



УДК 621.387.3

А. С. Киселев, Е. А. Смирнов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Влияние физических процессов в активной среде на параметры оптического резонатора газоразрядных лазеров

На основе использования уравнения стационарной генерации получено и проанализировано выражение, связывающее зависимость выходной мощности излучения лазера от параметров, определяемых физическими процессами, протекающими в его активной среде (АС): показатели усиления и поглощения АС, протяженность АС лазера, потери излучения в оптическом резонаторе (ОР). Разработана методика построения функции нормированной мощности излучения лазера, а также нахождения на ее основе оптимального коэффициента пропускания рабочего зеркала, соответствующего максимальной мощности, при заданных параметрах АС и ОР. Кроме того, методика позволяет определять зависимости оптимального коэффициента пропускания рабочего зеркала и коэффициента полезного действия ОР от параметров АС и резонатора лазера. Разработана компьютерная программа, позволяющая осуществлять оптимизацию параметров ОР в автоматизированном режиме. Программа прошла апробацию и может быть использована при разработке и проектировании газоразрядных лазеров.

Газоразрядный лазер, активная среда, оптический резонатор, оптимальный коэффициент пропускания рабочего зеркала, коэффициент полезного действия оптического резонатора

Последние десятилетия характеризуются всесторонним расширением сфер применения лазеров, в т. ч. газоразрядных лазеров (ГРЛ). Если на первом этапе развития лазеров на их базе создавались уникальные, как правило, штучные лабораторные установки, то сейчас лазеры являются незаменимыми инструментами, основой приборов, позволяющих решать научно-технические задачи на качественно новом уровне. Диапазон использования лазеров настолько широк, что легче назвать области науки и техники, в которых лазеры еще не используются, чем перечислить все их области применения.

Наиболее распространенная классификация лазеров осуществляется по типу их активной среды (АС): газоразрядные, твердотельные и полупроводниковые. Наиболее высоким уровнем пространственной и временной когерентности обладают лазеры, активным веществом которых являются смеси различных газов, а накачка осуществляется путем протекания газового раз-

ряда. Такие лазеры называют газоразрядными. Большая распространенность ГРЛ обусловлена разнообразием конструктивных решений, в т. ч. связанных с видом протекающего в приборе разряда. Для ГРЛ характерным является непрерывный режим работы. Их отличает многообразие используемых активных сред, а следовательно, и спектр генерируемых ими длин волн излучения. Газоразрядные лазеры занимают высокие позиции по объемам финансирования разработок, производства и областям применения. Диапазон излучаемой средней мощности излучения ГРЛ колеблется от десятых долей милливатта у мало-мощных лазеров до единиц–десятков киловатт у мощных технологических лазеров. Выходной уровень мощности излучения определяется физическими процессами, протекающими в АС лазера. В случае ГРЛ, в частности лазеров тлеющего разряда [1], [2], активной средой является газоразрядная плазма, обеспечивающая инверсную населенность энергетических уровней в АС. Ос-

новными параметрами плазмы в таком случае являются температура электронов и продольный градиент потенциала [3]–[7]. Плазма определяет энергию электронов и, как следствие, вероятность возбуждения частиц АС, что напрямую связано с уровнем усиления в активной среде.

Лазер является генератором электромагнитных волн оптического диапазона спектра. Любой генератор включает три обязательные составляющие: усилитель сигнала, цепь положительной обратной связи и источник питания (накачки). В отличие от отрицательной обратной связи положительная приводит к дестабилизации усилителя. В лазере функции усилителя выполняет АС. В ней нарушено состояние термодинамического равновесия и создана инверсия населенностей для пары энергетических уровней. В отличие от поглощающих сред в АС на верхнем энергетическом уровне концентрация возбужденных частиц больше, чем на нижнем уровне. Это создает возможность оптического усиления на рабочей длине волны λ , определяемой свойствами АС.

