

Российская академия наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт электрофизики
Уральского отделения Российской академии наук
(ИЭФ УрО РАН)

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Б1.В.ДВ.1-2

Специальность 03.06.01 – «Физика и астрономия»

Изучение работы CO₂-лазера

Материалы разработали:

к.ф.-м.н., доцент
к.ф.-м.н.

Лисенков В.В.
Орлов А.Н.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ CO₂ ЛАЗЕРА

Лисенков В.В., Орлов А.Н.

Введение

Лазер представляет собой источник монохроматического когерентного света с высокой направленностью светового луча. Само слово “лазер” составлено из первых букв английского словосочетания (“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”), означающего ”усиление света в результате вынужденного излучения”.

Одним из ярких представителей лазеров является CO₂-лазер. Как в непрерывном, так и в импульсном режимах он позволяет получить наибольшие мощности при высоких КПД. Впервые, сообщение о генерации на молекулах CO₂ было сделано в 1964г. Пателом на заседании Американского физического общества. Повышение мощности CO₂ – лазера до нескольких сотен Вт. открыло реальную перспективу его использования в промышленности. Дальнейшие исследования, проведенные в 1970-х – 1980-х годах привели к созданию промышленных образцов CO₂-лазера мощностью единицы – десятки кВт., что сделало данный лазер безусловным лидером среди всех лазеров, применяемых в производстве. В таких технологических операциях как резка, сварка, легирование и закалка поверхностей CO₂ лазер оказался вне конкуренции благодаря сочетанию высокой мощности с надежностью работы притом, что он не требует больших капиталовложений и не очень дорог в эксплуатации.

За более чем тридцатилетнюю историю было создано достаточно много различных типов и конструкций CO₂ лазера. Непрерывный CO₂ лазер, в котором активная среда создается продольным тлеющим разрядом, был одним из первых. Разработанные в последствии другие методы создания активной среды (накачки) CO₂ лазера позволили получить более высокие мощность и КПД. Тем не менее, непрерывный CO₂ лазер с накачкой тлеющим разрядом по-прежнему представляет определенный интерес благодаря простоте конструкции и надежности в работе. Именно поэтому данный лазер был выбран для исследования в настоящей лабораторной работе.

1. Физические основы и принцип работы CO₂ лазера.

Молекула CO₂ является линейно симметричной молекулой. Её ось симметрии проходит через ядра атомов образующих молекулу, а плоскость симметрии перпендикулярна данной оси, таким образом молекула имеет 2 вращательные и 2 колебательные степени свободы. Типы колебаний возможных в молекуле CO₂ показаны на рис. 1.

