

В. М. ГЕЛЛЕР, Г. И. ГРИФ, В. А. ХРУСТАЛЕВ

(Новосибирск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОВОГО СВЧ-РАЗРЯДА В ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРАХ

Сверхвысокочастотный разряд достаточно широко используется в различных областях науки и техники, многие его свойства рассмотрены в работах [1—3].

ВЧ-методы возбуждения газовых лазеров известны давно. Возбуждение первых образцов лазеров на смеси гелий—неон осуществлялось с помощью ВЧ-разряда [4]. В этих экспериментах использовался продольный емкостный E - или индукционный H -разряд. Устройство возбуждения таких лазеров выполнялось в первом случае в виде нескольких металлических колец, установленных аксиально, а во втором — в виде многовиткового индуктора, внутри которого помещалась разрядная трубка. Однако первые же испытания подобных лазеров выявили ряд существенных недостатков. Основными из них являются локальный перегрев трубки вблизи электродов, снижающий срок службы активного элемента [4]; высокий уровень ВЧ-мощности, необходимый для получения достаточной инверсии, обусловленный неэффективностью концентрации мощности возбуждения в плазме разряда; существенная неравномерность показателя усиления активной среды в осевом направлении [5]; высокий уровень внешнего излучения на частоте возбуждения. В дальнейших исследованиях и разработках продольный ВЧ-разряд не нашел широкого применения в газовых лазерах и был заменен разрядом постоянного тока (РПТ). Тем не менее, многолетний опыт использования He—Ne-лазеров с РПТ также выявил серьезные недостатки: ограничение срока службы активного элемента, связанное с расположением электродов в реакционной зоне разряда и изменением первоначального состава и давления активной газовой среды [6]; высокие рабочие напряжения [7]; большое время готовности лазера к работе [8, 9]; относительно низкое усиление активной среды, обратно пропорциональное поперечным размерам канала [4, 10, 11]; поперечная и продольная неоднородности усиления активной среды [12]; уширение спектральной линии, обусловленное доплеровским эффектом; наличие реактивных колебаний и страт в газовом разряде [12], т. е. высокий уровень шумов; пространственное разделение компонент газовой смеси [13]; продольный дрейф активных частиц [12].

В силу изложенного выше в последние годы для He—Ne-лазеров было рекомендовано использовать поперечный СВЧ-разряд [5], результаты применения которого показали реальные перспективы создания высокоэффективных приборов [13—18].

1. При повышении частоты возбуждающего поля с 200 до 900 МГц возрастает усиление активной среды и уменьшается требуемая мощность накачки. Это в основном связано с тем, что стационарная электронная концентрация при одной и той же вводимой в разряд мощности монотонно увеличивается с ростом частоты. При частоте возбуждения 880—900 МГц непасыщенный показатель усиления на $\sim 40\%$ превышает аналогичный показатель при режиме РПТ, что, с одной стороны, дает возможность создавать миниатюрные лазеры с активной длиной до 2—4 см, а с другой — увеличивать мощность лазерного излучения. Например, на разрядной трубке промышленного лазера ЛГ-56 в многомодовом режиме реализуется выходная мощность 4,0—4,5 мВт ($P_s = 18$ Вт, $\nu_s = 890$ МГц), тогда как в режиме РПТ эта трубка обеспечивает мощность не более 2,6 мВт.

2. В He—Ne-лазерах с СВЧ-возбуждением достигается более равномерное по сравнению с РПТ распределение усиления по сечению лазер-

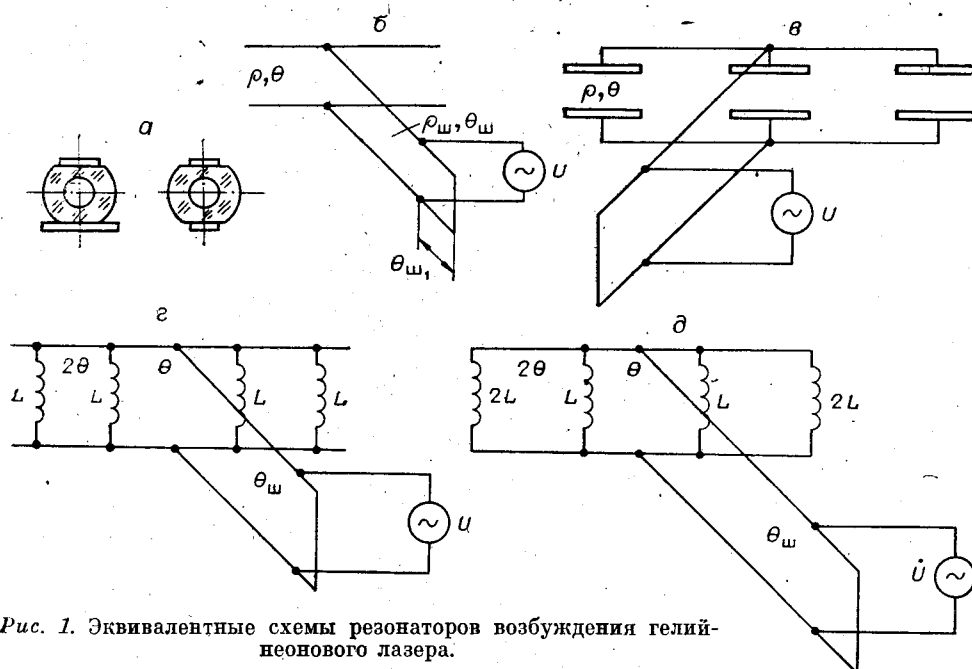


Рис. 1. Эквивалентные схемы резонаторов возбуждения гелий-неонового лазера.

ного канала, и за счет этого обеспечивается более высокое усиление активной среды лазера.

