

- дис. ... докт. физ.-мат. наук. – Томск: ГОУ ВПО «Томский государственный университет» и Институт сильноточной электроники СО РАН, 2009. – 43 с.
8. Соснин Э.А., Авдеев С.М., Ерофеев М.В., Цветков В.М., Пиккулев А.А., Тарасенко В.Ф. Исследование энергетических характеристик КгСl-эксилламп барьерного разряда // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 2. – С. 109–112.
9. Авдеев С.М., Зверева Г.Н., Соснин Э.А. Исследование условий эффективной люминесценции  $I_2^*$ (342 нм) в барьерном разряде в смеси Кг- $I_2$  // Оптика и спектроскопия. – 2007. – Т. 105. – № 6. – С. 430–442.

Поступила 19.04.2010 г.

УДК 621.373.8

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИСТОЧНИКИ НАКАЧКИ CuBr-ЛАЗЕРОВ

М.В. Тригуб<sup>1,2</sup>, С.Н. Торграев<sup>1,2</sup>, В.Ф. Фёдоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. акад. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

E-mail: trigub@tpu.ru

*Представлены результаты исследований полупроводниковых источников накачки для CuBr-лазеров различной геометрии. Продемонстрирована возможность создания твердотельных высокочастотных (свыше 100 кГц) источников накачки. Проведены исследования схемы накачки при работе на активную нагрузку экспериментальным путем и моделированием в пакете прикладных программ PSpice.*

### Ключевые слова:

*Лазер на парах металла, CuBr-лазер, источники накачки, моделирование.*

### Key words:

*Copper vapor laser, CuBr-laser, pumping source, simulation.*

### Введение

Традиционно источники накачки для лазеров на парах металлов и, в частности, для лазеров на парах бромида меди, строились с использованием электровакуумных коммутаторов, которые обладают рядом недостатков: малый срок службы ключевого элемента, КПД на уровне 50...60 %, низкая частота работы [1]. С появлением на рынке мощных полупроводниковых приборов (IGBT и MOSFET) стало возможно создание твердотельных источников накачки, которые будут лишены недостатков традиционных схем.

В работе [2] представлен полупроводниковый источник накачки, источник постоянного напряжения (10 кВ, 1,4 кВт) и полупроводниковый коммутатор на основе IGBT транзисторов. Для сжатия импульсов накачки применяется двухзвенная схема магнитной компрессии. Коммутатор состоит из 10 последовательно соединенных IGBT транзисторов без выравнивающих цепей, обеспечивающих одновременное отпирание силовых элементов, что может вызвать выход из строя всего коммутатора при задержке отпирания одного из ключей. Частота следования импульсов накачки составляет 17 кГц, что значительно ниже оптимальной частоты следования импульсов для лазера на парах бромида меди [3].

В работе [4] описан полупроводниковый источник накачки CuBr-лазера, работающий с частотой 50 кГц. Схема состоит из однотипных ячеек, вклю-

ченных параллельно, каждая из которых включает в себя IGBT транзистор, накопительный конденсатор, диод и импульсный трансформатор. Вторичные обмотки трансформаторов соединены последовательно, что обеспечивает повышение напряжения на выходе. Данная схема лишена недостатков, присущих схеме [2], однако, возникает вопрос о величине предельной коммутируемой мощности. Авторами [4] источник применялся для накачки лазера с газоразрядной трубкой (ГРТ) малых размеров: длина активной зоны 300 мм, диаметр 15 мм.

### Техника эксперимента

В настоящей статье приводятся результаты исследования полупроводниковых источников накачки лазеров на парах бромида меди при различной геометрии ГРТ, различной мощности накачки, повышенных частотах следования импульсов. Схема источника накачки представлена на рис. 1.

Для формирования высокого напряжения используются однотипные ячейки, которые включены параллельно, каждая из которых, как и в работе [4], включает в себя разделительный диод VD5, накопительный конденсатор C2, полупроводниковый коммутатор (IGBT или MOSFET), а так же импульсный трансформатор T1. Вторичные обмотки трансформаторов соединены последовательно, что обеспечивает суммирование напряжения на нагрузке. Дроссель L1 совместно с разделительными диодами обеспечивают резонансную зарядку нако-

