

УДК 621.373

Генератор накачки лазера на парах меди на основе высоковольтного твердотельного коммутатора

М. В. Малашин, С. И. Мошкунов, В. Ю. Хомич

Представлены результаты разработки и оптимизации параметров генератора накачки лазера на парах меди. Особенностью предложенного генератора является использование высоковольтного твердотельного ключа на основе последовательно соединенных биполярных транзисторов с изолированным затвором. Ключ имеет рабочее напряжение 12 кВ и ток 100 А. Получены следующие выходные параметры лазера: средняя мощность 12 Вт, частота повторения 15 кГц, при КПД лазера 0,7 %. По сравнению с аналогами, использующими тиратроны и модуляторные лампы, данный генератор имеет значительно более высокую долговечность и надежность.

PACS 84.30.Ng

Ключевые слова: твердотельный коммутатор, генерация высоковольтных наносекундных импульсов, лазер на парах меди.

Введение

Лазер на парах меди (ЛПМ) имеет уникальное сочетание характеристик, делающих его незаменимым в ряде областей науки и техники [1]:

- частота повторения импульсов излучения 1—100 кГц;
- средняя мощность излучения в видимом диапазоне $\sim 10^2$ Вт;
- коэффициент полезного действия 0,5—2 %;
- короткая длительность импульсов излучения 10—50 нс;
- усиление активной среды $\sim 10^2$ дБ/м;
- энергия в импульсе 0,1—100 мДж;
- пиковая мощность $\sim 10^6$ Вт;
- расходимость, близкая к дифракционной;
- пиковая мощность в пятне фокусировки до 10^{14} Вт/см².

Несмотря на имеющиеся преимущества доля ЛПМ на лазерном рынке остается достаточно малой. Это связано с большими техническими сложностями создания как высокотемпературного отпаянного активного лазерного элемента, так и надежных генераторов высоковольтных наносекундных импульсов накачки.

В нашей стране достаточно технологичные и надежные активные элементы на парах меди разработаны в ФГУП "Исток" [2]. Создание серийных ЛПМ на их основе сдерживается отсутствием надежных и долговечных систем накачки активных элементов.

Традиционно в генераторах накачки лазеров на парах металлов в качестве коммутатора используются тиратроны или модуляторные лампы. Основным недостатком подобных систем накачки является ограниченный срок службы коммутатора и как следствие необходимость его частой замены.

Известны схемы с применением тиратрона совместно с магнитным компрессором [2]. Такая схема включения тиратрона снижает коммутационные потери при включении и повышает надежность на высоких частотах следования импульсов, тем не менее стабильность работы и срок службы коммутатора остаются недостаточно высокими.

Для создания полностью твердотельных генераторов применялись тиристоры, биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), соединенные параллельно, а также реверсивно включаемые динисторы [3—5]. Тиристорные генераторы содержат большое число звеньев магнитного сжатия, что связано с относительно низким быстродействием данного ключа, как следствие такие системы имеют относительно невысокий коэффициент полезного действия. Для всех перечисленных коммутаторов характерно недостаточно высокое рабочее напряжение (1—2 кВ), что приводит к необходимости использовать громоздкий высоковольтный импульсный трансформатор, снижающий КПД и скорость нарастания тока.

Малашин Максим Владимирович, младший научный сотрудник.

Мошкунов Сергей Игоревич, заведующий лабораторией.

Хомич Владислав Юрьевич, заместитель директора.

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
Россия, 191186, С.-Петербург, Дворцовая набережная, 18.

Статья поступила в редакцию 13 марта 2010 г.

© Малашин М. В., Мошкунов С. В., Хомич В. Ю., 2010

В настоящей работе авторами разработан и создан генератор наносекундных импульсов для накачки ЛПМ на основе быстродействующего высоковольтного твердотельного коммутатора, состоящего из последовательно соединенных транзисторов IGBT [6—9].

