров можно отнести: накопительные и разрядные конденсаторы, коммутаторы, оптические элементы, источник высокого напряжения, газы для приготовления лазерной смеси.

В электроразрядных лазерах в основном используются керамические высоковольтные конденсаторы. Среди российских конденсаторов можно выделить следующие марки: UNV, K15-10, K15-4, КВИ, среди импортных – TDK. Данные конденсаторы имеют емкость от 0.1 нФ до 10 нФ и могут работать при напряжении от 10 до 40 кВ. Они являются компактными и малоиндуктивными, что позволяет их использовать в электрических схемах лазера для обеспечения мощных и коротких импульсов (5–10 нс) накачки.

В качестве коммутаторов в эксимерных лазерах используются газовые разрядники и стандартные тиратроны. Наиболее часто используются тиратроны типа: ТГИ и ТПИ, которые могут работать с частотой следования импульсов от единиц Гц до кГц при напряжении от 10 до 50 кВ и коммутировать импульсные токи  $\sim 1$ –10 кА. Реже используются разрядники типа: РУ-61, РУ-85, РУ-89. Они дешевле и проще, но работают

только с частотой 1–50 Гц и имеют на коротких длительностях большие потери по сравнению с тиратронами.

Поскольку азотные лазеры работают в УФ области спектра, то и оптические элементы должны пропускать и отражать в этой спектральной области. В связи с этим в качестве окон, делительных пластин и линз используются такие материалы, как: плавленный кварц, кристаллический кварц,  $\text{CaF}_2$ . В качестве зеркала обычно используется алюминиевое напыление на стеклянной полированной подложке.

### 3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Электрическая схема азотного лазера показана на рис.5. Накопительная емкость состоит из блока конденсаторов общей емкостью 11,3 нФ, емкость накачки  $C_H$  – из 22 конденсаторов по 470 пФ.