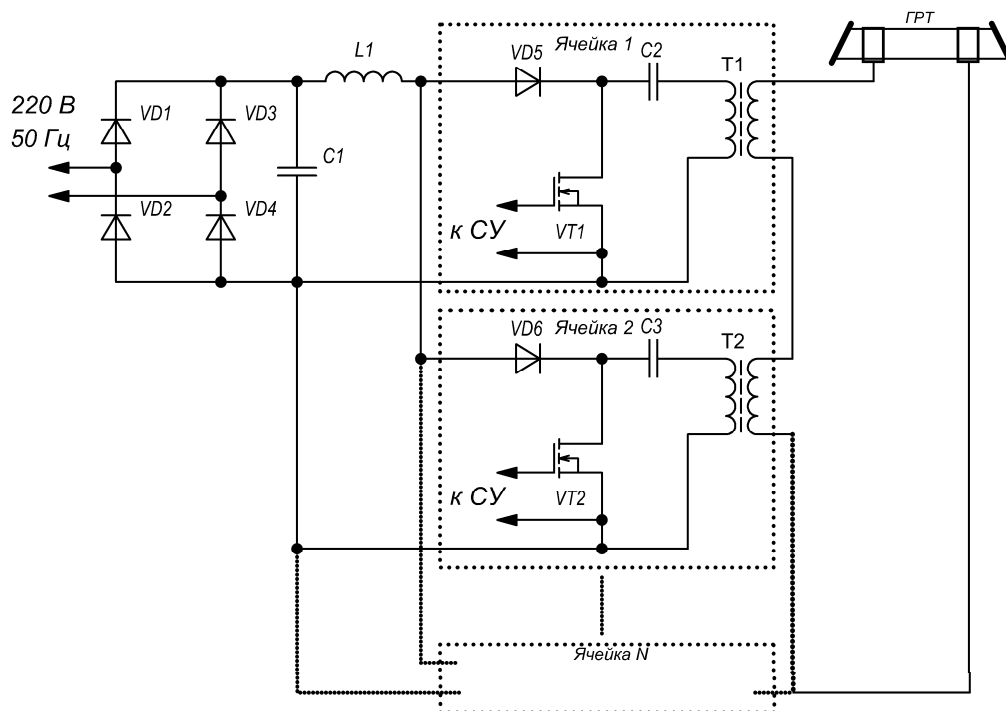


Рис. 1. Схема накачки  $\text{CuBr}$ -лазера

пительных конденсаторов  $C2-CN$ . Амплитуда напряжения на накопительных конденсаторах будет зависеть от времени открытого состояния транзистора, т. к. именно в этот период происходит накопление энергии в дросселе  $L1$ , которая затем передается в накопительные конденсаторы. Предложенная схема позволяет увеличивать выходную мощность путем включения дополнительных ячеек, при условии, что трансформаторы не будут насыщаться. Максимальное напряжение на ГРТ, при отсутствии эффекта насыщения трансформаторов и без учета потерь в элементах схемы, определяется как  $NUn$ , где  $N$  – количество ячеек,  $U_c$  – напряжение на накопительных конденсаторах,  $n$  – коэффициент трансформации.

Для проведения исследований был собран источник, в котором использовались силовые IGBT транзисторы IRGPS60B120KD. Накопительные конденсаторы – КВИ-3 3300 пФ на 10 кВ, индуктивность дросселя  $L1$  составляет 200 мкГн. Количество ячеек – 6. Импульсные трансформаторы реализованы на ферритовых кольцах марки 2000НМ с размерами  $K45 \times 28 \times 12$ ,  $n=1,25$ . Импульсы для отпираания силовых ключей формируются в системе управления (СУ), которая позволяет варьировать длительность импульса запуска в пределах от 70 до 200 нс и их частоту от 15 до 70 кГц. В качестве нагрузки использовалась ГРТ  $\text{CuBr}$ -лазера диаметром активной зоны 12 мм и длиной 300 мм. Регистрация импульсов тока и напряжения производилась с помощью датчика тока Pearson Current Monitors 8450 и пробника напряжения Tektronix P6015A. Импульсы генерации контролировались с использованием коаксиального фотоэлемента

ФК-22. Регистрируемые датчиками сигналы подавались на осциллограф Tektronix TDS3032. Средняя мощность излучения измерялась термоголовкой 20C-SH с отображением на дисплее Orion/TH фирмы Ophir. Диаграммы тока и напряжения представлены на рис. 2.

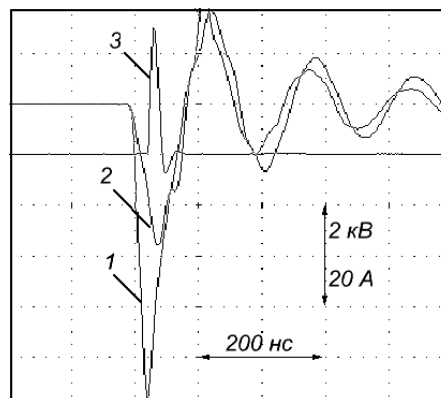


Рис. 2. Осциллограммы: 1) напряжение на ГРТ; 2) ток через ГРТ; 3) импульс генерации

Мощность, потребляемая источником от сети, 500 Вт; средняя мощность генерации при частоте 30 кГц составила 250 мВт. Таким образом, практический КПД равен 0,05 %.