Высоковольтный твердотельный коммутатор

Высоковольтный твердотельный коммутатор состоит из 12 биполярных транзисторов с изолированным затвором, соединенных последовательно, что позволяет получать необходимые величины рабочих токов и напряжений (100 А и 12 кВ, соответственно). Управление затворами IGBT осуществляется с помощью одновитковых трансформаторов, первичные обмотки которых соединены последовательно и выполнены единым высоковольтным проводом, пронизывающим сердечники всех трансформаторов управления.

Данная схема управления затворами обеспечивает гальваническую развязку цепей управления и высокую синхронность включения всех IGBT коммутатора. Существенным отличием такого ключа от тиратрона является возможность его полного управления (включение и выключение управляющим сигналом).

Высоковольтный ключ имеет модульную конструкцию, что обеспечивает возможность наращивания рабочего напряжения. Каждый модуль коммутатора содержит два последовательно включенных транзистора IGBT с двумя независимыми цепями управления затворами транзисторов и рассчитан на рабочее напряжение 2 кВ (рис. 1, а). Каждый из транзисторов установлен на отдельном радиаторе охлаждения, который позволяет рассеивать мощности до 20 Вт в режиме принудительного воздушного обдува.

В нашем случае использовался коммутирующий элемент, рассчитанный на рабочее напряжение 12 кВ и состоящий из 6 отдельных модулей. Общий вид высоковольтного коммутатора представлен на рис. 1, б.