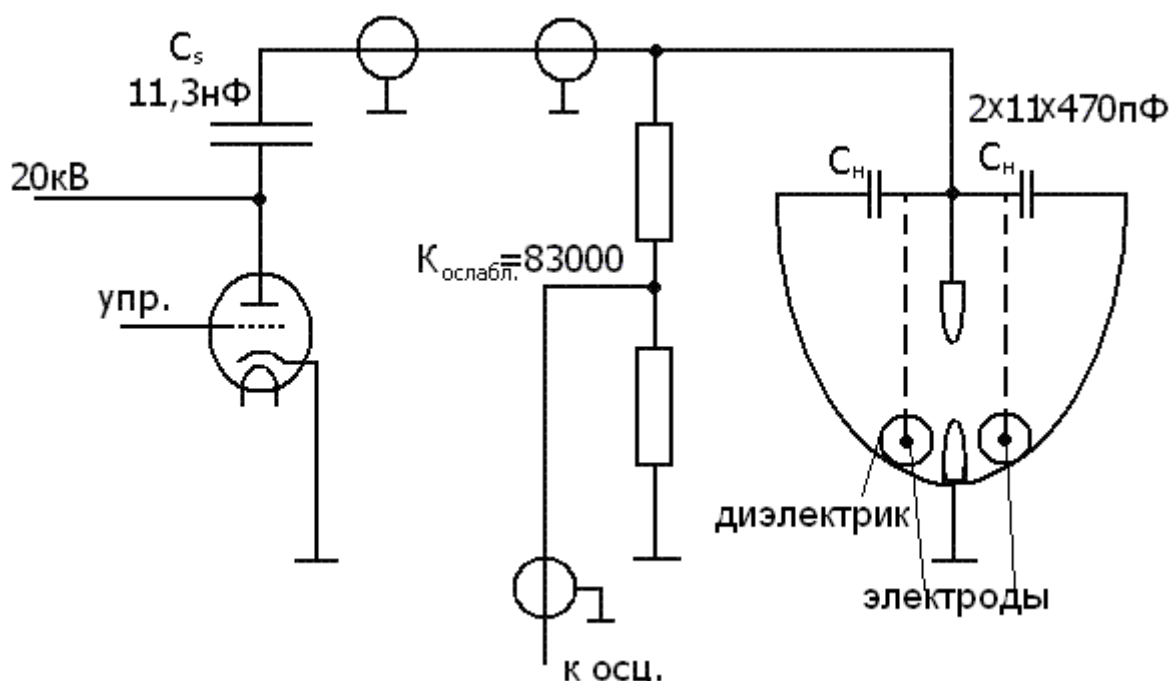


Рис. 5. Принципиальная электрическая схема лазера NL-1-100

Зарядка накопительной емкости  $C_s$  осуществляется от источника высокого напряжения. После зарядки включается тиратрон и происходит зарядка емкостей накачки  $C_H$ , одновременно с этим происходит барьерный разряд между диэлектриком и основным электродом, который обеспечивает предыонизацию газа в межэлектродном промежутке. При достижении на  $C_H$  напряжения пробоя происходит пробой разрядного промежутка и начинается формирование объемного разряда. В качестве коммутатора в данной схеме используется промышленный тира-



трон с ресурсом работы более  $10^8$  импульсов. Данная схема достаточно технологична в изготовлении и надежна, на ней легко осуществить импульсно периодический режим работы с высокой частотой повторения импульсов. Разряд происходит в объеме  $4 \times 300 \times 12$  мм<sup>3</sup>.

Газ напускается в алюминиевую камеру цилиндрической формы, в которой расположены емкости накачки, электроды и система прокачки газа. На торцах камеры имеются окна, в которые установлены зеркала резонатора – одно плоское диэлектрическое зеркало с коэффициентом отражения 95%, второе – плоскопараллельная кварцевая пластина. В качестве рабочего газа используется либо азот с давлением 100 тор, либо смесь N<sub>2</sub> и He. С точки зрения максимальной выходной энергии оптимальное содержание азота составляло 75 тор, гелия 1,25 атм.

В ходе работы по созданию лазера NL-1-100 были испробованы 3 системы прокачки рабочей смеси: система с самопрокачкой газа, с прокачкой ионным ветром и с прокачкой диаметральной вентилятором. Система с самопрокачкой газа и с прокачкой ионным ветром, создаваемым коронным разрядом, оказались недостаточно эффективными при работе в частотном режиме. В окончательном варианте прокачка лазера осуществляется диаметральной вентилятором, что обеспечивает эффективную работу на частоте.

При создании лазера NL-1-100 также были опробованы различные схемы УФ-предыонизации: схема с автоматической искровой подсветкой и подсветкой, образуемой барьерным разрядом.

Схема с искровой предыонизацией показала резкое ухудшение стабильности выходной мощности после  $\sim 10^5$  выстрелов. Причина была связана с обгоранием искровых электродов. В итоге схема лазера была изменена таким образом, чтобы предыонизация газа происходила барьерным разрядом через диэлектрик (рис. 5). В качестве диэлектрика были выбраны стеклянные трубки с внешним диаметром 5 мм, расположенные по обе стороны от анода на максимально близком к нему расстоянии. Надежность зажигания объемного разряда и энергия в импульсе от этого не изменились, но существенно возросла стабильность мощности импульсов излучения.

На рис. 6 представлен внешний вид лазера NL-1-100.



Рис. 6. Внешний вид азотного лазера NL-1-100

#### **Характеристики азотного лазера:**

длина волны излучения	337,1 нм
энергия импульса излучения	1,4 мДж
длительность импульса по уровню 0.5	3 – 6 нс
частота повторения импульсов	до 100 Гц
размеры лазерного пучка	4x14 мм
средняя мощность излучения	до 100 мВт
потребляемая мощность (220 в)	200 Вт
габариты и вес лазера	42×22×55 см, 20 кг

#### **4. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

##### ***Цель работы***

1. Изучить принцип работы азотного лазера и научиться управлять его параметрами генерации.
2. Научиться пользоваться регистрирующей аппаратурой (осциллограф, фотодиод, калориметр), изучив их инструкции по эксплуатации.
3. Научиться юстировать оптический резонатор лазера.

