

В.В. Дембовецкий

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СО₂-ЛАЗЕРЕ С НЕЛИНЕЙНЫМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ

В работе исследованы гистерезисные явления в СО₂-лазере с нелинейным внутрирезонаторным поглотителем для линий генерации Р(16)–Р(28) в 10-мкм переходе. В качестве нелинейного поглотителя использовался SF₆. Экспериментально зарегистрированы токовый и частотный гистерезис, а также гистерезис при изменении ненасыщенного поглощения и добротности резонатора. Обсуждается возможность использования такого типа лазера в качестве быстродействующего «газового затвора».

Существование гистерезисных эффектов в выходных характеристиках лазерного излучения было впервые продемонстрировано экспериментально в работе [1] на примере He-Ne-лазера с нелинейным поглощением. Теоретическое объяснение этих эффектов на основе немонотонной зависимости эффективного (с учетом поглощения) коэффициента усиления лазера от амплитуды электрического поля было дано в [2], где приведен критерий возникновения гистерезисных явлений. При исследовании гистерезисных явлений в лазерах с нелинейным поглощением различают несколько типов гистерезисных эффектов: 1) токовый гистерезис — при изменении тока разряда, т.е. при изменении уровня накачки активной среды; 2) гистерезис по поглощению — при изменении величины ненасыщенного поглощения (например, изменение давления поглощающего газа); 3) частотный гистерезис — при изменении частоты резонатора (изменении его длины); 4) гистерезис при изменении добротности резонатора (например, внесение нерезонансных потерь). Экспериментальное обнаружение гистерезисных эффектов в СО₂-лазере с нелинейным поглощением (для пассивных систем подобная неоднозначность между входным и выходным сигналом стала известна позднее как оптическая бистабильность) долгое время было затруднительно из-за возникновения режима пассивной модуляции добротности, который, как правило, возникал прежде чем выполнялся критерий появления гистерезиса. Режим пассивной модуляции добротности впервые в СО₂-лазере обнаружен с использованием в качестве нелинейного поглотителя SF₆ [3].

Возникновение и характеристики гистерезисных кривых можно понять, исходя из простой модели лазера с нелинейным поглощением [4]. В этом случае интенсивность внутри резонатора (пропорциональная выходной мощности лазера) описывается простым соотношением

$$\frac{\eta_1}{1 + \beta_1 \epsilon^2} - \frac{\eta_2}{1 + \beta_2 \epsilon^2} - 1 = 0, \quad (1)$$

где η_1 и η_2 — ненасыщенное усиление и поглощение, нормированное на потери резонатора; ϵ^2 — квадрат амплитуды электрического поля; β_1 , β_2 — параметры насыщения активной и поглощающих сред. Соотношение (1) справедливо для однородно уширенных линий поглощающей и усиливающей сред и при совпадении центров линий усиления, поглощения и частоты резонатора. В явном виде величина поля определяется следующим выражением:

$$\epsilon^2 = \frac{\{\beta_2 (\eta_1 - 1) - \beta_1 (\eta_2 + 1) \pm \sqrt{[\beta_2 (\eta_1 - 1) - \beta_1 (\eta_2 + 1)]^2 + 4\beta_1 \beta_2 (\eta_1 - \eta_2 - 1)}\}}{2\beta_1 \beta_2}. \quad (2)$$

На рис. 1 приведены характерные зависимости интенсивности, рассчитанные по формуле (2) для трех характерных случаев: 1) $1 - \eta_2 = 0$; 2) $\eta_2 \leq \eta_2^{\text{кр}} = \frac{\beta_2}{\beta_2 - \beta_1}$ (где $\eta_2^{\text{кр}}$ — критическое значение поглощения, при $\eta_2 > \eta_2^{\text{кр}}$ возможен гистерезис, см. критерий возникновения гистерезиса в [2]); 3) $\eta_2 > \eta_2^{\text{кр}}$. Для всех трех случаев $\beta_2 \epsilon^2 \geq \beta_1 \epsilon^2 \geq 1$. Таким образом, наличие двух действительных различных корней уравнения (1) определяет наличие гистерезиса. В общем случае зависимость коэффициента поглощения от интенсивности может носить довольно сложный характер. Например, для линий генерации СО₂-лазера 10Р(12)–10Р(28) насыщенный коэффициент поглощения описывается выражением (3) [5, 6]:

$$\alpha_{эфф} = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_s} + \frac{\beta_0 I/I_s}{1 + I/I_s}, \quad (3)$$

