

А.И. Гриднев, **И.И. Муравьев**

ИНФРАКРАСНЫЕ ЛАЗЕРЫ С АКТИВНОЙ СРЕДОЙ НА ОСНОВЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ОТКРЫТЫХ НЕОДНОРОДНЫХ РАЗРЯДОВ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

Изучалась инфракрасная генерация и спонтанное излучение в видимой области спектра. Активной средой являлись протяженные открытые неоднородные импульсные разряды в инертных газах. Рассмотрены четыре конструкции разрядных трубок.

Протяженные открытые неоднородные импульсные разряды (ПОНИР) могут служить активной средой для лазеров [1], а исследование генерации в таких активных средах позволяет лучше понять процессы возникновения неравновесности и релаксации в плазме.

Для изучения ПОНИР нами применялись несколько типов газоразрядных приборов (рис. 1).

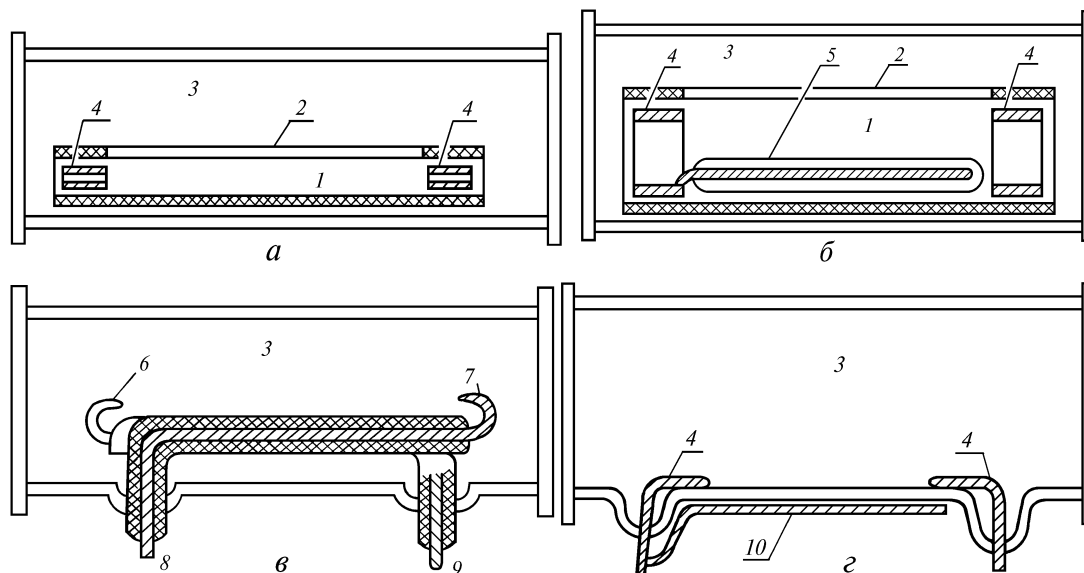


Рис. 1. Газоразрядные приборы первого (а), второго (б), третьего (в) и четвертого (з) типов: 1 – керамическая трубка; 2 – щель; 3 – камера; 4 – электроды; 5 – остеклованный стержень; 6, 7 – внутренние концы электродов, образующие разрядный промежуток; 8, 9 – внешние концы электродов (выводы); 10 – полоска фольги

Первый тип (рис. 1, а) состоит из алундовой разрядной трубки 1, в которой прорезана щель 2 по образующей. Плазма импульсного разряда, локализованного в трубке, вытекает через щель в камеру 3 [1]. Газ в камере подсвечивается разрядом через щель и вместе с вытекающей плазмой образует активную среду. В таком устройстве хорошо разделены процессы в камере и в трубке; прибор привлекает простотой, долговечностью, стойкостью к мощным импульсам. Однако длинные разрядные промежутки требуют высокого пробивного напряжения, разряд не всегда хорошо локализован в трубке, стабильность и воспроизводимость иногда недостаточно высоки.

Второй тип устройства (рис. 1, б) отличается только тем, что в разрядной трубке 1 на стенке лежит тонкий остеклованный молибденовый стержень 5, который одним концом, где нет остекловки, соединен с электродом 4 [2]. В результате понижается пробивное напряжение, разряд неизменно локализуется в трубке, наблюдается хорошая стабильность и воспроизводимость параметров.

