

09  
**Комбинированный слаботочный разряд в лазере на парах меди**

© В.Ф. Федоров<sup>1</sup> Д.В. Шиянов,<sup>1,2</sup> К.В. Федоров,<sup>1,2</sup> Г.С. Евтушенко,<sup>2</sup> С.Н. Торгаев,<sup>1,2,3</sup> А.Е. Кулагин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 634021 Томск, Россия,

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

<sup>3</sup> Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия  
 e-mail: qel@asd.iao.ru

(Поступило в Редакцию 16 сентября 2015 г.)

Представлено использование нового способа накачки активных сред на парах металлов комбинированным слаботочным разрядом. Отличительная особенность слаботочного разряда от традиционного способа накачки лазеров на самоограниченных переходах — реализация режима пониженного энергозатрата в разряд. Использование такого режима позволяет реализовывать импульсно-периодический режим разряда с импульсами генерации различной формы и длительности при низких амплитудах тока (единицы ампер). Нагрев же активной зоны осуществляется дополнительным импульсно-периодическим разрядом.

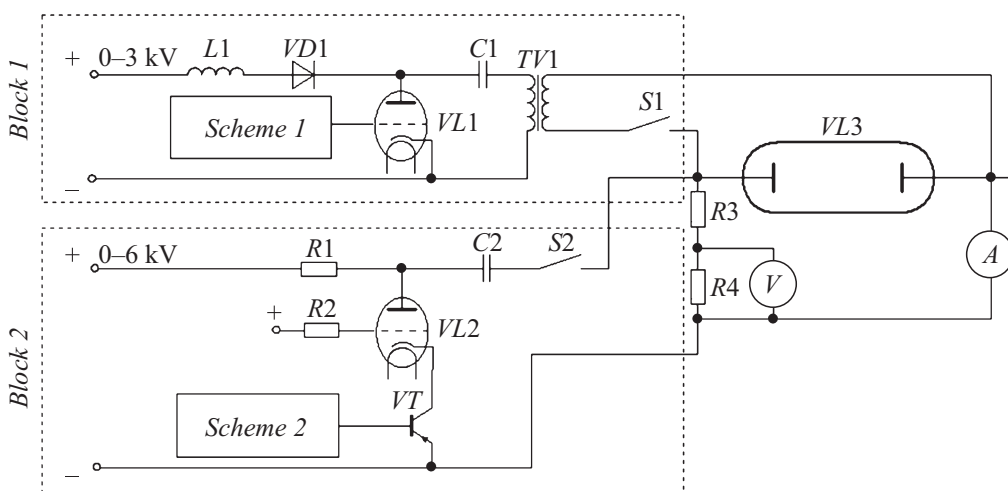
**Введение**

Настоящая работа продолжает исследования слаботочного разряда в лазере на парах меди, представленные в [1,2]. Слаботочный режим разряда характеризовался тем, что импульсные значения тока не превышали единиц ампер, в то время как при традиционной накачке амплитуда тока составляет десятки-сотни ампер. Указанный режим был реализован в условиях самопробоя разрядного промежутка при независимом нагреве рабочей зоны газоразрядной трубки (ГРТ) малого рабочего объема дополнительным источником питания. В настоящей работе мы приводим экспериментальные и модель-

