

**Высокоскоростная импульсная модуляция  
излучения лазеров на самоограниченных  
переходах атомов химических элементов**

*Н.М. Лепёхин, Ю.С. Присеко, В.Г. Филиппов*

ЗАО «Опытно-экспериментальное производство ВЭИ»

г. Истра, Московская обл., Россия

*Рассмотрены некоторые аспекты физики плазмы, являющиеся общими для всего класса газоразрядных импульсно-периодических лазеров на самоограниченных переходах атомов химических элементов – лазеров на парах металлов, которые были положены в основу разработанного способа управления энергетическими характеристиками лазеров данного класса, работающих в условиях саморазогрева в режиме сдвоенных (основного и дополнительного) импульсов возбуждения. Представлены результаты разработки промышленного лазера на парах меди KULON-10Cu-M с высокоскоростной импульсной модуляцией излучения, в котором реализован предложенный способ возбуждения, позволяющий эффективно производить регулирование энергетических характеристик доз лазерного излучения по любому наперед заданному закону с точностью до одного импульса.*

Импульсно-периодические лазеры на самоограниченных переходах атомов химических элементов (лазеры на парах металлов) являются высокоэффективными газоразрядными источниками лазерного излучения, генерирующими на переходах с резонансного на метастабильный уровни. Известно [1], что основным процессом, определяющим работу лазеров на парах металлов, является возбуждение лазерных уровней электронами или возбужденными молекулами в результате соударений, происходящих под действием приложенного к лазерной трубке импульса напряжения (тока). Для того чтобы во время импульса возбуждения обеспечить преимущественное заселение верхнего лазерного уровня, средние энергии (температуры) электронов и определяющие их величину напряженности электрического поля в разряде должны быть достаточно большими, а длительность импульса возбуждения не должна превышать обратной величины вероятности лазерного перехода. Известно также, что при низких температурах электронов доминирующую роль играет только процесс заселения метастабильных уровней [1]. Таким образом, очевидно,

что для обеспечения преимущественного заселения нижнего (метастабильного) лазерного уровня, напряженность электрического поля в разряде может быть значительно снижена.

Одной из основных проблем лазеров на парах металлов является задача управления энергетическими характеристиками, обусловленная их зависимостью от частоты следования импульсов возбуждения, что в наибольшей степени проявляется при саморазогревном [2] способе их накачки.

Известные способы [3÷5] управления энергетическими характеристиками работы лазеров на парах металлов, выполненные в режиме сдвоенных импульсов, основаны на направленном изменении предимпульсных параметров плазмы, таких как концентрация атомов рабочего вещества, концентрация электронов и электронная температура, т.е. носят инерционный характер, что и определяет невозможность высокоскоростной импульсной модуляции лазерного излучения с нужным быстродействием и качеством.

В работе [6] была впервые показана возможность высокоскоростной импульсной модуляции излучения лазеров на парах металлов за счет не направленного изменения предимпульсных параметров плазмы, а за счет изменений условий эффективной генерации лазера путем регулирования уровня заселенности метастабильных лазерных уровней [7]. При этом, если верхний лазерный (рабочий) уровень эффективно заселяется в результате воздействия импульсов накачки, а нижний (метастабильный) уровень предварительно не заселен, то в результате спонтанного распада верхнего уровня по лазерному переходу (с некоторой вероятностью) произойдет эффективная генерация лазерного излучения [1], а если нижний уровень предварительно заселен, то в результате спонтанного распада верхнего уровня генерации лазерного излучения не произойдет [8÷9].

