

УДК 621.373.826.038.823

В.В. Боровков, С.Л. Воронов, Б.В. Лажинцев, В.А. Нор-Армян, Г.И. Федоров

СО₂-ЛАЗЕР НА ОСНОВЕ ТРЕХЭЛЕКТРОДНОЙ СХЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗРЯДА

Разработан ТЕА СО₂-лазер атмосферного давления, в котором область разряда ограничена тремя электродами, образующими два последовательно соединенных разрядных промежутка, а емкостный накопитель присоединен непосредственно к двум крайним электродам. Зажигание объемного самостоятельного разряда (ОСР) в промежутках происходит последовательно во времени при подаче высоковольтного импульса напряжения на средний управляющий электрод. Показано, что подобная схема и способ работы позволяют формировать ОСР с энерговодами до 250 Дж/(л·атм) при высокой эффективности возбуждения активной среды лазера. Зарядное напряжение емкостного накопителя, при котором формируется ОСР, лежит в диапазоне 0,6...0,9 от статического пробойного, а энергия, затрачиваемая на это, составляет лишь 1...3% от энергии накачки. Реализация подобной схемы в импульсно-периодическом лазере позволит снизить нагрузку на коммутаторы системы энергопитания ОСР в десятки раз и одновременно обеспечить эффективное возбуждение активной среды лазера.

Введение

Для различных технологических применений импульсно-периодических ТЕА СО₂-лазеров, таких как разделение изотопов, фотохимия, лидарные комплексы, необходимы лазеры со средней мощностью излучения в несколько киловатт. До настоящего времени реализовано большое число схем возбуждения активной среды ТЕА СО₂-лазеров и соответственно источников энергопитания (см., например, [1, 2]). Тем не менее создание относительно простых схем возбуждения и соответственно источников энергопитания для длительной и надежной работы технологических ТЕА СО₂-лазеров вызывает большие трудности. Особенно это относится к элементам коммутации электрической энергии в системах накачки. Свою актуальность эта проблема не утратила и сегодня.

Для снижения нагрузки на коммутаторы источника накачки в последнее время все более широкое применение в СО₂-лазерах находят схемы энергопитания с использованием магнитной компрессии импульса тока [3, 4], а также схемы возбуждения активной среды на основе двойного разряда [5, 6]. Схемы с магнитной компрессией импульса тока потенциально обладают высокой надежностью и практически неограниченным сроком службы благодаря использованию в них твердотельных коммутаторов. Однако существующие сложности реализации подобных схем энергопитания ОСР [3, 4] ограничивают их широкое применение. К основным недостаткам подобных схем следует отнести наличие большой массы магнитного материала (~ 1 кг/Дж), а также отдельной конденсаторной батареи для каждого каскада сжатия. Кроме того, потери энергии в каскадах сжатия приводят к снижению эффективности лазера и необходимости использования охлаждения магнитных компрессоров.

Схемы возбуждения с использованием двойного разряда, получившие широкое распространение в электроразрядных лазерах на различных активных средах, находят свою реализацию на основе как двухэлектродной [5–8], так и трехэлектродной [9, 10] конструкции лазерных камер.

В двухэлектродной конструкции схемы возбуждения с двойным разрядом в настоящее время наиболее широко применяются в эксимерных лазерах [5, 6]. В работах [7, 8] сообщается об успешной реализации в СО₂-лазере подобной схемы возбуждения. В качестве развязки между контуром формирователя, который обеспечивает зажигание разряда, и контуром поддерживателя, осуществляющим возбуждение активной среды, использовалась ненасыщающаяся индуктивность 2...25 мкГн. Наличие в цепи основного разряда развязывающей индуктивности увеличивает время ввода энергии в объемный разряд. В результате длительность импульса генерации составляет более 1 мкс, что ограничивает применение таких лазеров в технологиях разделения изотопов, фотохимии, лидарных комплексах. Дополнительная индуктивность снижает возможности согласования ОСР в различных режимах, увеличивает длительность ввода энергии, что может отрицательно сказаться на устойчивости объемной фазы разряда, особенно в частотном режиме работы.