Функции элемента положительной обратной связи в лазере выполняет оптический резонатор (ОР), образуемый, как правило, двумя зеркалами Z_1 и Z_2 , характеризуемыми, соответственно, коэффициентами отражения ρ_1 и ρ_2 . Зеркала обеспечивают движение потока квантов вдоль оптической оси ОР и возврат части квантов после отражения в АС. Фазовые условия генерации выполняются в ОР автоматически у тех колебаний, для которых на длине резонатора L укладывается целое число полуволн или, иными словами, реализуются нулевые граничные условия для напряженности электрического поля оптической волны. Равенство нулю напряженности электрического поля обеспечивает нулевые потери излучения на зеркалах: $I = aE^2 = 0$. Роль начального сигнала в лазере играет какой-либо случайный квант, распространяющийся вдоль оси ОР, – чаще всего это квант, образованный в результате спонтанного излучения самой АС и сформированный в результате релаксации частицы, находящейся на верхнем энергетическом уровне.

Уровень генерируемой лазером мощности определяется из условия стационарной генерации. При заданных условиях, определяемых разновидностью АС, геометрией ОР и уровнем суммарных потерь в нем, нормированная мощность излучения лазера будет определяться соотношением

$$F = \frac{P_L}{SI_s} = \frac{\tau_2}{(1+\rho_2)} \left[\frac{\kappa_0}{\kappa_{\text{погл}} + \ln(\rho_1\rho_2)^{-1/2}/L_{\text{АС}}} - 1 \right], \quad (1)$$

где P_L – мощность лазера; S – площадь сечения лазерного пучка в ОР; I_s – параметр насыщения усиления АС; τ_2 – коэффициент пропускания рабочего (выходного) зеркала; κ_0 – ненасыщенный показатель усиления АС, зависящий в случае ГРЛ от параметров его плазмы, м^{-1} ; $\kappa_{\text{погл}}$ – показатель поглощения АС, м^{-1} ; $\rho_1 = 1 - \alpha_1 - \tau_1$ и $\rho_2 = 1 - \alpha_2 - \tau_2$ – коэффициенты отражения нерабочего, «глухого» и рабочего зеркал (τ_1 – коэффициент пропускания «глухого» зеркала; α_1 , α_2 – паразитные потери на «глухом» и рабочем зеркалах); $L_{\text{АС}}$ – протяженность АС. Нормировка мощности излучения осуществляется по площади лазерного пучка и показателю насыщения АС. С учетом связи между коэффициентами отражения, пропускания и потерь выражение (1) можно представить в виде

$$F = \frac{P_L}{SI_s} = \frac{\tau_2}{2 - (\tau_2 + \alpha_2)} \times \left[\frac{\kappa_0}{\kappa_{\text{погл}} + \ln\{(1 - \tau_1 - \alpha_1)(1 - \tau_2 - \alpha_2)\}^{-1/2}/L_{\text{АС}}} - 1 \right].$$

Задача оптимизации ОР сводится к поиску такого оптимального значения коэффициента пропускания рабочего зеркала (τ_{opt}), при котором мощность, излучаемая лазером, будет наибольшей. В общем случае из (1) трудно получить удобное для применения на практике выражение для поиска τ_{opt} проектируемого лазера. Однако, используя (1), τ_{opt} можно определять графическим построением и нахождением экстремума функции F .

Нормированная величина F_{max} несет смысл мощности излучения лазера, которую можно получить для случая, когда пропускание рабочего зеркала принимает оптимальное значение. Анализ зависимости, получаемой в ходе численного расчета, в диапазонах изменения параметров, характерных для лазеров тлеющего разряда, может позволить уточнить условия работы лазера с точки зрения геометрии, уровня потерь и усиления. Значение коэффициента пропускания рабочего зеркала лазера влияет на эффективность использования оптического резонатора лазера, характеризуемого коэффициентом полезного действия ОР.

Для реализации необходимых значений спектрального коэффициента отражения «глухого» зеркала можно использовать металлические и диэлектрические покрытия, наносимые на подложки. Лучшие металлические покрытия имеют высокий коэффициент отражения в широком диапазоне длин волн, достигающий 95–98 %. В реальных условиях неотраженная часть излучения (как минимум 3–7 %) поглощается, вызывая нагрев поверхности. Во многом свойства металлических отражающих покрытий определяются родом металла и качеством поверхности. Металлические покрытия широко используются при изготовлении неселективных зеркал, допустимо их применение и в лазерной технике в случае, если уровень потерь излучения на таких зеркалах является приемлемым. В качестве рабочего зеркала применяют многослойные диэлектрические четвертьволновые слои, состоящие из двух разнородных материалов, прозрачных для генерируемого излучения, с чередующимися высоким (n_B) и низким (n_H) показателями преломления. Такое сочетание слоев равной оптической толщины обеспечивает отражение электромагнитной волны от границ раздела всех сред в одной фазе. В итоге суммарная отраженная волна увеличивается по амплитуде, что равносильно увеличению коэффициента отражения покрытия. Коэффициент отражения интерференционного покрытия с ростом числа слоев в пределе приближается к единице и достигает у наиболее качественных образцов 99.7 %. Оставшаяся часть излучения рассеивается в диэлектрических слоях и подложке [8]. Наибольший коэффициент отражения (ρ_{\max}) такого покры-