3. Оптимальное давление газовой смеси в лазерах с СВЧ-возбуждением оказывается выше, чем в лазерах с РПТ, и с ростом частоты возбуждения еще несколько повышается. Это может быть обусловлено более высокой по сравнению с РПТ электронной температурой газа, характерной для СВЧ-разряда [18—23]. В работе [19] экспериментально получено $p d = 700 \text{ Па} \cdot \text{мм}$. Возможность использования повышенного давления газовой смеси позволяет увеличить оптическую мощность излучения как в одномодовом, так и в одночастотном режиме и повысить рабочий ресурс активного элемента.

4. Применение поперечного СВЧ-разряда дает возможность создать He — Ne-лазеры и поглощающие ячейки, работающие при очень малых давлениях с управляемым пространственным движением активных частиц газовой смеси, что приводит к уменьшению влияния доплеровских эффектов. При низких давлениях падение электронной мощности, обусловленное малым давлением газовой смеси, можно частично компенсировать увеличением энергии электронов за счет использования вторично-электронного резонансного разряда в смеси газов [24—26].

Гелий-неоновый лазер с поперечным СВЧ-возбуждением состоит из оптического и СВЧ-резонаторов, разрядной трубки и источника возбуждения. Для «поджига» и поддержания разряда применяют СВЧ-резонаторы, удовлетворяющие ряду требований: резонаторы позволяют эффективно использовать мощность СВЧ-источника для возбуждения активной среды, обеспечивать высокую равномерность электрического поля по оси активного элемента, перестраивать частоту источника без влияния на активную длину лазера.

В диапазоне частот возбуждения до 1,0 ГГц используются резонаторы на базе несимметричных полосковых линий передачи (рис. 1, а—д). Такой резонатор состоит из разомкнутого на концах отрезка несимметричной полосковой линии передачи, к центральному промежуточному сечению которого подключен отрезок также несимметричной полосковой линии, замкнутый на конце. Electroды первого отрезка касательны к стенкам газоразрядной трубки лазера и направлены вдоль ее оси (см. рис. 1, а, б).

Условие резонанса в такой системе имеет вид

$$\operatorname{tg} \theta / 2 \operatorname{tg} \theta_w = \rho / 2\rho_w, \quad (1)$$

где θ , θ_m — электрическая длина первого отрезка и короткозамкнутого шлейфа; ρ , ρ_m — волновое сопротивление отрезка и шлейфа соответственно.

Согласование резонатора с передающим трактом осуществляется с помощью трансформатора сопротивлений, роль которого играет короткозамкнутый шлейф.

Условие полного согласования резонатора с трактом имеет вид

$$\sin^2 \theta_{m1} = (\sin^2(\theta_m) \rho_0) / R_{oe}. \quad (2)$$

Здесь ρ_0 , R_{oe} — волновое сопротивление передающего тракта и эквивалентное сопротивление резонатора; θ_{m1} — электрическая длина, соответствующая точкам передающего тракта.

Описанный выше резонатор прост в реализации и может применяться при относительно низких частотах $\theta/2$, меньших или близких $\pi/2$. Для цилиндрических разрядных каналов в качестве СВЧ-резонатора в настоящее время используется также секториальная линия передачи высокочастотной энергии [27]. На рис. 2 показано поперечное сечение разрядного канала газового лазера с нанесенными на внешнюю поверхность трубки СВЧ-электродами резонатора, к которым присоединяется источник СВЧ-энергии. Волновое сопротивление такой линии (без учета активной среды в разрядном канале) можно определить из выражения

$$W = \frac{15}{(R - r) / 4\pi r \cos \varphi_1 + (\pi d / 8\pi r) [(\pi/2 - \text{arctg}(d/2r)) + (1/9) (\pi/2 - \text{arctg}(d/2r))^3]}, \quad (3)$$

где R , r — соответственно внешний и внутренний радиусы линии передачи (см), d — ширина зазора (см), $\varphi_1 = \text{arctg}(d/2r)$.

По сравнению с несимметричной полосковой линией секториальная линия передачи и соответственно СВЧ-резонатор имеют меньшие потери на излучение и более высокую добротность. На частотах возбуждающего поля $f \geq (0,5 \div 1)$ ГГц резонатор не может обеспечить высокую равномерность поля, а следовательно, и высокую однородность разряда по оси разрядной трубки. Указанный недостаток в значительной мере снижается при выполнении отрезка линии передачи в виде П- или Г-образного сечения [28]. Форма электродов СВЧ-резонатора в виде П-образного сечения создает конфигурацию электрического поля (на рис. 3 и 4 показаны эквипотенциальные линии), обеспечивающую примерно на 20% большую напряженность в середине разрядного промежутка, чем в случае СВЧ-резонатора, выполненного в виде отрезка полосковой линии, мощность потерь при этом уменьшается. Увеличение напряженности СВЧ-поля внутри разрядного канала и уменьшение потерь позволяют снизить потребляемую мощность возбуждения лазера. Размер боковой стороны П-образного отрезка выбирается в зависимости от частоты в 2,5–6 раз меньше поперечного размера разрядной трубки.

Проводники резонатора можно также выполнять в виде двух Г-образных линий, повторяющих форму разрядного канала и прилегающих к его поверхности (см. рис. 4). Размер стороны Г-образного сечения в этом случае выбирается равным 0,6–0,8 от поперечного размера разрядного канала. В этом случае, как показывают модельные эксперименты, также повышается напряженность СВЧ-поля в середине разрядного канала [28]. Обычно при выполнении разрядного канала из керамики полосковые

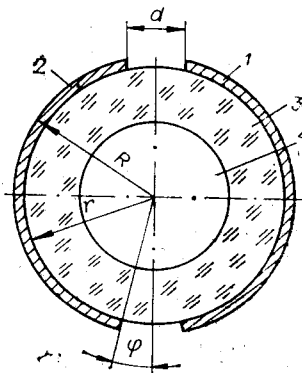


Рис. 2. СВЧ-резонатор на секториальной двухпроводной линии:

1, 2 — секториальные проводники СВЧ-линии; 3 — разрядная трубка лазера; 4 — разрядный канал с активной средой.