В трехэлектродных конструкциях с возбуждением двойным разрядом емкостный накопитель контура поддерживателя с минимальной индуктивностью подсоединен к двум крайним электродам, а контур формирователя соединен со средним управляющим электродом. В таких конструкциях камер в [9] исследовались генерационные характеристики ХеСl-лазера, а в [10] характеристики комбинированного разряда в СО₂-смеси в квазипрерывном режиме при давлении ≤ 0,1 атм. В [9, 10] формирование разряда осуществлялось практически одновременно в

обоих разрядных промежутках. Это достигалось подбором определенных соотношений межэлектродных расстояний в первом и втором разрядных промежутках, величиной напряжения в контуре энергопитания ОСР и, в основном, скоростью нарастания и большой амплитудой импульса напряжения на управляющем электроде. Осуществление такого режима достаточно сложно как в эксимерных, так и в CO_2 -смесях, особенно при давлении, близком к атмосферному.

Авторами [11, 12] предложена трехэлектродная конструкция лазера с возбуждением двойным разрядом, в котором формирование разряда осуществляется последовательно во времени в двух разрядных промежутках. Так как в цепи энергопитания разряда исключены дополнительные развязывающие индуктивности, характерные для [7, 8], то возможна реализация минимальной длительности импульса возбуждения, что позволяет надеяться на повышение устойчивости ОСР в более широком диапазоне изменения состава активной среды, особенно в частотном режиме работы лазера. Наличие двух синхронизованных во времени лазерных каналов позволяет работать в схеме задающий генератор – усилитель. В [13–15] сообщалось об успешной реализации такой схемы как с равными, так и с неравными разрядными промежутками для возбуждения эксимерных, Ar-Xe и CO_2 -лазерных смесей.

В настоящей статье приводятся более подробные результаты исследований CO_2 -лазера на основе трехэлектродной схемы формирования ОСР [15].

Экспериментальная установка

В экспериментах использовалась цилиндрическая лазерная камера из нержавеющей стали диаметром 240 мм. Электродная сборка состояла из трех никелевых электродов с длиной разрядной части около 250 мм, образующих два разрядных промежутка с межэлектродными расстояниями $d_1 = 32$ мм и $d_2 = 24$ мм. Все четыре рабочие поверхности электродов выполнены с одинаковым профилем, близким к профилю Чанга. Электроды установлены внутри камеры на проходных тefлоновых изоляторах. Ряд из 12 искровых зазоров с одной из боковых сторон каждого разрядного промежутка служил для предыонизации разрядного объема.

Резонаторная оптика устанавливалась непосредственно на фланцах лазерной камеры и служила одновременно торцевыми окнами камеры. Плоскопараллельные резонаторы обоих каналов были образованы выходными пластинами из BaF_2 с диэлектрическим покрытием ($R = 80\%$, $\lambda = 10,6$ мкм) и глухими медными зеркалами.

Энергия лазерного излучения измерялась двумя калориметрами ИМО-2Н. Импульс генерации регистрировался фотоприемником ФПУ-50.

Для измерения вольт-амперных характеристик разряда использовались токовый шунт и омические

делители. В экспериментах использовались Ne высокой, N_2 и CO_2 технической чистоты.

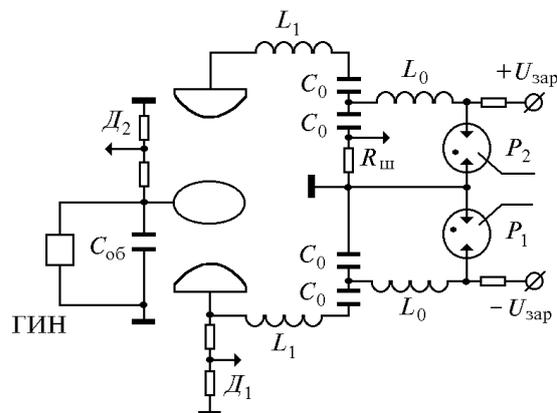


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема установки: D_1 и D_2 – омические делители напряжения; $R_{ш}$ – токовый шунт