тия из M слоев получается при абсолютно строгом равенстве оптических толщин слоев четверти длины волны рабочего излучения лазера: $n_B d_B = n_H d_H = \lambda/4$, где d_B, d_H – геометрические размеры (толщины) слоев с высоким и низким показателями преломления. Для покрытия с нечетным числом слоев наибольший коэффициент отражения

$$\rho_{\max} = \left(\frac{n_B^{M+1} - n_0 n_S n_H^{M-1}}{n_B^{M+1} + n_0 n_S n_H^{M-1}} \right)^2,$$

для покрытия с четным числом слоев

$$\rho_{\max} = \left(\frac{n_0 n_B^M - n_S n_H^M}{n_0 n_B^M + n_S n_H^M} \right)^2,$$

где n_0 – показатель преломления окружающей среды (для воздуха $n_0 = 1$); n_S – показатель преломления материала подложки. Рис. 1 отражает зависимость коэффициента отражения интерференционного многослойного покрытия от числа диэлектрических слоев для He-Ne-лазера, работающего на длине волны $\lambda = 632.8$ нм. На рис. 2 показана зависимость коэффициента отражения многослойного интерференционного покрытия от рабочей длины волны для тех же условий. Для достижения наибольшего значения коэффициента отражения следует использовать нечетное количество слоев.

При выборе количества слоев M следует стремиться к минимально возможному числу, поскольку каждый из них из-за поглощения и рассеяния излучения, а также отличия оптической толщины от четверти длины волны вносит дополнительные потери излучения. При подборе материалов для $\lambda/4$ -слоев и подложек зеркал учитывают их меха-

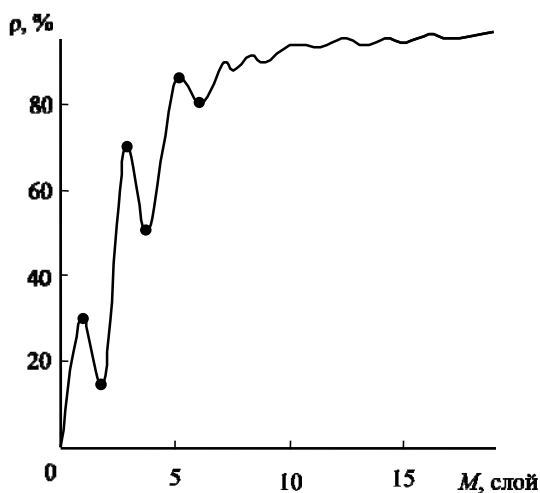


Рис. 1

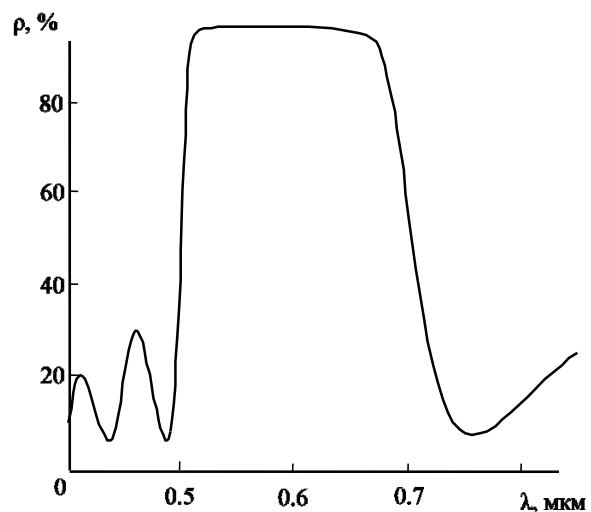


Рис. 2

нические, оптические и термические свойства. Для обеспечения наибольших значений ρ_{\max} используются материалы с большой разницей показателей преломления n_B и n_H .