где α_0 , β_0 — ненасыщенные коэффициенты поглощения моды ν_3 и $\nu_3 + \nu_6 SF_6$, I_s — интенсивность насыщения, величины α_0 , β_0 и I_s , естественно, различны для различных линий. При перестройке CO_2 -лазера с одной линии генерации на другую возможно как получение гистерезисных эффектов, так и переход в режим пассивной модуляции добротности (при неизменных поглощении и уровне накачки активной среды) в зависимости от того, какой критерий выполняется: возникновение гистерезиса или режима автомодуляции [4]. В настоящее время гистерезисные эффекты получены и в лазерах на других активных веществах, например, в N_2O -лазере [7].

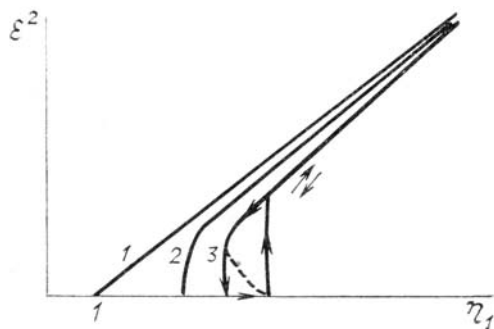


Рис. 1. Зависимость выходной мощности лазера с нелинейным поглощением усиления в активной части

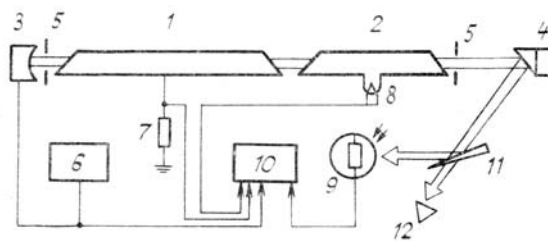


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — разрядная трубка; 2 — поглощающая ячейка; 3 — сферическое зеркало; 4 — дифракционная решетка (100 штрихов/мм); 5 — ирисовая диафрагма; 6 — низкочастотный генератор треугольного напряжения; 7 — измерительное сопротивление в цепи катода; 8 — преобразователь манометрический термопарный; 9 — фотоприемник; 10 — графопостроитель; 11 — клин из ZnSe; 12 — измеритель мощности

В настоящей работе проведено исследование гистерезисных эффектов в CO_2 -лазере с нелинейным поглощением. В качестве поглотителя использовался SF_6 . Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Усиливающая (активная) часть лазера — два разрядных промежутка с отдельными высоковольтными источниками питания. Длина одного разрядного промежутка — 1,3 м. Длина поглощающей ячейки — 0,65 м. Внутри резонатора вблизи сферического зеркала и дифракционной решетки располагались две ирисовые диафрагмы для выделения основной гауссовой моды. Регистрация гистерезисных кривых осуществлялась на двухкоординатном графопостроителе, на ось «Y» которого подавался сигнал с фотоприемника (радиационный компенсированный элемент РТН-10г), а на ось «X» — сигнал, пропорциональный току разряда, изменению потерь или длины резонатора, давлению поглощающего газа. Изменение длины резонатора осуществлялось при помощи пьезокорректоров, на которых крепились сферическое зеркало и дифракционная решетка. Напряжение на пьезокорректоры подавалось с низкочастотного генератора треугольного напряжения. Идентификация линии генерации лазера осуществлялась при помощи монохроматора SPM-2. Вакуумная система позволяла откачивать ячейку до уровня 10^{-5} торр, напуск и откачка поглощающего газа могли производиться или непрерывно, или малыми порциями. Для возможности сравнения гистерезисных кривых (рис. 3–6) измерения проводились везде на одной и той же линии генерации лазера 10P(16).