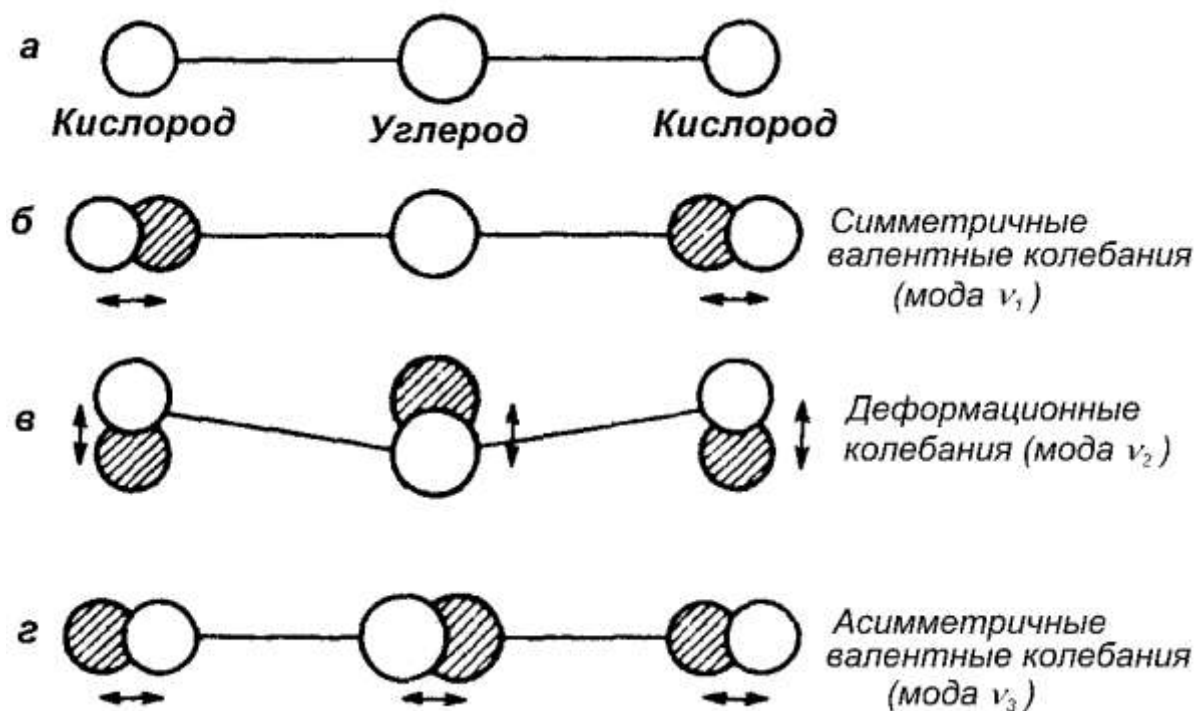


Рис. 1.

Колебательное движение в молекуле CO₂. (а — невозбужденная молекула; б - г соответствуют трем нормальным колебательным модам).

Видно что их существует 3 типа.

Первый тип, обозначаемый ν_1 , происходит вдоль оси соединяющей атомы и называется симметричным (симметричная валентная мода).

Второй тип, обозначаемый ν_2 , соответствует движению атома С в плоскости перпендикулярной оси симметрии (деформационная мода).

Третий тип, обозначаемый ν_3 , происходит также как и первый вдоль оси симметрии, но в отличие от него является асимметричным, т.е. в колебательном процессе задействован атом углерода. Такой режим называется асимметричная валентная мода.

Схема энергетических уровней молекулы CO₂ приведена на рис. 2.

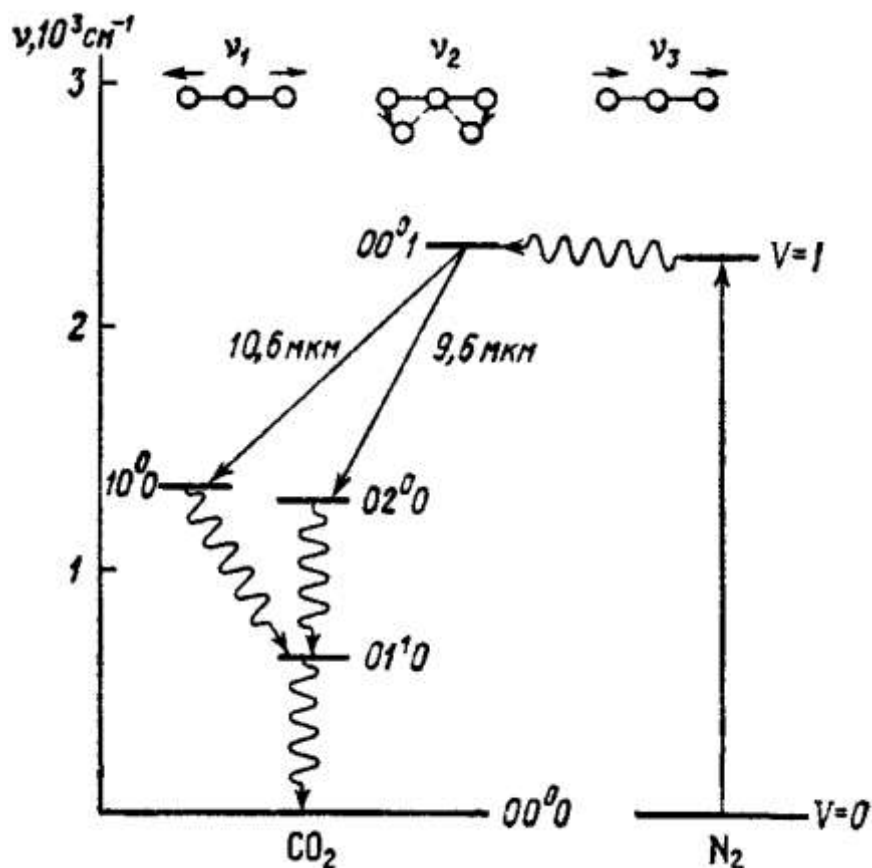
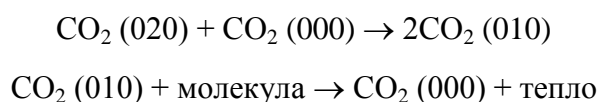


Рис. 2

Схема нижних колебательных уровней молекул CO_2 и N_2 в основном электронном состоянии: прямые наклонные стрелки — генерационные переходы, прямая стрелка вверх — возбуждение азота, волнистая горизонтальная стрелка — передача энергии возбуждения от азота к CO_2 , остальные волнистые стрелки — релаксационное опустошение нижних лазерных уровней.

