

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
СПЕКТРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ФЛУКТУАЦИЙ
ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ He—Ne ЛАЗЕРА
НА $\lambda=0.63$ мкм

Л. Н. Гуськов, В. П. Сологуб и Б. И. Трошин

Проведено экспериментальное исследование формирования структуры низкочастотного шумового спектра флуктуаций интенсивности излучения лазера в условиях существования релаксационных и волновых колебаний разряда. Дан качественный анализ полученных экспериментальных результатов.

Для большинства газовых лазеров подавляющая часть мощности шума интенсивности излучения обусловлена неравновесностью состояний плазмы разряда. Исследования влияния неустойчивости плазмы на работу гелий-неонового лазера проводились в течение многих лет [1-3]. В отмеченных работах основное внимание было уделено определению типов неустойчивости разряда, измерению диапазонов их существования по току и зависимости частот колебаний от величины тока разряда при различных давлениях и соотношениях компонент смеси для активных элементов разной геометрии. Изучались также проявления неустойчивости разряда в выходной мощности лазера, режимы генерации, спектральный состав, взаимодействие типов колебаний и некоторые другие вопросы.

Данная работа посвящена детальному исследованию механизмов формирования структуры спектрального состава флуктуаций интенсивности излучения лазера при наличии регенеративной неустойчивости плазмы разряда. С этой целью режим генерации лазера был выбран таким, чтобы можно было наиболее четко и наглядно проследить за формированием шумового спектра излучения. В условиях наших экспериментов имели место релаксационные (реактивные) колебания и волновые процессы (страты), которые обычно дают основной вклад в шумовую мощность излучения лазеров.

Интерпретация результатов выполнена на базе представлений, развитых в физике низкотемпературной плазмы.

Формирование структуры спектрального
состава флуктуаций интенсивности
излучения лазера

Экспериментальные результаты измерения спектральной плотности мощности флуктуаций интенсивности излучения лазера $S_{\Delta I^2}$ и тока разряда $S_{\Delta I^2}$ показаны на рис. 2, где выделены основные области спектров и характерные частоты. Релаксационные колебания с центральной частотой $\Omega_p \sim 44$ кГц были обусловлены отрицательным динамическим сопротивлением плазмы разряда и реактивными свойствами газоразрядной трубки и внешних цепей. Колебания в области частоты $\Omega_b \simeq 390$ кГц соответствовали волновым процессам — ионно-диффузионным волнам положительного столба разряда активной среды. Структура страт была

определена спектром собственных частот волнового резонатора и представляла резонансный подъем шума вокруг частот наибольшей добротности. Нелинейные эффекты и эффекты взаимодействия приводили к возникновению шума в низкочастотной области спектра и гармонических составляющих. Вклад в низкочастотную область давали нулевые биения релаксационных и волновых колебаний. Подъем мощности на частотах $\omega_1 = \Delta\Omega_b$ и $\omega_2 = 2\Delta\Omega_b$ вызван биениями между различными спектральными компонентами волновых колебаний, где $\Delta\Omega_b$ — частотное расстояние между смежными составляющими спектра. Межмодовые биения на частоте $3\Delta\Omega_b$ практически совпадали с центральной частотой релаксационных колебаний и не разрешались при спектральном анализе. Биения на частоте $4\Delta\Omega_b$ относительно малы и в спектре не проявлялись. Подъем мощности на частоте $\omega_3 = 2\Omega_b$ определен второй гармоникой релаксационных колебаний.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состояла из гелий-неонового лазера на $\lambda = 0.63$ мкм, силовой и регистрирующей аппаратуры (рис. 1). Резонатор лазера образован плоским и сферическим ($R = 4$ м) зеркалами. Внутренний диаметр газоразрядной трубки равен ~ 3 мм, параметр $c/2L \simeq 79$ МГц. Излучение на $\lambda = 3.39$ мкм подавлялось метановой ячейкой. Состав активной смеси: $P_{Ne} \simeq 0.15$ тор, $P_{He} \simeq 2.6$ тор. Силовое питание осуществлялось от источника типа Б1-4 через дроссель Dp и нагрузочное сопротивление. Для модуляции тока разряда использовались генераторы типа ГЗ-33 и ГЗ-41. Лазерное излучение регистрировалось нестандартным германиевым фотодетектором $\Phi Д$, имеющим линейный частотный отклик в области измеряемых частот ($0.4 \div 600$ кГц), а боковое излучение трубки — фотоумножителем $\Phi У-15$. Флуктуационная и модуляционная составляющие тока разряда снимались с сопротивления r_2 . Спектральный анализ выполнялся прибором СК4-13. В качестве резонансных фильтров использовались микровольтметры селективные типа В6-6. При исследовании структуры спектрального состава шумов проводилась запись сигналов с выхода анализатора СК4-13 на самописец с одновременной точной приборной регистрацией данных для ряда характерных точек, отмеченных на рис. 2, 3, а, б. Измерение модуля импеданса газоразрядной трубки проводилось на дискретных частотах. Исследование бокового излучения выполнено по методике работы [2]. Среднее значение разрядного тока равнялось около 10 мА, среднее значение мощности излучения лазера составляло примерно 1 МВт.

