

УДК 621.373.826

© В. А. Елохин, И. Г. Жданов

## МЕТОДЫ МОДУЛЯЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРОВ

В обзоре представлены методы модуляции излучения СО<sub>2</sub>-лазеров. Особое внимание уделено лазерам с ВЧ-возбуждением рабочей смеси, а также методам модуляции добротности резонаторов СО<sub>2</sub>-лазеров.

### ВВЕДЕНИЕ

Из всех выпускаемых в данное время технологических лазеров, наиболее распространенными являются газоразрядные СО<sub>2</sub>-лазеры. Со времени их создания в 1964 г. их мощность увеличилась от нескольких милливатт до многих киловатт. В последние годы большое распространение получили СО<sub>2</sub>-лазеры с высокочастотным возбуждением (ВЧ). Накачка активной среды лазера в них осуществляется разрядом переменного тока с частотой в диапазоне от десятков мегагерц до нескольких гигагерц. ВЧ-разряд по сравнению с тлеющим разрядом постоянного тока имеет большие преимущества, в частности повышается эффективность, устойчивость и однородность разряда. В связи с этим технологические СО<sub>2</sub>-лазеры с ВЧ-возбуждением нашли большое применение в промышленной обработке материалов. В частности, лазеры данного типа используются для резки и сварки металлов, прошивки керамики, резки дерева, пластмассы, тканей и маркировки материалов [1]. Такой широкий спектр применений СО<sub>2</sub>-лазеров связан с тем, что большинство материалов хорошо поглощают излучение в диапазоне длин волн 9–11 мкм [2], излучаемых лазерами этого типа. Вместе с тем это может привести к перегреву обрабатываемого участка, что приведет к деформации обрабатываемого материала или ухудшению качества реза. Зона нагрева при лазерной резке может быть уменьшена путем фокусировки излучения на малую площадь и работой лазера в частотно-импульсном режиме. Большинство СО<sub>2</sub>-лазеров, выпускающихся в данное время, отличаются высоким оптическим качеством излучения ( $M^2 < 1.2$ ), что позволяет хорошо фокусировать луч на обрабатываемой детали [3]. Получение импульсного режима работы является более сложной задачей. В данном обзоре мы рассмотрим два принципиальных метода получения частотно-импульсного режима работы лазера.

### СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРЫ С МОДУЛЯЦИЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЧ-ПИТАНИЕМ

Простейшим способом получения частотно-импульсного режима генерации является применение ВЧ-источника питания, работающего в импульсном режиме, для накачки СО<sub>2</sub>-плазмы. В работе [2] показано, что с помощью ВЧ-накачки можно получить импульсы длительностью до 10 мкс. При соответствующей частоте повторения импульсов пиковая мощность в импульсе может превышать среднюю мощность лазера в 2–3 раза. Данный способ широко реализован в СО<sub>2</sub>-лазерах щелевой конфигурации. Выпускаемые в настоящее время лазеры щелевого типа обладают высокой мощностью излучения (до 500 Вт) и могут работать в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 60 и даже до 100 кГц (компании Rofin-Sinar и Coherent). Принципиальная схема щелевого лазера показана на рис. 1.

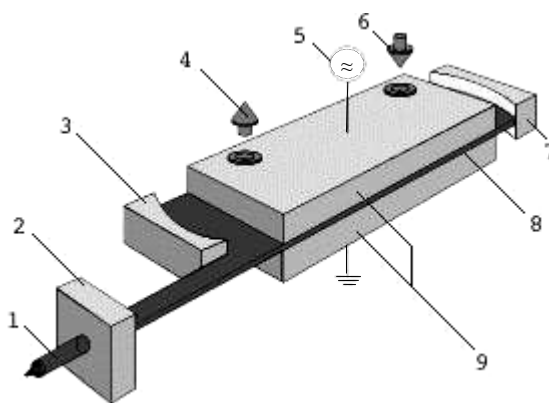


Рис. 1. Принципиальная схема щелевого СО<sub>2</sub>-лазера.