Регулирование уровня заселенности метастабильных лазерных уровней, как это показано в [7], может быть выполнено при работе лазеров на парах металлов в режиме сдвоенных (основного и дополнительного) импульсов возбуждения с помощью дополнительного импульса возбуждения, энергия которого достаточна для заселения метастабильных лазерных уровней и недостаточна для заселения резонансных уровней путем изменения местоположения дополнительного импульса относительно основного импульса возбуждения, т.е. за счет относительного отставания дополнительного импульса от основного импульса возбуждения, что соответствует режиму генерации лазера, или за счет его относительного опережения, что соответствует режиму гашения лазера. При этом основной и дополнительный импульсы возбуждения формируются синфазно от двух отдельных каналов (генераторов наносекундных импульсов). Увеличение населенностей нижних лазерных уровней и отсутствие или незначительное заселение верхних лазерных уровней,

при опережающем дополнительном импульсе возбуждения, определяется только энергией дополнительного импульса возбуждения и средней энергией электронов нижних лазерных уровней (для лазера на парах меди средняя энергия электронов верхних лазерных уровней имеет величину порядка 4 эВ, а нижних уровней не превышает 2 эВ), поэтому, с одной стороны, дополнительный импульс должен обладать энергией значительно ниже уровня энергии основного импульса возбуждения, определяющего возникновение и релаксацию инверсной населенности рабочих уровней и развитие индуцированного излучения, с другой стороны, дополнительный импульс не должен влиять на процессы релаксации населенностей нижних рабочих уровней в межимпульсный период после прохождения дополнительного импульса, т.е. должен находиться «вблизи» основного импульса возбуждения.

Экспериментально установлено, что эффективность управления энергетическими характеристиками лазера обеспечивается в наибольшей мере, когда время импульсного опережения и время импульсного отставания дополнительного импульса, отсчитываемые от начала импульса возбуждения, меньше времени жизни метастабильных лазерных уровней (для лазеров на парах меди эта величина равна  $\sim 1,0$  мкс). Кроме того, с точки зрения стабилизации параметров плазмы, обеспечиваемой постоянством параметров импульса возбуждения и дополнительного импульса, при управлении энергетическими характеристиками лазера оптимальным является такой режим работы, когда мощность, потребляемая от сети при генерации лазера (отстающем дополнительном импульсе), равна мощности, потребляемой лазером при отсутствии генерации (опережающем дополнительном импульсе). Этот режим достигается регулированием времени импульсного опережения и времени импульсного отставания дополнительного импульса от импульса возбуждения.

При принятых параметрах и условиях формирования дополнительного импульса, не происходит существенных изменений предимпульсных параметров плазмы, т.е. начальные условия последующего импульса возбуждения стабильны и неизменны, что и позволяет безынерционно выполнять высокоскоростную импульсную модуляцию излучения лазера по любому наперед заданному закону.

### **Устройство и работа лазера**

Практическая реализация работы устройства выполнена на базе промышленного лазера на парах меди серии KULON [10].

Устройство содержит газоразрядную лазерную трубку, катод и заземленный анод которой зашунтированы индуктивностью, резонатор, два коммутатора, два емкостных накопителя энергии, выполненных в виде нелинейных искусственных формирующих линий, выводы которых объединены и соединены с катодом лазерной трубки, регулируемый вы-

соковольтный источник питания, общий вывод которого соединен с заземленными катодами коммутаторов, генератор запускающих импульсов, две регулируемые линии задержки, два анодных реактора, два импульсных подмодулятора, нерегулируемую линию задержки, электронное реле и контроллер.

На рис. 1 представлена блок-схема лазера с высокоскоростной импульсной модуляцией; на рис. 2 и 3 – временные диаграммы работы элементов лазера; на рис. 4 и 5 – осциллограммы импульсов суммарного пучка излучения, полученные при проведении испытаний лазера с активным элементом в квазимоимпульсном и пакетном режимах с частотой следования импульсов 1 Гц (рис. 4), а также в квазимоимпульсном и пакетном режимах с частотой следования импульсов 0,1 Гц (рис. 5) при использовании, соответственно, неустойчивого телескопического резонатора с увеличением  $M=200$  и плоско-сферического резонатора. Рабочая частота следования импульсов в пакетном режиме на частоте 1 Гц составляет 12,5 кГц, а на частоте 0,1 Гц – 11 кГц.