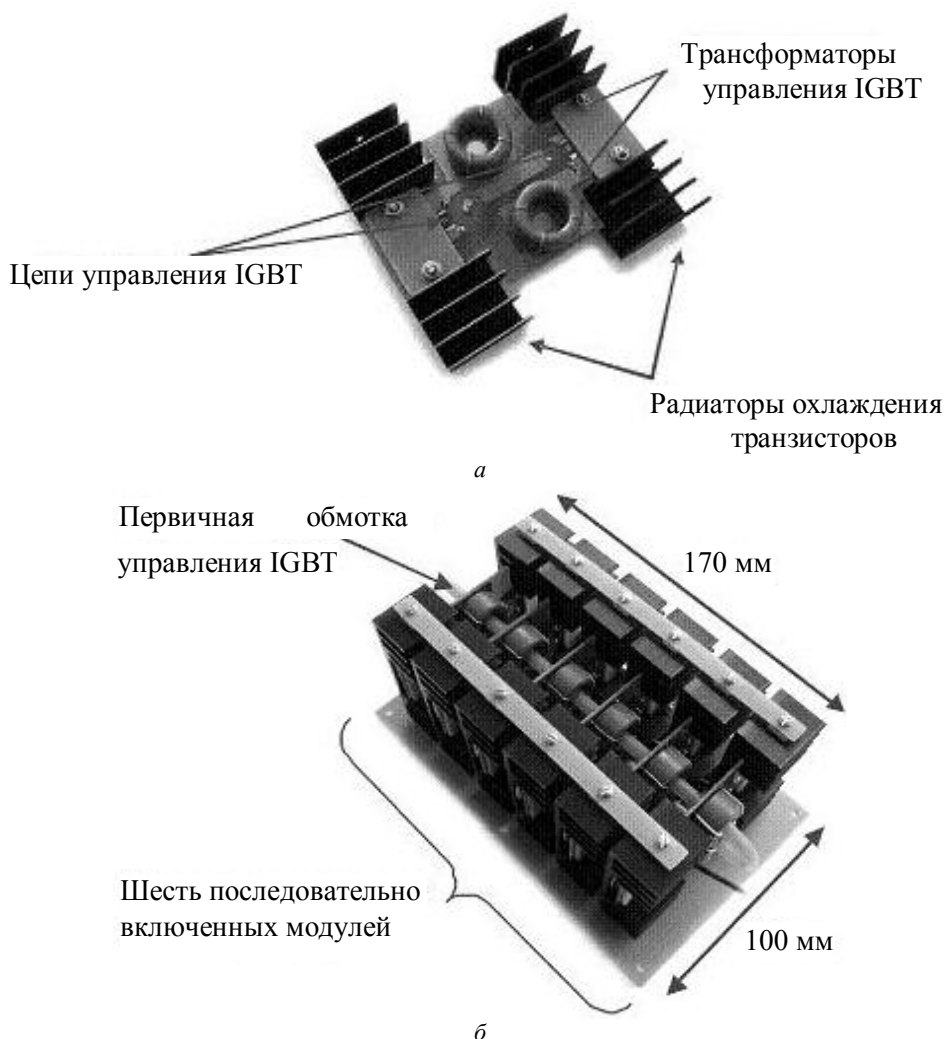


Рис. 1. Высоковольтный твердотельный коммутатор:
 а — модуль ключа с рабочим напряжением 2 кВ; б — коммутатор с рабочим напряжением 12 кВ

Особенностью данного ключа является схема управления затворами, работающая в режиме источника тока, позволившая осуществить последовательное включение транзисторов IGBT без специальных цепей выравнивания (TVS, варисторы и др.). Общая первичная обмотка всех трансформаторов управления обеспечивает необходимую синхронность срабатывания всех последовательно включенных транзисторов.

Допустимая мощность, рассеиваемая коммутатором, составляет 240 Вт.

Генератор высоковольтных импульсов

Схема лазера представлена на рис. 2, а. Управляемое выключение составного транзисторного коммутатора позволило реализовать схему генератора импульсов возбуждения ЛПМ с неполным разрядом накопительного конденсатора и удвоением напряжения. Гальваническая развязка цепей управления ключа от его электродов дала возможность применить более простую схему, в которой оба электрода находятся под потенциалом относительно земли.

Генератор содержит высоковольтный источник заряда накопительного конденсатора C_0 , высоковольтный твердотельный коммутатор, блок управ-

ления и контроля, зарядный дроссель L_3 , два звена магнитного сжатия импульсов C_1, L_1, C_2, L_2 . Нагрузкой генератора является ЛПМ трубка (активный элемент) Kulon LT-10Cu.

При открывании ключа происходит резонансный заряд конденсатора C_1 первого звена сжатия через дроссель L_0 за время, равное 250 нс. Поскольку емкость накопительного конденсатора $C_0 \gg C_1$ (C_0 — 100 нФ, C_1 — 0,5 нФ), амплитуда напряжения на C_1 близка к удвоенному напряжению источника питания.

С целью повышения КПД генератора и обеспечения требуемой длительности импульсов накачки (50—70 нс) были применены два звена магнитной компрессии с суммарным коэффициентом сжатия равном пяти (рис. 2, а) [10, 11].

Для повышения эффективности системы магнитной компрессии импульсов, а также уменьшения временной нестабильности следования выходных импульсов генератора, использовалось принудительное перемагничивание сердечников дросселей магнитного компрессора постоянным током.

Перемагничивание сердечников осуществлялось постоянным током с помощью высоковольтного провода, пропущенного через все дроссели магнитного компрессора и регулируемого источника тока.