Как видно из схемы, генерация происходит между первым колебательным уровнем асимметричной валентной моды (обозначается CO_2 (001), является верхним), и первым колебательным уровнем симметричной валентной моды (обозначается CO_2 (100), является нижним уровнем). Нижним уровнем может быть также 2-ой колебательный уровень деформационной моды (обозн. CO_2 (020)). Разность энергий между уровнями (100) и (020) очень мала и между ними происходит интенсивный взаимообмен. Тем не менее, поскольку уровень (100) лежит несколько выше, то он населен немного меньше, что делает переход (001)→(100) более предпочтительным для генерации. Поэтому **длина волны** излучения CO_2 лазера считается равной **10,6 мкм**.

Далее в результате следующих столкновений энергия нижнего уровня переходит в тепло:



Практически во всех достаточно эффективных CO_2 – лазерах в качестве дополнительного канала для перекачки энергии в ν_3 моды колебаний молекулы CO_2 используются молекулы азота. Дело в том, что максимум сечения колебательного возбуждения молекулы N_2 существенно ближе к максимуму функции распределения электронов по энергиям в газовом разряде по сравнению с молекулой CO_2 . Поэтому эффективность образования колебательно-возбужденных молекул N_2 значительно выше, чем молекул CO_2 . Поскольку молекула N_2 состоит из двух одинаковых ядер, её дипольное излучение запрещено. Она может дезактивироваться только при столкновении со стенкой сосуда или с другими молекулами. При наличии CO_2 колебательная энергия N_2 может быть легко передана молекулам CO_2 , поскольку существует близкий резонанс между колебаниями N_2 и модой ν_3 колебаний CO_2 . Как видно из рис. 2, уровень $\text{CO}_2(001)$ только на 18 см^{-1} лежит выше первого колебательного уровня азота. Эта разность энергий намного меньше средней кинетической энергии, так что во время столкновений молекулы CO_2 могут легко отбирать энергию у N_2 на возбуждение моды ν_3 .

Резонансный обмен энергиями может происходить не только между CO_2 и N_2 , но также и между молекулами CO и CO_2 . Во время разряда образуется заметное количество молекул CO .

В газовую смесь CO_2 лазера кроме азота ещё добавляют гелий. Он облегчает тепловое расселение нижнего уровня, отвод тепла в лазерах низкого давления и улучшение характеристик газового разряда в лазерах высокого давления.

Рассмотрим типичную конструкцию CO_2 лазера, с продольной накачкой тлеющим разрядом. Она представлена на рис.3.

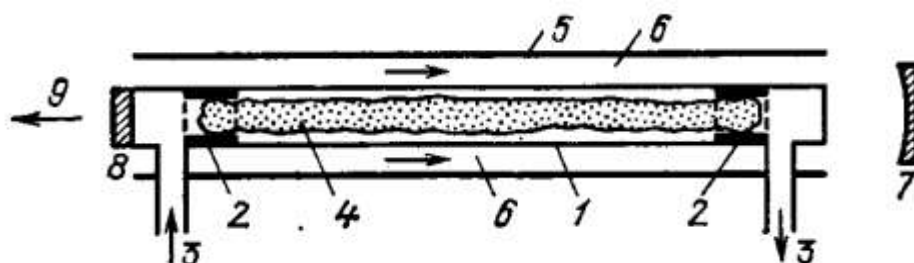


Рис.3 Схема CO_2 лазера небольшой мощности с диффузионным охлаждением:

- 1 – разрядная трубка, 2 – кольцевые электроды, 3 – система прокачки рабочей смеси, 4 – газоразрядная плазма, 5 – внешняя трубка, 6 – охлаждающая проточная вода, 7 – глухое зеркало, 8 – полупрозрачное зеркало, 9 – лазерное излучение.

В длинной стеклянной трубке радиусом несколько сантиметров помещены внутри кольцевые электроды, чтобы не загромождать дорогу излучению. В некоторых конструкциях может присутствовать система непрерывного обновления смеси, которая выводит побочные продукты разложения молекул в газовом разряде, оказывающие побочные неблагоприятные действия. Поток тепла из разряда идет к стенкам трубки, которые охлаждают проточной водой.

Как известно, стационарный тлеющий разряд можно зажечь только при сравнительно низких давлениях газовой среды (1-18 мм. рт. ст.). На рисунке 4 приведена вольтамперная характеристика тлеющего разряда.