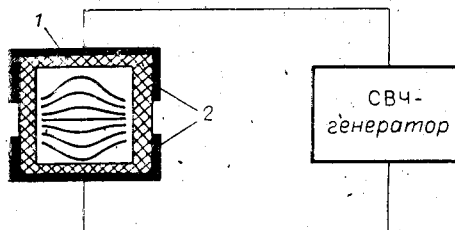


Рис. 3. Разрядный канал прямоугольного сечения с СВЧ-резонатором П-образного типа:

1 — керамический разрядный канал, 2 — полосковый П-образный СВЧ-резонатор.

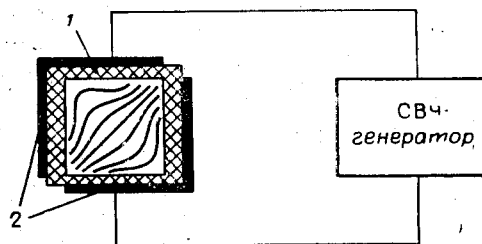


Рис. 4. Разрядный канал прямоугольного сечения с СВЧ-резонатором Г-образного типа:

1 — керамический разрядный канал, 2 — полосковый Г-образный СВЧ-резонатор.

резонаторы П- и Г-образных сечений выполняются методом многослойного напыления (хром, медь, серебро) или вжиганием в водородных печах металлических покрытий, нанесенных предварительно в виде пасты на поверхность разрядной трубки.

На частотах возбуждения выше 1,0 ГГц добротность описанных резонаторов резко падает за счет увеличения излучения с торцевых и боковых поверхностей. В этом случае целесообразно использовать СВЧ-резонаторы магнетронного, коаксиального типов или резонаторы на базе Н- и П-образных волноводов. Газоразрядная трубка лазера или активная газовая среда при этом помещаются в емкостные зазоры резонаторов [29, 30] или непосредственно между электродами коаксиального СВЧ-резонатора, как это показано в настоящей работе (рис. 5).

Для повышения рабочего ресурса газовых лазеров с поперечным СВЧ-возбуждением возникает необходимость исключить влияние краевых эффектов, присущих этим устройствам и приводящих к «запылению» окон Брюстера либо внутренних зеркал. Напыление частиц на внутренние оптические элементы обусловлено формой электрического поля, созданного на концах СВЧ-резонатора. Заряженные частицы, вылетающие из разрядного промежутка в продольном направлении (по оси) с некоторой начальной скоростью, не испытывают действия со стороны поля и могут достигать поверхности окон Брюстера (или внутренних зеркал). Для исключения этого недостатка на некотором удалении от концов СВЧ-резонатора вводятся кольцевые электроды, замыкающие «на себя» траектории «тяжелых» заряженных частиц (рис. 6) [31]. Осевые размеры лазера при этом можно существенно уменьшить.

При использовании поперечного СВЧ-поля для возбуждения одночастотных He — Ne-лазеров в отличие от многочастотных, рассмотренных, например, в [13, 14, 18], имеется ряд существенных особенностей.

В одночастотных лазерах для повышения усиления и исключения поперечных мод методом диафрагмирования применяются разрядные ка-

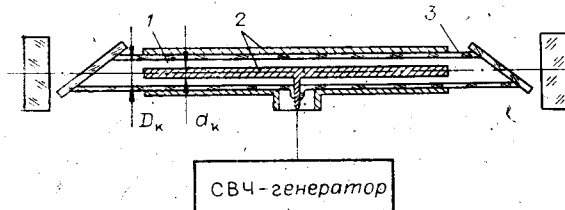
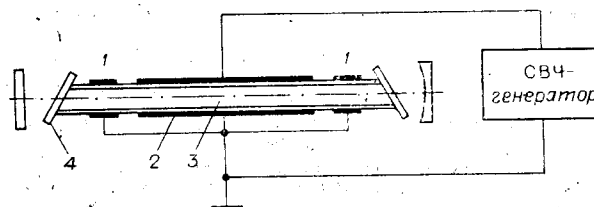


Рис. 5. Коаксиальный гелий-неоновый лазер с поперечным СВЧ-возбуждением:

1 — активная среда, 2 — коаксиальный СВЧ-резонатор лазера, 3 — стеклянная трубка.

Рис. 6. Устройство защиты оптических элементов (брюстеровских окон) газового лазера от напыления при поперечном СВЧ-возбуждении:

1 — кольцевые электроды; 2 — полосковый СВЧ-резонатор; 3 — разрядный канал лазера; 4 — окна Брюстера.



пилляры с сечением d , значительно меньшим, нежели C/v_b , где v_b и C — соответственно частота высокочастотного поля возбуждения и скорость света. Оптическая длина резонатора и межмодовый параметр обычно выбираются из условия $C/2L \geq \Delta v_D$, Δv_D — доплеровская ширина спектральной линии. Как показывают расчеты и эксперименты, с уменьшением сечения разрядного капилляра повышается необходимая мощность высокочастотного поля P_b , которую необходимо подводить к высокочастотному резонатору в режиме «поджига» разряда и его стационарного горения. Для повышения плотности возбуждения целесообразно выбирать длину волны СВЧ-поля соизмеримой с оптической длиной резонатора. В режиме пробоя разрядного промежутка СВЧ-полем диффузионная длина Δ пробега электрона за период частоты возбуждения $T_b = 1/v_b$ может быть меньшей или соизмеримой с d . Если амплитуда $E_{кр}$ СВЧ-поля достаточно велика и v_b значительно меньше эффективной частоты соударения электронов с атомами газа, то электроны с некоторой вероятностью за один период $T_b = 1/v_b$ могут пройти расстояние, сравнимое с d . Это условие соответствует определенному давлению активной среды ^3He и ^2He и зависит от эффективной напряженности СВЧ-поля и сечения канала d . Поскольку мы имеем дело с газовым прибором, высокочастотный генератор должен обеспечить два режима работы: режим пробоя разрядного промежутка и режим стационарного горения разряда с уровнем возбуждения активной среды, обеспечивающим некоторое превышение порогового уровня генерации лазера. Обычно мощность пробоя оказывается значительно больше мощности, необходимой для поддержания оптической генерации в стационарном режиме.