4. Исследовать, как меняются лазерные параметры (энергия генерации, форма импульса излучения, длительность импульса, средняя мощность генерации) от:
- величины зарядного напряжения.
  - давления газовой смеси.
  - состава газовой смеси.
5. Дать физическое объяснение поведения выходных характеристик генерации при изменении начальных параметров.

### ***Описание работы***

Работа состоит из трех частей. В первой части исследуются выходные характеристики лазерной генерации от состава и давления смеси для одного указанного напряжения. Во второй части исследуются выходные характеристики лазерной генерации для оптимального состава и давления смеси в зависимости от зарядного напряжения. В третьей части исследуются возможности фокусировки лазерного пучка на мишень. Результаты исследований заносятся в таблицы и анализируются. Дается физическое объяснение поведения соответствующей лазерной характеристики от изменяемого параметра.

#### **4.1. Часть 1. Порядок работы**

1. Приготовить лазерную смесь в разрядной камере лазера. Для этого включить насос, открыть вентиль для откачки газа и откачать газ из разрядной камеры. Закрывать вентиль. Другими вентилями напустить газ в нужном количестве (чистый азот – 130 мбар). Закрывать все вентили.

2. Включить юстировочный He-Ne лазер и проверить юстировку зеркал. Если они разъюстированы – подъюстировать выходное зеркало с помощью винтов на зеркале.

3. Включить источник питания на лазере и установить напряжение 20 кВ.

4. Провести исследования с занесением всех данных в табл.1.

5. Определить пиковую мощность лазерного импульса. Для этого провести сравнение экспериментальной энергии генерации, измеренной с помощью калориметра, и посчитанной из интеграла импульса излучения. При этом для оценки можно пользоваться формулой

$$E=0,5P\tau_{1/2}, \quad (1)$$

где  $P$  – пиковая мощность генерации,  $\tau_{1/2}$  – длительность импульса генерации на полувысоте его амплитуды.

Для точного расчета необходимо взять интеграл мощности излучения во времени и сравнивая его величину с измеренной энергией, из сравнения определить величину пиковой мощности.

Таблица 1

<i>Чистый азот, Зарядное напряжение <math>U=20</math> кВ</i>					<i>Смесь гелий-азот Зарядное напряжение <math>U=20</math> кВ</i>				
№ п/п	Р, мбар	Е, мДж	$\tau$ , нс	Р <sub>ср</sub> , мВт	Р, мбар	N <sub>2</sub> /He	Е, мДж	$\tau$ , нс	Р <sub>ср</sub> , мВт
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

## 4.2. Часть 2

### Порядок работы

1. Приготовить оптимальную лазерную смесь в разрядной камере лазера. Для этого включить насос, открыть вентиль для откачки газа и откачать газ из разрядной камеры. Закрыть вентиль. Другими вентилями напустить газ в нужном количестве. Закрыть все вентили.

2. Включить юстировочный He-Ne лазер и проверить юстировку зеркал. Если они разъюстированы – подъюстировать выходное зеркало с помощью винтов на зеркале.

3. Включить источник питания на лазере и установить минимальное напряжение, при котором наблюдается генерация лазера (~ 16 кВ).

4. Провести исследования выходных характеристик лазера, изменяя напряжение от 16 до 24 кВ через один киловольт, с занесением всех данных в табл. 2.

Таблица 2

<i>Чистый азот, Давление Р = ? мбар</i>					<i>Смесь гелий-азот Давление Р = ? мбар, N<sub>2</sub>/He = ?</i>			
№ п/п	U, кВ	Е, мДж	$\tau$ , нс	Р <sub>ср</sub> , мВт	U, кВ	Р <sub>ср</sub> , мВт	Е, мДж	$\tau$ , нс
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

На основании полученных результатов подсчитать КПД лазера для всех напряжений и построить зависимость  $\text{КПД} = f(U)$ . Сделать вывод о наличии (отсутствии) оптимального напряжения с точки зрения КПД. Дать физическое объяснение полученному результату.