1 — излучение лазера; 2 — выходное окно; 3 — выходное зеркало; 4, 6 — охлаждающая вода; 5 — ВЧ-источник питания; 7 — глухое зеркало; 8 — разрядный промежуток; 9 — электроды

Одной из особенностей газоразрядного возбуждения среды является поджиг разряда. Это связано с тем, что процесс зажигания разряда требует повышенной по сравнению со стационарным напряженности поля (обычно в 2 раза), что может приводить к образованию токовых шнуров (вследствие точечного пробоя). Для нормального возбуждения же необходим однородный по всей поверхности электродов разряд. С этой целью требуется необходимость применять специальные меры, направленные на обеспечение однородности процессов ионизации во всем разрядном промежутке. Для этого может быть использована предионизация ультрафиолетовым излучением [4], которая также позволяет облегчить поджиг лазера. Предионизация позволяет увеличивать давление газовой смеси, а следовательно, и мощность лазера. С точки зрения электрического способа возбуждения плазмы лазерная система (ЛС) с ВЧ-накачкой является резонансной цепью с емкостью и индуктивностью. Электроды представляют собой емкостные элементы, а токовые вводы — индуктивности и емкости. Особенностью таких  $\text{CO}_2$ -лазеров является то, что резонансная частота лазера с зажженным разрядом примерно на 1–3 МГц ниже резонансной частоты лазера без разряда [5]. При зажигании разряда импеданс ЛС меньше, чем в случае, когда разряда нет (рис. 2).

Таким образом, при пуске  $\text{CO}_2$ -лазера ВЧ-источник питания должен подавать высокое напряжение на электроды для поджига разряда и затем обеспечивать подачу ВЧ-мощности при более низком напряжении для поддержания излучения. Поджигающее напряжение и ВЧ-мощность, вкладываемая в разряд, зависят как от выходного импеданса источника питания, так и от импеданса лазерной системы (электродов и активной среды),

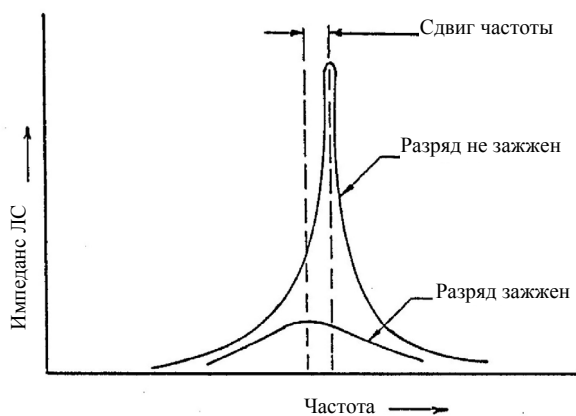


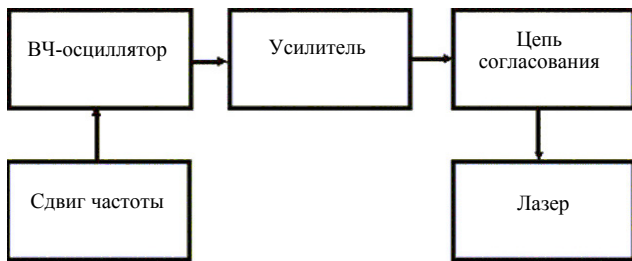
Рис. 2. Резонансные кривые импеданса ЛС без разряда и с разрядом