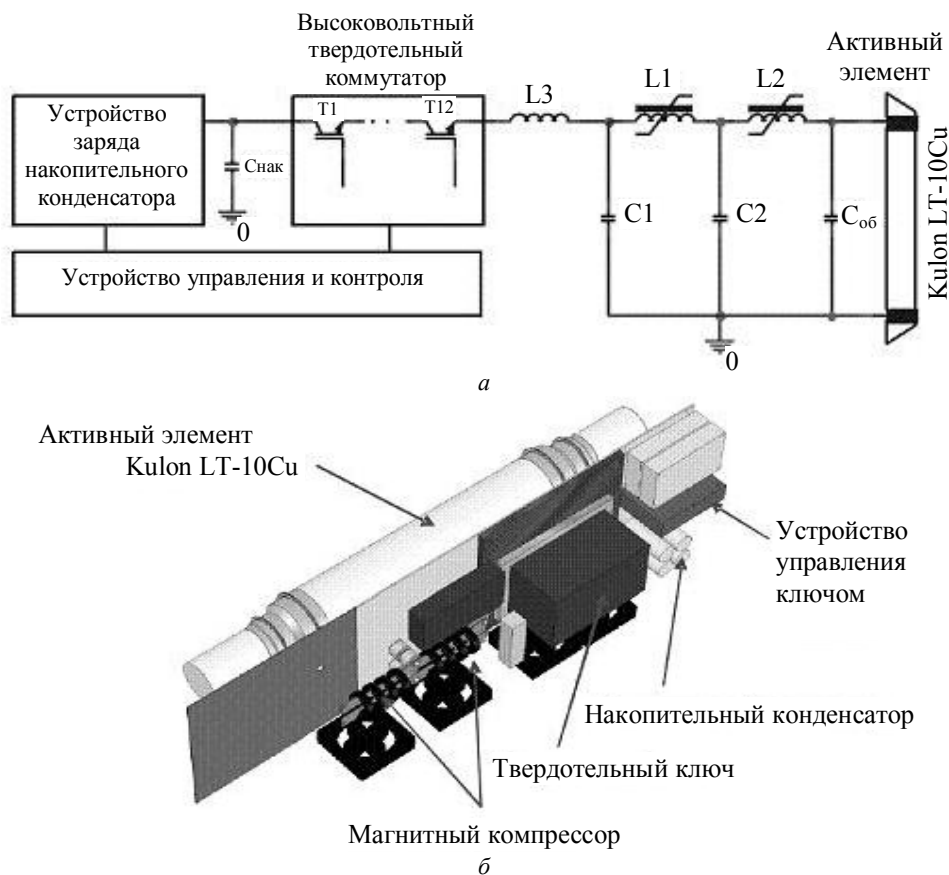


Рис. 2. Структурная схема лазера на парах меди:

а — структурная схема генератора накачки ЛПМ; б — компоновка элементов генератора и активного элемента

Система накачки ЛПМ

На основе разработанного твердотельного генератора создан лазер на парах меди с активным элементом Kulon LT-10Cu производства ФГУП "Исток" и проведена оптимизация его параметров.

Компоновка элементов цепей формирования импульсов накачки и активного элемента представлена на рис. 2, б. Конструктивно система накачки медного лазера была выполнена в виде единого электронного блока, смонтированного в корпусе с габаритными размерами 1000×480×360 мм (рис. 3). Система ЛПМ состоит из блока питания, составного высоковольтного коммутатора с блоком управления, магнитного компрессора, системы управления и контроля, активного лазерного элемента и оптического резонатора.



Рис. 3. Лазер на парах меди со снятыми стенками экранирующих кожухов

Блок питания представляет собой импульсный преобразователь с регулируемым и стабилизированным напряжением до 12 кВ, мощностью до 2 кВт, работающий на частоте 100 кГц. Блок осуществляет заряд накопительного конденсатора до установленного напряжения и поддерживает его постоянным в течение работы.

Активный лазерный элемент помещен в металлический кожух, который образует малоиндуктивную коаксиальную конструкцию разрядного контура. Обостряющий конденсатор расположен в непосредственной близости от электродов активного элемента с целью минимизации индуктивности разрядного контура. Уменьшение индуктивности разрядного контура позволяет уменьшить длительность фронта, увеличить амплитуду тока импульсов накачки и в результате повысить мощность генерации. Все тепловыделяющие элементы

системы накачки имеют принудительное воздушное охлаждение.

Оптимизация системы накачки

Временная стабильность следования импульсов накачки является важным параметром, поскольку система ЛПМ высокой яркости строится по схеме генератор—усилитель, где недостаточная синхронизация приводит к нестабильности выходной мощности. Основным источником временной нестабильности (джиттера) в данном генераторе импульсов является флуктуация начальной магнитной индукции в сердечниках магнитного компрессора. Было обнаружено также, что на джиттер влияет несогласованность нагрузки и магнитного компрессора, приводящее к отражению импульса.

