

УДК 621. 373. 826.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОДНОЧАСТОТНОГО He - Ne ЛАЗЕРА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ СВЧ ВОЗБУЖДЕНИИ

Имонкулов Закиржон Имонкулович¹,

Акылбек кызы Сезим², Осорова Тахмина Шайырбековна²

*1. Жалал-Абадский государственный университет имени
Б.Осмонова, Кыргызстан, кафедра физики и информатики,*

2. к.ф.-м.н., профессор

*3. Жалал-Абадский государственный университет имени Б.Осмонова,
кафедра физики и информатики, магистрант.*

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF THE RADIATION OF A SINGLE- FREQUENCY He-Ne LASER UNDER TRANSVERSE MICROWAVE EXCITATION

Imonkulov Zakirjon Imonkulovich¹,

Akylbek kyzy Sezim², Osorova Takhmina Shaiyrbekovna²

*1. Jalal-Abad State University named after B. Osmonov, Kyrgyzstan,
Department of Physics and Informatics, Ph.D., Professor*

*2. Jalal-Abad State University named after B. Osmonov, Kyrgyzstan,
Department of Physics and Informatics, master's student.*

Аннотация: Экспериментально показано, что синхронизация автогенераторов накачки устраняет радиотехнический шум, а также уменьшает ширину и амплитуду шума лазерного излучения He-Ne лазера на $\lambda = 0,63\text{мкм}$. Область синхронизации автогенераторов зависит от взаимной ориентации полосковых линий системы накачки.

Ключевые слова: Лазер, излучение, шум, синхронизация, автогенераторы.

Abstract: It is shown experimental that synchronization of the auto generators of pumping eliminates the radio technical noise and also decreases the width and the amplitude of the laser radioactive noise of the He-Ne laser on $\lambda = 0,63\ \mu\text{m}$. The synchronization region is depended on the mutual orientation of the striped lines of pumping systems.

Keywords: Laser, radiation, noise, synchronization, auto generators

При поперечной СВЧ накачке газовых лазеров успешно применяются автогенераторы, имеющие в качестве резонансного контура четвертьволновые полосковые линии, являющиеся одновременно электродами газового разряда [1,2]. На длинных трубках можно установить несколько таких автогенераторов, полосковые линии которых последовательно расположены оси трубки. Это один из способов, позволяющий создать улучшенную равномерность распределения тепловых источников и коэффициента усиления вдоль

разрядной трубки, причем система накачки оказывается компактной и может быть расположена, вместе с разрядной трубкой в одном корпусе. Ранее указывалось [2], что такие генераторы должны быть расстроены относительно друг - друга на несколько МГц. Такая система накачки обладает радиотехническим шумом, вызванным разностными частотами автогенераторов. Но, в процессе длительной работы или при изменении каких-либо параметров радиоэлементов такая расстройка может быть нарушена. Влияние изменения расстройки между автогенераторами может привести к различным режимам их работы, связанным с изменением взаимодействия между генераторами.

Большой научный и практический интерес представляет слабо освещенный в литературе вопрос о влиянии режима работы СВЧ автогенераторов на характеристики лазерного излучения. Нами исследованы различные режимы работы двух СВЧ автогенераторов и рассмотрены шумовые характеристики излучения одночастотного He - Ne лазера в этих режимах.

В эксперименте в качестве активного элемента лазера использовалась разрядная трубка с внутренним диаметром 2,3 мм и длиной 960 мм с газовой смесью 9He : 1Ne при общем давлении 6,3 мм. рт. ст.[3] . СВЧ разряд поджигался двумя автогенераторами, колебательный контур которых включал себя четвертьволновые полосковые линии, подсоединенные концами к базе и коллектору транзистора, и отрезок лазерной трубки, заключенный между этими полосками. Полоски накладывались по наружной поверхности разрядной трубки и ориентировались вдоль ее оси. Ширина медных полосок была 3 мм, общая длина линии одного СВЧ автогенератора 35 см, часть линии, прилегающая к трубке-28 см, толщина полосок 0,2 мм. Рассматривались две ориентации полосок: А - свободный конец одной полосковой линии соседствует с замкнутым концом другой, Б - свободными концами полоски обращены навстречу друг - другу. Расстояние между полосковыми линиями двух СВЧ генераторов накачки равнялось 7 мм. В качестве фотоприемника для регистрации лазерного излучения использовали ФЭУ-55. Спектр колебаний СВЧ автогенераторов в области частот 100-110 МГц измерялся анализатором спектра С4-27. Синхронизированный режим работы двух СВЧ автогенераторов контролировался высокочастотным осциллографом С1-75. Низкочастотные шумы (0÷200 кГц) лазерного излучения измерялись анализатором С4-77. Он также использовался для наблюдения низкочастотного радиотехнического шума (0÷700 кГц).