Лазер работает следующим образом. Отпирающий сигнал с первого выхода генератора запускающих импульсов подают с требуемой частотой работы лазера на вход системы управления регулируемого высоковольтного источника питания, и производят зарядку емкостных накопителей нелинейных искусственных формирующих линий до требуемого уровня питающего напряжения. Синхронно с сигналом с первого выхода, сигнал со второго выхода генератора запускающих импульсов, как это показано на рис. 2 и 3, подают на вход нерегулируемой линии задержки. Сигнал на выходе линии задержки формируется после действия постоянной времени задержки  $t_0$ , определяемой максимальным временем заряда емкостных накопителей нелинейных искусственных формирующих линий. Импульс на выходе первой регулируемой линии задержки отстает от заднего фронта импульса с выхода нерегулируемой линии задержки и величина этого отставания  $t_1$  изменяется за счет первой регулируемой линии задержки. Импульс на выходе второй регулируемой линии задержки отстает от заднего фронта импульса с выхода первой регулируемой линии задержки и величина этого отставания  $t_2$  изменяется за счет второй регулируемой линии задержки.

На выходе контроллера формируются единичные сигналы, длительность которых определяется любым наперед заданным законом. При этом сигналу «ноль» соответствует нормальнозамкнутое состояние контактов электронного реле, а сигналу «единица» соответствует размыкание нормальнозамкнутых контактов и замыкание нормально разомкнутых контактов электронного реле.

Таким образом, при необходимости формирования опережающего дополнительного импульса возбуждения лазера, контакты электронного реле должны находиться в нормальнозамкнутом состоянии, а на выходе контроллера отсутствовать единичный импульс. При необходимости формирования отстающего дополнительного импульса возбуждения лазера, на выходе контроллера необходимо сформировать единичный импульс и замкнуть тем самым нормально разомкнутые контакты электронного реле.

Итак, при постоянном формировании на выходе контроллера единичного сигнала, дополнительный импульс возбуждения всегда отстает от основного импульса возбуждения и выполняются условия полной генерации лазера на требуемой частоте работы лазера. При постоянном отсутствии единичного сигнала на выходе контроллера, дополнительный импульс возбуждения всегда опережает основной импульс возбуждения, и выполняются условия полного или частичного гашения генерации лазера. Газоразрядная трубка лазера находится при этом в состоянии «горячего» резерва.

При испытаниях промышленного образца лазера, в качестве активного элемента использовалась отпаянная саморазогревная газоразрядная трубка «KULON LT-10CU». Максимальная средняя мощность излучения по паспорту завода-изготовителя для этих трубок составляет 17 Вт на двух линиях генерации при частоте следования импульсов генерации 12÷15 кГц. В качестве коммутаторов использовались тиратроны ТГИ2-1000/25 (основной канал) и ТГИ1-500/16 (вспомогательный канал). При проведении испытаний максимальная потребляемая мощность от выпрямителя не превышала 1,8 кВт, максимальное рабочее напряжение на аноде основного канала 12 кВ. Нелинейная формирующая линия основного канала была выполнена двухзвенной, а нелинейная формирующая линия вспомогательного канала – однозвенной. Индуктивности анодных реакторов основного и вспомогательного каналов – 15 мкГ.

Регулируемый высоковольтный источник питания представлял собой источник постоянного напряжения на неуправляемых диодах и управляемый одноконтурный резонансный преобразователь, на выходе которого установлен высоковольтный трансформаторно-выпрямительный блок [11]. Время заряда емкостных накопителей энергии нелинейных искусственных формирующих линий – 30 мкс. Диапазон регулирования линий задержки от нуля до 1300 нс. Амплитуда тока импульса возбуждения основного канала от 200 А до 400 А, фронт не более 60 нс, амплитуда напряжения до 20 кВ. Амплитуда тока импульса возбуждения вспомогательного канала до 40 А, амплитуда напряжения до 5 кВ. Длительность импульса возбуждения основного канала по основанию 120 нс, вспомогательного до 250 нс. При данных параметрах импульсов возбуждения основного и дополнительного

каналов на рабочей частоте 12,5 кГц была получена максимальная средняя мощность генерации в установившемся режиме 16 Вт.

