

УДК 621.373

Генератор накачки эксимерного лазера на основе высоковольтного твердотельного коммутатора

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

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

О. В. Грязнов

Центр физического приборостроения ИОФ РАН им. А. М. Прохорова,
г. Троицк, Московская обл., Россия

Разработан высоковольтный твердотельный коммутатор (ВТК) на основе параллельно-последовательного включения IGBT. На базе коммутатора построен полностью твердотельный генератор импульсов субмикросекундного диапазона для накачки мощного эксимерного лазера. Максимальная выходная мощность генератора 2 кВт, рабочая частота до 2 кГц, амплитуда выходного напряжения 20—27 кВ, длительность фронта нарастания выходного напряжения < 70 нс.

Введение

В настоящее время в системах накачки эксимерных лазеров используются генераторы как на газоразрядных приборах (тиратроны, разрядники) [1—3], так и на твердотельных (тиристоры) [4]. Основными недостатками схем на тиристорах и разрядниках являются малый срок службы, низкий КПД, нестабильность характеристик в течение срока службы. Недостатком тиристора можно считать существенный разброс времени включения от прибора к прибору, что приводит к необходимости применять более сложную схемотехнику управления либо использовать в схеме генератора импульсный повышающий трансформатор. В дан-

ной работе предложен и исследован генератор накачки на основе нового твердотельного коммутатора.

Генератор высоковольтных импульсов

Генератор высоковольтных наносекундных импульсов выполнен на основе полностью твердотельной элементной базы. Блок генератора содержит ВТК со схемой управления, двухзвенную систему магнитной компрессии импульсов, блок управления и контроля. Функциональная схема генератора представлена на рис. 1.

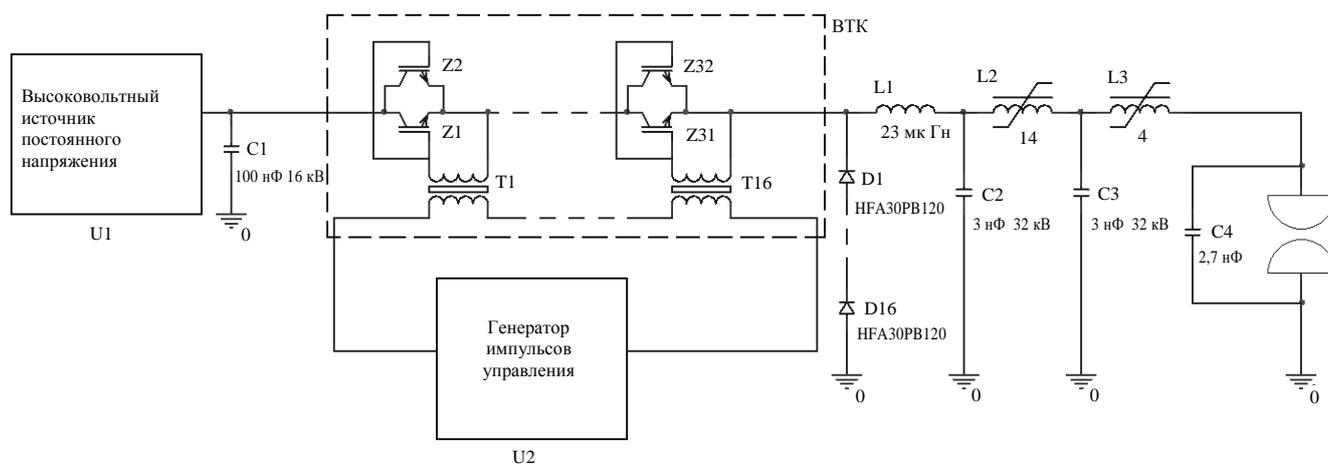


Рис. 1. Функциональная схема генератора:

U1 — высоковольтный источник постоянного напряжения; C1 — накопительный конденсатор; ВТК — высоковольтный твердотельный коммутатор на IGBT; U2 — генератор импульсов управления; D1—D16 — линейка защитных диодов; L1 — зарядный дроссель; C2 — конденсатор первого звена магнитного сжатия; L2 — насыщающийся дроссель первого звена магнитного сжатия; C3 — конденсатор второго звена магнитного сжатия; L3 — насыщающийся дроссель второго звена магнитного сжатия; C4 — обостряющий конденсатор лазерной камеры

Основная особенность схемы предложенного генератора накачки — использование нового высоковольтного полупроводникового коммутатора (см. пункт на рис. 1) [5].

Высоковольтный твердотельный коммутатор является полностью управляемым (включение и выключение) и состоит из 32 параллельно-последовательно включенных IGBT (Z1—Z32), управление которыми осуществляется посредством трансформаторов Т1 – Т16. Такая схема включения IGBT обеспечивает гальваническую развязку цепи управления от входа и выхода ВТК, что позволяет реализовать достаточно простую схему генератора с удвоением напряжения за счет неполного разряда накопительного конденсатора. Режим управления отдельными IGBT позволил отказаться от снабберных цепочек в конструкции ВТК, что привело к повышению его быстродействия и снижению потерь в коммутаторе.