На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема трехэлектродного лазера с управляющим средним электродом. Система энергопитания ОСР выполнена на основе двух разнополярных LC-генераторов, собранных из конденсаторов типа К15-10 (4700 пФ, 30 кВ), которые заряжались от двух источников напряжения до ± 20 кВ. Начальная емкость LC-генераторов $4C_0$ в экспериментах изменялась от 200 до 510 нФ. Волновое сопротивление источника накачки ОСР при емкости в ударе $C_0/4 = 32$ нФ составляло около 1 Ом. Величина индуктивности L_1 определялась конструктивными особенностями камеры и емкостного накопителя. Индуктивность L_0 подбиралась таким образом, чтобы обеспечить надежную развязку контура накачки ОСР с контурами перезарядки LC-генераторов. Коммутация LC-генераторов осуществлялась разрядниками P_1 и P_2 типа РУ-73. В проведенных экспериментах время перезарядки LC-генераторов составляло 10...20 мкс. В контрольных опытах увеличение длительности перезарядки до 50 мкс не приводило к изменению лазерных параметров. Очевидно, что подобное увеличение времени перезарядки значительно снижает нагрузку на коммутаторы системы энергопитания ОСР при реализации такой схемы в частотном режиме. Контур формирователя разряда представлял собой ГИН, который заряжал обострительную емкость $C_{об} = 1$ нФ. Блок предыонизации запитывался отдельным генератором, не показанным на рис. 1. Доля энергии в блоке предыонизации составляла 3% от запасенной в накопителе ОСР. Запуск лазера осуществлялся внешним высоковольтным генератором пусковых импульсов, инициирующим срабатывание разрядников P_1 и P_2 для перезарядки LC-генераторов. Вблизи максимума напряжения на разрядных промежутках включался блок предыонизации разряда, а затем с задержкой 80 нс срабатывал контур формирования поджигающего импульса. Величина задержки оставалась неизменной в течение всех экспериментов.

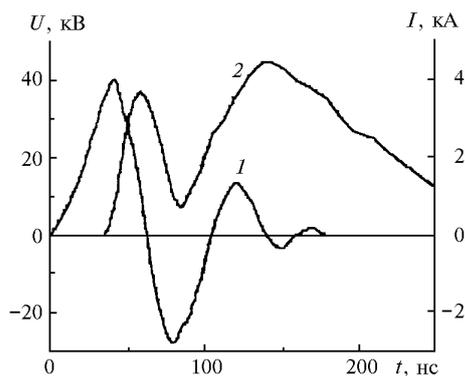


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения (1) на среднем электроде и тока разряда (2). Рабочая смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:3$, $P_{\text{смеси}} = 0,8$ атм, $U_{\text{зар}} = \pm 15$ кВ

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 2 представлены характерные осциллограммы импульсов напряжения на среднем электроде и тока в разрядных промежутках, иллюстрирующие начальную стадию формирования ОСР. Как видно из рис. 2, при зарядке $C_{об}$ на среднем электроде возникает импульс положительной полярности с фронтом нарастания ~ 40 нс. В результате в первом (d_1) разрядном промежутке формируется объемный разряд при напряженностях электрического поля ~ 22 кВ/см. Затем за время ~ 30 нс происходит перезарядка $C_{об}$, напряжение на среднем электроде изменяет полярность и при напряженности поля ~ 24 кВ/см происходит формирование разряда во втором (d_2) разрядном промежутке с одновременным появлением тока основного разряда. Плотность тока при формировании разряда сравнима с плотностью тока ОСР и в зависимости от состава и общего давления смеси составляла $40 \dots 100$ А/см². Высокая плотность тока на стадии формирования ОСР необходима для перезарядки $C_{об}$ на сопротивлении плазмы первого промежутка и создания максимально высокой напряженности поля во втором разрядном промежутке.