Конструктивно, разработанный промышленный лазер с высокоскоростной импульсной модуляцией состоит из излучателя, содержащего активный элемент с плоско-сферическим или неустойчивым телескопическим резонатором, регулируемого источника питания [12], который обеспечивает в автоматическом режиме выход активных элементов на рабочий режим и работу лазера в номинальном режиме, а также вспомогательного канала, обеспечивающего высокоскоростную импульсную модуляцию излучения лазера от внешнего задающего генератора. Лазер выполнен в виде моноблока с габаритными размерами (Д x Ш x В): 1250 x 540 x 190 мм и массой не более 65 кг. Охлаждение – принудительное воздушное. На рис. 6 представлен внешний вид лазера.

### Технические характеристики

#### разработанного образца промышленного лазера Kulon – 10Cu-M

|   |                         |
|---|-------------------------|
| Конструктивное исполнение                               | моноблок                |
| Мощность излучения, Вт                                  | 10                      |
| Длина волны излучения, нм                               | 510,6; 578,2            |
| Мощность, потребляемая от сети, не более, кВт           | 2,0                     |
| Диаметр пучка излучения, мм                             | 14 ± 1                  |
| Расходимость излучения, мрад                            |                         |
| резонатор плоско-сферический                            | 4                       |
| резонатор неустойчивый, M=200                           | 0,2                     |
| Плотность мощности в зоне обработки, Вт/см <sup>2</sup> | до 10 <sup>12</sup>     |
| Длительность импульса излучения по полувывсоте, нс      | 15 ÷ 25                 |
| Импульсная мощность, не ниже, кВт                       | 50                      |
| Частота следования импульсов, кГц,                      | 12 ÷ 16                 |
| Электропитание от однофазной сети (50Гц), В             | 220±10%                 |
| Режим включения   | автоматический          |
| Охлаждение принудительное                               | воздушное               |
| Гарантийная наработка на отказ, не менее, ч             | 2000                    |
| Электробезопасность соответствует                       | ГОСТ 12.1.019           |
| Лазерная безопасность соответствует                     | ГОСТ Р 50723 (класс 3В) |
| Климатическое исполнение                                | УХЛ 4.2 по ГОСТ 15150   |

Промышленный лазер Kulon 10Cu – M может применяться для лазерной спектроскопии, усиления яркости изображения, зондирования атмосферы, локации, навигации, в медицине (фотодинамическая терапия, косметология, дерматология, хирургия, гинекология), в электронной промышленности, химической промышленности и специальном машиностроении для прецизионной обработки тонколистовых материалов (тугоплавких: W, Mo, Ta; теплопроводных: Cu, Ag, Al, Au; полупроводников: Si, Ge, GaAs, SiC; диэлектриков, алмазов, графитов и т.д.) при различных видах выполняемых операций (сверление микроотверстий, прецизионная контурная резка, скрайбирование, фрезерование и др.), а также для высокоскоростной маркировки и гравировки.

Кроме того, разработанный лазер имеет возможность импульсного регулирования цветности и энергетических характеристик излучения, а также работы в прицельном режиме.

В настоящее время проведены сертификационные испытания (сертификат соответствия №РОСС RU.МЕ20.Н01050) и освоен серийный выпуск промышленного лазера на парах меди с высокоскоростной импульсной модуляцией (ЮВИЕ.433713.001ТУ).

### **Заключение**

Разработан эффективный способ управления энергетическими характеристиками излучения лазеров на парах металлов. Способ и устройство для его осуществления реализованы при разработке промышленного лазера на парах меди, что позволяет по любому наперед заданному закону осуществлять высокоскоростную импульсную модуляцию доз лазерного излучения с точностью до одного импульса, изменять частоту следования импульсов генерации, осуществлять любую последовательность импульсов генерации и т.д., и позволяет, таким образом, широко использовать лазеры на самоограниченных переходах атомов химических элементов практически во всех областях науки, техники и медицины.