Прежде всего, исследовали режимы работы каждого автогенератора в отдельности (второй генератор в это время был отключен). Было обнаружено, что автогенератор мог работать в двух качественно различных режимах: стабильном и нестабильном. В стабильном режиме спектр отдельного автогенератора состоял из ряда дискретных гармоник кратных основной гармонике (~110 МГц), и форма колебаний представляла собой сумму гармоник. С изменением напряжения питания U_n от 5 до 30 В основная частота F автогенератора изменяется в пределах 107÷111 МГц, причем величина частоты проходит через максимум.

При определенных значениях построочной емкости C_n и напряжения питания от 30 до 6 В СВЧ автогенератор переходил в нестабильный режим работы, характеризующийся широкой полосой частот СВЧ диапазона (~2 МГц) вокруг основного колебания и его гармоник, и рядом низкочастотных биений (рис.1 а,б). Форма колебаний СВЧ автогенератора в этом режиме соответствовала релаксационным. На рис.1 в. представлен спектр низкочастотных шумов лазерного излучения, обусловленный шумом автогенератора. Эта характеристика была снята при накачке двумя СВЧ автогенераторами, разность частот которых была больше

2 МГц, причем один из них работал в стабильном режиме, а другой - в нестабильном.

Ширина низкочастотного спектра интенсивности лазерного излучения определяется, в общем случае, как полосой частот, способных модулировать концентрации электронов, так и полосой низкочастотных флуктуаций лазерного излучения [5]. Ширина спектра амплитудных хаотических флуктуаций лазерного излучения может, доходит до ~1 МГц в зависимости от количества генерируемых мод, уровня превышения над порогом и коэффициента пропускания зеркал [4].

Проведен теоретический расчет ширину спектра колебаний концентрации электронов для пространственно однородного накачивающего СВЧ- поля.

Пусть накачивающее поле будет пространственно однородным, а его зависимость от времени можно представит, следующим образом:

$$E = E_0 e^{i\omega t} + A e^{i\Omega t} \quad (1)$$

Где E_0 , ω - амплитуда и частота высокочастотного поля накачки,

A , Ω - амплитуда и частота низкочастотного поля, модулирующего концентрации электронов. Т.е. принято, что $\omega \gg \Omega$

(2)

В нашем случае $\omega \sim 10^8$ Гц. Поле E действует на электроны плазмы, изменяя их ансамблевые характеристики: среднюю энергию, скорости возбуждение молекул и ионизации и др. Функция распределения электронов по скоростям (ФРЭС), которая обуславливает характеристики ансамбля электронов формируется за времена порядка релаксации энергии электронов τ_e :

$$\tau_e^{-1}(v) \approx \frac{2m}{M} v_m(v) + \sum_j v_j(v) + v_i(v) + v_a(v). \quad (3)$$

Где m_e / M -отношение массы электрона к массе молекулы, $v_m(v)$ - частота передачи импульса при упругом столкновении с атомами (молекулами), $v_j(v)$ - частота столкновительного возбуждения j -ого уровня, $v_i(v)$ и $v_a(v)$ – частота ионизации и электронного прилипания. В атомарных газах, вплоть до умеренных E/N , большинство энергетических потерь электронов происходит благодаря упругим столкновениям с нейтральными частицами. Для Ne приводит [7] значения $v_m^{He}/P = 1,2 \cdot 10^9$ I/c тор, а для He - $v_m^{He}/P = 2,0 \cdot 10^9$ I/c тор. Тогда $\tau_e^{-1}/P \approx 10^{-3} \times 10^9 \approx 10^6$ 1/c тор. При характерном для He - Ne лазера

давлении $P \approx 1$ тор. $\tau_e^{-1} \approx 10^6$ 1/с. Если $\tau_e^{-1} < \omega$, то ансамбль электронов можно считать квазистационарным. Тогда ФРЭС формируется под действием эффективного поля [8]:

$$E_{эфф} = \left\{ 1 + \left[\omega \left(\sum \nu(\nu)^{-1} \right)^2 \right]^{-1/2} \right\} \left(\frac{E_0}{\sqrt{2}} \right) \quad (4)$$