Наличие двух типов гистерезиса на рис. 3 (слева и справа от центра линии генерации) связано с тем, что линии поглощения SF_6 вблизи линии генерации лазера 10P(16) образуют эффективный асимметричный контур поглощения. Зависимость выходной мощности без поглощающего газа в ячейке помечено на рис. 3–6 цифрой 1. На всех рисунках изменение интенсивности при прямом и обратном ходе помечены стрелками.

Возникновение генерации при токах разряда, меньших значения, соответствующего максимуму выходной мощности при токовом гистерезисе (рис. 4), можно объяснить следующим образом: выходная мощность пропорциональна произведению насыщенного усиления и интенсивности насыщения, усиление является монотонно убывающей, а интенсивность насыщения — возрастающей функцией в диапазоне токов 4–40 мА. Таким образом, значение тока, при котором наблюдается максимум выходной мощности, не соответствует максимальному значению коэффициента ненасыщенного усиления, возникновение же генерации определяется условием $\eta_1 - \eta_2 - 1 = 0$ [2]. Для гистерезиса по поглощению интересно отметить тот факт, что при увеличении усиления (включение двухразрядных промежутков вместо одного, как

на рис. 5) область гистерезиса по давлению (а следовательно, и по величине поглощения) расширяется и смещается в сторону больших поглощений (например, рис. 4 в работе [8]).

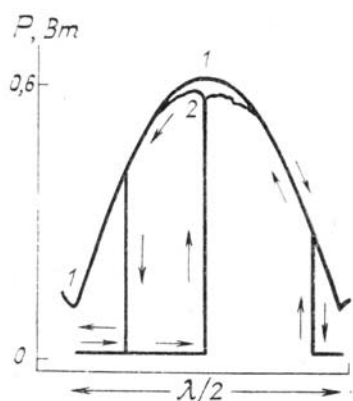


Рис. 3. Частотный гистерезис. Давление SF₆ в ячейке 8,5 мторр

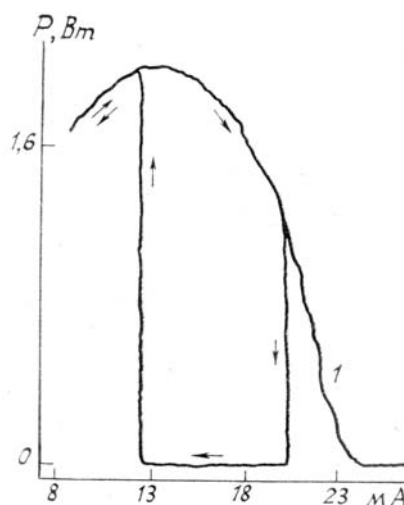


Рис. 4. Точковый гистерезис. Давление SF₆ в ячейке 14 мторр

Специально исследовалась устойчивость в области гистерезиса. При внесении потерь внутрь резонатора в область гистерезиса генерация срывалась и при возвращении к прежнему уровню потерь никогда не возникала вновь. Эта картина соответствует кривой зависимости эффективного усиления от поля с одним максимумом и двумя стационарными точками с нулевым и ненулевыми значениями электрического поля (кривые 3–5 рис. 2 в работе [2]), причем ненасыщенный коэффициент усиления лазера (при нулевом значении поля) меньше потерь, что и обеспечивает устойчивость безгенерационного состояния.