На рис. 4, а представлена зависимость джиттера импульсов тока через активный элемент от времени прогрева при различных значениях тока перемагничивания. Верхняя кривая 1 получена при нулевом токе перемагничивания. Кривая 2 — при токе 5 А, 3 — при токе 10 А. При токе 10 А происходит насыщение сердечников и дальнейшее увеличение тока не оказывало существенного влияния на джиттер.

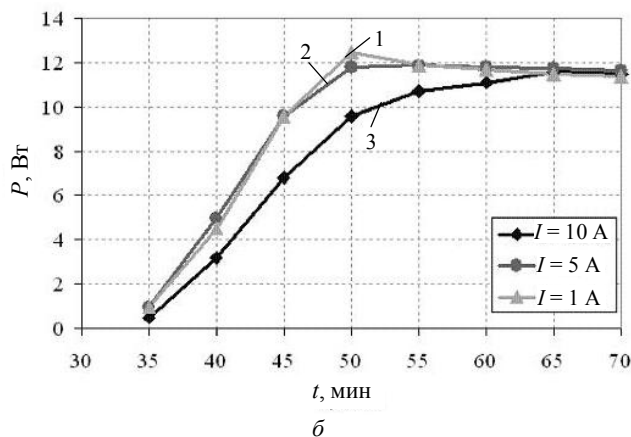
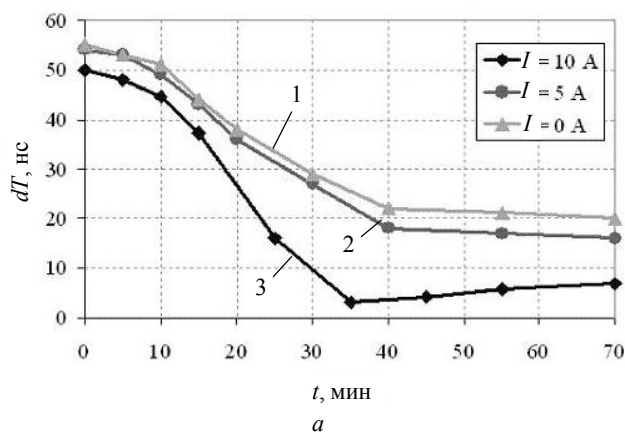


Рис. 4. Работа системы накачки ЛПМ при различных значениях тока перемагничивания:

а — нестабильность следования импульсов (джиттер) во времени; б — средняя мощность лазерного излучения от времени

На рис. 4, б приведены временные зависимости средней мощности излучения во время прогрева лазерной трубки.

С повышением тока перемagnичивания мощность, затрачиваемая на разогрев активной среды, снижается, соответственно возрастает время выхода на максимальную мощность. Кривая 3 соответствует току 10 А, при котором максимальное значение мощности составляет 11,6 Вт, при значении тока 5 А, кривая 2, достигается более высокое значение — 11,9 Вт. Кривая 1 соответствует току 1 А — при котором максимальное значение мощности составляет 13 Вт.

С увеличением тока перемagnичивания растут потери в сердечниках, что отражается на КПД системы в целом. Оптический КПД системы при увеличении тока перемagnичивания от 0 до 10 А и падает на ~15 %.

Оптимальный ток перемagnичивания составил 10 А. Дальнейшее увеличение тока не влияет на стабильность, однако при этом возрастают потери в дросселях компрессора и снижается КПД системы в целом.

Мощность излучения ЛПМ сильно зависит от фронта и амплитуды импульса тока через активный элемент [1], а, следовательно, и от емкости обостряющего конденсатора. На рис. 5, а представлена зависимость выходной мощности лазера от емкости обостряющего конденсатора $C_{об}$ при частоте следования импульсов 15 кГц, напряжение на накопительном конденсаторе составляло 12 кВ.

Оптимальное значение для $C_{об}$ составило 150 пФ. Дальнейшее увеличение емкости приводит к падению лазерной выходной мощности вследствие уменьшения скорости нарастания напряжения на активном элементе.