Существенное влияние на энергетические характеристики лазера оказывает расстройка частоты $\omega = \omega_b - \omega'_b$, возникающая вследствие изменения собственной частоты СВЧ-резонатора, обусловленной диэлектрическими и реактивными характеристиками активной среды до и после пробоя. При этом его резонансная частота становится равной ω_b . Плазму активной среды лазера в режиме диффузного горения, образованную СВЧ-полем в разрядном канале, можно рассмотреть с помощью двух параметров [4]: относительной диэлектрической проницаемости

$$\epsilon = 1 - \omega_0^2 / (\omega_0^2 + \nu_{эф}^2) \quad (4)$$

и удельной объемной проводимости

$$\sigma = \omega_0^2 \nu_{эф} \epsilon_0 / (\omega_0^2 + \nu_{эф}^2), \quad (5)$$

где $\omega_0 = (n_0 e^2 / m \epsilon_0)^{1/2}$ — собственная частота колебания плазмы; ϵ_0 , n_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума и концентрация свободных электронов. При $\omega_b = \nu_{эф}$ проводимость активной среды достигает максимального значения $\sigma_{max} = \omega_0^2 \epsilon_0 / 2\omega_b$, а концентрация электронов критического значения $n_{кр} = 2m\omega_b \sigma_{max} / e^2$. Из (4), (5) получаем

$$n/n_{кр} = (1 - \epsilon) [1 + (\nu_{эф}/\omega_b)^2]. \quad (6)$$

При $\nu_{эф} = \omega_b$ активная составляющая плазмы при СВЧ-возбуждении имеет максимум, электроны наиболее эффективно отбирают энергию у СВЧ-поля и выходная оптическая мощность генерации стремится к насыщению. При этом за счет изменения ϵ , σ и $\omega_b = \omega + \omega_b$ добротность СВЧ-резонатора с плазмой изменяется на величину $\delta(1/Q_b) = -(2\nu_{эф}/\omega_b)(\Delta f/f_0)$, где Q_b — добротность резонатора, заполненного плазмой и материалом разрядного канала, f_0 — собственная частота резонатора, Δf — полуширина его резонансной кривой. Добротность СВЧ-резонатора с плазмой и капилляром можно определить из выражения $(1/Q_b) = 1/Q + \delta(1/Q_b)$, Q — добротность «холодного» резонатора.

Относительное затягивание, т. е. сдвиг частоты, в этом случае будет составлять

$$(\delta\omega_b/\omega_b) = 0,5[1/Q + \delta(1/Q_b)]. \quad (7)$$

Для исключения влияния сдвига собственной частоты резонатора и добротности на величину пробойного напряжения и характеристики излучения лазера для возбуждения среды нужно использовать автогенератор. Благодаря режиму энергочастотного «автослежения» можно будет минимизировать величину мощности, необходимой для пробоя и стационарного режима работы лазера.

Для существенного повышения мощности генерации газового лазера с поперечным СВЧ-возбуждением полосковые и секториальные СВЧ-резонаторы недостаточно эффективны, так как не позволяют возбуждать большие объемы активной среды при сохранении достаточного усиления. Автором работы [24] предложены и экспериментально исследованы He — Ne-лазеры повышенной мощности с использованием коаксиальных и коаксиально-конических разрядных каналов и СВЧ-резонаторов. Коаксиальные резонаторы дают возможность увеличить объем возбуждаемой активной газовой среды при сохранении усиления на той же длине разрядного канала. В одном из экспериментов с ОКГ, работающим на длине волны $\lambda = 0,6328$ мкм, поперечное СВЧ-возбуждение осуществлено в разрядном канале кольцевого сечения. Кольцевое сечение образовано коаксиальным высокочастотным резонатором (см. рис. 5). Существенным отличием такого разрядного канала является то, что он позволяет в $(D_k^2 - d_k^2)/d_k^2$ раз увеличить объем активной среды, взаимодействующей с полем оптического резонатора, по сравнению с лазером, имеющим круглое сечение разрядного канала. Например, разрядный канал кольцевого сечения при $\nu_a = 850$ МГц дает возможность повысить ненасыщенный показатель усиления на $\sim 35\%$ по сравнению с разрядным каналом круглого сечения. В поперечном сечении разрядного промежутка коаксиального высокочастотного резонатора напряженность поля изменяется по закону

$$E(r_0) = E_m/r_0 \ln R_k/r_k. \quad (8)$$

Здесь E_m — напряженность СВЧ-поля между коаксиальными цилиндрами; R_k, r_k — радиусы внешнего и внутреннего цилиндров; r_0 — расстояние от точки наблюдения до оси.

Поле в сечении разрядного промежутка является неоднородным и увеличивается при уменьшении r_k . Электронная температура плазмы, находящейся в электрическом поле $E_m = E_0 \exp i\omega t$, обусловлена параметрами плазмы и возбуждаемого поля [1]:

$$T_e = T_0 + e^2 E_0^2 / 3km\delta (\omega_b^2 + \nu), \quad (9)$$

где T_0 — температура ионов и нейтральных частиц; e, m — заряд и масса электрона; k — постоянная Больцмана; $\delta = 2m/M, M$ — масса ионов и нейтральных частиц; ω_b — частота СВЧ-возбуждения; ν — эффективная частота столкновений.