#### Высокочастотный источник накачки

Для создания высокоскоростных лазерных мониторов необходим высокочастотный  $\text{CuBr}$ -лазер, поэтому актуальной задачей является создание полупроводникового источника накачки с высокой частотой следования импульсов [5].

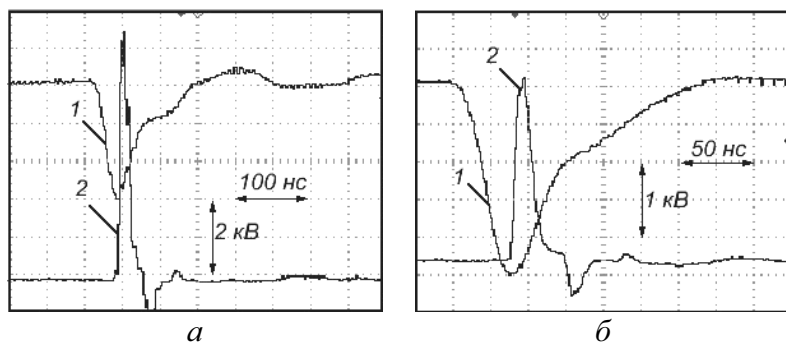


Рис. 3. Импульс накачки (1) и импульс генерации (2) при частоте накачки 90 кГц (а) и 120 кГц (б)

По схеме, рис. 1, был собран источник накачки, способный работать на частотах, свыше 100 кГц. В качестве силовых ключей использовались высокочастотные транзисторы MOSFET – 2SK1317. Основным недостатком этих ключей является малое значение прямого тока (до 7 А), что является ограничивающим фактором при создании лазеров с высокой выходной мощностью. Поэтому было принято решение использовать понижающие импульсные трансформаторы (Т1–ТN), что в свою очередь позволяет получить более крутой фронт импульса накачки, и, как следствие, большую мощность генерации. Разделительные диоды VD5–VDN – HFA15PB60, конденсаторы C2–CN – КВИ-3 470 пФ на 10 кВ. Источник был нагружен на ГРТ диаметром 6 мм и длиной активной зоны 200 мм, температура наружной стенки в экспериментах составляла 600 °С. Активный элемент находился в кожухе с внешним нагревателем [6]. На рис. 3 представлены диаграммы импульса напряжения на ГРТ и импульса генерации при различных частотах работы источника накачки. Видно, что при повышении частоты работы происходит снижение напряжения на ГРТ, что связано с ростом потерь в ключевых элементах и трансформаторах.

Как известно, с ростом частоты происходит изменение соотношения мощности генерации желтой и зеленой линии для лазера на парах меди [3]. В ходе исследований получены зависимости полной мощности, мощности желтой и зеленой линии от изменения частоты, результаты представлены на рис. 5. Для выделения линий использовались светофильтры: для желтой – ОС-17, для зеленой – СЗС-22. Так же снижение мощности генерации связано с уменьшением амплитуды импульса накачки.

Таким образом, показана возможность создания высокочастотного лазера на парах бромида меди с полупроводниковым источником накачки. Однако использование такой ГРТ в качестве усилителя яркости для лазерного монитора приведет к уменьшению области обзора и искажению формируемого изображения. Поэтому интерес представляет создание высокочастотных лазеров на основе ГРТ с диаметром активной зоны более 1 см.

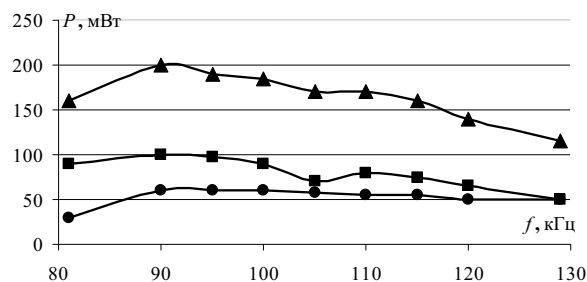


Рис. 4. Зависимость мощности от частоты: ▲ – суммарной; ■ – линии 510,6 нм; ● – линии 578,2 нм

#### Источник накачки для получения высокой мощности генерации

Создание источников накачки, способных обеспечить высокую мощность генерации является актуальной задачей. В настоящее время в лаборатории квантовой электроники ИОА СО РАН ведутся работы по созданию технологической установки для изготовления коронарных стентов с использованием системы генератор-усилитель на основе CuVg-лазеров. В качестве задающего генератора планируется использование лазера с полупроводниковым источником накачки. В связи с этим была предпринята попытка создания источника накачки, способного обеспечить среднюю мощность генерации порядка 5 Вт.