На рис. 5, б представлена зависимость величины энергии потерь в коммутаторе от длительности импульса тока при частоте следования импульсов 15 кГц, напряжении на накопительном конденсаторе 12 кВ, полученные путем изменения индуктивности дросселя L3 (см. рис. 2, а). В качестве оптимальной точки была выбрана длительность 250 нс. При такой длительности импульса через ключ удалось ограничиться двумя звеньями сжатия.

Мощность, потребляемая лазерной системой от выпрямителя, составляет 1840 Вт. С учетом того, что мощность разогрева активного элемента составляет ≈ 1500 Вт, электрический КПД составил более 80 %.

Лазер на парах меди на основе активного элемента LT-10Cu и высоковольтного твердотельного генератора имел следующие параметры [12]:

- частота повторения импульсов — 15 кГц;
- средняя мощность излучения с плоским резонатором — 12 Вт;

- энергия излучения в импульсе — 0,8 мДж;
- соотношение мощностей излучения $P(\lambda = 510,6 \text{ нм}) : P(\lambda = 578,2 \text{ нм}) = 3/2$;
- длительность импульсов излучения — 17—20 нс;
- расходимость излучения с плоским резонатором — 4,5 мрад;
- расходимость излучения с неустойчивым резонатором — 0,3—0,5 мрад;
- диаметр лазерного пучка — 14 мм;
- время выхода лазера в режим номинальной мощности — 50 мин;
- КПД (мощности излучения/электрическая потребляемая мощность) — 0,7 %.

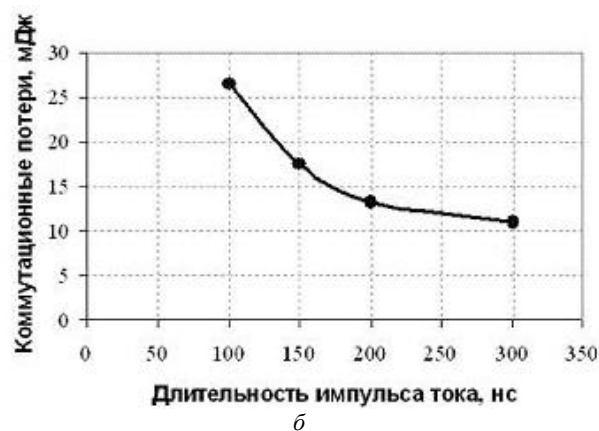
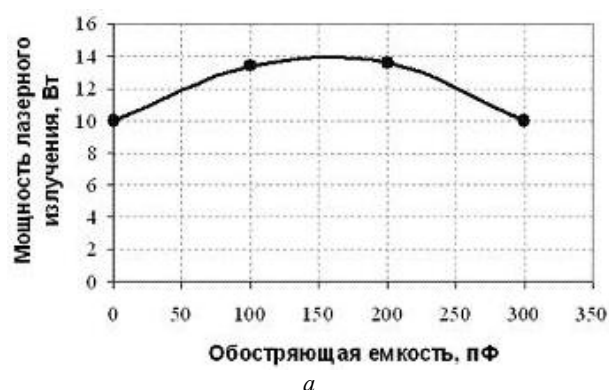


Рис. 5. Оптимизация параметров системы накачки: а — зависимость выходной мощности лазера от емкости обостряющего конденсатора $C_{об}$ (частота следования импульсов 15 кГц, L1 — 4 кольца по 4 витка, L2 — 5 колец по 3 витка); б — зависимость энергии потерь в коммутаторе от длительности импульса тока (напряжение на накопительном конденсаторе — 12 кВ)

Заключение

Разработанный авторами новый твердотельный высоковольтный коммутатор на основе транзисторов IGBT является альтернативой применению тиратронов и модуляторных ламп в системах накачки ЛПМ и ряда других лазеров с высокой частотой повторения, и значительно превосходит ти-

ратрон и модуляторную лампу по сроку эксплуатации и надежности.