С увеличением СВЧ-мощности, подводимой к плазме в коаксиальном резонаторе, будет увеличиваться напряженность поля, и при постоянном давлении активной среды электронная температура будет повышаться. На рис. 5 показан коаксиальный лазер с возбуждением активной среды СВЧ-полем с частотой $\nu_a = 850$ МГц. В качестве материала для трубки использовано молибденовое стекло с диаметром наружного канала $D_k = 4,8$ см и внутренним оксидированным электродом диаметром $d_k = 0,1$ см, выполненным из дюралюминия Д16-Т. Коаксиальный резонатор образован внутренним электродом и внешней трубкой. Ввод СВЧ-энергии осуществлен через герметичный коваровый спай.

Разрядная трубка герметизирована двумя брюстеровскими окнами, изготовленными из кварца и стекла К-8. Разрядная трубка наполняется при соотношении ${}^3\text{He} : {}^{20}\text{Ne}$, равном 7 : 1, и общем давлении $p = 65, 130, 175$ Па. Возбуждение активной среды лазера осуществлялось автогенератором, работающим на частоте 850 МГц. Резонатор лазера был образован зеркалами $R_1 = \infty$ и $R_2 = 6$ м.

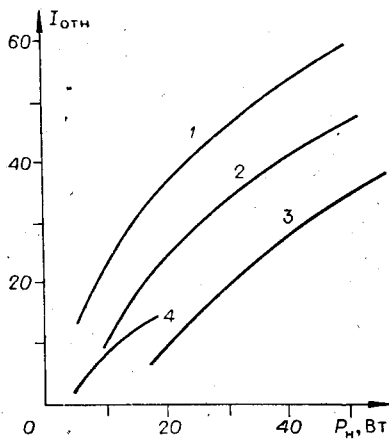


Рис. 7. Зависимость относительной оптической мощности генерации $I_{отн} = f(P_в)$ коаксиального лазера от мощности возбуждения $P_в$ при различных давлениях активной среды (1—3) и лазера с круглым сечением разрядного канала (4): 1 — $P_1=175$ Па; 2 — $P_2=130$ Па; 3 — $P_3=65$ Па; 4 — $P_4=175$ Па, $d_K=2$ мм.

При экспериментальной проверке исследована зависимость оптической мощности генерации лазеров с коаксиальным и круглым сечениями разрядного канала от мощности возбуждения $P_в$. На рис. 7 кривая 4 относится к лазеру с круглым сечением разрядного промежутка, равного $d_{ок}=0,2$ см и наполненного смесью при давлении $p=175$ Па. Из рисунка

следует, что эффективность поперечного СВЧ-возбуждения и мощность генерации в стационарном режиме благодаря коаксиальному разрядному каналу оказываются выше, чем у лазеров с круглым сечением разрядного канала и полосковым СВЧ-резонатором той же длины.

Для рассмотренных модификаций He—Ne-лазеров с поперечным СВЧ-возбуждением в качестве источников СВЧ-мощности используются автогенераторы на полупроводниковых элементах или на металлокерамических СВЧ-триодах.

Как показали результаты исследований [17, 18, 24, 28, 29, 32—34], оптимальный уровень мощности возбуждения для лазеров с полосковыми резонаторами в диапазоне частот 0,5—1,0 ГГц составляет 0,6—1,0 Вт/см. Обычно в устройствах возбуждения малогабаритных лазеров повышенной мощности необходимо развивать мощность 12—20 Вт на трубках длиной 10—20 см, а в случае миниатюрных лазеров с активной длиной 3—6 см — 2—6 Вт. Это позволяет использовать для возбуждения транзисторы СВЧ-диапазона. Генераторы могут строиться по одно- и двухконтурной схемам. Обычно колебательная система генератора состоит из СВЧ-резонатора и трансформирующей коллекторной цепи, представляющей собой полосковую систему. Трансформирующая коллекторная цепь в режиме «поджига» осуществляет трансформацию СВЧ-напряжения от зажимов транзистора к разрядному каналу лазера, а в режиме горения разряда — трансформацию сопротивления нагрузки («горячего» разрядного канала) в оптимальное сопротивление на выходных зажимах транзистора.

Генератор возбуждения малогабаритных лазеров большей частью выполняется по двухконтурной схеме. Генератор имеет свою колебательную систему, резонансная частота которой равна резонансной частоте СВЧ-

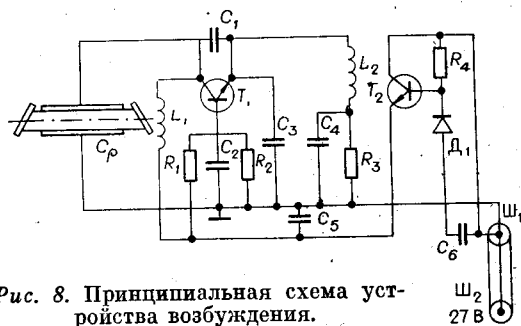


Рис. 8. Принципиальная схема устройства возбуждения.

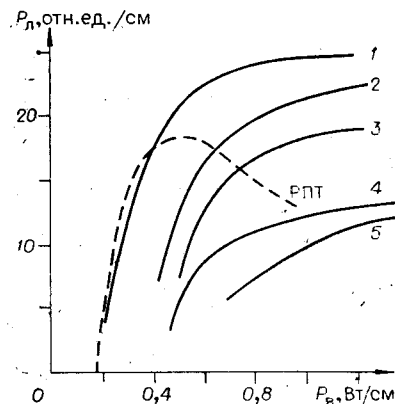


Рис. 9. Зависимость мощности лазерного излучения от мощности возбуждения: 1 — $f_B=900$ МГц, 2 — $f_B=775$ МГц, 3 — $f_B=605$ МГц, 4 — $f_B=500$ МГц, 5 — $f_B=340$ МГц.