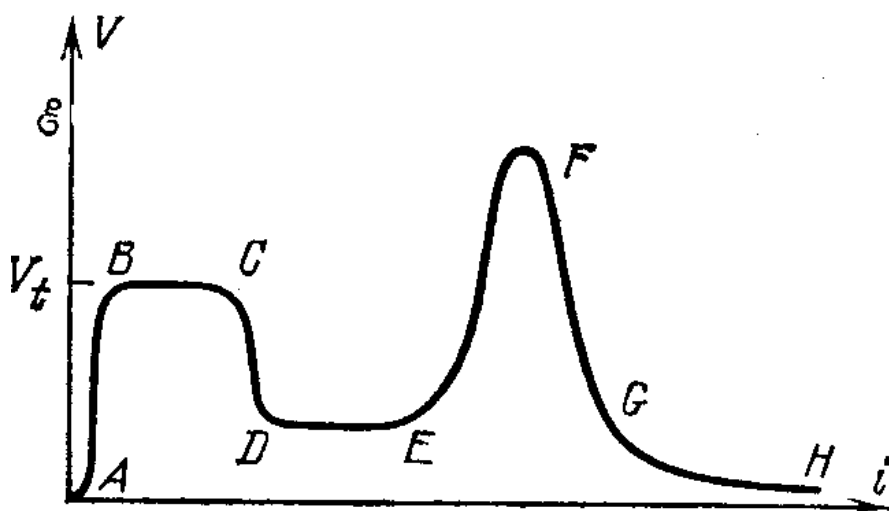


Рис.4 ВАХ разряда между электродами в широком диапазоне токов; А- область несамостоятельного разряда, ВС- темный таунсендовский разряд, DE- нормальный тлеющий разряд, EF- аномальный тлеющий разряд, FG- переход в дугу, GH- дуга

На вольтамперной характеристике отчетливо можно провести разграничение различных характеристик областей.

В области А (токи от 10^{-16} до 10^{-13}) токи пропорциональны подведенной извне энергии и не зависят от U (область насыщения).

В области ВС (токи $10^{-12} - 10^{-6}$ А) происходит усиление попавших в промежуток электронов за счет ионизационного размножения, т.е. электрон в поле на длине свободного пробега набирает достаточную энергию для ионизации атомов или молекул газа (разряд получил название таунсендовского).

В области CD (токи $10^{-6} - 10^{-4}$) имеем дело с поднормальным разрядом, который является переходным от таунсендовского к нормальному разряду DE.

В области DE имеет место нормальный тлеющий разряд, вольтамперная характеристика представляет собой прямую параллельную оси тока. Таким образом, в нормальном тлеющем разряде напряжение между электродами не зависит от силы тока. Дело в том, что в нормальном тлеющем разряде только часть поверхности катода покрыта разрядом, с увеличением силы тока часть поверхности, занимаемая разрядом, возрастает так, что плотность тока остается постоянной.

При токах, больших $10^{-2} - 10^{-1}$ А возникает аномальный тлеющий разряд с возрастающей вольтамперной характеристикой – область EF. Аномальный разряд занимает всю поверхность катода и поэтому при увеличении силы тока плотность тока возрастает.

При достижении определенной плотности тока в аномальном разряде происходит скачкообразный переход к дуговому разряду с резким возрастанием тока и уменьшением напряжения, падающего на газовом промежутке – область FG.

Характерная структура классического нормального тлеющего разряда показана на рис. 5.