который, как указано выше, различен для двух состояний (разряд зажжен и разряд не зажжен). Из-за этого встает проблема создания соответствующего согласующего устройства между источником питания и нагрузкой. В качестве возможного решения данной проблемы в [6] предлагается ВЧ-источник питания, который дает напряжение для зажигания разряда и обладает цепью согласования с изменяющимся импедансом между источником питания и активной средой лазера. Данное устройство управляется обратной связью и позволяет высокоэффективно подводить энергию в процессе стабильной генерации. Однако оно хорошо работает только при низких уровнях ВЧ-мощностей и не применимо при высоких мощностях, когда отраженная от нагрузки волна имеет напряжение около 300–500 В. Другим возможным решением может быть система, предложенная в [7]. Здесь источник питания вырабатывает импульсы длительностью 1 мкс, имеющие энергию чуть ниже порога генерации лазера и следующие с частотой 5 кГц. Эти импульсы предионизируют активную среду лазера. Для получения генерации лазера используются более широкие импульсы, которые имеют достаточно энергии для получения инверсии заселенности. Данная система позволяет пользователю хорошо управлять параметрами излучения. Проблема здесь состоит в том, что предионизирующие и основные импульсы имеют заполнение одинаковой ВЧ частотой. Таким образом, процессы поджига и генерации не оптимизированы.

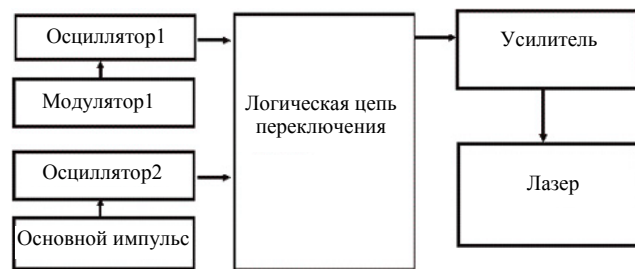
В попытке создать многочастотный источник питания Хестерман в [8] предлагает ВЧ-генератор, работающий после поджига на частоте, оптимальной для генерации лазера в непрерывном режиме. Для поджига лазера операционная частота ВЧ-генератора моментально сдвигается вверх на резонансную частоту "холодного" лазера изменением напряжения на переменном конденсаторе, включенном в цепь задающего генератора источника питания. Тем самым изменяется частота источника питания и обеспечивается достаточное напряжение для поджига лазера.

Принципиальная схема такой системы приведена на рис. 3.

Данное решение вполне приемлемо для поджига лазера и поддержания его работы в непрерывном режиме и совершенно не подходит при работе в импульсном режиме. Основной причиной этого является зависимость импеданса ЛС от величины и длительности предыдущего импульса. Питер Лаакман [9] попробовал решить проблему включением настроенной цепи разряда, которая направляет обратно на ВЧ-осциллятор 10 % его выходной мощности через четвертьволновый преобразователь импеданса. Это приводит к автоматической самоподдержке частоты осциллятора (автогенератора) в зависимости от того, горит разряд



**Рис. 3.** Схема питания лазера от ВЧ-генератора с перестраиваемой частотой



**Рис. 4.** Схема питания лазера с помощью двух ВЧ-осцилляторов

или нет. Данное решение требует тонкой настройки параметров обратной связи, что ведет к сложности получения максимальной эффективности и технической реализации данной схемы. Наиболее приемлемое решение проблемы эффективного поджига лазера и затем подвода к нему максимальной мощности представлено в [10]. В данной схеме используются два ВЧ-осциллятора, работающие на разных частотах и подсоединенные к разрядной камере через логическую цепь переключения и ВЧ-усилитель. Первый осциллятор, работающий на одной частоте, позволяет подвести максимальное напряжение для поджига "холодного" лазера, а второй, работающий на другой частоте, позволяет подвести максимальную мощность для оптимальной работы лазера в непрерывном и импульсном режимах. Первая частота — резонансная частота "холодного" лазера, вторая — "горячего". Первая частота модулируется для получения ВЧ-импульсов с длительностью, частотой следования и амплитудой, достаточными для уверенного поджига "холодного" лазера и поддержания возбуждения активной среды ниже порога генерации. Вторая частота — наиболее эффективная частота для генерации лазера, в котором плазма зажжена и поддерживается ионизованной импульсами первой частоты. Вторая частота модулируется основными импульсами, контролирующими мощность и длительность лазерного излучения. Логическая цепь переключения обеспечивает переключение между импульсами первой частоты и импульсами второй частоты. Данная схема обладает рядом существенных преимуществ.