Возможность увеличения рабочего напряжения и коммутируемого тока ключа путем его масштабирования (увеличение числа последовательно и параллельно включенных IGBT), открывает широкие перспективы для построения значительно более мощных генераторов и лазеров на их основе.

Обладая возможностью полного управления высоковольтным твердотельным коммутатором, становится возможным новый подход в построении генераторов высоковольтных наносекундных импульсов — создание схем с неполным разрядом накопительной емкости, ранее реализовавшихся только с модуляторными электронными лампами.

Результаты экспериментов показали надежную работу коммутатора совместно с двухзвенной системой магнитной компрессии при частоте следования импульсов до 20 кГц и средней мощностью в нагрузке 2 кВт.

Применение твердотельной системы накачки совместно с отпаянными активными элементами ФГУП "Исток" создает реальную возможность создания конкурентоспособных лазеров на парах меди.

*Работа выполнена при поддержке гранта
РФФИ № 07-08-12084-офи.*

Л и т е р а т у р а

1. Григорьянц А. Г., Казарян М. А., Лябин Н. А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. — М.: Физматлит, 2005.

2. Колоколов И. С., Клименко В. И., Лябин Н. А., Парамонова Г. М., Чурсин А. Д., Казарян М. А., Лепехин Н. М., Присеко Ю. С., Филиппов В. Г. // Прикладная физика. 2003. № 3. С. 84.

3. Birt D. L., Cook E. G., Hawkins S., Mayers A., Regina-to L. L., Schmidt J. A., Smith M. W. Regulation and drive system for high-rep rate magnetic pulse compressors//IEEE Conference record of 1982 fifteens power modulator symposium. P. 15—21.

4. Визирь В. А., Иванов С. В., Ковальчук Б. М., Маньных В. И., Шубкин Н. Г., Червяков В. В., Юрьев В. В., Бутаков Л. Д., Толмачев В. И. // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 4. С. 53.

5. Грехов И. В., Коротков С. В., Андреев А. Г., Козлов А. К., Рольник И. А., Яковчук Н. С. // Там же. 1996. № 3. С. 115.

6. Moshkunov S. I. A New Approach for Developing Highly effective Solid-State HV Pulse Generators for Laser Pumping// The 17th International Conference on Advanced Laser Technologies ALT'09. P. 110.

7. Иванов Е. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором: Препринт ИПЭФ РАН. — М.: РИИС ФИАН, 2004.

8. Иванов Е. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю. // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 1. С. 88.

9. Иванов Е. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю. // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 122—125.

10. Месяц Г. А., Насибов А. С., Кремнев В. В. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. — М.: Энергия, 1970.

11. Кремнев В. В., Месяц Г. А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. — Новосибирск: Наука, 1987.

12. Малашин М. В., Мошкунов С. И., Хомич В. Ю. Разработка, создание и исследование лазера на парах меди с системой накачки на основе твердотельной элементной базы: Препринт ИЭЭ РАН. — М.: РИИС ФИАН, 2009.

Copper vapor laser pumping source based on the high voltage solid-state switch

V. Yu. Khomich, M. V. Malashin, S. I. Moshkunov

Institute of Electrophysics and Electrical Power Engineering, 18 Dvortsovaya Naberezhnaya, S.-Petersburg, 191186, Russia

The results of developing and construction optimization of copper vapor laser excitation circuit were represented. The main feature of excitation circuit construction is high voltage solid-state switch which consists of a number of series-connected IGBT's. The blocking voltage of the switch is 12 kV and peak pulse current is 100 A. Average output laser power 12 W, repetition rate 15 kHz and total efficiency (light power to electric consumption power ratio) — 0,7 %. In comparison with excitation circuits based on thyratrons and modulator vacuum tubes the present circuit is much more reliable and have much longer lifetime.

PACS 84.30.Ng

Keywords: solid state switch, excitation circuit, copper vapor laser, nanosecond pulse generation.

Bibliography — 12 references.

Received March 13, 2010