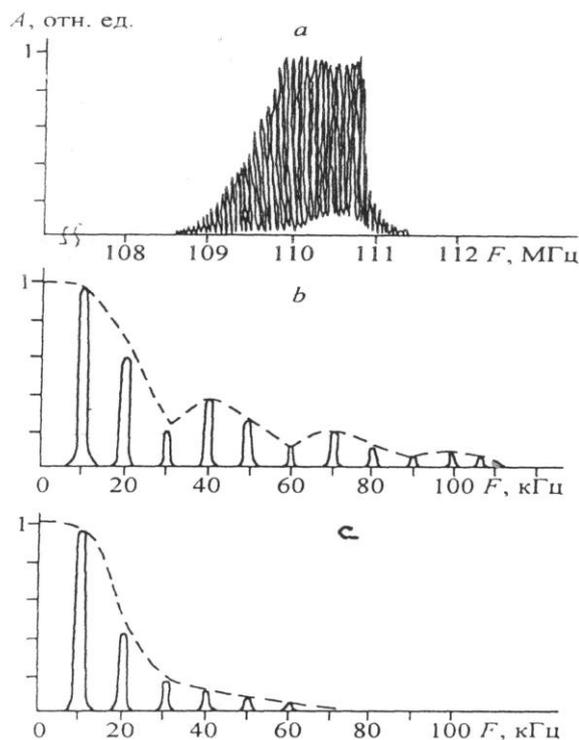


Рис.1. Влияние нестабильного режима работы СВЧ автогенератора на лазерное излучение

- а) Высокочастотный спектр СВЧ генератора.
- б) Низкочастотный спектр СВЧ генератора.
- в) Спектр низкочастотных флуктуаций лазерного излучения.

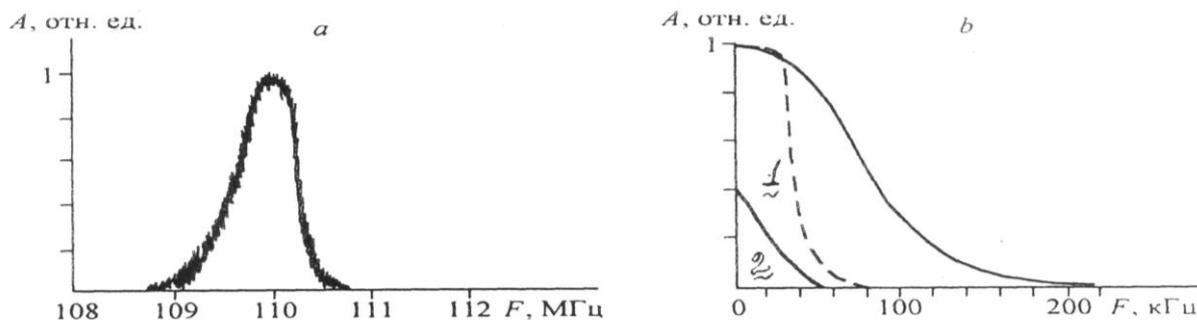


Рис.2. Спектр совместных колебаний СВЧ автогенераторов и шумов лазерного излучения. а) в области основного тона ~ 110 МГц. б) в низкочастотной области.

1. низкочастотный шум лазерного излучения при накачке автогенераторами в режиме частичного нестабильного захвата частоты.
2. при полной взаимной синхронизации частот автогенераторов накачки.

Если $\Omega < \tau_e^{-1}$ то ансамбль электронов будет следовать изменениям поля и ФРЭС, будет изменяться во времени [9]. Т.о., если внешнее поле имеет вид (1), то ФРЭС необходимо представить в следующем виде:

$$g(v,t) = g_{st}(v) + g_{alt}(v,t) \quad (5)$$

Где $g_{st}(v)$ - квазистационарная составляющая ФРЭС, обусловленная эффективным полем $E_{эфф}$ (4), $g_{alt}(v,t)$ - изменяющаяся во времени часть ФРЭС, обусловленная модулирующим полем $Ae^{i\Omega t}$.