1. Хороший поджиг и максимальная выходная мощность.
2. Независимый контроль поджига и выходной мощности.
3. Улучшенная импульс-импульсная репродуктивность.
4. Высокая эффективность по мощности.
5. Облегченная настройка лазера в процессе производства.

С помощью описанной выше схемы лазер может работать как в непрерывном режиме, так и в импульсном с частотой повторения импульсов до 100 кГц. Принципиальный вид данной схемы изображен на рис. 4.

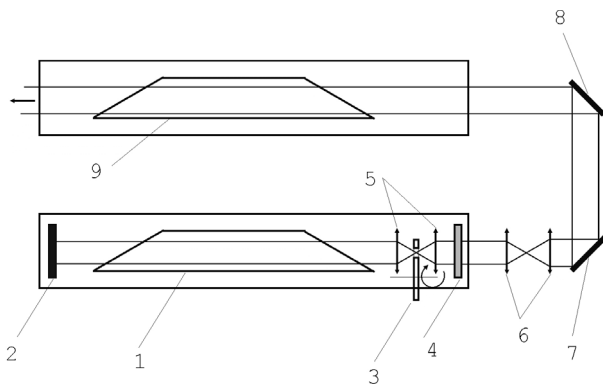
Более короткие импульсы могут быть получены с помощью модуляции добротности резонатора.

#### МОДУЛЯЦИЯ ДОБРОТНОСТИ. МЕТОДЫ

Метод модуляции добротности резонатора позволяет получать лазерную генерацию в любых типах лазеров в виде коротких импульсов с длительностью  $10^{-5}$ – $10^{-9}$  с с высокой пиковой мощностью в диапазоне  $10^5$ – $10^{10}$  Вт. Принцип работы лазера в режиме модуляции добротности состоит в следующем. В резонатор лазера помещается оптический элемент, обладающий способностью изменять пропускание излучения данного лазера (затвор). Если затвор закрыт, то генерация не возникает и инверсия населенности может стать очень большой. При открывании затвора усиление в лазере будет значительно превышать потери, и накопленная в активной среде энергия выделится в виде короткого и интенсивного импульса.

#### Механические затворы

Модуляция добротности осуществляется механическим путем. Например, в работе [11] в резонатор лазера помещался затвор в виде диска с отверстиями, вращающегося с большой скоростью (до 70 000 об/мин). Полученная длительность импульсов составляла около 200 нс, а частота повторения импульсов достигала 100 кГц. Принципиальная схема такого лазера представлена на рис. 5. Однако стоит заметить, что данная схема работает по принципу генератор—усилитель, т. е. является достаточно громоздкой. В работе [12] в резонатор мощного быстропроточного, технологического,



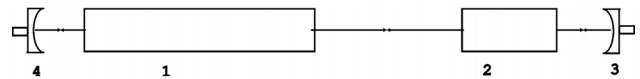
**Рис. 5.** Принципиальная схема лазера с механической модуляцией добротности резонатора. 1 — лазер-генератор; 2 — глухое зеркало; 3 — диск с отверстиями; 4 — частично прозрачное зеркало; 5 — телескопическая система; 6 — телескопическая система; 7, 8 — поворотные зеркала; 9 — лазер-усилитель

ВЧ-накачиваемого лазера TRUMPF TLF2000SP, работающего в непрерывном режиме, было помещено аналогичное устройство, в результате чего были получены импульсы длительностью 400 нс.