На рис. 3 представлены типичные осциллограммы импульсов напряжения на втором разрядном промежутке, тока разряда и генерации при емкости генератора накачки $4C_0 = 510$ нФ. Разряд носит аperiodический характер, причем более 85 % энергии, запасенной в генераторе накачки основного разряда, вводится в течение первых 500 нс от начала разряда. Активное сопротивление плазмы ОСР минимально (~ 10 Ом) в момент максимума тока и затем увеличивается до ~ 30 Ом при величине тока $0,1 I_{\text{max}}$. К моменту окончания разряда емкостные накопители контура накачки полностью не разряжаются. Доля энергии, остающаяся в них, составляет ~ 3 % от первоначально запасенной. Уровень остаточной энергии увеличивается при неизменном зарядном напряжении с ростом общего давления смеси и содержанием молекулярных компонентов, а также с уменьшением зарядного напряжения. Приведенная напряженность электрического поля на стадии

ввода энергии в ОСР находится в диапазоне $E/N \sim (1,5 \dots 4) 10^{-16}$ В·см². Такой уровень напряженности электрического поля обеспечивает эффективное возбуждение активной среды CO_2 -лазеров [16]. Достаточно высокое сопротивление плазмы ОСР и отсутствие дополнительной индуктивности в контуре энергопитания разряда позволяют относительно просто выполнить его на основе линии с распределенными параметрами, согласованной с активным сопротивлением плазмы разряда. В результате во время всего импульса накачки будет обеспечена оптимальная величина квазипостоянного напряжения на разрядном промежутке для эффективного возбуждения активной смеси. При этом длительность импульса накачки останется такой же, как и при выполнении источника энергопитания на основе сосредоточенной емкости.

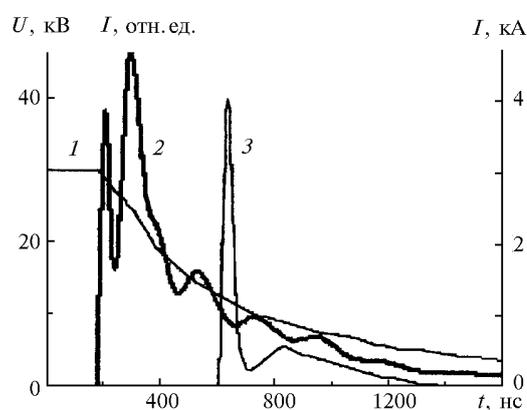


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения (1) на втором разрядном промежутке, тока разряда (2) и генерации (3). Рабочая смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:3$, $P_{\text{смеси}} = 0,8$ атм, $U_{\text{зар}} = \pm 15$ кВ

Импульс генерации имеет характерный для ТЕА CO_2 -лазера временной профиль. В первом пике излучения длительностью на уровне $0,5 I_{\text{max}} \sim 50$ нс сосредоточено около 50 % энергии лазерного излучения. Задержка импульса генерации относительно момента начала импульса тока разряда возрастает с уменьшением содержания N_2 и для рассматриваемого случая составляет ~ 400 нс.

На рис. 4 представлены зависимости энергии генерации E_1 и E_2 с первого и второго разрядных промежутков соответственно, удельной энергии генерации с обоих разрядных промежутков, а также суммарной энергии генерации лазера от энергии, запасенной в емкостных накопителях ОСР (смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:3$, при давлении 0,8 атм и $R_1 R_2 \sim 0,8$). Видно, что энергия генерации практически линейно растет с увеличением запасаемой энергии вплоть до 75 Дж, что соответствует энерговыкладу ~ 250 Дж/(л·атм). Отметим, что во всем этом диапазоне происходит формирование однородных диффузных разрядов. Дальнейшее увеличение запасаемой энергии не приводило к повышению выходной энергии генерации вследствие значительного ухудшения однородности разрядов. При уровне энергии

80...90 Дж практически все разряды заканчивались искровыми пробоями. Замена выходных зеркал $R = 80\%$ на зеркала $R = 53\%$ приводила к значительному уменьшению энергии генерации. На большем разрядном промежутке энергия уменьшалась в 1,7 раза, на меньшем – в 1,4 раза, что говорит о невысоком превышении порога генерации в обоих промежутках.