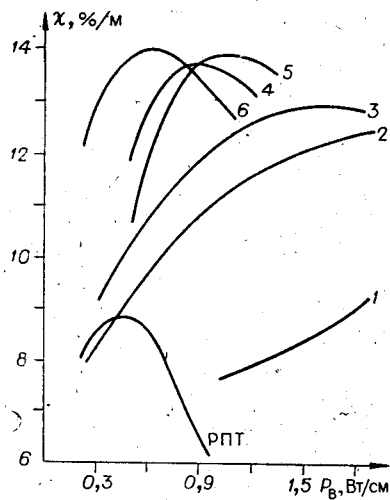


Рис. 10. Зависимость показателя усиления гелий-неоновой смеси от мощности возбуждения:

1 - $f_{в} = 390$ МГц, 2 - $f_{в} = 470$ МГц, 3 - $f_{в} = 635$ МГц, 4 - $f_{в} = 820$ МГц, 5 - $f_{в} = 860$ МГц, 6 - $f_{в} = 910$ МГц.

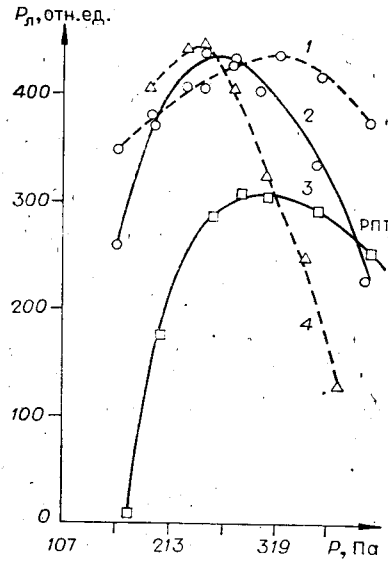


Рис. 11. Зависимость мощности излучения лазера от общего давления газовой смеси: 1 - $f_{в} = 950$ МГц, $P_{в} = 4,5$ Вт; 2 - $f_{в} = 700$ МГц, $P_{в} = 15$ Вт; 3 - $f_{в} = 700$ МГц, $P_{в} = 4,5$ Вт; 4 - $f_{в} = 950$ МГц, $P_{в} = 15$ Вт.

резонатора. При работе на повышенных частотах пробой разряда затруднен и генератор не может обеспечить «зажигание» разряда в канале лазера. Для исключения этого недостатка в устройство возбуждения вводится дополнительный генератор с более низкой рабочей частотой (рис. 8).

Ниже приведены некоторые экспериментальные зависимости, полученные авторами настоящей работы на разработанных He-Ne-лазерах. На рис. 9 показана зависимость выходной мощности лазера в многомодовом режиме от мощности, поглощаемой в СВЧ-резонаторе. Здесь же штриховой линией изображена аналогичная зависимость выходной мощности оптической генерации, полученная на этой же трубке при использовании РПТ. Активная длина в случае СВЧ-разряда составляла 14 см, а для РПТ — 20,5 см. На рис. 10 представлены зависимости показателя усиления и мощности лазера от мощности накачки для различных частот поля. В диапазоне частот до 1,0 ГГц выходная мощность лазера и показатель

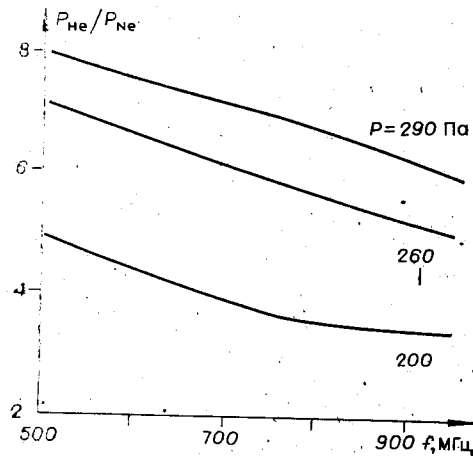


Рис. 12. Зависимость оптимального соотношения P_{He}/P_{Ne} от частоты.

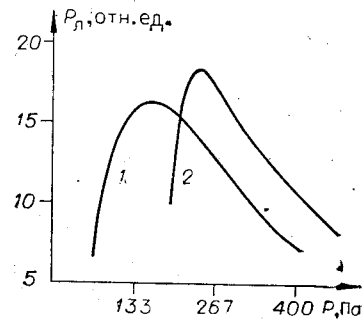


Рис. 13. Зависимость мощности излучения лазера от общего давления газовой смеси для СВЧ-разряда (1) и РПТ (2).

Рис. 14. Частотная зависимость уровня собственных шумов лазера с СВЧ-возбуждением:

1 — $f_B = 400$ МГц, 2 — $f_B = 550$ МГц, 3 — $f_B = 700$ МГц, 4 — $f_B = 830$ МГц.

усиления монотонно растут, причем, начиная с частот 450—600 МГц, они превышают аналогичные параметры для РПТ [28].

На рис. 11 представлена зависимость выходной мощности лазера от суммарного давления газа для двух значений частоты и мощности возбуждения. Из рисунка видно, что с ростом частоты повышается оптимальное давление газовой смеси, причем при частоте возбуждения 950 МГц оптимальное давление составило 319 Па при $p d_{\text{opt}} = 70,2$ Па·см, что больше, чем оптимальное давление при РПТ. С увеличением мощности возбуждения p_{opt} падает, что характерно и для РПТ. На рис. 12 показана зависимость оптимального соотношения парциальных давлений гелия и неона для трех значений суммарного давления газовой смеси при различных частотах накачки.

Результаты исследований зависимости лазерной мощности от суммарного давления газовой смеси для лазерной трубки с РПТ и СВЧ-разрядом приведены на рис. 13. В диапазоне мощностей возбуждения до 1,0 Вт/см в лазере с РПТ наблюдается экстремум энергетических характеристик, в то время как при использовании СВЧ-разряда энергетические характеристики лазера с СВЧ-возбуждением имеют гораздо менее выраженный экстремальный характер.