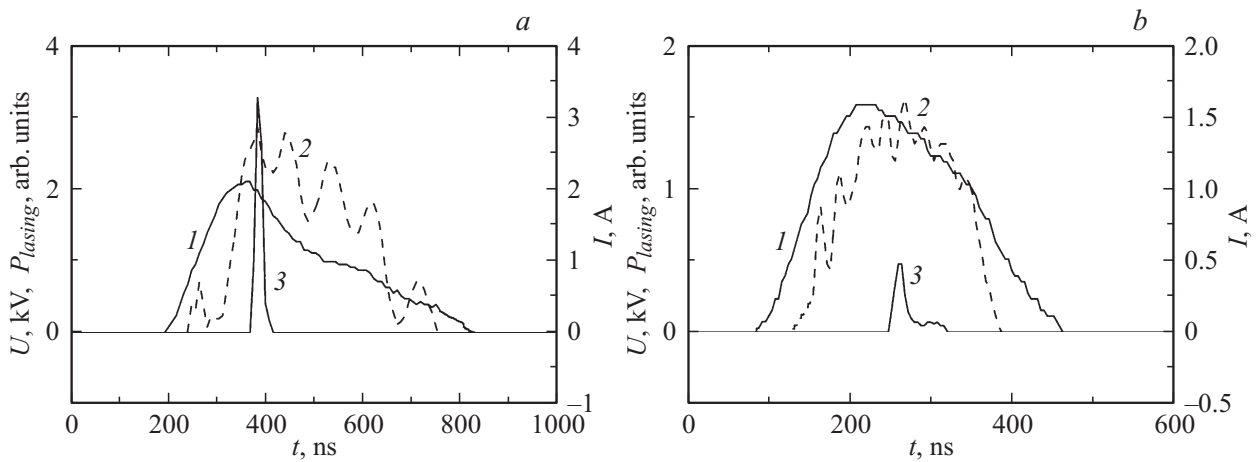
ные данные по реализации импульсно-периодического режима от единиц Hz до 50 kHz при управляемом пробое разрядного промежутка в ГРТ. Разработка такого способа накачки активных сред вызвана необходимостью создания компактных лазерных мониторов на основе скоростных усилителей яркости на парах металлов для неразрушающего контроля изделий и диагностики быстротекущих процессов в условиях мощной фоновой засветки [3–5].

**1. Техника эксперимента**

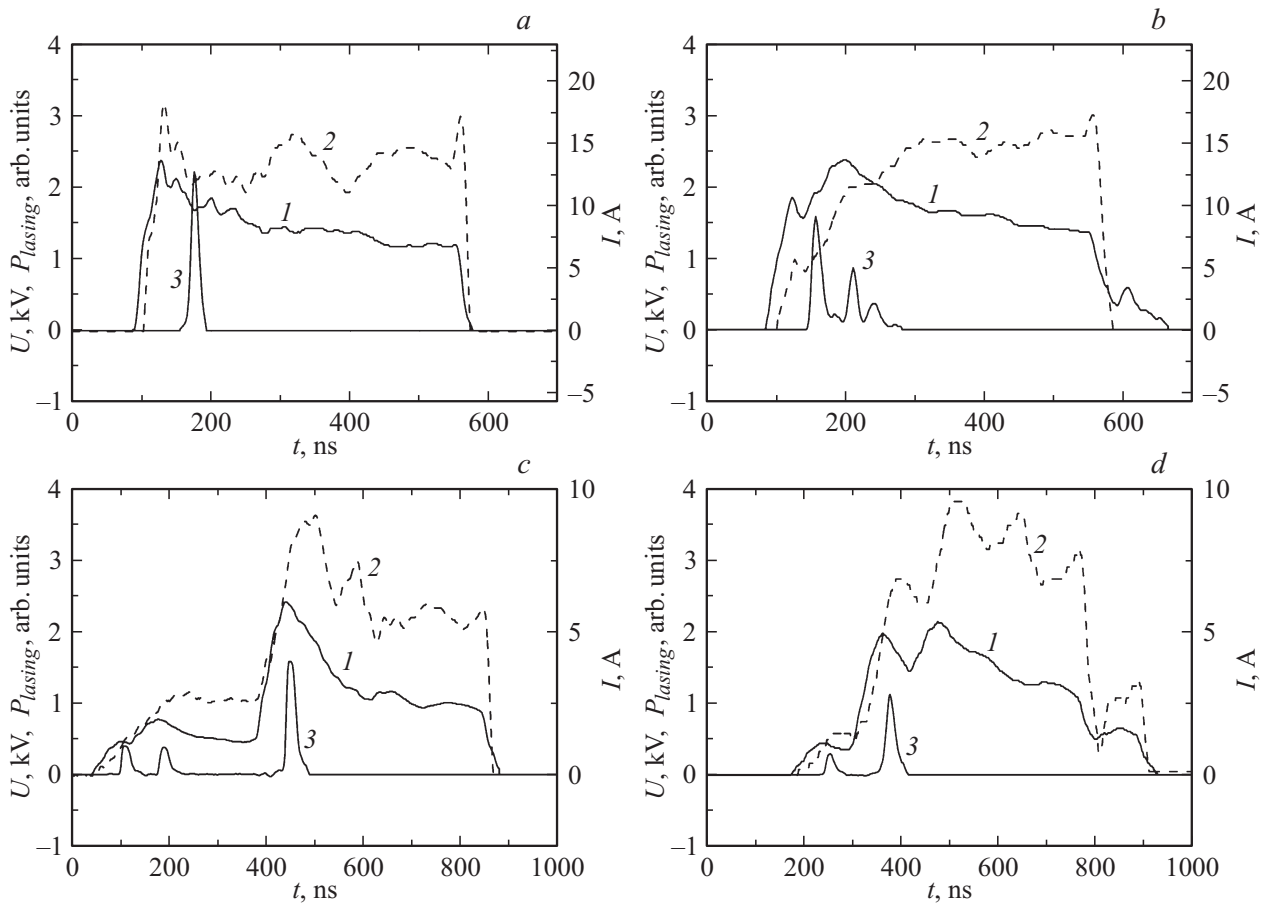
В настоящей работе использована ГРТ также малого объема (диаметр 0.5 см, длина 18.5 см), изготовленная



