УДК 621.37

Управление электрооптическими затворами с помощью высоковольтных коммутаторов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором

С.И. Мошкунов, И.Е. Ребров, В.Ю. Хомич

В работе рассмотрены особенности построения коммутаторов на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором для управления электрооптическими затворами, описан пример реализации устройства управления модулятором добротности. На основе коммутаторов создана серия компактных генераторов с наносекундными временами нарастания и спада и частотой повторения до 100 кГц.

PACS: 07.50.Ek, 42.79.— e
Ключевые слова: твердотельный коммутатор, электрооптический затвор, генератор высоковольтных импульсов.

Введение

Электрооптические затворы (ЭОЗ) широко применяются в науке и технике для амплитудной модуляции оптического пучка, а также для активной модуляции добротности резонаторов лазеров [1─3]. Для управления ЭОЗ требуются импульсы высокого напряжения с достаточно плоской вершиной и малыми временами переключения [3, 4]. Модуляторы добротности на ячейке Поккельса обычно работают в режиме полуволнового или четвертьволнового напряжения, что составляет от 3 до 10 кВ [5]. Для коммутации ЭОЗ используют крайтроны [6─8], лавинные [1, 9, 10], биполярные [11, 12] транзисторы, и, в последнее время, МДП-транзисторы [13─15].

Лавинные транзисторы имеют большое остаточное напряжение, что ограничивает диапазон частот повторения. Кроме того, лавинный режим достигается в достаточно узком диапазоне блокируемых напряжений, и, в результате, быстродействие ключа сильно зависит от прикладываемого напряжения.

Недостаток крайтрона определяется его принадлежностью к классу газоразрядных устройств. По сравнению с полупроводниковыми коммутаторами крайтрон имеет весьма ограниченный срок службы и узкий диапазон частот повторения, а также трудно устранимый джиттер. Кроме того, крайтрон создает большой уровень электромагнитных помех, часто блокирующих работу других электронных устройств.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) при рабочих напряжениях 500 В составляют активную конкуренцию МДП-транзисторам, а при напряжениях более 1000 В превосходят последние по многим параметрам. В частности, падение напряжения на IGBT при одинаковых размерах кристалла оказывается значительно ниже такового у МДП-транзистора. Это определяет перспективность их применения для питания быстродействующих ЭОЗ.

В настоящей статье рассматриваются особенности построения генераторов импульсов на основе IGBT для управления ЭОЗ и приводится пример реализации устройства управления модуляторами добротности для Nd: YAG-лазеров.

Высоковольтный твердотельный коммутатор

В настоящее время серийно-выпускаемые биполярные транзисторы с изолированным затвором имеют рабочие напряжения, достигающие 6 кВ. Однако технологически процесс увеличения предельного напряжения связан с ухудшением скорости нарастания и спада тока при переключениях, так как при включении транзистора необходимо инжектировать в *n*-слой (и, соответственно, удалять из *n*-слоя при выключении) носители заряда, имеющие высокие концентрации. В высоковольтных полупроводниковых приборах дрейфовый слой имеет увеличенную толщину, поэтому процессы переключения происходят медленнее.

Одним из решений этой проблемы при построении генераторов наносекундных импульсов является использование цепи последовательно со-

Мошкунов Сергей Игоревич, зав. лаборатории.
Ребров Игорь Евгеньевич, ст. научн. сотрудник.
Хомич Владислав Юрьевич, зам. директора.
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.
Россия, 191186, Санкт-Петербург,
Дворцовая набережная, 18.
Тел.: (499) 135–11–95; (499) 135–13–04.
E-mail: khomich@ras.ru; serg-moshkunov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10 октября 2013 г.

© Мошкунов С.И., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., 2013

единенных низковольтных (600 ─ 1200 В) IGBT, формирующих высоковольтный коммутатор [16, 17] (см. рис. 1). Помимо увеличения быстродействия высоковольтного ключа, данный подход расширяет круг решаемых задач, поскольку выбор рабочих напряжений уже не ограничен пробивным напряжением используемых транзисторов.

Для получения требуемых времен переключения менее 10 нс необходимо обеспечить высокую синхронность срабатывания всех полупроводниковых элементов и низкое эквивалентное сопротивление цепей затвора. Решить эту задачу позволило применение мультитрансформаторной схемы последовательно соединенных биполярных транзисторов с изолированным затвором