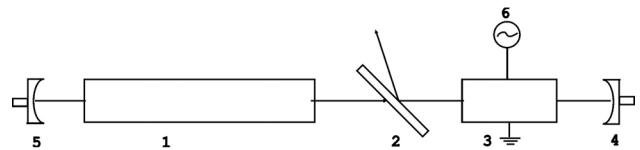
#### Затворы на основе насыщающихся поглотителей

Данные затворы представляют собой наиболее простой метод модуляции добротности. В этом случае затвор представляет собой оптический элемент, который поглощает свет на длине волны, совпадающей с длиной волны лазерного излучения. Обычно используется кювета с растворами солей или органических красителей либо полимерные матрицы с указанными веществами. Генерация может возникнуть, только когда усиление активной среды скомпенсирует потери в резонаторе и потери в кювете. Происходит одновременная накачка активной среды и поглотителя; при этом, как и в случае механического затвора, инверсия населенности достигает значительно большей величины, чем в случае свободной генерации. При насыщении поглотителя вещество раствора становится прозрачным, и возникает генерация. На выходе лазера появится импульс, называемый гигантским из-за того, что в отличие от случая свободной генерации в его испускании участвует большее число атомов активной среды [13]. Для лазеров на  $\text{CO}_2$  в качестве насыщающегося поглотителя применяют кюветы с газами, например  $\text{SF}_6$  [14]. Принципиальная схема такого волноводного лазера представлена на рис. 6.

С помощью насыщающегося поглотителя возможно получение импульсов длительностью в 200 нс [15] и частотой следования импульсов до 50–100 кГц [14].



**Рис. 6.** Принципиальная схема волноводного лазера с затвором на основе насыщающегося поглотителя. 1 — активная среда; 2 — ячейка с насыщающимся поглотителем; 3, 4 — зеркала резонатора



**Рис. 7.** Принципиальная схема лазера с АОМ. 1 — активная среда; 2 — АОМ; 3 — питание АОМ; 4, 5 — зеркала резонатора

#### Акустооптические модуляторы добротности

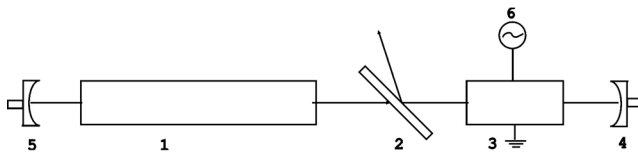
Акустооптический модулятор (АОМ) представляет собой оптически прозрачное вещество, в котором с помощью пьезоэлектрического преобразователя возбуждается ультразвуковая волна. Наличие волны приводит к тому, что вещество работает как фазовая решетка. При помещении ячейки в резонатор и приложении напряжения к преобразователю часть лазерного излучения будет дифрагировать на индуцированной фазовой решетке и выходить из резонатора. Если напряжение сделать достаточно большим, то потери могут привести к срыву генерации. Затем, снимая напряжение, мы можем получить короткий и мощный импульс [13, 16].

Принципиальная схема лазера с АОМ показана на рис. 7.

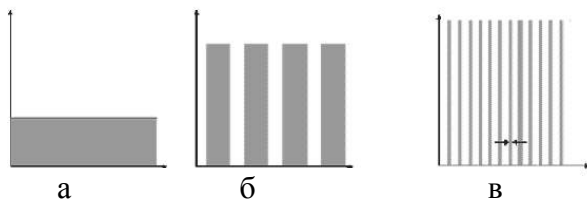
Для  $\text{CO}_2$ -лазеров в качестве АОМ используют кристалл Ge [16, 17]. Заметим, что выпускаемые в данное время АОМ рассчитаны на среднюю мощность лазерного излучения не более 100 Вт [18] вследствие поглощения части излучения в веществе и невысокой лучевой прочности материала АОМ. При помощи АОМ можно получить частоту следования импульсов 100 кГц [19], 200 кГц [20] и даже 550 кГц [21].

#### Электрооптические модуляторы добротности

Действие затворов этого типа основано на электрооптическом эффекте, называемом эффектом Поккельса. При приложении к ячейке напряжения в ней возникает двойное лучепреломление.