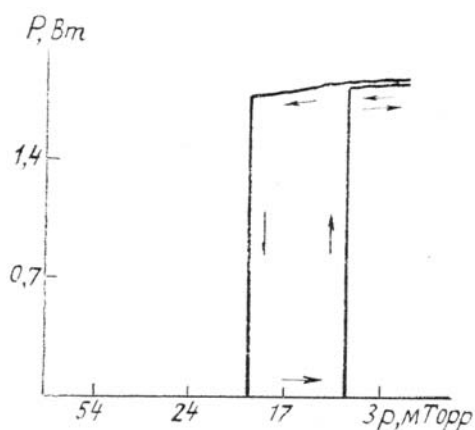


Рис. 5. Гистерезис в зависимости от величины поглощения (давления газа в ячейке). $I_{\text{разр}} = 15$ мА

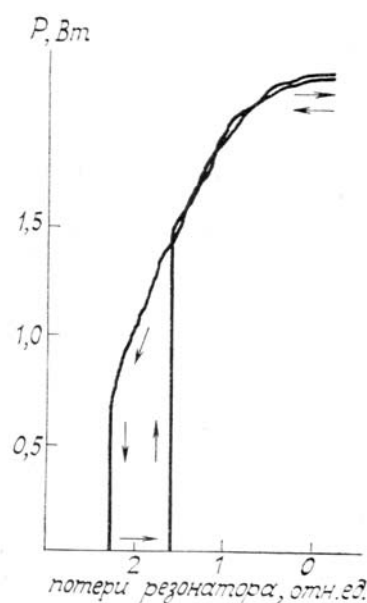


Рис. 6. Гистерезис в зависимости от величины потерь резонатора. Давление SF₆ в ячейке — 9 мторр, $I_{\text{разр}} = 16$ мА

Был замечен интересный эффект: срыв генерации происходил в стационарном режиме, а возникновение генерации — в пульсирующем. Такой режим наблюдался на линиях генерации CO₂-лазера 10P(18)–10P(20), а на линиях 10P(24)–10P(28) при этих же давлениях поглотителя наблюдался режим пассивной модуляции добротности. В первом случае критерий возникновения генерации для пиковых значений импульса может быть уже выполнен, а для остальной части импульса (хвоста) еще нет. Отметим, что срыв генерации происходил плавно. Этот эффект, насколько нам известно, наблюдался впервые.

С точки зрения прикладных задач, на наш взгляд, наибольший интерес представляет гистерезис по поглощению. На основе этого эффекта может быть создан «газовый затвор», например, для технологических лазеров. В режиме генерации (как видно из рис. 5) такой затвор не вносит потерь, а следовательно, не уменьшает выходную мощность. В закрытом же состоянии, поскольку генерация отсутствует, вопрос о теплоотводе от затвора не ставится, (хотя он возникает для затворов обычного типа). Время срабатывания такого затвора на порядок менее, чем обычно используемого в настоящее время механического затвора.

В заключение автор выражает благодарность Г.И. Сурдутовичу за плодотворные дискуссии по гистерезисным явлениям в лазерах.

1. Лисицын В.Н., Чеботаев В.П. // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 7. № 3.
2. Казанцев А.П., Раутиан С.Г., Сурдутович Г.И. // ЖЭТФ. 1968. Т. 54. С. 1409.
3. Wood O.R., Schwars S.E. // Appl. Phys. Lett. 1967. V. 11. P. 88.
4. Дембовецкий В.В., Сурдутович Г.И. // Лазерные пучки. Хабаровск, 1975. С. 110.
5. Plinski E.F., Abramski K.M. // Appl. Opt. 1984. V. 14. P. 301.
6. Brunet H. // IEEE. T. QE-6. 1970. P. 678.
7. Weiss C.O. // Opt. Commn. 1982. V. 42. P. 291.
8. Дембовецкий В.В., Сурдутович Г.И. // Лазерные пучки. Хабаровск, 1985. С. 111.

Научно-исследовательский центр по технологическим лазерам АН СССР,
г. Троицк

Поступила в редакцию
18 января 1989 г.

V. V. Dembovetski. Hysteresis Phenomena in the CO₂ Laser with a Nonlinear Absorber.

The paper deals with the study of hysteresis phenomena in the CO₂-laser with a nonlinear absorber for the laser emission lines P(16) to P(28) of the 10 μm transitions inside the cavity. The nonlinear absorbing material was SF₆. The current and frequency hysteresis was observed experimentally, also was observed the hysteresis when both the absorption under saturation level and the resonator Q were varied. The possibility is discussed in the paper of making use of such types of lasers as a fast gaseous switch.