Предложенная интерпретация формирования спектрального состава флуктуаций мощности излучения лазера основана на следующих экспериментальных данных. На рис. 3, а показан спектр бокового излучения различных участков газоразрядной трубки. При измерении у катода амплитуды волновых биений малы и подъем на частоте 44 кГц обусловлен по существу только релаксационными возмущениями, а увеличение сигнала в области низких частот указывало на присутствие нулевых биений. По мере удаления от катода появлялись и увеличивались амплитуды сигналов межмодовых и нулевых биений волновых колебаний. Модуляцией анодного напряжения через сопротивление r_2 было проведено измерение модуля проводимости цепей: r_2 —трубка— r — Dp —источник питания— r_1 (кривая 2) и r_2 —трубка— c — r_3 (кривая 1) (рис. 1 и 3, б). Из рис. 3, б видно, что минимум проводимости совпадает с экстремальной точкой в мощности флуктуаций тока разряда. В этой же области частот было проверено, что внешняя модуляция приводит к синфазному отклику бокового излучения газоразрядной трубки лазера.

Запись спектра мощности флуктуаций излучения лазера и тока разряда в области волновых колебаний на x — y самописце с выхода квадратичного детектора анализатора показана на рис. 3, в. В соответствии с рис. 3, в характерное значение периодичности спектра равно $\Delta\Omega_b \simeq 14$ кГц.