Лазер вне зависимости от типа его АС и способа накачки может быть представлен в виде трех основных звеньев: активной среды, источника накачки и оптического резонатора. Исходя из этого, можно оценить эффективность лазера, которая представляет собой общий коэффициент полезного действия (КПД)

$$\eta_0 = \eta_{\text{нак}} \eta_{\text{АС}} \eta_{\text{ОР}}$$

Поток когерентных квантов, излучаемых АС и циркулирующих в результате многократных преотражений в ОР, благодаря конечной прозрачности (τ_2) рабочего зеркала покидает резонатор, образуя выходное излучение лазера. Эту часть излучения можно назвать «полезными» потерями ОР. Другая часть потока теряется в ОР из-за наличия в нем каналов паразитных потерь излучения. Соотношение между полезными и общими потерями является мерой эффективности оптического резонатора и называется коэффициентом полезного действия ОР ($\eta_{\text{ОР}}$). Выражение для $\eta_{\text{ОР}}$ может быть получено из анализа выражения для уравнения стационарной генерации

$$\kappa_{\text{ст}} = \kappa_{\text{погл}} + \frac{1}{L_{\text{АС}}} \ln(\rho_1 \rho_2)^{-1/2}. \quad (2)$$

Правая часть (2) отражает все возможные виды потерь оптического излучения в ОР, которые должны быть скомпенсированы усилением АС, характеризуемым в стационарном режиме $\kappa_{\text{ст}}$.

Второе слагаемое в правой части (2) зависит от $\rho_2 = 1 - \alpha_2 - \tau_2$ и, следовательно, включает в себя полезные потери, связанные с выходом лазерного излучения через рабочее зеркало. Тогда можно предположить

$$\eta_{\text{ОР}} = \frac{\ln(\rho_1 \rho_2)^{-1/2}}{\kappa_{\text{погл}} L_{\text{АС}} + \ln(\rho_1 \rho_2)^{-1/2}}. \quad (3)$$

Выражение (3) можно использовать только в том случае, если $\tau_2 \gg \alpha_2$ и $\alpha_1, \alpha_2, \tau_1 \ll 1$, т. е. при $\rho_1 \sim 1$ и $\rho_2 = 1 - \tau_2$, иными словами, когда выражение в числителе определяется только полезными потерями. Стоит отметить, что в ГРЛ эти условия выполняются. Когда же указанные условия не выполняются, необходимо использовать более строгое выражение [9]:

$$\eta_{\text{ОР}} = \frac{\ln(\rho_1 \rho_2)^{-1/2}}{\kappa_{\text{погл}} L_{\text{АС}} + \ln(\rho_1 \rho_2)^{-1/2}} \times \frac{\tau_2}{(\alpha_1 + \tau_1) \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} + (\alpha_1 + \tau_1)}$$

С целью исследования и оценки влияния параметров ОР и АС на нормированный уровень мощности генерации лазера (F), поиска оптимального коэффициента пропускания ($\tau_{\text{опт}}$), а также КПД ОР было разработано специализированное программное обеспечение (ПО) в среде Visual Studio на языке C#. При запуске программы появляется окно, содержащее поля выбора типа лазеров, а также варьируемых при расчетах параметров (рис. 3).