Уравнение для изменения концентрации электронов $n(t)$ во времени записывается в виде:

$$\frac{1}{n(t)} \frac{dn(t)}{dt} = Z_i + D_a - Z_a \quad (6)$$

Где Z_i, Z_a - скорость ионизации и прилипания, а D_a - эффективная скорость изменения концентрации за счет амбиполярной диффузии:

$$D_a = d_a \left(\frac{2,4}{R} \right)^2 \quad (7)$$

Где d_a - коэффициент амбиполярной диффузии, R - радиус разрядной трубки. Эффектами рекомбинации, квадратичными по n , пренебрегаем, полагая что, концентрацию электронов не слишком высокой. Стационарная $n(t)$ реализуется в случае

$$R_n(t) = Z_i + D_a - Z_a = 0. \quad (8)$$

Такое возможно, если в разряде установлено некоторое номинальное поле E_n . Изменение электрического поля E_n приводит к нарушению равенства (8) в случае, если хотя бы один из коэффициентов Z_i, D_a или Z_a успевает отреагировать на флуктуации поля. Поскольку эти коэффициенты определяются ФРЭС, то важно знать, при каких частотах Ω приложенного электрического поля ФРЭС будет изменяться во времени.

Скорость ионизации Z_i определяются «хвостовой» частью ФРЭС, лежащей выше потенциала ионизации ε_i . Сечение ионизации Ne в пике порядка $2 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ [10]. При давлении 1 тор, средней энергии электронов порядка 1 эВ частота ионизации будет не ниже $\nu_i = 7 \cdot 10^5$ Гц. Действие сигнала с частотой на ансамбль электронов, имеющих время релаксации $\tau_i = \nu_i^{-1} \sim 10^{-6} \text{ с}$, аналогично прохождению сигнал через фильтр низких частот с временем затухания τ_l . Коэффициент передачи фильтра низких частот

$$\chi = \frac{1}{\Omega \tau_i + 1} \quad (9)$$

Динамический диапазон фильтра определяются частотой

$$\Omega_{\text{fld}} = \frac{\sqrt{2-1}}{\tau_i} \approx 0,4\tau_i^{-1} \quad (10)$$

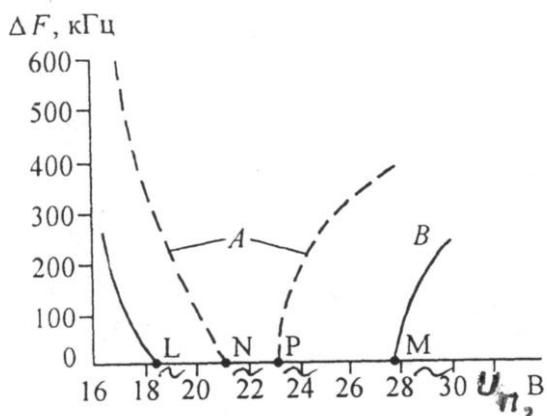
Сигнал с частотой Ω_{fld} , может пройти по фильтру с ослаблением мощности в 2 раза. При больших частотах Ω сигнал на выходе фильтра будет более сглаженным. Таким образом, колебания концентрации электронов будут сглажены не более чем на 10% , если частота ВЧ поля

$$\Omega \approx \frac{1}{18} \tau_i^{-1}$$

(11)

Соответствующая линейная частота $\nu = 8,6 T_e$ кГц, где T_e – температура электронов в эВ. Поскольку T_e в СВЧ разряде составляет ~ 5 эВ [5,6], то получаем, что максимальная частота огибающей СВЧ поля накачки, которая беспрепятственно модулирует концентрацию электронов, – порядка 43 кГц.

Следующий этап исследований касался совместной работы автогенераторов. При накачке обоими СВЧ автогенераторами из-за их взаимодействия друг с другом за счет антенного эффекта возможны различные режимы их совместной работы. Наблюдали четыре качественно различных режима. Режим 1 - несвязанная генерация, когда спектр совместной генерации СВЧ автогенераторов являлся аддитивной суммой спектров каждого отдельного автогенератора. Режим 2 - слабое взаимодействие автогенераторов, возникающее при расстройке их частот $\Delta\omega/\omega < 2 \times 10^{-3}$, где ω - частота СВЧ поля накачки, $\Delta\omega$ - частота расстройки СВЧ поля накачки. При дальнейшем сближении частот СВЧ автогенераторов взаимодействие их усиливается и наступает режим 3 - частичный нестабильный захват частоты СВЧ автогенераторов, характеризующийся низкочастотным спектром (рис. 2 а,б). Эти низкочастотные флуктуации СВЧ мощности (до 50 кГц) обусловили высокий уровень шумов мощности лазерного излучения (рис. 2.б, 1). В нашем случае частичный взаимный захват частот автогенераторов возникает, когда $\Delta\omega/\omega \approx 2 \times 10^{-4}$ - для такой ориентации полосок, когда свободный конец одной