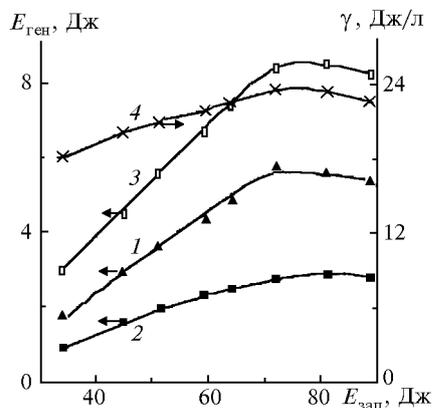


Рис. 4. Зависимость энергии генерации (1) и (2) с первого и второго разрядных промежутков соответственно, суммарной энергии генерации (3) и суммарной удельной энергии генерации (4) с обоих разрядных промежутков от запасаемой энергии в емкостных накопителях ОСР. Рабочая смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:3$, $P_{смеси} = 0,8$ атм

Одна из особенностей работы лазера заключается в значительном изменении ширины (следовательно, и объема) области генерации. Контроль ширины области генерации осуществлялся путем регистрации автографа излучения с каждого из разрядных промежутков. В процессе увеличения энергии накачки происходил почти линейный рост ширины (w) зоны генерации, при этом расширение наблюдалось в обоих лазерных каналах. Практически во всем диапазоне изменения энергии накачки $w_1/w_2 \approx 1,5$. Отмеченная разница в ширине зоны генерации по промежуткам определяется в основном одинаковостью используемого профиля всех четырех рабочих поверхностей электродов при неравенстве межэлектродных расстояний.

Максимальная суммарная энергия генерации 8,4 Дж с кпд = 11,5 % по отношению к запасенной в источнике накачки ОСР была получена для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:3$ при полном давлении смеси 0,8 атм. Как следует из электротехнических характеристик разряда, а также из распределения энергии генерации в промежутках, реальный кпд в первом разрядном промежутке составляет $\geq 13\%$. Для реализации потенциальных возможностей способа формирования разряда в трехэлектродных системах необходимо обеспечить одинаковую ширину области разряда в обоих промежутках. Это может быть достигнуто уменьшением кривизны рабочих поверхностей электродов во втором разрядном промежутке и переходом на системы с равными межэлектродными

промежутками. Предварительные эксперименты с равными межэлектродными промежутками показали возможность формирования однородных диффузных разрядов в широком диапазоне напряжений источника энергоснабжения ОСР.

Весьма перспективной для CO_2 -лазера является успешно развиваемая в [7, 8] электрическая схема, в которой отсутствуют коммутаторы в цепи энергоснабжения ОСР. В этой схеме емкостной накопитель ОСР заряжается непосредственно от источника постоянного напряжения. В наших экспериментах при уровне зарядного напряжения 0,6...0,95 от статического пробойного напряжения такая схема позволяла формировать однородный диффузный разряд в CO_2 -смесях. На лазерной смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:2$ при полном давлении 0,2 атм были получены такие же результаты (с точки зрения эффективности работы лазера), как и при использовании схемы с LC-генераторами. Энергия генерации составила величину 0,6 Дж с кпд $\sim 4,5\%$ при удельном энергокладе ~ 190 Дж/(л·атм).

Заключение

В данной статье впервые представлена трехэлектродная схема CO_2 -лазера на основе двойного разряда, в которой формирование разряда осуществляется последовательно во времени в двух разрядных промежутках. Показано, что подобная схема и способ работы позволяют формировать ОСР с энерговодами до 250 Дж/(л·атм) при эффективности возбуждения активной среды лазера $> 11\%$. Зарядное напряжение емкостного накопителя, при котором формируется ОСР, лежит в диапазоне 0,6...0,9 от статического пробойного. Реализована минимальная длительность импульса генерации, характерная для используемого состава лазерной смеси, ~ 50 нс. Зажигание разряда осуществляется при быстрой коммутации только энергии, запасаемой в контурах формирователя, и предыонизации, которая составляет $< 5\%$ от энергии накачки. Это позволяет надеяться на создание блоков УФ-предыонизации и формирования разряда, обладающих достаточно большим ресурсом работы. Схема позволяет не только значительно снизить (в десятки раз) нагрузку на коммутаторы в цепи основного разряда, но и при необходимости полностью исключить их. Наличие двух синхронизованных во времени разрядных промежутков позволяет работать в режиме «задающий генератор-усилитель». Схема позволяет в широких пределах изменять соотношение величин межэлектродных расстояний в промежутках.