**Рис. 8.** Принципиальная схема лазера с ЭОМ. 1 — активная среда; 2 — поляризатор; 3 — ЭОМ; 4, 5 — зеркала резонатора; 6 — питание ЭОМ



**Рис. 9.** Сравнение режимов работы технологического волноводного ВЧ-накачиваемого  $\text{CO}_2$ -лазера с внутренней модуляцией добротности: а — непрерывный режим, б — импульсный режим, в — режим модуляции добротности

При соответствующем напряжении происходит изменение поляризации излучения на некоторый угол, что приводит к дополнительным потерям и срыву генерации. Снимая напряжение, мы открываем затвор [13]. Принципиальная схема лазера с ЭОМ показана на рис. 8.

В  $\text{CO}_2$ -лазерах в качестве ЭОМ используется кристалл  $\text{CdTe}$  [22, 23]. С его помощью можно получить импульсы длительностью от нескольких наносекунд до 300 нс [22]. Так, в работе [24] с помощью такого кристалла были получены импульсы длительностью 140 нс. Недостатком кристалла  $\text{CdTe}$  можно назвать его очень сильную чувствительность к повреждениям и маленькую лучевую стойкость. Однако в начале 2002 г. фирма Coherent заявила о выпуске первых технологических волноводных ВЧ-накачиваемых  $\text{CO}_2$ -лазеров с внутренней модуляцией добротности [25]. Средняя мощность одного из них превышает 15 Вт. Мощность в импульсе превышает 2.5 кВт. Мощность второго также превышает 15 Вт, а мощность в импульсе превышает 15 кВт. Длительность импульса в обоих случаях при этом менее 150 нс. На рис. 9 показаны графики работы лазера: а) в непрерывном режиме (мощность — 500 Вт); б) в импульсном режиме (длительность импульсов 100 мкс; мощность в импульсе 1.5 кВт); в) в режиме модуляции добротности (длительность импульса 100 нс, мощность в импульсе 3кВт).

Другой способ электрооптической модуляции

может быть осуществлен на основе эффекта Штарка. В резонатор помещается ячейка с веществом, которое подбирается таким образом, чтобы при приложении к нему напряжения уровни энергии атомов вещества сдвигались или расщеплялись так, чтобы могли поглощать излучение на длине волны, которую излучает лазер. При выключении напряжения вещество становится оптически прозрачным и возникает генерация. Для  $\text{CO}_2$ -лазеров в качестве такого вещества применяют смесь газов  $\text{NH}_3 + \text{ND}_3 + \text{NH}_2\text{D}$ . С помощью такой модуляции можно получить импульсы длительностью от 50 до 350 нс [26].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характерными особенностями волноводных  $\text{CO}_2$ -лазеров с ВЧ-накачкой являются компактность, высокое оптическое качество излучения, надежность и возможность работы в отпаянном режиме в течение многих тысяч часов. В целом волноводные лазеры лучше, чем какие-либо другие газовые лазеры, подходят под требования роботизации технологических процессов. Метод получения сверхкоротких импульсов с помощью модуляции добротности открывает большие перспективы в технологиях микрообработки материалов. Наиболее приемлемыми способами модуляции добротности, очевидно, являются акустооптическая модуляция и электрооптическая модуляция, т. к. они позволяют нам управлять длительностью импульсов и частотой их следования. Однако, как мы видели, имеющиеся на данный момент модуляторы имеют низкую лучевую стойкость, что не дает повысить среднюю мощность лазера больше 100 Вт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дутов А.И., Евстратов Ю. И., Иванова В.Н. и др. Экспериментальное исследование и численное моделирование щелевого волноводного  $\text{CO}_2$ -лазера с высокочастотной накачкой // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. С. 499–504.
2. Spatch D.P., DeMaria A.J. The Design of Sealed  $\text{CO}_2$  Lasers Continues to Improve // Laser Focus World. Internet: <http://lfn.pennwellnet.com/home.cfm>, March, 2001. V. 37, N 3.
3. Дутов А.И., Кулешов А.А., Новоселов Н.А. и др. //  $\text{CO}_2$  лазеры щелевого типа с высокочастотной накачкой // Оптический журнал. 1998. Т. 65, № 12. С. 62–69.
4. Hobart J.L., et al. RF Excited  $\text{CO}_2$  slab waveguide laser. Патент США N 5,123,028.
5. Chenausky P.P., et al. Turned-circuit RF-excited laser. Патент США N 4,363,126.