полоски соседствует с замкнутым концом другой (А), и $\Delta\omega/\omega \approx 4 \times 10^{-4}$ - когда полоски были обращены друг к другу (Б). Дальнейшее уменьшение разностной частоты приводит к режиму 4 - полной взаимной синхронизации (на частоте ~ 110 МГц). Этот режим наступает, начиная с $\Delta\omega/\omega \approx 1,7 \times 10^{-4}$ - для случая ориентации А, и $\Delta\omega/\omega \approx 3,4 \times 10^{-4}$ - для случая Б. Уровень соответствующих низкочастотных колебаний лазерного излучения гораздо ниже, чем в режиме 3 (рис. 2 б, 2).

Рис.3. Зависимость разностной частоты ΔF двух генераторов накачки от напряжения их питания:

----- для ориентации А,
 _____ для ориентации Б.

На рис. 3 приведена область синхронизации в зависимости от напряжения питания СВЧ автогенераторов для двух ориентации полосок: NP- для ориентации А, LM - для ориентации Б. Ограниченность диапазона напряжений питания $U_{п}$ при которых возможен полный взаимный захват автогенераторов, является следствием зависимости их разностной частоты от $U_{п}$. Последнее в свою очередь обусловлено, во-первых, зависимостью $F(U_{п})$, а во-вторых, не идентичностью радиоэлементов, использованных в автогенераторах, в результате чего $F(U_{п})$ для каждого автогенератора имеет свой вид, сохраняя, тем не менее, общую качественную зависимость.

Выводы:

1. С изменением напряжения питания СВЧ автогенераторов накачки меняется не только интенсивность лазерного излучения (о чем было известно раньше), но и уровень его шума из-за нелинейного взаимодействия СВЧ автогенераторов друг с другом.

2. Использование синхронного режима работы СВЧ автогенераторов, накачивающих He-Ne лазер, позволяет устранить радиотехнический шум, а также уменьшит низкочастотный шум лазерного излучения, обусловленный модуляцией плазмы в области частот до 40 КГц.

3. Для увеличения и стабильности области синхронизации СВЧ автогенераторов необходимо ориентировать их полосковые линии свободными концами навстречу друг другу (режим Б).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геллер В. М., Гриф Г. И., Хрусталева В. А. Использование газового СВЧ разряда в гелий-неоновых лазерах. //Автометрия. 1984. Т.1 стр.35.
2. Асеев В. Ф. и др. // А. с. СССР Т 702988 от 19.06.78 г. ж МКИ 5: НОI s 3/0975; опубл. 30.10.91 в бюл. № 40.
3. Иманкулов З.И., Миринояттов М.М. Исследование одночастотного режима генерации в мощном He-Ne лазере с поперечным СВЧ разрядом. // Журн. Прикладной Спектроскопии, 1997. Т.64. № 1. С. 116.
4. Тучин В. В. Флуктуации в газовых лазерах. Ч.1. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1981. 62 с.
5. Иманкулов З.И., Миринояттов М.М. «Шумы излучения одночастотного He-Ne лазера при совместной накачке двумя СВЧ- автогенераторами», Автометрия, №2, 2000, стр-1-5.
6. Иманкулов З.И., Миринояттов М.М., Соловьев И.А., Степанов В.А. Характеристики одночастотных He-Ne и He-Xe лазеров с СВЧ возбуждением.// Журнал Оптика и спектроскопия, 1987, т.62, вып. 6, стр. 1346-1350
7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда : Учеб. рук-во. –М.: Наука, 1987, -98 стр.
8. Vidaud P., He D., Hall D.R. High efficiency RF excited CO₂ laser// Optics communic.-1985, - v.56 ,№3, -p.185-190.
9. Makabe T.,Goto N. The time behaviour of electron transport in RF fields in gases //J.Phys.D; Appl.Phys. -1988, -v.21, p.887-895.
10. Гуляев Р.А. Ионизация нейтральных атомов электронным ударом. // Астрономический журнал.-1966, -т.43, №5, -с.948-953.