Достоинством лазеров с СВЧ-накачкой является низкий уровень собственных шумов излучения. В диапазоне частот 20—10 000 Гц интенсивность шумов не превышает 0,5%, что в 10—30 раз ниже, чем в лазерах с РПТ (рис. 14). Кроме того, к достоинствам лазеров нужно отнести малое время выхода на режим генерации прибора — 5—10 мс.

Конструкция He — Ne-лазера с СВЧ-возбуждением может быть двух типов. Совмещенная конструкция (излучатель и генератор в одном корпусе) может применяться при повышенных требованиях к лазеру по габаритам и весу. В случае жестких требований на стабильность выходных параметров лазеров предпочтительнее раздельная конструкция лазера и СВЧ-генератора. Зависимость мощности лазерного излучения от мощности, потребляемой от источника питания, показана на рис. 15, а, б.

Отмеченные выше достоинства газового СВЧ-разряда дают возможность успешно применять его для возбуждения лазеров, получая при этом лучшие выходные характеристики, чем при возбуждении с использованием постоянного тока.

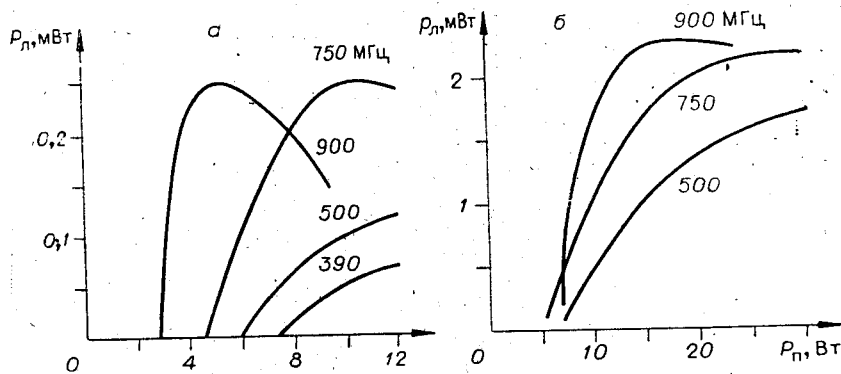
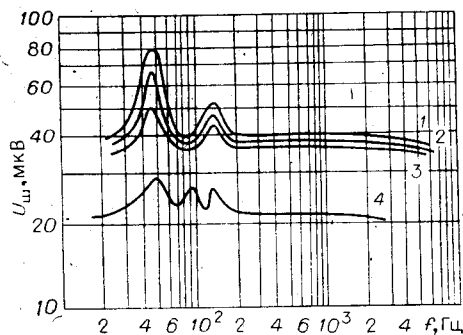


Рис. 15. Зависимость лазерной мощности от мощности питания для миниатюрного (а) и малогабаритного (б) лазеров с СВЧ-возбуждением.



Можно предполагать, что использование СВЧ-разряда в He—Ne-лазерах позволит создать высоконадежные миниатюрные лазеры с низковольтным (20—50 В) автономным источником питания и малой потребляемой мощностью, работающие как в одномодовом режиме, так и в одночастотном, стабилизированном по частоте. Такие лазеры могут лечь в основу малогабаритных кольцевых лазеров с малым уровнем шумов, свободных от колебаний в разряде и дрейфа активных атомов. Кроме того, наши исследования показали, что возможно создание He—Ne-лазеров повышенной мощности, работающих в одно- и многомодовом режимах, с малым временем готовности, имеющих малый вес и габариты. Использование СВЧ-возбуждения в коаксиальных разрядных каналах позволяет существенно повысить выходную мощность оптического излучения в одномодовом и одночастотном режимах. В этих лазерах легко реализуются режимы генерации на различных длинах волн для одной активной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голант В. Е. Газовый разряд на сверхвысоких частотах.— УФН, 1958, т. 65, № 1.
2. Джерпетов Х. А., Патсюк Г. М. Исследование высокочастотного разряда методом зондов.— ЖЭТФ, 1955, т. 28, № 3.
3. Брюховецкий А. С., Мартынюк С. П., Моторненко А. П. Некоторые свойства плазмы СВЧ-разряда, возбуждаемого миллиметровыми волнами.— УФЖ, 1974, т. 19, № 8.
4. Ищенко Е. Ф., Климов Ю. М. Оптические квантовые генераторы.— М.: Сов. радио, 1968.
5. Никольский О. А., Юдин В. И. Энергетический спектр электронов плазмы в электромагнитном поле.— Радиотехника и электроника, 1977, т. 22, № 2.
6. Collinson J. A. RF-excited gas lasers at 6328 Å.— The Bell Syst. Techn. J., 1965, N 7, p. 1511—1519.
7. Vosdecke L. R., Haldeman C. W. Some experimental results from a nonequilibrium RF discharge.— AIAA Journal, 1968, vol. 6, N 3.
8. Остапенко Е. П., Оськин В. А., Рюмин В. Б., Степанов В. А. О функции распределения электронов по энергиям в смеси He—Ne в ВЧ-разряде.— Квант. электроника, 1976, т. 3, № 9.
9. Горохов А. В., Мякишов А. И., Свещов В. И., Соколов В. Ф. О сравнении свойств тлеющего и СВЧ-разрядов в электроотрицательных газах.— ЖТФ, 1973, т. 43, № 2.
10. Орлов Л. Н., Рубанов В. С. Влияние наполнения и диаметра разрядной трубки на генерацию гелий-неонового лазера.— Электрон. техник. Сер. 3. Газоразрядные приборы, 1968, № 4 (12).
11. Привалов В. Е., Фридрихов С. А. Зависимость мощности излучения He—Ne-лазера от геометрии сечения разрядного промежутка.— ЖТФ, 1968, т. 38, № 12.
12. Привалов В. Е. Колебания в разряде газового лазера.— Квант. электроника, 1977, т. 4, № 10.
13. Максимов А. И., Рыбкин В. В., Сизов В. Д. Исследование стационарного СВЧ-разряда, горящего в диффузионном режиме. II. Изменение параметров сканированной СВЧ-плазмы.— ЖТФ, 1975, т. 45, № 4.
14. George N. Improved population inversion in gaseous lasers.— Proc. IEEE, 1963, vol. 51, N 8.
15. Cantin A., Gagne R. J. Pressure dependence of electron temperature using RF-floated electrostatic probes in rf plasmas.— Appl. Phys. Lett., 1977, vol. 30, N 7.
16. Максимов А. И. Об использовании микроволнового разряда в качестве активной среды газоразрядного лазера.— Опт. и спектр., 1966, т. 24, № 6.
17. Муллер Я. Н., Геллер В. М., Лисицына Л. И., Хрусталева В. А. Исследование поперечного СВЧ-разряда как активной среды He—Ne-лазера.— Радиотехника и электроника, 1979, т. 24, № 4.
18. Муллер Я. Н., Геллер В. М., Лисицына Л. И., Гриф Г. И. Гелий-неоновый лазер с СВЧ-накачкой.— Квант. электроника, 1977, т. 4, № 8.
19. Кононенко К. И. Измерение параметров высокочастотного безэлектродного разряда.— Изв. высш. учебн. заведений. Радиофизика, 1958, т. 1, № 3.
20. Бочкова О. П., Разумовская Л. П. Спектроскопические исследования ВЧ-разряда в гелии.— Опт. и спектр., 1965, № 5, т. 18, с. 776—784.
21. Геллер В. М. и др. Повышение эффективности нагрева слабоионизированной плазмы путем использования многочастотных слабоскоррелированных спектральных энергоносителей.— В кн.: Широкополосные устройства СВЧ и системы оптимальной обработки сигналов: Межвуз. сб. научн. трудов НГУ—НЭТИ. Новосибирск: НЭТИ, 1976.
22. Геллер В. М., Гриф Г. И., Гаревский В. Н. Исследование возможностей создания керамических моноблоков для газовых квантооптических приборов.— В кн.: Электронное полупроводниковое приборостроение: Межвуз. сб. научн. трудов НЭТИ—НГУ. Новосибирск: НЭТИ, 1980.