Основой третьего типа устройства (рис. 1, в) являются два изогнутых остеклованных молибденовых стержня 6, 7. Стержни расположены горизонтально, спаяны между собой и помещены в газонаполненную камеру. Концы у обоих стержней не остеклованы. Внутренние противоположные концы стержней 6, 7 образуют разрядный промежуток. Концы 8, 9, выходящие из камеры наружу, являются выводами, к которым подключен источник импульсов [3]. К достоинствам прибора можно отнести низкие напряжения пробоя, хорошую локализацию разрядного шнура в пространстве, прекрасную стабильность и воспроизводимость параметров. В этом устройстве легко получить необходимую чистоту газа в связи с отсутствием керамики, обычно склонной к газовыделению. Интенсивность облучения газа в камере высока, т.к. токовый шнур ничем не прикрыт.

К недостаткам устройства следует отнести недостаточную стойкость к повышенным импульсным напряжениям по сравнению с предыдущими типами газоразрядных приборов.

Четвертый вариант прибора (рис. 1, г) – это просто камера, где токовый шнур стелется по стенке между двумя электродами 4 и плазма расширяется к оси камеры. Для этого электроды прижаты к внутренней стенке камеры, с наружной стороны к ней прикреплена полоска фольги (по линии между электродами), соединенная с одним из электродов. Конструкция прибора проста в изготовлении, обеспечивает высокую стабильность и воспроизводимость работы. Пробивное напряжение сравнительно низко.

Первый и второй типы прибора удобны для исследований, так как процессы в камере и в разрядной трубке хорошо разделяются, а третий и четвертый – позволяют облучать газ в камере светом высокой интенсивности.

Источник электрических импульсов представлял собой батарею конденсаторов, коммутируемую трехэлектродным разрядником на газоразрядный прибор. Чаще использовался самопробой разрядника, т.к. он более выгоден. В отдельных экспериментах применялся тиратрон ТГИ1-1000/25. Емкость батареи конденсаторов могла изменяться ступенями по 0,1 до 0,7 мкФ. Напряжение зарядки достигало 25 кВ. Ток разряда измерялся шунтом.

Применялся осциллограф С1-74, монохроматор ЗМР-3 и в отдельных случаях МДР-23, фотоумножитель ФЭУ-62 и фотоспротивления для регистрации излучения. Фоторазвертки свечения снимались прибором ВФУ-1.

С помощью описанной аппаратуры изучались разряды в инертных газах (в основном в смесях). Наблюдаемые нами линии генерации и приписанные им переходы приведены в таблице.

λ , мкм	Переходы	Газ
1,27	$3 d [3/2]_1^0 - 4 p [1/2]_1$	Ar I
1,35	$3 s [3/2]_2^0 - 4 p [3/2]_2$	Ar I
1,44	$6 s [3/2]_1 - 5 p [3/2]_1$	Kr I
1,45	$5 d [3/2]_1^0 - 4 p [1/2]_0$	Ne I
1,73	$5 d [3/2]_1^0 - 6 p [5/2]_2$	Xe I
1,79	$4 d [1/2]_1^0 - 4 p [3/2]_2$	Ar I
2,03	$5 d [3/2]_1^0 - 6 p [3/2]_1$	Xe I
2,39	$3 d [3/2]_0^0 - 4 p [1/2]_1$	Ar I
2,52	$4 d [1/2]_1^0 - 5 p [3/2]_2$	Kr I
2,65	$5 d [3/2]_1^0 - 6 p [1/2]_0$	Xe I

Для линии 2,026 мкм нейтрального ксенона основные результаты получены с устройством <разрядная трубка – щель – камера> (первый и второй варианты). Дадим сводку результатов по этой линии и краткие комментарии по ходу изложения. Изучались смеси ксенона (в основном давление 1 Торр) и гелия (0–150 Торр).

1. Генерация наблюдается как в трубке, так и в камере.

2. В трубке генерация жестко привязана к первому полупериоду разрядного тока и в других временных интервалах не возникает. Наиболее вероятный механизм возбуждения – преимущественно электронный удар.