**Рис. 1.** Электрическая схема накачки (и разогрева) лазера: L1, VD1 — зарядная цепь; C1 и C2 — рабочие емкости источников нагрева и возбуждения соответственно. Схема запуска 1 — запуск тиратрона; схема запуска 2 — запуск полупроводникового ключа; S1, S2 — высоковольтные вакуумные реле ВВ-20, которые позволяют автоматически или вручную подключать ГРТ на нагрев (блок 1) либо накачку (блок 2); TV1 — развязывающий кабельный трансформатор; R1 — зарядный резистор; R2 — токоограничивающее сопротивление; R3, R4 — делитель напряжения; V — измеритель напряжения; A — датчик тока; VL1 — тиратрон; VL2 — электровакуумная лампа (триод, либо тетрод); VL3 — ГРТ.



**Рис. 2.** Осциллограммы напряжения (1), тока (2) и генерации (3) при ограничении тока с использованием лампы-триода, соответствующие разным значениям тока и напряжения (а, б). ЧСИ = 30 kHz.



**Рис. 3.** Осциллограммы напряжения (1), тока (2) и генерации (3) при ограничении тока с использованием электровакуумного пентода. ЧСИ на а — 23 kHz, б — 20 kHz, с — 50 kHz, д — 28 kHz.

из кварца, но в отличие от [1,2] с рабочими электродами, выполненными в виде стаканов, заполненных медной стружкой. Для ввода высокого напряжения использованы электроды от лампы ИФП-1200. Кусочки чистой

меди (99.9%) в виде коротких гранул диаметром 2 mm и длиной 2 mm равномерно распределялись по длине ГРТ. В качестве буферного газа использован спектрально чистый неон при давлении 3.0 kPa. Зеркалами резонатора

служили плоское металлическое зеркало и плоскопараллельная пластинка. Расстояние между зеркалами составляло 35 см.

На рис. 1 показана электрическая схема накачки и разогрева ГРТ. Принцип работы схемы заключается в независимой работе двух блоков: нагревающего (блок 1), основанного на разряде рабочей емкости через тиратрон, и возбуждающего (блок 2), собранного по схеме последовательных включенных модуляторной лампы и сборки IGBT-транзисторов. В качестве модуляторной лампы в экспериментах использованы экспериментальная лампа-триод, производства ООО „Импульсные технологии“, Рязань, и тетрод ГМИ-27Б. Реализованная схема позволила регулировать ток разряда в широких пределах (от десятых долей до десятков ампер).

Измерение электрических характеристик разряда осуществлялось с помощью датчика тока PersonTM 8450, датчика напряжения Tektronics P6015A и осциллографа LeCroy Wave Jet 324. Импульсы излучения регистрировались коаксиальным фотоэлементом ФК-19. Мощность излучения измерялась фотоприемником Ophir 20C-SH.