В качестве силовых ключей использовались IGBT транзисторы IRGPS60B120KD. Накопительные конденсаторы – КВИ-3 3300 пФ на 10 кВ. Количество ячеек – 16. Коэффициент трансформации  $n=1,25$ . Входной выпрямитель был выполнен по схеме удвоения напряжения. Накачка осуществлялась с частотой 17 кГц. В качестве нагрузки использовалась ГРТ диаметром 25 мм и длиной 900 мм. Активный элемент находился в кожухе с внешним нагревателем [6]. Диаграммы тока и напряжения на ГРТ представлены на рис. 5. Напряжение на каждом накопительном конденсаторе составляло 1000 В. Средняя мощность генерации составила 3 Вт при потребляемой – 900 Вт.

Интерес представляет тот факт, что напряжение на нагрузке (ГРТ) значительно меньше расчетного. Это объясняется эффектом насыщения трансформаторов, т. к. сопротивление разрядного канала да-

же в межимпульсный период не превышает сотни Ом. Для детального исследования работы схемы было проведено моделирование и макетирование схем накачки.

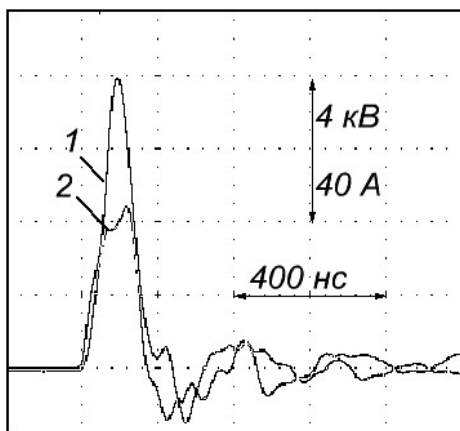


Рис. 5. Импульс накачки (1) и импульс тока через ГРТ (2)

#### Моделирование схемы источника накачки

Макетирование полупроводникового источника накачки проводилась по схемам с двумя однотипными ячейками. В качестве силовых ключей использовались IGBT транзисторы IRG60B120KD. Импульсные трансформаторы реализованы на ферритовых кольцах марки 2000НМ с размерами  $K45 \times 28 \times 12$ , индуктивность дросселя  $L1$  составляет 200 мкГн, емкость накопительных конденсаторов  $C=2,2$  нФ, сопротивление нагрузки  $R_H=30-1000$  Ом. Входное напряжение для макета регулировалось с помощью лабораторного автотрансформатора. Моделирование схемы проводилось в пакете прикладных программ PSpice.

Для проверки работоспособности модели были получены зависимости амплитуды выходного напряжения от сопротивления нагрузки в схеме с двумя ячейками расчетным и экспериментальным путями. Результаты представлены на рис. 6. Полученные зависимости выходного напряжения для модели и макета имеют схожий характер изменения при варьировании нагрузки, что подтверждает адекватность разработанной модели.

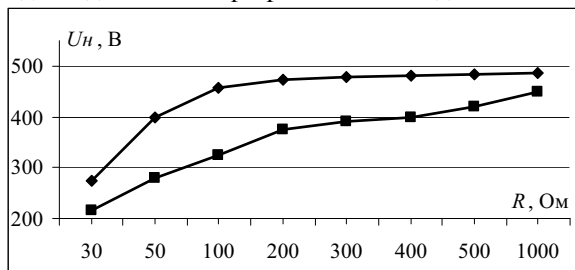


Рис. 6. Диаграмма зависимости амплитуды выходного напряжения от сопротивления нагрузки в схеме с 2-мя ячейками:  $\blacklozenge$  – расчет,  $\blacksquare$  – эксперимент

Напряжение на конденсаторе составляло порядка 245 В и практически не менялось при изменении сопротивления нагрузки. Амплитуда выход-

ного напряжения определяется выражением  $NU_n$  и должна составлять 490 В. Однако это наблюдалось только при высоких сопротивлениях нагрузки (рис. 6). При уменьшении сопротивления нагрузки наблюдается снижение амплитуды выходного напряжения, что объясняется нагрузочной способностью импульсного трансформатора. Для детального исследования процессов, определяющих поведение выходного напряжения при различных сопротивлениях нагрузки, были получены диаграммы напряжений на конденсаторе ( $U_C$ ), первичной обмотке трансформатора одной ячейки ( $U_{TR,1}$ ) и напряжения коллектор-эмиттер силового транзистора ( $U_{VT}$ ) в момент формирования импульса накачки в схеме с двумя ячейками при различных сопротивлениях нагрузки. На рис. 7, а, показаны диаграммы напряжений, полученные при  $R_H=1000$  Ом. Видно, что в момент включения транзистора напряжение коллектор-эмиттер за короткое время падает до нуля и к первичной обмотке трансформатора прикладывается напряжение конденсатора.