### **Литература**

1. В.М.Батенин, В.В.Бучанов, М.А.Казарян, И.И.Климовский, Э.И.Молодых. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов – М.: «Научная книга». 1998. – 554с.
2. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. //Письма в ЖТФ, 1972, т.16, №1, с. 40-42.
3. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. //Квантовая электроника, 1983, т.10, №5, с.974-980
4. Евтушенко Г.С. и др. //Журнал прикладной спектроскопии», 1988, т.49, №5, с.745-751.
5. Скрипниченко А.С., Солдатов А.Н., Юдин Н.А. //Описание изобретения к патенту РФ, №2082263, опубл. 20.06.97, бюл. №17.
6. Лепёхин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г. //Сборник научных трудов/Под редакцией В.А. Петрова. –М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2003, с. 72-73.
7. Лепёхин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г. и др. Положительное решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2003120867/20, кл. H01S 3/097
8. Казаков В.В. и др. //Квантовая электроника, 1983, т.10, №5, стр. 954-960.
9. Исаев А.А. и др. // Квантовая электроника, 1986, т.13, №11, с.2302-2309.
10. Колоколов И.С. и др. //Прикладная физика, 2003, №3, с.84-89.
11. Лепёхин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г. //Прикладная физика, 2001, №5, с.46-49
12. Лепёхин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г. //Прикладная физика, 2005, №1

## **High-speed impulse modulation radiation of lasers on self-limited transitions of atoms of chemical devices**

*N.M. Lepehin, Y.S. Priseko, V.G. Filippov*

JSC « Experimental – manufacture of ALL-Russian electrician institute »

Istra, Moscow region, Russia

Some aspects of a plasma physics being common for all class of gas-discharge repetitively pulsed lasers on self-limited transitions of atoms of chemical devices - of metals vapor lasers, which were fixed in a basis of a designed expedient of control of power performances of lasers of the given class, working in requirements self-heating in a condition twin (basic and additional) of impulses of excitation. The results of development the industrial sealed-off copper vapor laser KULON-10Cu-M with high-speed impulse modulation of radiation are represented, in which the offered expedient of excitation, permitting effectively is implemented to make regulation of power performances of doses of a laser radiation on anyone beforehand to given law to within one impulse.

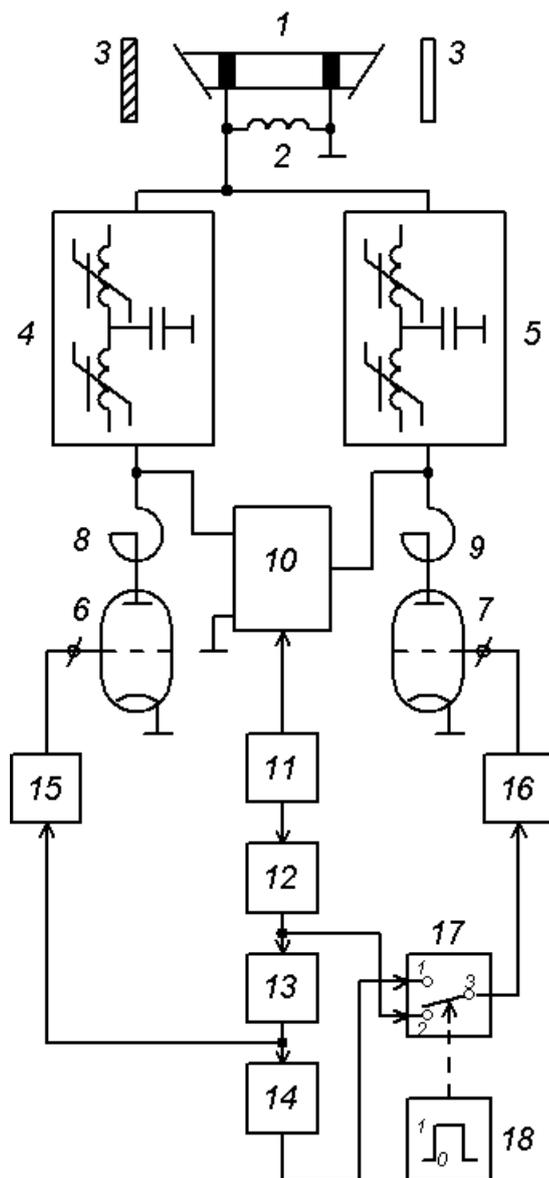


Рис. 1. Блок-схема лазера с высокоскоростной импульсной модуляцией:

- 1 – газоразрядная лазерная трубка;
- 2 – шунтирующая индуктивность;
- 3 – зеркала резонатора;
- 4,5 – нелинейные искусственные формирующие линии с сосредоточенными параметрами;
- 6 – тиратронный коммутатор основного канала возбуждения;
- 7 – тиратронный коммутатор вспомогательного канала возбуждения;
- 8,9 – анодные реакторы;
- 10 – регулируемый высоковольтный источник питания;
- 11 – генератор запускающих импульсов;
- 12 – нерегулируемая линия задержки;
- 13 – первая регулируемая линия задержки;
- 14 – вторая регулируемая линия задержки;
- 15, 16 – импульсные подмодуляторы;
- 17 – электронное реле;
- 18 – контроллер (внешнее задающее устройство)

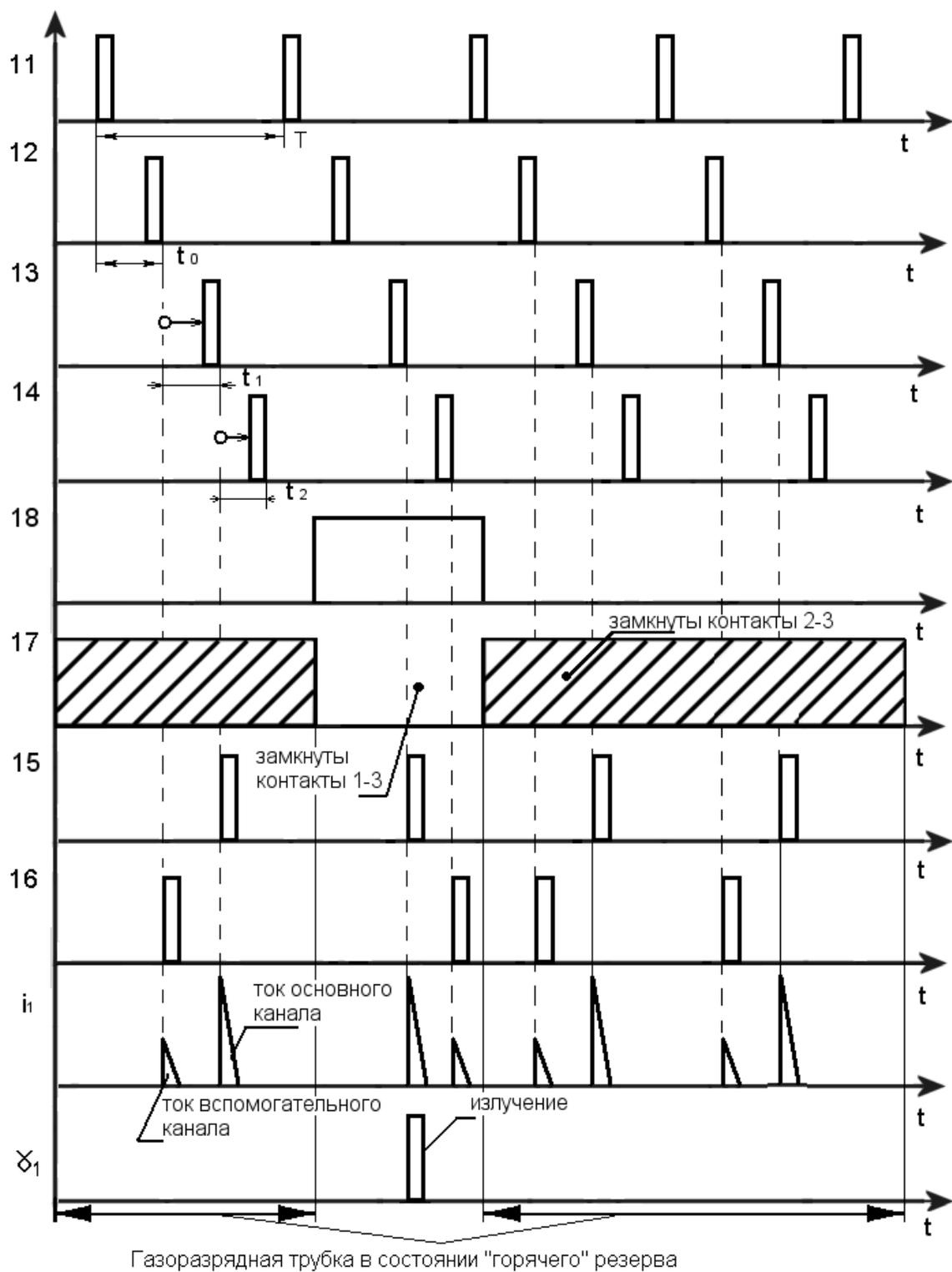


Рис. 2. Временные диаграммы работы элементов лазера.

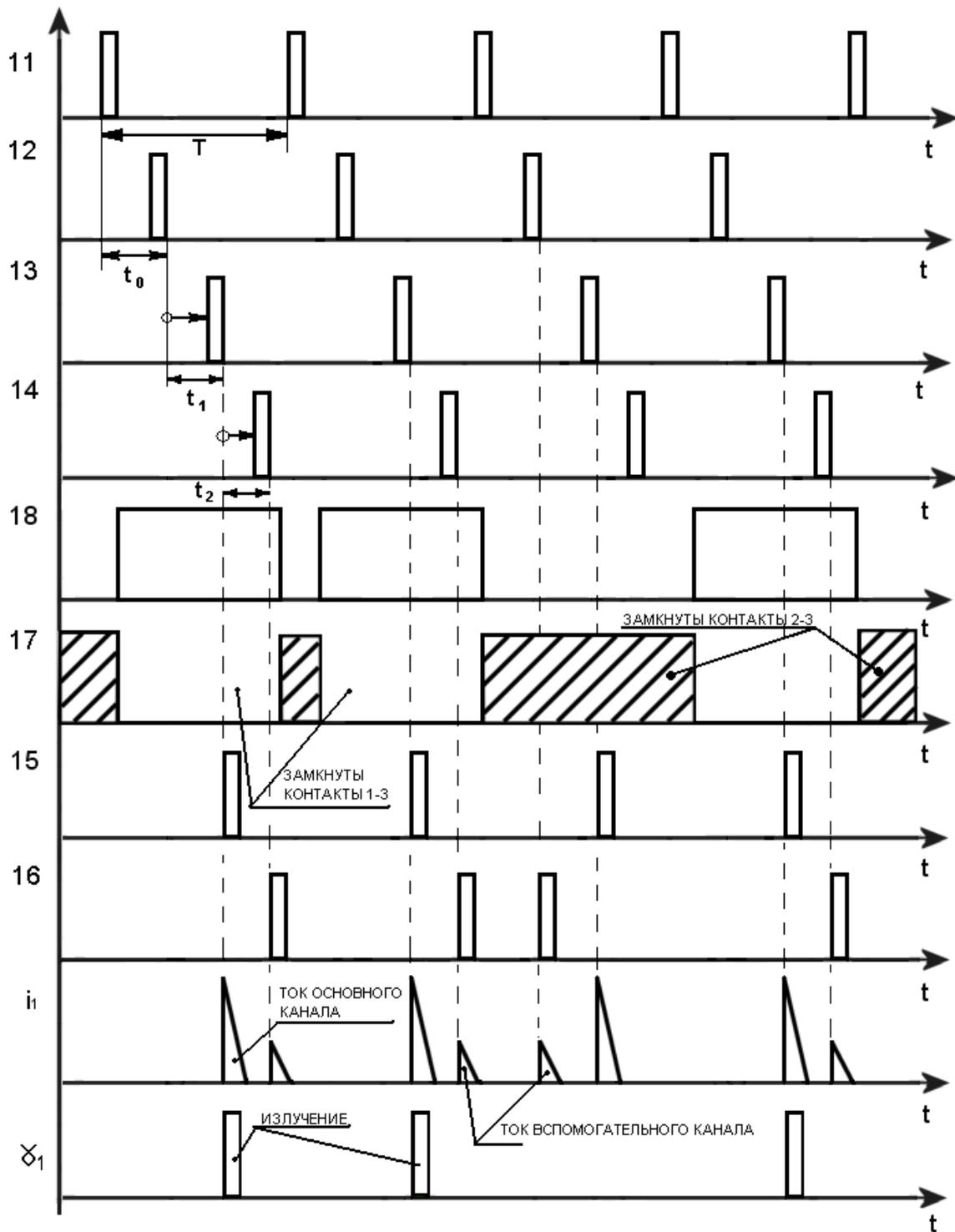


Рис. 3. Временные диаграммы работы элементов лазера.