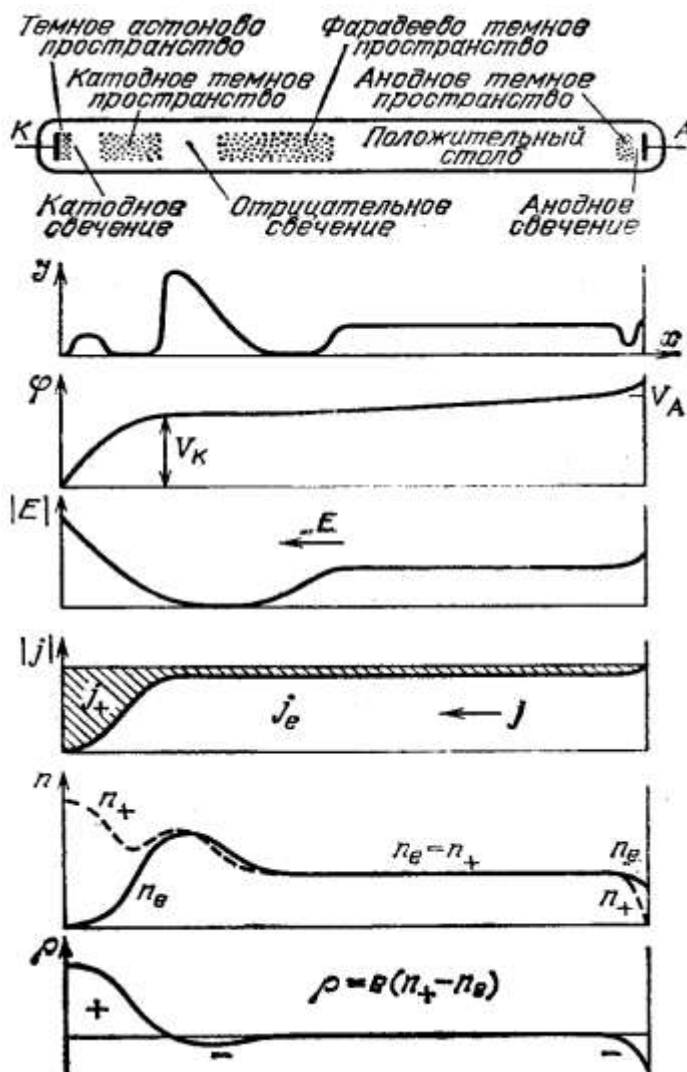


Рис.5 Картина тлеющего разряда в трубке и распределения эффективности свечения J, потенциала φ, продольного поля E, плотностей электронного и ионного токов J_e , J_+ и разрядов n_e , n_+ , объемного заряда $\rho = e(n_+ - n_e)$

На этом же рисунке приведено распределение интенсивности свечения J , потенциала ϕ , напряженности поля E , плотностей электронного и ионного токов J_e , J_+ , распределение заряда.

К катоду примыкают катодные части, затем следует положительный столб, вблизи анода располагается сравнительно узкая анодная часть.

Основные процессы, обеспечивающие самостоятельный разряд, происходят в катодных частях разряда и на самом катоде. Глеющий разряд не может существовать без них. Положительный столб не является существенной частью разряда. Если при существующем разряде приближать анод к катоду, то сокращается именно эта область. Анодные части также не являются необходимыми, они представляют собой переходную часть между анодом и положительным столбом. В катодных частях разряда преобладающим является направленное движение заряженных частиц (электронов и положительных ионов), тогда как в положительном столбе доминирует хаотическое движение частиц.

Из катода эмитируются электроны вследствие бомбардировки его поверхности ионами, ускоренными сильным электрическим полем вблизи катода, быстрыми атомами, а также вследствие фотоэффекта. Эти электроны, ускоряясь в направлении анода, приобретают энергию, достаточную для ионизации атомов. Новые электроны, возникающие при ионизации газа, снова ускоряются полем, а положительные ионы летят к катоду, вызывая на его поверхности эмиссию электронов.

Различные этапы указанного процесса обуславливают наличие темных и светящихся областей, таких как темное анодное пространство, катодное свечение, катодное темное пространство, отрицательное свечение, фарадеево темное пространство.

Подробное рассмотрение физики процессов происходящих в этих областях выходит за рамки нашего курса. Поэтому перейдем сразу к рассмотрению положительного столба, поскольку именно он используется в качестве активной среды газовых лазеров. Его использование обусловлено следующими причинами:

1. Положительный столб может быть наиболее протяженной областью разряда.
2. Положительный столб наиболее однороден по параметрам.
3. Длину положительного столба легко регулировать простым придвижением или сближением электродов, при этом размеры приэлектродных областей не изменяются
4. Положительный столб отличается от приэлектродных областей относительно небольшим градиентом потенциала и отсутствием объемного заряда. Он

представляет собой однородную в продольном направлении среду, состоящую из различных частиц.

Такой положительный столб использовался для создания непрерывных лазеров с низким давлением активной среды, таким как гелий-неоновый лазер, CO_2 -лазер, лазер на парах металлов и т.д..

2. Описание лабораторного стенда для изучения непрерывного CO_2 -лазера низкого давления

Общий вид установки непрерывного CO_2 -лазера низкого давления показан на рис.6.



Рис.6 Общий вид лазерной установки.

В состав лабораторного стенда входят: панель управления (рис.7), панель измерителей (рис.8), излучатель (рис.9), газовакуумная система установки (рис.10), электрическая система установки (рис.11).



Рис.7 Панель управления.