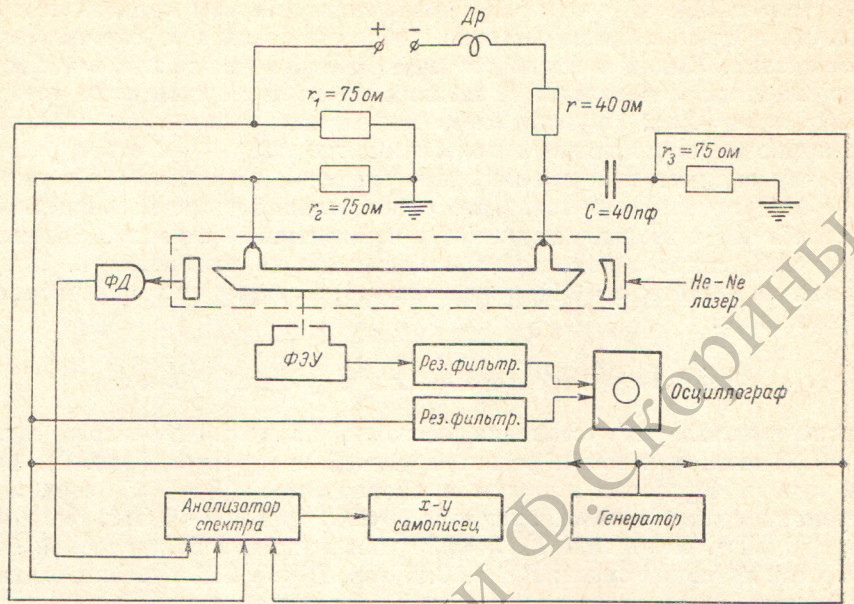


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

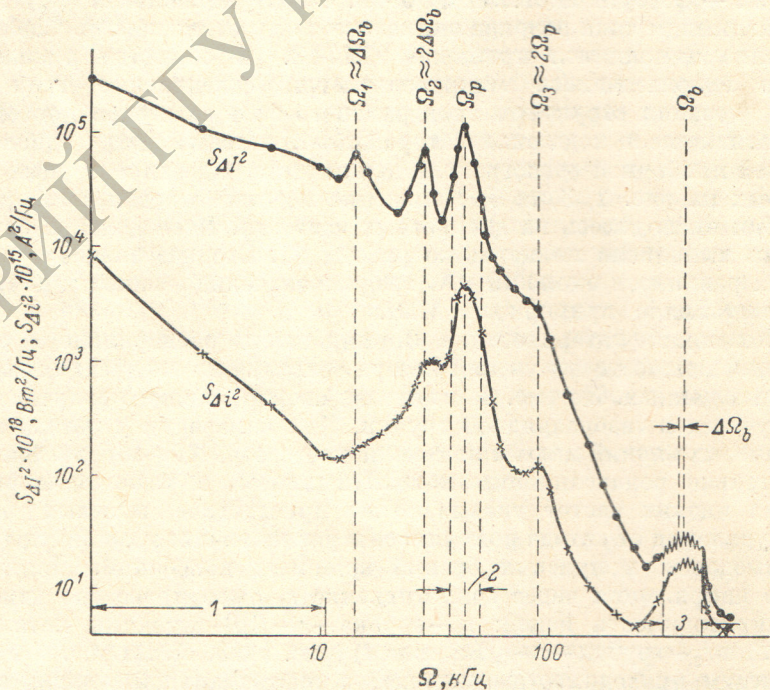


Рис. 2. Спектральные плотности мощности флуктуаций интенсивности лазерного излучения ($S_{\Delta I^2}$) и тока разряда ($S_{\Delta i^2}$).

1 — область нулевых биений, 2 — область релаксационных колебаний, 3 — область волновых колебаний.

На частоте 14 кГц и кратных ей были обнаружены биения в низкочастотной области спектра (рис. 2). Относительно небольшими вариациями давления неона были получены режимы генерации лазера, при которых частотная периодичность волновых колебаний была равна $\Delta\Omega_b \approx 12.5$ и

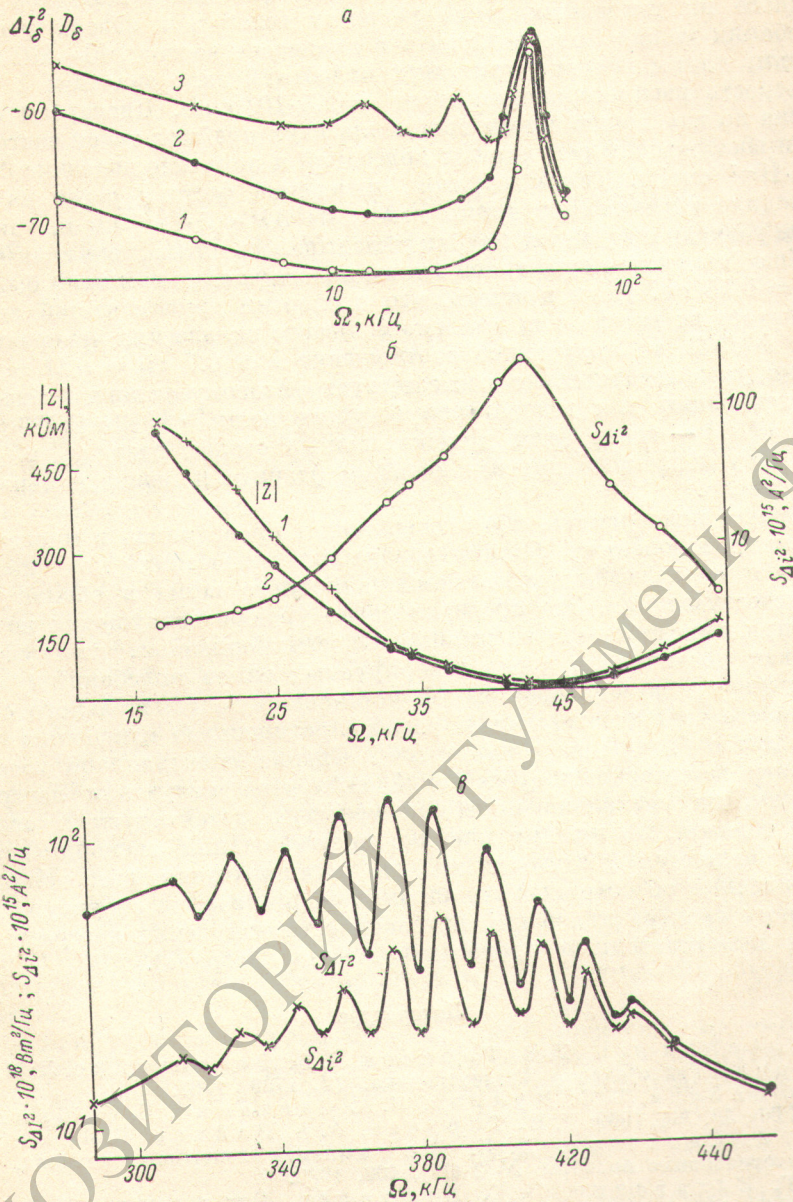


Рис. 3.