## 2. Результаты физических и модельных экспериментов, их обсуждение

С использованной схемой накачки проведено два типа экспериментов.

В первом случае мы определили минимальное значение тока и напряжения, при которых реализуется импульсно-периодический режим генерации излучения, когда для ограничения тока разряда в блоке возбуждения используется электровакуумный триод. На рис. 2, *a, b* приведены типичные осциллограммы напряжений, токов и генерации при частоте следования импульсов (ЧСИ) 30 kHz. Основная энергия излучения сосредоточена на переходе  ${}^2P_{3/2} - {}^2D_{5/2}$  (зеленая линия генерации 510.6 nm). Как и в работах [1,2], значения рабочих токов не превышают единиц ампер и соответствуют слаботочному режиму накачки. При этом минимальное значение тока, при котором возможна генерация, составило 1.5 А при напряжении 1.5 kV (рис. 2, *b*). Типичное же значение энергии, вводимой в разряд за импульс, составляет 0.35 мДж, что соответствует режиму пониженного энерговыклада в разряд [6]. Из полученных данных также следует, что для обеспечения требуемых значений токов (менее 5 А) и напряжений (2–4 kV) можно в качестве коммутаторов использовать сборку из современных высокочастотных транзисторов.

Во второй серии экспериментов в качестве коммутатора использована лампа-тетрод со схемой управления, что позволило изменять форму импульсов возбуждения. Как следствие, изменяются форма и длительность импульсов генерации (рис. 3).

При достаточно крутом фронте накачки (менее 20 ns) и амплитуде тока 10–20 А реализуется короткий им-

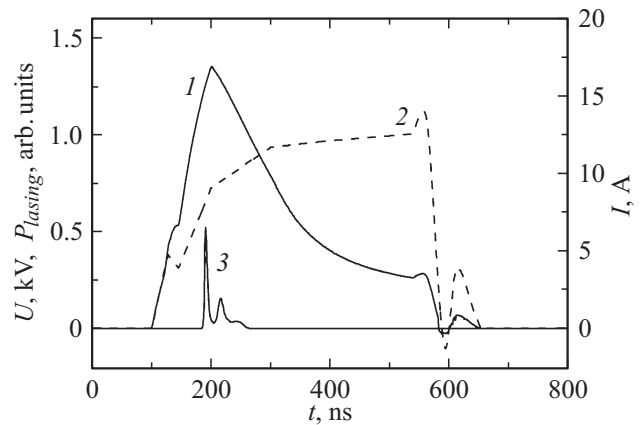


Рис. 4. Результаты моделирования. 1 — напряжение, 2 — ток и 3 — генерация на  $\lambda$  510.6 nm. ЧСИ = 5 kHz.

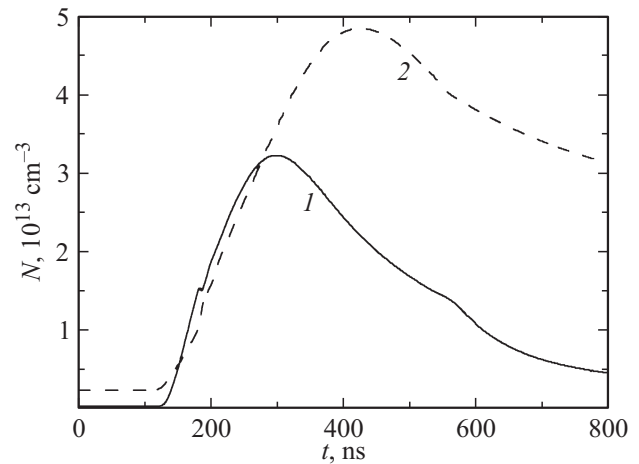


Рис. 5. Поведение во времени концентрации верхнего ( ${}^2P_{3/2}$ ) и нижнего ( ${}^2D_{5/2}$ ) рабочих уровней (результаты моделирования). ЧСИ = 5 kHz.