3. Генерация в камере наблюдается в виде импульсов: а) привязанных к полупериодам разрядного тока; б) возникающих сразу после затухания импульса тока; в) в интервале 40–50 мкс от импульса тока.

4. Интенсивность спонтанных линий в трубке значительно выше тех же линий в камере. Генерация же, наоборот, сильнее в камере.

5. В разрядной трубке импульсы излучения спонтанных линий имеют сравнительно крутой фронт нарастания. Максимум достигается в конце первого полупериода тока.

6. Спонтанное излучение из камеры имеет максимум интенсивности, начинающийся развиваться спустя 7–10 и более микросекунд после окончания импульса тока. До этого интенсивность нарастает плавно, иногда имеется пьедестал, иногда промежуточные максимумы, привязанные ко второму и третьему полупериоду разрядного тока.

7. Импульсы генерации в камере могут быть привязаны к первому, второму, первому и второму, второму и третьему, первому, второму и третьему полупериодам разрядного тока. Другие сочетания не наблюдались при любых вариациях условий эксперимента.

8. Импульс генерации, возникающий после затухания тока, исчезал при повышении энергии, запасенной в батарее конденсаторов.

9. Генерация вблизи 40–50 мкс появлялась только при наборе свежей смеси.

На рис. 2 изображены в единой временной шкале схема фоторазвертки, ток, генерация в камере и спонтанное излучение из камеры.

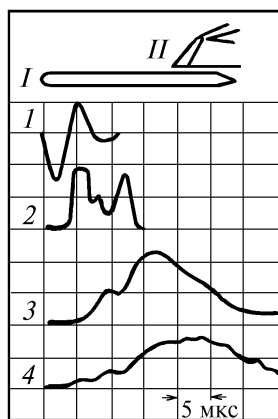


Рис. 2. Динамика развития процессов в камере прибора первого типа. I – схема фоторазвертки в трубке; II – в камере; I – ток; 2 – генерация на линии 2,026 нейтрального ксенона в камере; 3 – спонтанное излучение в камере (линия 588,9 нм нейтрального гелия); 4 – линия 840 нм нейтрального ксенона. Давление гелия 150 Торр, ксенона – 1 Торр; емкость конденсаторов 0,4 мкФ; напряжение 14 кВ

Анализ формы импульсов спонтанного излучения из трубки и из камеры дает основания предполагать, что в камере, облучаемой светом разряда, образуется фотоплазма. Затем в камеру вытекает плазма из разрядной трубки, смешиваясь с фотоплазмой. Но это происходит тогда, когда генерация уже затухла.

Генерацию на линии 2,026 мкм нейтрального ксенона здесь можно объяснить следующими механизмами: прямым электронным ударом (разрядная трубка), прямым оптическим возбуждением (камера, низкое давление гелия), процессами образования и релаксации фотоплазмы при облучении газа (камера, повышенное давление газа), рекомбинацией фотоплазмы (максимум после импульса тока), рекомбинацией разрядной плазмы, вытекающей из щели трубки (импульс в интервале 40–50 мкс).

Генерация при облучении газа резонансным светом может быть значительно сильнее, чем при прямом электронном возбуждении и при рекомбинации в сходных условиях (давлении и составе смеси, энергии, вложенной в разряд).

При использовании третьего типа разрядного устройства формы импульсов генерации качественно похожи на те, что были в устройствах <трубка – щель – камера>. Сигнал генерации с фотоприемника рос с увеличением зарядного напряжения до 11–12 кВ, после чего наблюдалось насыщение. Максимальная интенсивность же генерации с ростом давления гелия до 120 Торр (при напряжении не более 15 кВ) падает, а затем начинает возрастать.

Генерация на линиях нейтрального ксенона на длине волны 1,73 и 2,65 мкм имеет ряд отличий от генерации на длине волны 2,026 мкм. Последняя наблюдается и с алюминиевыми, и с диэлектрическими зеркалами. На линии же 1,73 мкм генерация с алюминиевыми зеркалами не на-

блюдается, а возникает при замене одного из зеркал селективным диэлектрическим, отражающим в области вблизи 1,73 мкм. При тех же условиях наблюдается генерация на волне 2,65 мкм (линия 2,026 мкм таким резонатором подавляется).