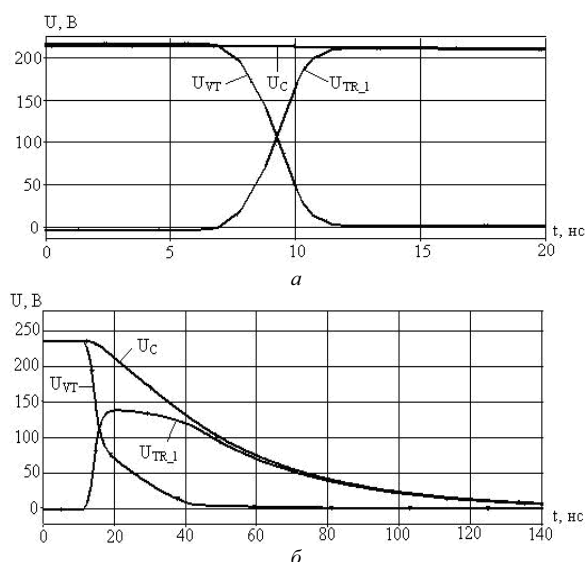


Рис. 7. Диаграммы напряжений на конденсаторе ( $U_C$ ), первичной обмотке трансформатора одной ячейки ( $U_{TR,1}$ ) и напряжения коллектор-эмиттер силового транзистора ( $U_{VT}$ ) при нагрузке (а) 1000 и (б) 30 Ом

На рис. 7, б, показаны диаграммы, полученные при  $R_H=30$  Ом. Данные диаграммы показывают, что при такой нагрузке в определенный момент времени ( $t \approx 18$  нс) происходит насыщение трансформатора, в результате чего напряжение на первичной обмотке перестает нарастать.

Из результатов моделирования и макетирования следует, что при малых сопротивлениях нагрузки увеличение количества ячеек приводит к насыщению трансформатора. Для исключения данного эффекта необходимо увеличивать индуктивность намагничивания трансформаторов, что приводит к увеличению длительности фронта импульса накачки, а это снизит мощность генерации CuVg-лазера.

### Выводы

Предложена схема источника накачки CuVg-лазеров с различной геометрией газоразрядных трубок, различной мощностью накачки и частотой работы.

Впервые продемонстрирована возможность создания высокочастотных полупроводниковых источников накачки с частотой работы свыше 100 кГц.

Исследования на активной нагрузке показали, что основным сдерживающим фактором для полу-

чения высокой мощности генерации является насыщение импульсных трансформаторов, поэтому предложенную схему целесообразно применять при создании лазеров с выходной мощностью не выше 1 Вт.

*Авторы выражают благодарность Г.С. Евтушенко, Ф.А. Губареву, Д.Н. Огородникову за помощь при проведении исследований и анализе полученных результатов.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: проект: РНП.2.1.2.1425.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтушенко Г.С., Паршина Н.В., Татур В.В., Суханов В.Б. и др. CuVg-лазер с транзисторным коммутатором // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – Т. 13. – № 3. – С. 265–266.
2. Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. Магнитотранзисторный генератор для питания лазера на парах бромида меди // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 1. – С. 88–91.
3. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. Лазер на парах бромида меди с высокой частотой следования импульсов // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – № 8. – С. 680–682.
4. Суханов В.Б., Татур В.В. Эксплуатационные характеристики CuVg-лазера с транзисторным коммутатором // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 2. – С. 108–110.
5. Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Суханов В.Б., Шиянов Д.В., Торгаев С.Н., Тригуб М.В. Скоростная визуализация микрообъектов посредством активных сред лазеров на парах металлов в условиях мощной засветки // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 141–146.
6. Активный элемент лазера на парах галогенида металла: пат. на ПМ 62742 Рос. Федерация. № 2005130448/28; заявл. 30.09.2005; опубл. 27.04.2007, Бюл. № 12. – 6 с.

*Поступила 02.09.2010 г.*