6. *Angle E.R. et al.* Radio frequency laser pumping system. Патент США N 4,451,766.
7. Synrad, Inc.: Series 48 Laser Operation and Service Manual, Realise v. 2.0. Oct. 18, 1995. 10 p.
8. *Hesterman J.W.* Pumping system for RF excited gas devices. Патент США N 4,748,634.
9. *Laakmann Peter* Electrically self-oscillating, RF-excited gas laser. Патент США N 4,837,772.
10. *Sukhman Y.P. et al.* Gas laser RF power source apparatus and method. Патент США N 6,181,719.
11. *Viol W., Uhlenbusch J.* Generation of CO<sub>2</sub> laser pulses by Q-switching and cavity dumping and their amplification by a microwave excited CO<sub>2</sub> laser // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1996. V. 29. P. 57–67.
12. *Sakai T., Hamada N.* A high-power Q-switched CO<sub>2</sub> laser using intense pulsed RF discharge excitation // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1996. V. 35. P. 3428–3435.
13. *Звелто О.* Принципы лазеров. М.: Мир, 1984. 190–194 с.
14. *Chenausky P.P., Hart R.A.* Passively Q-switched square bore waveguide laser. Патент США N 4,512,021.
15. *Chenausky P.P. et al.* Passively-Q-switched dual laser. Патент США N 4,464,758.
16. *Fox A.J.* Acousto-optic modulator. Патент США N 4,759,613.
17. *Baumgart P.M. et al.* Multiple channel acousto-optic modulators. Патент США N 5,963,569.
18. *Roberts S.H.* Laser angroxing head employing acousto-optic modulator. Патент США N 5,748,222.
19. *Wheatley D.I.* High power laser amplifier. Патент США N 5,631,769.
20. *Wheatley D.I.* A high power, high modulation bandwidth CO<sub>2</sub> laser // *Proceeding of SPIE.* 1997. V. 3092. P. 109–113.
21. *Cao Q., Baker H.J., Hall D. R.* High modulation rate, microsecond pulses for micromachining using a planar waveguide CO<sub>2</sub> laser amplifier // *Proceeding of SPIE.* 2001. V. 4184. P. 266–269.
22. *Wayne R.J., Chenausky P.P. et al.* Method for cavity dumping a Q-switched laser. Патент США N 4,176,327.
23. *Chenausky P.P. et al.* Coupled waveguide freespace laser. Патент США N 4,484,333.
24. *Wang Q., Tian Z., Wang Y.* Tunable electro-optically Q-switched RF excited CO<sub>2</sub> waveguide laser with two channels // *Infrared Physics & Technology.* 2000. V. 40. P. 349–352.
25. Coherent, Inc.: Press Release. May 21, 2002.
26. *Chenausky P.P. et al.* Apparatus and method for cavity dumping a Q-switched laser. Патент США N 4,174,504.

*ОАО "Научные приборы", Санкт-Петербург  
(Елохин В.А.)*

*Институт аналитического приборостроения РАН,  
Санкт-Петербург (Жданов И.Г.)*

Материал поступил в редакцию 21.05.2003.

## METHODS OF CO<sub>2</sub> LASER LIGHT MODULATION

**V. A. Elokhin, I. G. Zhdanov\***

*Scientific Instruments PLC, Saint-Petersburg,*

*\*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

In this review, methods of modulation of CO<sub>2</sub> laser radiation are presented. Most attention is given to RF-excited CO<sub>2</sub> lasers and methods of Q-switching in CO<sub>2</sub> lasers.