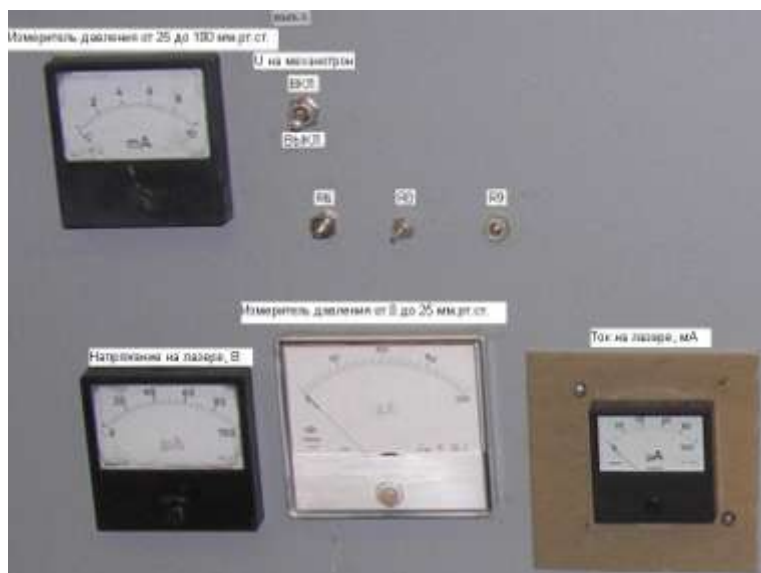


Рис.8 Панель измерителей.



Рис. 9. Излучатель

Газовакуумная система состоит из: баллона с гелием, баллона с азотом, баллона с углекислым газом, пустого баллона для приготовления рабочей смеси, форвакуумного насоса, электромагнитного клапана, мановакуумметра, механотрона, кранов. Подключение этих элементов изображено на рис.10.

Электрическая система состоит из: магнитного пускателя ПМЕ-222, предохранителей, трех выключателей (S1, S2, S3), электромагнитного клапана, блока управления клапаном, магнитного пускателя ПМЕ-011, форвакуумного насоса, механотрона, высоковольтной части, латра, измерительных приборов, резисторов системы измерения (R1-R9). Подключение этих элементов изображено на рис.11.

Излучатель представляет собой стеклянную колбу, внутри которой располагаются два несообщающихся сосуда, в один из которых подается готовая смесь газов, а другой служит для охлаждения лазера и в него подается вода. Внутри располагаются два зеркала и два электрода (рис.9).