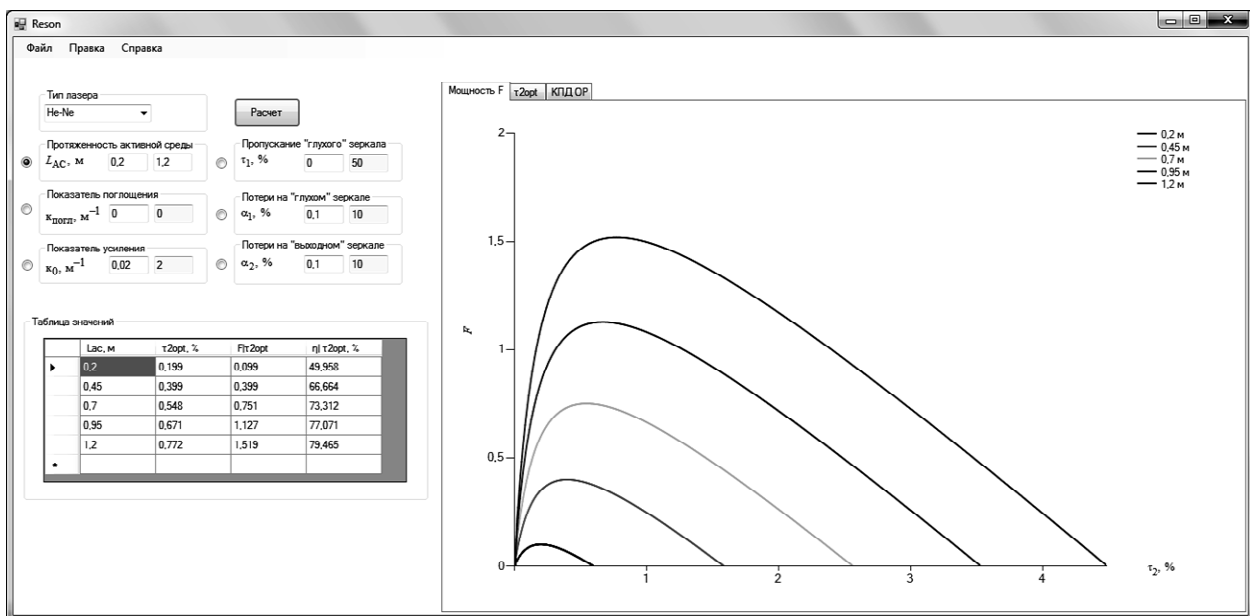


Рис. 3

Классификация лазеров осуществляется по типу АС. Перед началом расчета задаются границы изменения варьируемого параметра в виде диапазона значений, остальные параметры задаются в виде одного значения. При выборе соответствующего типа лазера поля варьируемых параметров заполняются значениями, характерными для данного лазера. Запуск алгоритма расчета, построенного на соотношении (1), осуществляется нажатием кнопки «Расчет». Результатом расчета являются три графика. Первый содержит семейство зависимостей $F(\tau_2)$ для пяти значений варьируемого параметра. Второй и третий отображают, соответственно, зависимости коэффициента оптимального пропускания и КПД ОР от варьируемого параметра. Данные зависимости также могут позволить определить пороговые условия генерации. Кроме того, после расчета выводится таблица, которая содержит необходимую информацию о числовых значениях τ_{opt} а также F и КПД ОР при $\tau_2 = \tau_{\text{opt}}$ для пяти значений варьируемого параметра: двух граничных значений, задаваемых пользователем, среднего значения и двух точек, отличающихся от среднего значения на 25 %.

Расчет зависимости уровня нормированной мощности от коэффициента пропускания рабочего зеркала $F(\tau_2)$ для гелий-неонового лазера представлен на рис. 4 (кривая 1 – 0.25 м; кривая 2 – 0.375 м; кривая 3 – 0.5 м). При расчете данных зависимостей полагалось $\kappa_0 = 0.08 \text{ м}^{-1}$, $\tau_1 = 1 \%$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1 \%$, длина АС менялась при этом от 0 до 0.5 м. В случае ГРЛ $\kappa_{\text{погл}}$ можно принять равным нулю. Общая тенденция хода данной зависимости носит экстремальный характер. При малых значениях коэффициента пропускания рабочего зеркала τ_2 из резонатора лазера выходит лишь малая часть излучения, что приводит к низкому уровню генерируемой мощности. При боль-

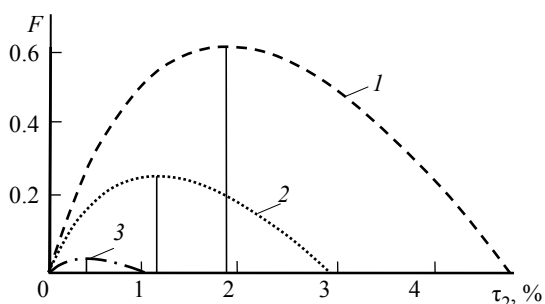


Рис. 4

ших значениях τ_2 увеличивается уровень потерь (полезных) в ОР и снижается его добротность. Из графика видно, что генерация имеет место лишь при определенных значениях $L_{\text{АС}}$, превышающих пороговое, например при протяженности АС 0 и 0.125 м лазерной генерации не будет (на рис. 4 не показаны). Это обусловлено тем, что, несмотря на высокую степень пространственной и временной когерентности излучения, АС гелий-неонового лазера обладает низким показателем усиления для перехода в видимом диапазоне ($\lambda = 632.8 \text{ нм}$). Этот переход является самым слабым в лазере, однако излучение в видимой области делает его привлекательным для практического использования.