пульс генерации (порядка 20 ns на рис. 3, *a*), что является типичным значением для ЛПМ. В режиме ограничения тока (рис. 3, *b*) на пологом фронте тока реализуется 2–3 импульса генерации. Подобную картину наблюдали авторы работы [7] при накачке ЛПМ импульсами синусоидальной формы. А авторы работы [8] предлагают реализовать затухающий цуг импульсов генерации лазера на парах меди за счет специального формирования выходных импульсов магнитно-полупроводникового генератора накачки.

В эксперименте, представленном на рис. 3, *c*, мы реализовали нарастание напряжения до 700 V и тока до 3 А за время порядка 200 ns. При этом отчетливо регистрировались два импульса генерации с задержкой первого от начала развития разряда порядка 100 ns. А затем при резком подъеме напряжения до 4 kV и тока до 8 А наблюдался новый, более мощный импульс генерации, задержанный относительно первых двух на 250 ns. Представленные на рис. 3, *c* и *d* импульсы генерации по расположению на временной оси

и амплитуде соответствуют колебаниям и амплитудным значениям напряжения и тока. Здесь наиболее интересным является тот факт, что первый импульс появляется при напряжении порядка 500 V, что соответствует напряженности поля на разрядном промежутке менее 30 V/cm. Возможно, это свидетельствует о реализации инверсной населенности в короткой приэлектродной части разряда (у высоковольтного электрода).

Проведенное по аналогии с работами [2,9] моделирование лазера подтвердило возможность получения импульса излучения сложной, пиковой формы (рис. 4). На рис. 5 видно, что абсолютная величина инверсии между населенностью верхнего резонансного уровня и нижнего метастабильного при этом не превышает  $0.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ .

Таким образом, пиковая структура импульса излучения может быть связана как с колебаниями напряжения и тока в течение импульса накачки, так и с работой лазера вблизи порога генерации.

## Заключение

Организация слаботокового разряда с независимым нагревом рабочей зоны позволяет реализовать режим пониженного энергозатрата в разряд. При этом амплитуда тока составляет единицы ампер, а вводимая в разряд мощность — единицы-десятки Вт. Использование такого режима позволяет получить в активных элементах лазеров на парах металлов малого объема импульсно-периодическую генерацию с импульсами различной формы и длительности с высокой частотой повторения импульсов. Раздельный режим питания будет востребован при разработке компактных лазеров и скоростных усилителей яркости на парах металлов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект No 14-19-00175.

Авторы выражают свою признательность М.В. Тригубу за участие в обсуждении полученных результатов.

## Список литературы

- [1] Федоров В.Ф., Федоров К.В., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. // Сборник трудов Симпозиума „Лазеры на парах металлов“. Ростов-на-Дону. Сочи-Лео. 22–26 сентября 2014. С. 84.
- [2] Евтушенко Г.С., Федоров В.Ф., Шиянов Д.В., Федоров К.В., Торгаев С.Н., Кулагин А.Е. // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 9. С. 65–70.
- [3] Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyonov D.V. // Review of Scientific instruments. 2014. Vol. 85. P. 033111-1–033111-5.
- [4] Бужинский Р.О., Савранский В.В., Земсков К.И., Исаев А.А., Бужинский О.И. // Прикладная физика. 2009. № 3. С. 96–98.
- [5] Yermachenko V.M., Kuznetsov A.P., Petrovskiy V.N., Prokopova N.M., Strel'tsov A.P., Uspenskiy S.A. // Laser Physics. 2011. Vol. 21. N 8. P. 1530–1537.
- [6] Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Nekhoroshev V.O., Shiyonov D.V., Torgaev S.N. // Physics of Wave Phenomena. 2015. Vol. 23. N 1. P. 1–13.
- [7] Герасимов В.А., Герасимов В.В. // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 1. С. 153–156.
- [8] Волков И.В., Зозулев В.И., Подольный С.В., Шолох Д.А. // Техн. Электродинамика. 2012. № 1. С. 17–22.
- [9] Kulagin A.E., Torgaev S.N., Evtushenko T.G. // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2014): proceedings. 30 June–4 July 2014. Novosibirsk: NSTU, 2014. P. 305–308.