При подаче импульса управления генератором U2 ВТК открывается, в результате происходит резонансный заряд конденсатора C2 через дроссель L1. Длительность управляющего импульса подбирается таким образом, чтобы ВТК закрылся в момент достижения максимума напряжения на C2. При этом ток через ВТК близок к нулю, что приводит к значительному снижению коммутационных потерь.

Амплитуду напряжения на C2 в этом случае без учета падения напряжения на ключе можно оценить по формуле

$$U = \frac{2U_{in}C1}{C1+C2}.$$

При $C1 \gg C2$ напряжение на конденсаторе C2 стремится к значению $2U_{in}$.

Полученный на C2 импульс напряжения сжимается по длительности системой магнитного сжатия.

Максимальная частота повторения импульсов генератора определяется временем восстановления напряжения на накопительном конденсаторе (т. е. мощностью высоковольтного источника) и эффективностью отвода тепла от элементов ключа и магнитного компрессора. При использовании источника мощностью 2500 Вт и принудительного воздушного охлаждения была продемонстрирована надежная работа при частоте повторения 2 кГц.

На рис. 2 представлены осциллограммы напряжений в различных точках электрической цепи генератора при его работе без пробоя разрядного промежутка и при напряжении, поддерживаемом высоковольтным источником U1 на накопительном конденсаторе C1 — 16 кВ.

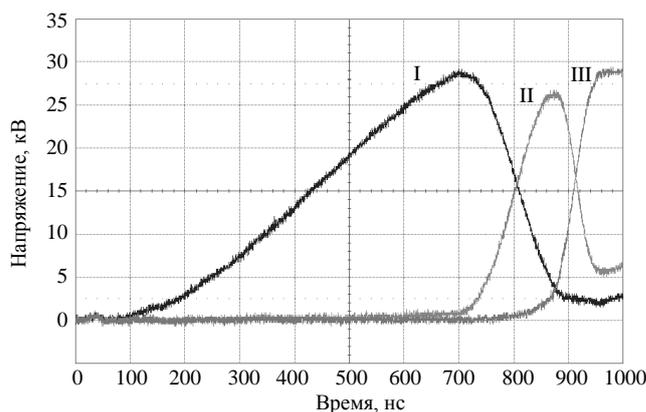


Рис. 2. Осциллограмма напряжений по звеньям сжатия (I–III)

Длительность фронта нарастания напряжения на конденсаторе C2 (см. рис. 2, осциллограмма I) по уровню 10—90 % составила 400 нс; пиковое напряжение 28 кВ. Длительность фронта нарастания напряжения на конденсаторе C2 (см. рис. 2, осциллограмма II) по уровню 10—90 % составила 100 нс; пиковое напряжение 26 кВ.

Форма напряжения на выходе генератора представлена осциллограммой III (см. рис. 2). Длительность фронта нарастания по уровню 10—90 % составила 70 нс; пиковое напряжение 28 кВ.

Таким образом, коэффициент сжатия (определяемый отношением длительностей импульсов по полувысоте для двух соседних звеньев) составил около 4 и 1,4 для I и II звеньев, соответственно.

На рис. 3 представлена осциллограмма напряжения на выходе генератора при его работе на активную нагрузку сопротивлением 30 Ом.

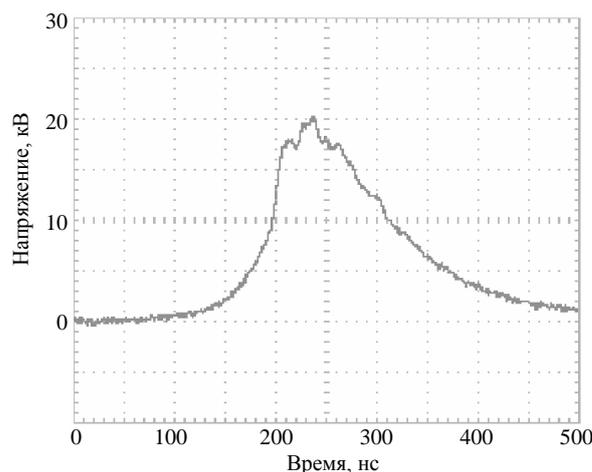
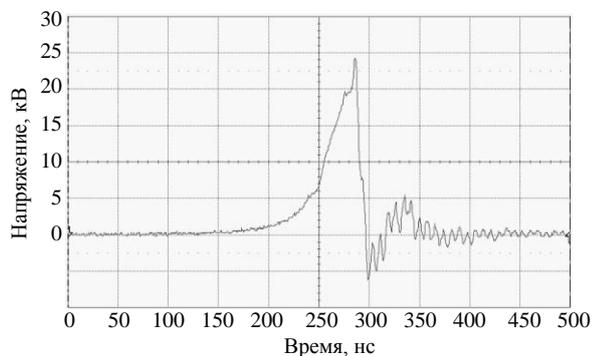