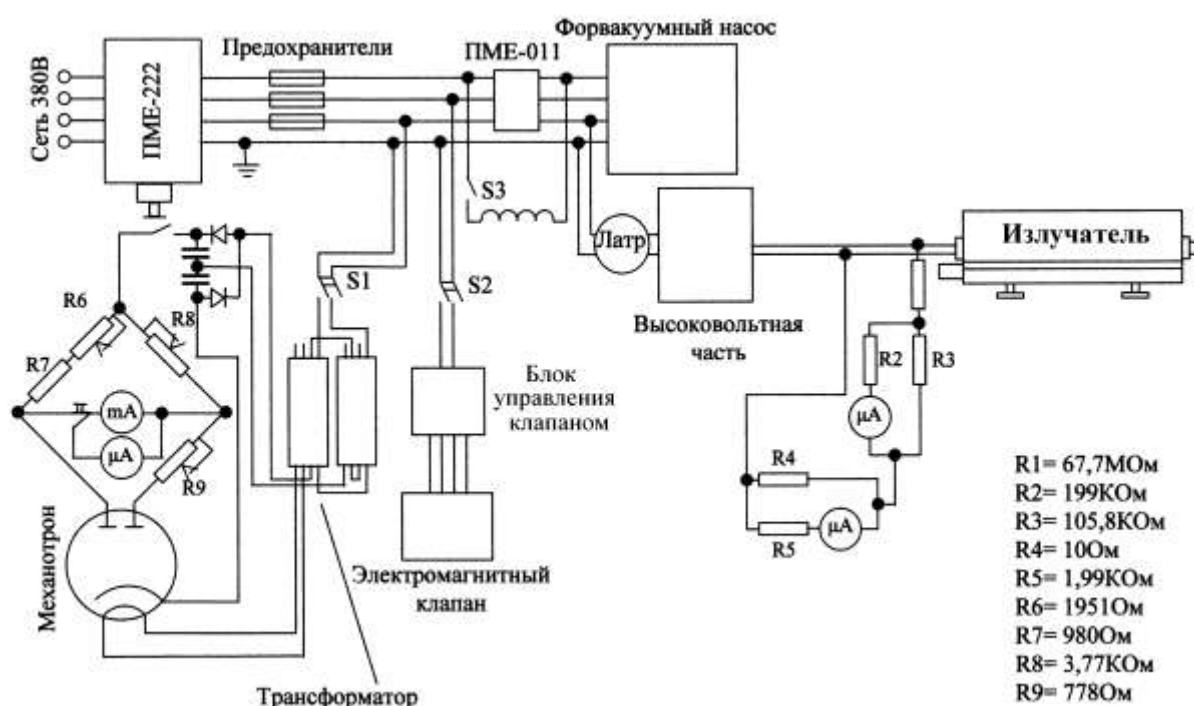


Рис. 10. Электрическая схема установки. Пояснения см. в тексте.

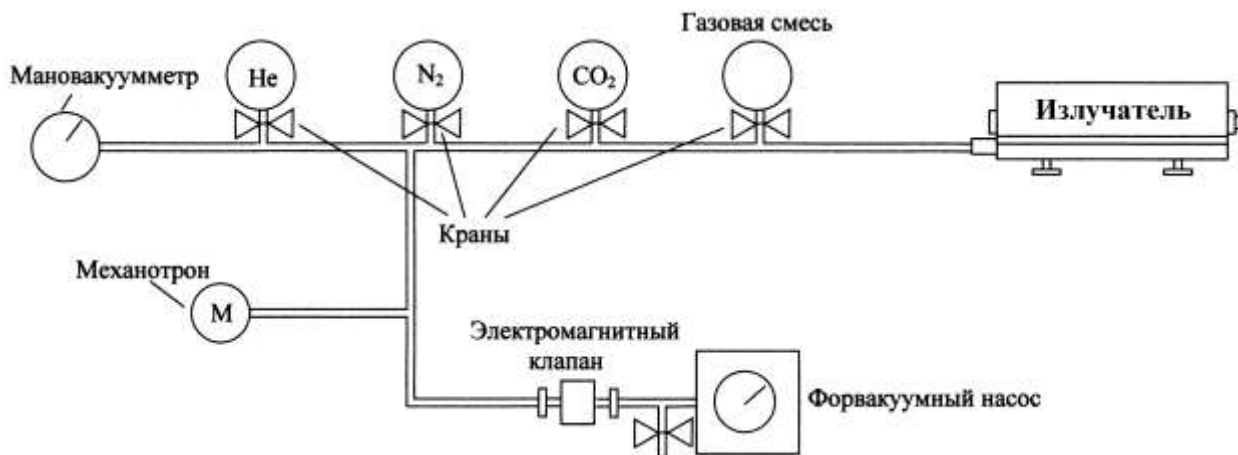


Рис. 11. Газовакуумная система установки. Пояснения см. в тексте.

Газовакуумная система установки изображена на рис.10.

С помощью форвакуумного насоса создается вакуум во всей газовакуумной системе (рис.10), при этом все краны баллонов с газами должны быть закрыты. После чего пускается под давлением в 15 Тор углекислый газ, находящийся в первом баллоне, который заполняет пустой баллон (баллон №4). Затем перекрывается баллон с углекислым газом, после чего, под давлением в 30 Тор, пускается азот из баллона №2, заполняя четвертый баллон. После чего перекрывается баллон с азотом и, наконец, подается гелий из третьего баллона под давлением в 90 Тор, и заполняется баллон со смесью газов. Перекрыв все баллоны, создается вакуум в системе. Четвертый баллон со смесью гелия, азота и углекислого газа в соотношении один, к одному, к четырем ($1:1:4 = \text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$) готов. И, открывая его, подается необходимая смесь газов на CO_2 -лазер.

Электромагнитный клапан служит для перекрытия шлангов, чтобы избежать утечки газа, а также проникновения атмосферного воздуха при создании смеси.

Механотрон служит для точного измерения давления в системе.

В данном случае приведен пример создания в четвертом баллоне смеси ($1:1:4 = \text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$), в работе также будут использованы смеси ($1:1:8 = \text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$), ($1:4:8 = \text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$).

Электрическая система установки показана на рис.11.

Питание 380В подходит к магнитному пускателю ПМЕ-222, который служит для отключения сети при перегревах, перепадах напряжения, а также пробоях. Далее ток идет через предохранители, которые служат, для предохранения приборов от скачков напряжения и короткого замыкания, проходя через клеммы, к форвакуумному насосу и в высоковольтную часть, где напряжение повышается до 20кВ. Затем ток поступает на лазер и через делитель напряжения поступает на измерительные приборы, с помощью которых измеряется ток и напряжение на лазере.