Пороговое значение протяженности АС можно оценить при помощи зависимостей КПД ОР $\eta_{\text{ОР}} = f(L_{\text{АС}})$ и оптимального коэффициента пропускания $\tau_{2\text{opt}} = f(L_{\text{АС}})$, представленных на рис. 5 и 6 соответственно. Наличие порогового характера этих зависимостей можно объяснить тем, что усиление в АС зависит от ее протяженности. При малых значениях длины усиление имеет недостаточный уровень, а начиная с некоторого порогового значения превышает полезные и паразитные потери. Несмотря на то что с точки зрения работы лазера выходное излучение является полезным сигналом, для ОР это излучение также является потерями, снижающими добротность ОР.

Разработанная программа позволяет оценивать уровень потерь в ОР, при котором не будет происходить генерации лазерного излучения. При задании в качестве варьируемого параметра коэффициента потерь на зеркалах аргументом выступает сумма коэффициентов потерь на обоих зеркалах, а не отдельные на каждом из зеркал. Зависимости КПД ОР и оптимального пропускания от суммарных потерь для гелий-неонового лазера представлены на рис. 7 и 8 соответственно. При расчете полагалось $L_{\text{АС}} = 0.6 \text{ м}$, $\kappa_0 = 0.08 \text{ м}^{-1}$, $\tau_1 = 1 \%$, суммарные потери на зеркалах $\alpha_1 + \alpha_2$ изменялись в пределах от 1 до 12 %. В He–Ne-лазерах оптимальный коэффициент пропускания принимает значения на уровне единиц процентов. Низкое значение показателя усиления приходится компенсировать высоким значением добротности ОР, которая падает с ростом суммарных потерь. Нахождение оптимального