Рис. 3. Работа на активную нагрузку 30 Ом

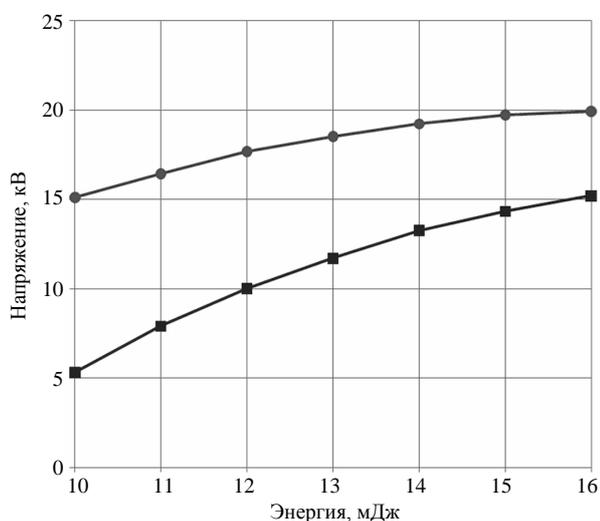
Длительность фронта нарастания импульса напряжения по уровню 10—90 % составила 60 нс; пиковое напряжение 20 кВ.

Генератор прошел успешные испытания на эксимерном лазере модели СЛ-5000 (разработка Центра физического приборостроения ИОФ РАН).

На рис. 4, *а* представлена осциллограмма напряжения на разрядном промежутке камеры эксимерного лазера. Длительность фронта нарастания напряжения по уровню 10—90 % составила 70 нс; пиковое напряжение 24 кВ.



а



б

Рис. 4. Напряжение на разрядном промежутке эксимерного лазера (*а*); напряжение на разрядном промежутке и энергия (*б*); ● — кВ; ■ — мДж

Генератор надежно работал на частотах повторения импульсов до 2 кГц при амплитуде выходного импульса в пределах 20—27 кВ (зависит от давления в лазерной камере). При максимуме входного напряжения (16 кВ) энергия, передаваемая в нагрузку в импульсе, составляет 1,1 Дж.

На рис. 4, *б* представлены зависимости напряжения на разрядном промежутке и энергии излучения лазера, соответственно, от напряжения на входе генератора. Приведенные зависимости получены для оптимального состава газовой среды.

Заключение

Разработан и исследован полностью твердотельный генератор для накачки эксимерного лазера на основе нового ВТК. Предложенное решение позволяет уйти от использования традиционных коммутаторов, применяемых в схемах с последующим магнитным сжатием — тиратронов и тиристоров. Высоковольтный твердотельный коммутатор на основе параллельно-последовательного включения IGBT превосходит вышеназванные приборы по стабильности характеристик, ресурсу работы без замены коммутатора и максимальной частоте переключения. По сравнению с аналогичными генераторами на основе тиристоров применение ВТК позволило исключить из схемы генератора импульсный повышающий трансформатор, что повысило КПД, улучшило временные характеристики (ввиду отсутствия индуктивности рассеяния) и снизило массогабаритные параметры устройства.

Литература

1. Атежес В. В., Варпанетов С. К., Жуков А. В., Курзанов М. А., Обидин А. З., Ямщиков В. А. Условия эффективного возбуждения электроразрядного F₂-лазера// Квантовая электроника. 2003. Сер. 33. № 7, 8. С. 677—683.
2. Варпанетов С. К., Жигалкин А. А., Лапшин К. Э., Обидин А. З., Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. Исследование электроразрядного ВУФ-лазера на молекулярном фторе// Там же. Сер. 36. 2006. № 5. С. 393.
3. El-Osealy M. A. M., Jitsuno T., Nakamura K., Uchida Y., Goto T. Oscillation and gain characteristics of longitudinally excited VUV F₂ laser at 40 Torr total pressure// Optics Communications. 2002. № 207. P. 255—259.
4. Görtler A., Strowitzki C., Geiger S. High repetition rate 157 nm Mini-Eximer-Lasers// XIII International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Laser Conference: Proceedings of SPIE. 2001. V. 4184.
5. Иванов Е. В., Мошкунев С. И., Хомич В. Ю. Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором: Препринт ИПЭФ РАН. — М., 2004. — 50 с.

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2008 г.

Pumping source for the eximer laser based on high voltage solid-state switch

E. V. Ivanov, M. V. Malashin, S. I. Moshkhunov, V. U. Khomich
Institute of Power Electronics and Electroenergetics RAS, St.-Petersburg, Russia

O. V. Gryaznov

Physics Instrumentation Center of Prokhorov's General Physics Institute RAS, Moscow Region, Troitsk, Russia

High-voltage solid-state switch based on parallel-serial connection of IGBT was developed. The switch has allowed to construct all solid-state power generator of sub-microsecond range for pumping of high power eximer laser. The generator's maximal output power is 2 kW. It operates at frequency up to 2 kHz with output voltage level 20—27 kV and with rise-time less than 70 ns.