Питание 220В подходит к измерительным приборам, механотрону, подключенному по мостовой схеме, блоку управления клапаном, клапану, магнитному пускателю ПМЕ-011, служащему для отключения сети при перегревах и перепадах напряжения, а также пробоях.

Сопротивления подобраны таким образом, чтобы на измерительные приборы приходилось не более 20В, а на лазер не более 20кВ. Это сделано для того, чтобы можно было легко измерить напряжение на лазере.

Для охлаждения излучателя во время работы предусмотрена подача проточной воды через вентиль из трубы холодного водоснабжения. Слив воды осуществляется в раковину.

3. Порядок работы на установке и задание на самостоятельную работу.

Прежде чем начать работу необходимо:

1. Открыть вентиль охлаждения излучателя проточной водой и убедиться в наличии потока воды. Невыполнение данного требования создает опасность выхода из строя излучателя вследствие перегрева.
2. Убедиться в наличии в наличии массивного, не отражающего, не воспламеняющегося предмета на пути лазерного луча. Лазер способен генерировать излучение мощностью до 20 Вт. Это излучение способно вызвать ожог, порчу одежды и лабораторного имущества. **Излучение особенно опасно для глаз при прямом попадании.**
3. Убедиться, что все тумблеры на установке стоят в положении “выключено”.

Запрещается так же открывать крышку и прикасаться к излучателю, поскольку для его питания используется напряжение до 20 кВ.

Далее предусмотрен следующий порядок действий.

1. Нажать черную кнопку (пуск) включения сетевого напряжения на панели управления (рис. 7).
2. Включением тумблера “магнитный пускатель” на панели управления запустить форвакуумный насос. Дождаться пока стрелка мановакуумметра опустится до нуля.
3. Включить тумблер “U на механотрон” (рис. 8), подав тем самым напряжение на механотрон. Следя за показаниями измерителя давления от 25 до 100 мм. рт. ст., расположенного на той же панели дождаться нулевых показаний.
4. Включить тумблер “напряжение на клапан” и нажав на клапан в левом верхнем углу установки подключить измеритель давления от 0 до 25 мм. рт. ст.
5. Дождавшись нулевых показаний измерителя давления от 0 до 25 мм. рт. ст., тумблером “магнитный пускатель” выключить форвакуумный насос.
6. Удерживая клапан измерителя давления от 0 до 25 мм. рт. ст., **осторожно** открыть кран баллона с рабочей смесью и напустить ее в систему до заданного давления. После этого отпустить клапан и выключить тумблер “U на механотрон”.

7. Включить тумблер “Латр” на панели управления. Поворачивая ручку латра зажечь тлеющий разряд и обеспечить требуемый ток.

8. Снять показания измерителя мощность лазерного излучения.

При работе необходимо иметь ввиду, что при увеличении напряжения на латре, после зажигания разряда напряжение падает, а ток увеличивается. Это связано с тем, что происходит переход от темного таунсендовского к нормальному тлеющему разряду (см. рис.4 и описание к нему), вольтамперная характеристика которого представляет прямую, параллельную оси тока. Таким образом, в нормальном тлеющем разряде напряжение между электродами не зависит от силы тока. В нормальном тлеющем разряде только часть поверхности катода покрыта разрядом; с увеличением силы тока часть поверхности, занимаемая разрядом, возрастает так, что плотность тока остается постоянной.

После окончания работы на установке следует:

- привести все тумблеры в положение “выключено”;
- нажав красную кнопку (стоп), отключить сетевое напряжение;
- закрыть вентиль подачи воды.

Задание на самостоятельную работу:

- заполнить систему с излучателем газовой смесью до давления, указанного руководителем;
- зажечь тлеющий разряд;
- снять зависимость мощности лазерного излучения от силы тока разряда, снимая так же значения напряжения на газоразрядной трубке;
- обработав полученные данные построить зависимости мощности лазерного излучения и КПД от мощности, вводимой в разряд.

4. Контрольные вопросы.

1. Принцип работы CO_2 лазера.
2. Длина волны лазерного излучения.
3. Область тлеющего разряда, являющаяся активной средой лазера.
4. Устройство лабораторной установки.
5. Порядок работы и меры безопасности.

Список литературы.

1. Карлов Николай Васильевич. Лекции по квантовой электронике / Н. В. Карлов. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: Наука, 1988. - 335с.
2. Витteman В. СО₂-лазер., М.: Мир, 1990, 360с.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда: Учеб. руководство. – М.: Наука, 1987. – 592 с.