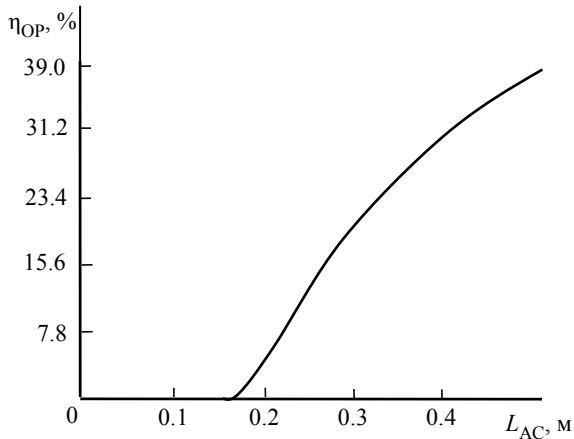


Рис. 5

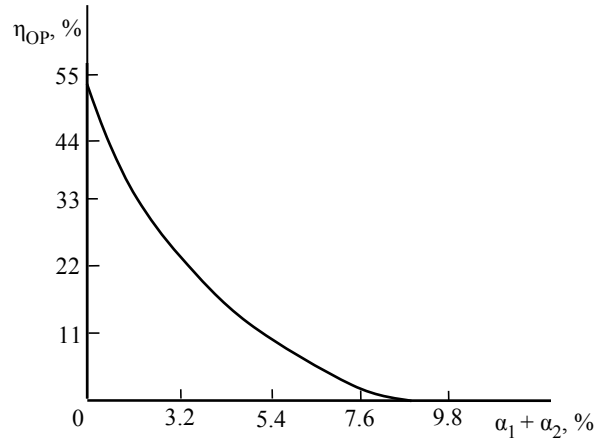


Рис. 7

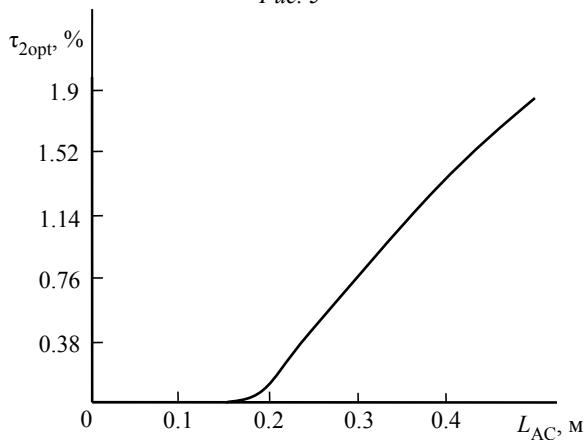


Рис. 6

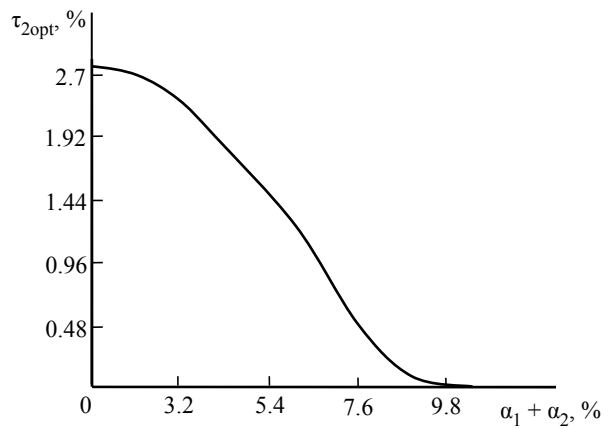


Рис. 8

коэффициента пропускания рабочего зеркала τ_{2opt} позволит определить требуемый коэффициент отражения зеркала и, следовательно, число диэлектрических слоев в зеркале.

На основании данных, полученных при оптимизации параметров ОР лазера, определяются такие важные характеристики, как КПД, а также генерируемая лазером мощность и частота излучения. Анализируя зависимости, получаемые в ходе моделирования, для диапазона изменения

параметров, которые характерны для данной АС, можно уточнить рабочие условия работы лазера с точки зрения геометрии, уровня потерь и усиления. Помимо ГРЛ программа позволяет оптимизировать параметры ОР других типов лазеров, например твердотельных и полупроводниковых. Разработанная программа прошла апробацию и успешно используется студентами при выполнении курсового проекта по дисциплине «Квантовые и оптоэлектронные приборы и устройства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киселев А. С., Смирнов Е. А. Исследование вольт-амперных характеристик тлеющего разряда в протяженных трубках // Вакуумная техника и технология. 2014. Т. 23, № 1. С. 172–174.
2. Киселев А. С., Смирнов Е. А. Исследование вольт-амперных характеристик лазеров тлеющего разряда // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 6. С. 3–6.
3. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. М.: Наука, 1971. 490 с.
4. Киселев А. С., Смирнов Е. А. Методика расчета параметров плазмы тлеющего разряда // Вакуумная техника и технология. 2014. Т. 24, № 1. С. 56–59.
5. Determination of the plasma parameters of a glow discharge in long tubes / A. S. Kiselev, D. K. Kostin, A. A. Lisenkov, E. A. Smirnov // J. of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 789. P. 012027.
6. Kiselev A. S., Smirnov E. A. Determination of the plasma impedance of a glow discharge in carbon dioxide // J. of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 872. P. 012050.
7. Kiselev A. S., Smirnov E. A. Dynamic characteristics of the plasma of a helium-cadmium laser // J. of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 872. P. 012053.
8. Пихтин А. Н. Квантовая и оптическая электроника. М.: Абрис, 2012. 656 с.
9. Смирнов Е. А., Черниговский В. В. Автоматизированный расчет и проектирование приборов квантовой электроники: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. 96 с.

A. S. Kiselev, E. A. Smirnov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

INFLUENCE OF PHYSICAL PROCESSES IN ACTIVE MEDIUM ON OPTICAL RESONATOR PARAMETERS OF GAS DISCHARGE LASERS

Based on the use of the stationary generation equation, an expression is obtained that relates the dependence of the output power of the laser radiation on parameters determined by physical processes occurring in its active medium: reinforcement and absorption index of the active medium, length of the active medium of the laser, loss of radiation in the optical resonator. The method of creation of function of normalized power of radiation of the laser and also stay on its basis of optimum coefficient of transmission of the working mirror corresponding to the maximum power at the set parameters of the active environment and the optical resonator is developed. Besides, the technique allows defining dependences of optimum coefficient of transmission of a working mirror and efficiency of the optical resonator on parameters of the active environment and the resonator of the laser. A computer program has been developed that makes it possible to optimize the optical resonator parameters in an automated mode. The program has undergone approbation, and can be used at design and development of gas-discharge lasers.

Gas discharge laser, active medium, optical resonator, optimum transmittance of the working mirror, efficiency of the optical resonator