### **Контрольные вопросы.**

1. Почему с изменением давления газовой смеси изменяются выходные характеристики излучения лазера?
2. Что будет происходить с разрядом при давлении выше оптимальной величины?
3. Как будет изменяться выходная энергия генерации с ростом зарядного напряжения?
4. В чем заключается разница при использовании чистого азота и его смеси с гелием?

### **4.3. Часть 3**

В третьей части исследуются возможности фокусировки лазерного пучка на мишень. Исследования проводятся на оптимальной лазерной смеси при среднем напряжении питания лазера (20 кВ) в разовом режиме работы лазера и частоте следования импульсов 1–50 Гц. Излучение лазера направляется на линзу и фокусируется на фотобумагу для получения видимого отпечатка. С помощью микроскопа определяется размер пятна (керна и ореола). В месте перетяжки устанавливается диафрагма с различным диаметром и определяется доля средней мощности (при частоте 50 Гц).

На основании полученных результатов рассчитать среднюю плотность мощности для каждого диаметра диафрагмы и построить зависимость плотности мощности от диаметра пятна. Оценить расходимость пучка в радианах для 80% мощности по формуле

$$\Theta = d/F, \quad (2)$$

где  $F$ -фокусное расстояние линзы,  $d$ - диаметр пучка на мишени.

### **При защите отчета ответить на следующие вопросы:**

1. Как вы оцениваете возможности использования чистого азота и его смеси с гелием?
2. На сколько важно иметь точную юстировку зеркал в азотном лазере?
3. Какие пути возможны для повышения пиковой мощности лазерного излучения?
4. В каком режиме лазера получается наиболее однородное распределение интенсивности по сечению лазерного пучка, чем она определяется?
5. Каковы возможности фокусировки лазерного пучка, и какие интенсивности излучения можно достигать на данном лазере?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. «Характеристики мощного азотного лазера» / Квантовая электроника, 1973. – № 3(15). – С. 103–105.
2. Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. «Влияние геометрии лазерной камеры на мощность излучения лазера на азоте» / Квантовая электроника, 1974. – Т. 1. – № 1. – С. 200–203.
3. Бычков Ю.И., Загулов Ф.Я., Кутелев А.Ф., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. «Азотный импульсный лазер АИЛ-1» / Квантовая электроника, 1974. – Т. 1. – № 9. – С. 2103.
4. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. «Азотный импульсный лазер АИЛ-3» / Квантовая электроника, 1974. – Т. 1. – № 10. – С. 2285.
5. Х. Курниаван, А.Н.Чумаков, Чунг Джи Ли, Май Он Чиа, М. Уэда, К. Кагава, «Эмиссионный спектроскопический анализ металлов с использованием азотного лазера» / Журнал прикладной спектроскопии январь-февраль 2004.
6. Атежев В.В., Вартапетов С.В., Жигалкин А.К., Лапшин К.Э., Обидин А.З. «Азотный лазер с частотой повторения импульсов 11 кГц и расходимостью излучения 0,5 мрад» / Квантовая электроника, 2004. – 34. – № 9.
7. Браун С.. Элементарные процессы в плазме газового разряда. – М.: Госатомиздат, 1961.
8. Газовые лазеры: пер. с англ. / под ред. И. Мак-Даниеля и У. Нигэна. – М.: Мир, 1986. – С. 552.
9. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Физические процессы в газовых лазерах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 152 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение.....	3
2. Элементная база азотных лазеров .....	7
3. Описание экспериментальной установки .....	8
4. Краткое описание лабораторной работы .....	10
4.1. Часть 1. Порядок работы .....	11
4.2. Часть 2 .....	12
Контрольные вопросы. ....	13
4.3. Часть 3 .....	13
Список литературы .....	14

Учебное издание

ЛОСЕВ Валерий Федорович

## ГЕНЕРАЦИЯ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АЗОТНОМ ЛАЗЕРЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по курсу «Мощные газовые лазеры» для магистрантов,  
обучающихся по магистерской программе 210106  
«Физическая электроника» направления 210100  
«Электроника и микроэлектроника»

Верстка

Дизайн обложки

*В.П. Аршинова*

*О.Ю. Аршинова*

*О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 17.11.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».


Печать XEROX. Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,84.

Заказ 865. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.