Начинается генерация на волнах 1,73 и 2,65 мкм при сравнительно высоких давлениях гелия (100–150 Торр для волны 1,73 и 75 Торр – 2,65 мкм). Мы использовали четвертый вариант газоразрядного прибора с межэлектродным расстоянием всего 180 мм из-за высокого пробивного напряжения при повышенных давлениях. Генерация на волне 1,73 мкм не исчезает при парциальных давлениях ксенона до 4-х Торр.

Зависимость максимальной мощности генерации на длине волны 1,73 мкм от накопительной емкости имеет максимум при 0,4 мкФ (давление ксенона 1 Торр, гелия 720 Торр, напряжение 9,5 кВ). При емкости конденсатора 0,1 мкФ генерации уже нет, а при емкости 0,7 мкФ она падает в три раза. Максимальная мощность генерации как функция давления гелия растет в основном монотонно. Для давления ксенона 1 Торр этот рост почти линейен при изменении давления гелия от 400–500 до 1200 Торр. Максимальная мощность генерации при давлении ксенона 2 Торр меньше, чем при 1 Торр. Максимальная мощность генерации при давлении ксенона 3 Торр еще меньше и линейно растет до 900 Торр, а дальше начинается насыщение. При давлении ксенона 4 Торр мощность падает еще в полтора раза.

Интересно ведет себя мощность генерации в зависимости от зарядного напряжения (на линии 1,73 мкм смеси ксенон – гелий). Она максимальна при минимально возможном напряжении зарядки (пока газоразрядный промежуток еще пробивается). При росте напряжения мощность резко падает. Если мы в смесь ксенона (давление 0,5 Торр) и гелия (630 Торр) добавим неон (15 Торр), то мощность генерации упадет в 1,5 раза, спад с напряжением сохранится, но станет гораздо более плавным. При добавлении же аргона (давление 15 Торр) мощность генерации возрастает более чем в 2,5 раза, спад в зависимости от напряжения не будет уже наблюдаться. При добавлении криптона (давление 15 Торр) генерации не будет совсем. При увеличении содержания аргона в смеси мощность генерации значительно возрастает (везде используется емкость 0,4 мкФ).

Итак, эксперименты с добавками говорят о том, что механизм генерации на линии 1,73 мкм ксенона как количественно, так и качественно зависит от парциального состава смеси газов, растет с увеличением общего давления и содержания аргона. Снижение содержания ксенона до определенного предела также приводит к возрастанию мощности генерации.

Эксперименты по изучению инфракрасных линий генерации нейтрального аргона с активной средой на основе ПОНИР проводились с малыми парциальными давлениями аргона (десятые доли – единицы Торр). При давлении аргона 1 Торр и отсутствии заметных количеств других газов генерация на линии 1,79 мкм начинается уже при напряжении на 1 кВ выше пробойного (прибор четвертого типа, 0,4 мкФ) и растет слабо с напряжением. При давлении гелия 15 Торр появляется генерация на длине волны 2,39 мкм и немного усиливается вынужденное излучение на линии 1,79 мкм. Как и для линии 2,026 нейтрального ксенона, наблюдается появление насыщения при напряжении 12–15 кВ. Максимальная мощность генерации (при напряжении 15 кВ) наблюдается в интервале давлений около 30 Торр. Затем мощность генерации начинает падать – на линии 2,39 мкм она исчезает при давлении гелия 60 Торр, а на линии 1,79 мкм при давлении 75 Торр. Форма импульса генерации – простой максимум, синхронный с первым полупериодом разрядного тока.