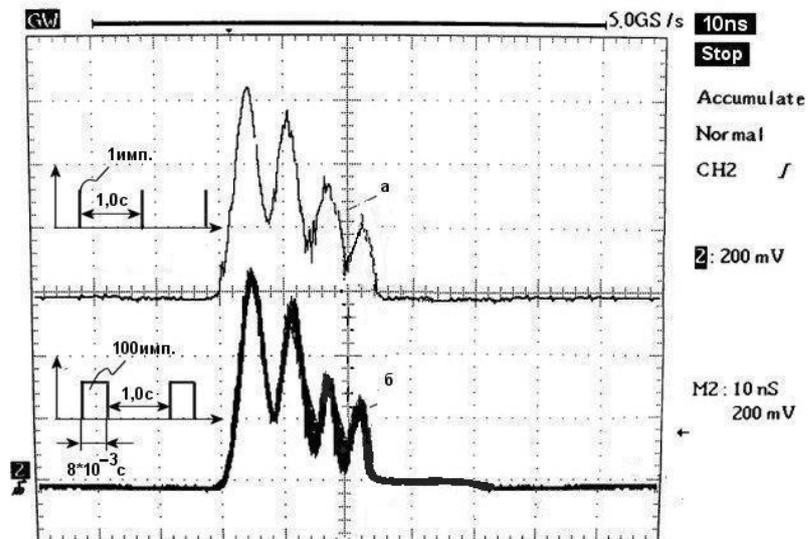


Рис. 4. Осциллограммы импульсов суммарного пучка излучения с неустойчивым телескопическим резонатором при увеличении  $M = 200$

(а) – квазимоноимпульсный режим;

(б) – пакетный режим (частота импульсов в пакете 12,5 кГц)

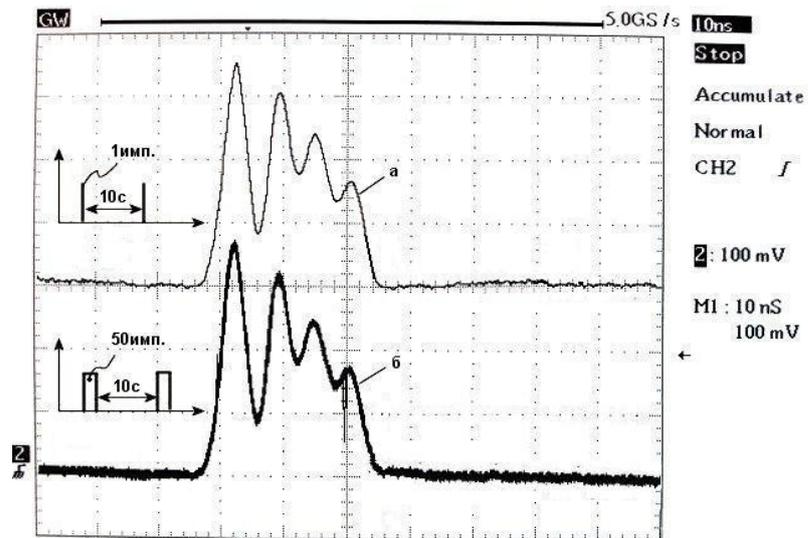


Рис. 5. Осциллограммы импульсов суммарного пучка излучения с плоско-сферическим резонатором

- (а) - квазимоноимпульсный режим;
- (б) - пакетный режим (частота импульсов в пакете 11 кГц)



Рис. 6. Внешний вид лазера на парах меди с высокоскоростной импульсной модуляцией