23. Егоров В. Н., Резиков О. В. Возбуждение спектра тория в безэлектродных разрядных трубках и его характеристика.— *Опт. и спектр.*, 1965, т. 19, № 4.
24. Муллер Я. Н., Лисицына Л. И., Хрусталеv В. А. Использование явления вторичной электронной эмиссии в He—Ne-лазерах с поперечным СВЧ-разрядом.— *Квант. электроника*, 1979, т. 6, № 3.
25. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда.— М.: Мир, 1961.
26. Максимов А. И. СВЧ-разряд для технологии в приборостроении.— *Труды Ивановского хим. технологического ин-та*, 1973, № 3.
27. Гриф Г. И., Зенкевич Н. М. Линия передачи СВЧ-энергии. (Автор. свид-во № 114439).— *БИ*, 1958, № 7.
28. Гриф Г. И.— В кн.: 24-я Областная НТК, посвященная Дню радио. Новосибирск, 1981.
29. Муллер Я. Н., Съедугин В. В., Хрусталеv В. А. К вопросу о минимизации мощности накачки ОКГ с СВЧ-разрядом.— В кн.: Тез. докл. II Всесоюз. конф. «Применение лазеров в приборостроении, машиностроении и медицинской технике». М.: МЭИ, 1979.
30. Муллер Я. Н., Съедугин В. В., Хрусталеv В. А. He—Ne-лазер с повышенной мощностью генерации.— Там же.
31. Гриф Г. И., Суворова М. И.— В кн.: 23-я Областная НТК, посвященная Дню радио. Новосибирск, 1980.
32. Горохов А. В., Максимов А. И., Свенцов В. И., Соколов В. Ф. О сравнении свойств тлеющего и СВЧ-разрядов.— *ЖТФ*, 1973, т. 43, № 2.
33. Хрусталеv В. А. Малогабаритный гелий-неоновый ОКГ с СВЧ-накачкой.— В кн.: Физическая гидродинамика и теплообмен. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1978.
34. Муллер Я. Н., Хрусталеv В. А. Измерение ненасыщенного показателя усиления He—Ne-лазера с поперечной СВЧ-накачкой.— *Квант. электроника*, 1981, т. 8, № 3.

*Поступила в редакцию 30 марта 1983 г.;
окончательный вариант — 31 августа 1983 г.*

УДК 621.378.3

М. ЯНОШИ, К. РОЖА, Л. ЧИЛЛАГ, ЛЕ ТРОНГ МУ
(Будапешт, ВНР)

ИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ С ПОЛЫМ КАТОДОМ НА СМЕСИ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ

Введение. Исследования, проведенные в последние годы, показали, что разряд в полом катоде успешно применяется для возбуждения газовых лазеров непрерывного действия малой или средней мощности в зеленой, синей и ультрафиолетовой областях спектра. Главным преимуществом разряда в полом катоде является то, что в нем число электронов высокой энергии значительно больше, чем в положительном столбе. Так как в лазерах, работающих в сине-зеленой области спектра, используются переходы между уровнями однократно ионизированных атомов, нетрудно понять роль высокоэнергетических электронов в процессе возбуждения этих лазеров.

Известно большое число работ по исследованию лазеров с полым катодом на смеси гелия и паров металлов. Системы He—Cd и He—Zn оказались самыми интересными и были изучены подробнее других. В лазерах на парах металлов рабочая температура разрядной трубки достигает 300—400°C, что значительно усложняет их конструкцию и технологию изготовления.

Открытие лазеров с полым катодом на смеси благородных газов. Технологические проблемы, связанные с необходимостью создания паров металлов в лазерах с полым катодом, привели к размышлениям о возможности использования в них любых благородных газов. К этому времени уже было известно, что многие системы «металл—гелий», генерирующие когерентное излучение в положительном столбе только в им-