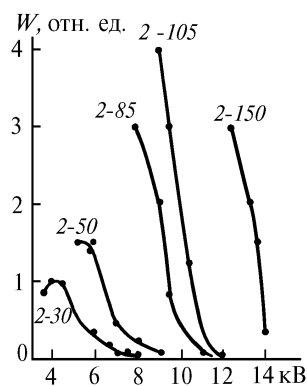


Рис. 3. Зависимость мощности генерации на линии 1,45 мкм неона от напряжения. Первая цифра – давление неона, вторая (через тире) – гелия, емкость конденсаторов 0,4 мкФ, прибор третьего типа

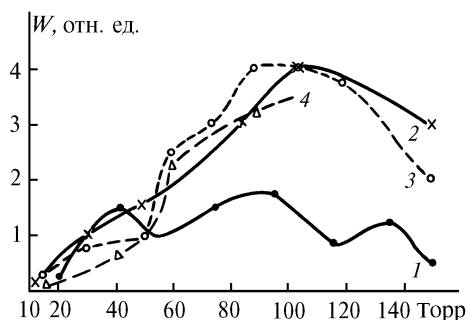


Рис. 4. Зависимость максимальной мощности генерации на линии 1,45 мкм неона от давления гелия. Кривая 1 – давление неона 1 Торр, 2 – 2, 3 – 4, 4 – 8 Торр, емкость 0,4 мкФ, прибор третьего типа

На рис. 3 изображено поведение сигнала генерации на длине волны 1,45 мкм в неоне [4] (смесь гелий – неон) в зависимости от напряжения при разных давлениях гелия (прибор третьего типа). Давление неона здесь не варьируется и равно 2 Торр. Отметим, что спад мощности генерации с ростом напряжения (при давлении гелия больше 60 Торр) сильно напоминает поведение таких же кривых для линии 1,73 мкм нейтрального ксенона в смеси ксенон – гелий. Такое обстоятельство делает вероятным предположение о сходстве механизмов генерации для этих линий.

На рис. 4 показано изменение максимальной мощности генерации на линии 1,45 мкм неона с ростом давления гелия при давлениях неона соответственно 1, 2, 4, 8 Торр. Отметим, что с увеличением давления неона кривые приобретают более простую форму. Добавки других инертных газов в смесь гелий – неон приводят к резкому падению мощности и исчезновению генерации на линии неона 1,45 мкм.

Генерация на линии 2,52 мкм в криптона имеет меньшую интенсивность. При давлении 0,5 Торр выброса еще нет и токовый шнур не наблюдается; имеет место лишь диффузионный разряд во всем объеме камеры. При давлении же 1 Торр появляется выброс и мощность генерации растет с напряжением, достигая насыщения с 11–12 кВ. При добавке гелия мощность генерации на линии 2,52 мкм криптона падает.

Генерация на линии 1,44 мкм в смеси гелий – криптон в чистом криптона не возникала (давление криптона 5 Торр). При давлении гелия 20 Торр возникала генерация на длине волны 1,44 мкм. При повышении давления гелия до 210 Торр мощность генерации возрастает более чем в четыре раза.

Таким образом, ПОНИР обеспечивает генерацию на ряде инфракрасных линий. Повышенные давления наполняющего газа, технологическая простота делают описанные в статье приборы удобными для построения простых долговечных импульсных лазеров инфракрасного диапазона.

1. Г р и д н е в А. Г. // Изв. вузов. Физика. 1992. N 2. С. 41–46.
2. Г р и д н е в А. Г., М у р а в ь е в И. И. / Фотоплазма вблизи плазменной струи: генерация и обсуждение механизмов инверсии. Томск, 1990. 13 с. Деп. в ВИНТИ 18.05.90. N 2739–В90.
3. Г р и д н е в А. Г., М у р а в ь е в И. И. Вынужденное и спонтанное излучение на переходах инертных газов в неоднородных средах, возбуждаемых открытым разрядом Томск, 1991. 18 с. Деп. в ВИНТИ 24.05.91. N 2183–В91.
4. Г р и д н е в А. Г., М у р а в ь е в И. И. // XI Всесоюз. конф. по физике электронных и атомных столкновений (Тезисы докл.). Чебоксары: Изд-во Чувашского университета. 1991. С. 146.

Сибирский физико-технический институт им. В. Д. Кузнецова
при Томском госуниверситете

Поступила в редакцию
2 марта 1992 г.

A.G. Gridnev, I.I. Murav'jev. IR Lasers with an Active Media of Extended Open Inhomogeneous Electric Discharges in Noble Gases.

Lasing effect in the IR region and spontaneous emission in the visible spectral region have been studied. Active media of extended open nonuniform pulsed electric discharge in the inert gases were studied in this investigation. Four types of discharge tubes are analyzed.