а — Спектральная мощность флуктуаций бокового излучения разрядной трубки у катода (1), на расстоянии 9 см от катода (2), на расстоянии 77 см от катода (рядом с анодом) (3); б — кривые 1, 2 характеризуют частотную зависимость модуля импеданса газоразрядной трубки в области существования релаксационных колебаний тока разряда; спектральная мощность флуктуаций тока — кривая $S_{\Delta i^2}$; в — спектральные мощности флуктуаций интенсивности лазерного излучения ($S_{\Delta I^2}$) и тока разряда ($S_{\Delta i^2}$) в области существования страт.

10 кГц. Соответствующие частоты колебаний наблюдались и в начале шумового спектра излучения лазера. Волновые колебания носили регенеративный характер, так как при исследовании бокового излучения трубки не было обнаружено участка с постоянным значением амплитуды сигнала [5]. Внешняя модуляция анодного или катодного потенциала

трубки (через сопротивления r_2, r_3 соответственно) на величину порядка $15 \div 25$ В на частотах в области существования страт приводила к возникновению регулярных колебаний, и при этом мощности флуктуаций интенсивности излучения лазера и тока разряда во всем спектральном диапазоне исследований снижались на четыре—шесть порядков. Для последующего из указанных выше режимов генерации лазера регулярные колебания можно было возбудить в диапазоне частот $340 \div 410$ кГц. Измерение длины волны регулярных колебаний дало значение $\lambda \sim 0.7$ см и скорость распространения страт $v = 2.5 \cdot 10^5$ см/с. Дисперсия была измерена по изменению длины волны для двух крайних точек частотной области возбуждения регулярных колебаний и получено значение $\Delta\lambda/\Delta\Omega \sim 5 \cdot 10^{-7}$ см/Гц. Таким образом, изменение частоты страт на 10 кГц приводило к изменению длины волны на $\Delta\lambda \sim 5 \cdot 10^{-3}$ см и, так как на длине разрядного участка трубки укладывалось число длин волн $n \sim 110$, то общее изменение суммарной длины волны целого числа длин волн было равно $n\Delta\lambda = 0.55$ см. Если принять, что дисперсия других частей волнового резонатора не внесла относительно большого вклада при измерении величины $\Delta\lambda/\Delta\Omega$, то полученное соотношение $\lambda \sim 0.7$ см \leftrightarrow $n\Delta\lambda \sim 0.55$ см вполне удовлетворительно соответствует фазовому условию возникновения генерации для генераторов бегущих волн [4, 5] $2\pi(l/\lambda) + \varphi_0 = 2\pi n$, где $2\pi(l/\lambda)$ — сдвиг фазы положительного столба разряда, φ_0 — сдвиг фазы, обусловленный другими частями разряда и внешней цепью, n — целое число.

Следует подчеркнуть, что эксперименты проводились в многомодовом самосинхронизованном режиме генерации оптических мод излучения лазера и вклад избыточного комбинационного шума в общий уровень был исчезающе мал. Это проверялось по уровню возмущения возникающего при выходе лазера из режима самосинхронизации, что осуществлялось как увеличением числа генерируемых типов колебаний (уменьшались потери в резонаторе), так и установкой дополнительного слабоотражающего третьего зеркала и регистрировалось по изменению спектра межмодовых биений на частоте $\Delta\omega_0$. Оценка спектральной плотности, мощности естественных флуктуаций выходного излучения лазера дает величину, на несколько порядков меньшую детектируемых значений. Таким образом, по нашему мнению, представленные экспериментальные данные являются достаточными для подтверждения вышеизложенных представлений об основных механизмах формирования структуры низкочастотного спектра колебаний интенсивности излучения лазера (возбуждаемых неравновесными процессами плазмы разряда).

Литература

- [1] С. А. Алякишев, Д. В. Гордеев, Е. П. Остапченко, Л. М. Пятакова. Радиотехника и электроника, 12, 1769, 1967.
- [2] А. А. Зайцев, В. Ф. Махров, И. А. Савченко, Б. Н. Швилкин. ЖТФ, 39, 764, 1969; Д. В. Гордеев, А. А. Зайцев, В. Ф. Махров, И. А. Савченко, Д. В. Швилкин. Электронная техника, сер. 3. Газоразрядные приборы, № 2 (14), 103, 1969.
- [3] Ю. Г. Захаренко, В. Е. Привалов. Опт. и спектр., 27, 821, 1969; ЖТФ, 42, 1899, 1972; Опт. и спектр., 35, 750, 1973.
- [4] А. А. Зайцев, Г. С. Леонов. Радиотехника и электроника, 10, 913, 1965.
- [5] М. Е. Герценштейн, В. В. Потемкин. ЖЭТФ, 24, 643, 1953

Поступило в Редакцию 1 октября 1974 г.