1. Велюхов Е.П., Баранов В.Ю., Летохов В.С., Рябов Е.А., Старишин А.Н. // Импульсные CO_2 -лазеры и их применение для разделения изотопов. М.: Наука, 1983. 304 с.
2. Технологические лазеры: Справочник. Т. 1. М.: Машиностроение, 1991. 432 с.
3. Tanaka H., Hatanaka H., Obara M., Midorikawa K., Tashiro H. // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. N 8. P. 2092–2096.
4. Hatanaka H., Midorikawa K., Obara M., Tashiro H. // Rev. Sci. Instrum. 1993 V. 64. N 11. P. 3061–3065.

5. Sato Y., Inoue M., Haruta K., Nagai H., and Murai Y. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 64. N 6. P. 679–680.
6. Goo F.A., Witteman W.J., Timmermans J.C.M., Spijker J., Couperus J. // Proc. SPIE. 1994. V. 2206. P. 30–40.
7. Bhadani P.K., Sylvan A., Harrison R.G. // Rev. Sci. Instrum. 1991. V. 62. N 6. P. 1404–1407.
8. Bhadani P.K., Harrison R.G. // Rev. Sci. Instrum. 1994. V. 65. N 3. P. 563–566.
9. Bollanti S., Lazzaro P.Di., Flora F., Giordano G., Letardi T., Petrucci C., Schina G., Zheng C.E. // Proc. SPIE. 1994. V. 2206. P. 144–152.
10. Осипов В.В., Савин В.В., Тельнов В.А. // ЖПМТФ. 1982. N 2. С. 10–16.
11. Пат. 2017289 РФ, МКИ5, H01S 3/09, 3/097. Устройство для накачки газового проточного лазера / Боровков В.В., Воронин В.В., Воронов С.Л., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Тананакин В.А., Федоров Г.И. Опубл. в БИ. 1994. N 14. С. 153.
12. Пат. N 2029423 РФ, МКИ5, H01S 3/09, 3/097. Способ получения генерации в газовом электроразрядном лазере и газовый электроразрядный лазер / Боровков В.В., Воронин В.В., Воронов С.Л., Жеребцов В.Е., Иванов В.В., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Тананакин В.А., Федоров Г.И. Опубл. в БИ. 1995. N 5. С. 213.
13. Боровков В.В., Воронин В.В., Воронов С.Л., Зенков Д.И., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Тананакин В.А., Федоров Г.И. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 4. С. 36–39.
14. Боровков В.В., Воронин В.В., Воронов С.Л., Зенков Д.И., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Тананакин В.А., Федоров Г.И., Юткин И.М. // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. N 5. С. 439–440.
15. Боровков В.В., Воронин В.В., Воронов С.Л., Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А., Тананакин В.А., Федоров Г.И. // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. N 1. С. 41–42.
16. Месяц Г.А., Королев Ю.Д. // УФН. 1986. Т. 148. Вып. 1. С. 101–122.

Российский федеральный ядерный центр –
 Всероссийский научно-исследовательский институт
 экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородской области

Поступила в редакцию
 9 октября 1997 г.

V.V. Borovkov, S.L. Voronov, B.V. Lazhintsev, V.A. Nor-Areвяn, G.I. Fedorov. **CO₂-Laser on the Base of Three-Electrode Scheme for Discharge Formation**

TEA CO₂-laser of atmospheric pressure, in which the discharge area is limited by three electrodes, forming two discharge gaps, connected in series and storage capacitor is connected immediately to two side electrodes, is developed. The ignition of the volumetrically independent discharge (VID) in the gaps happens sequentially in time at sending of high-voltage pulse to the middle control electrode. It is shown, that such scheme and operation method allow one to formation of VID with energy output up to 250 J/l-atm at high efficiency of active laser media excitation. Charging voltage of storage capacitor, forming VID, is in the range of 0.6...0.9 of the static breakdown voltage and the energy, used for this, is only 1...3% of the pumping energy. The realization of such scheme in pulsed-periodical laser allows one to decrease tens times the load on VID power-feeding system commutators and simultaneously provides effective excitation of active laser media.