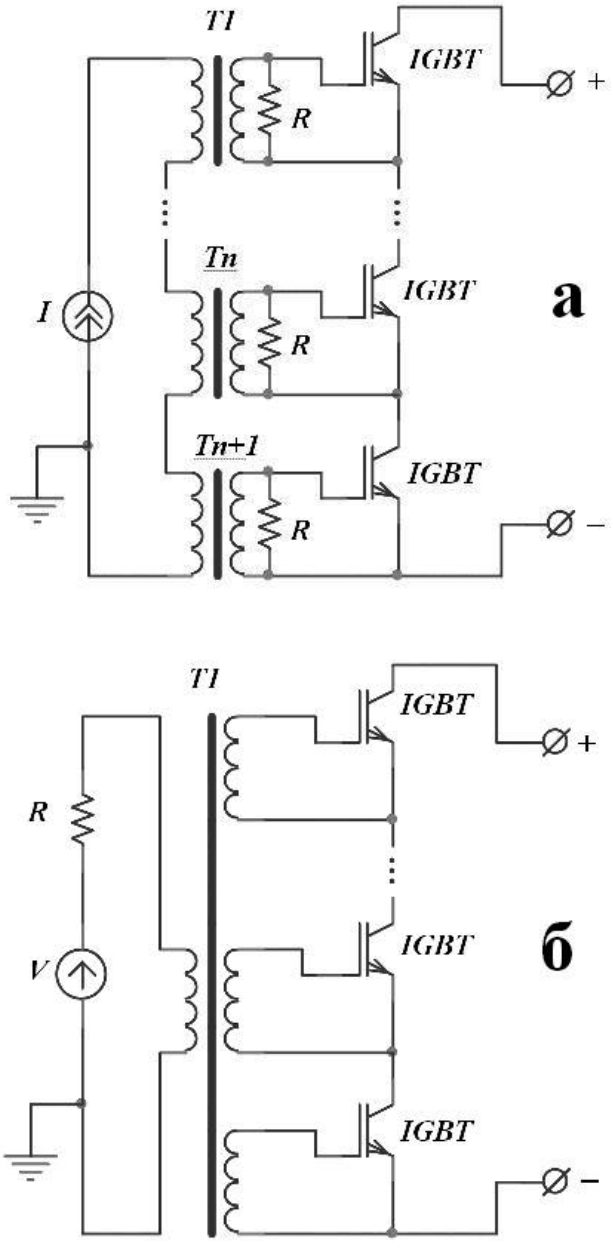

Рис. 1. Схемы включения IGBT: а) мультитрансформаторная схема; б) однотрансформаторная схема со множеством вторичных обмоток.

(рис. 1, а), которая, по сравнению с наиболее часто используемой (рис. 1, б) [18], обладает рядом преимуществ. С ее помощью достигаются широкие возможности масштабирования благодаря тому, что число каскадов уже не ограничено размером импульсного трансформатора Т1. Равенство напряжений на затворах IGBT и высокая помехоустойчивость схемы обеспечиваются включением низкоомных резисторов R параллельно вторичным обмоткам. Они же определяют эффективное выходное сопротивление цепи управления затвора каждого транзистора и, следовательно, быстродействие коммутатора. Таким образом, для создания отпирающего падения напряжения U_{GE} = 15 В на затворах необходимо, чтобы протекающий ток во вторичной обмотке был равен $I = U_{GE}/R$.

Устойчивость работы последовательно включенных транзисторов связана с перераспределением напряжения между отдельными дискретными элементами и температурной стабильностью. Ток утечки IGBT увеличивается с ростом напряжения и температуры, поэтому в выключенном состоянии напряжение коллектор─эмиттер более нагретого прибора оказывается ниже, чем у других транзисторов. Работа с более низким стартовым напряжением соответствует меньшим переключательным потерям IGBT и приводит его охлаждению.

Наличие гальванической изоляции между управляющими и силовыми цепями высоковольтного ключа облегчает его использование и расширяет область применений: появляется возможность работы с источниками разной полярности, а также использование «плавающего» подключения коммутатора, когда оба силовых электрода находятся под потенциалом.

В данной работе на основе описанных выше коммутаторов были реализованы три основных схемы построения ЭОЗ, представленные на рис. 2. Униполярная схема (рис. 2, а), когда на ЭОЗ через резистор подавалось постоянное высокое напряжение 4 кВ, а импульс создавался шунтирующим ключом; биполярная схема (рис. 2, б), в которой высоковольтный ключ коммутирует отрицательное напряжение 4кВ на положительно заряженный ЭОЗ с последующей зарядкой через резистор до напряжения +4кВ; и импульсная (рис. 2, в) в которой к ЭОЗ последовательно прикладывается отрицательное и положительное напряжение.

Экспериментальная установка

Для реализации схем коммутации ЭОЗ и достижении требуемых параметров высоковольтного импульса были разработаны генераторы ос-

нованные на 4-кВ и 8-кВ высоковольтном ключе, состоящим из 8 последовательно соединенных IGBT. В разработанном 4-кВ (рис. 3) генераторе были применены транзисторы IRGB20B60PD1 (Q1 — Q8) с рабочим напряжением до 600 В, обладающие наиболее высоким быстродействием среди ряда исследованных приборов разных производителей [16].

Управление первичными цепями трансформаторов T 1 — T 8 осуществляется с помощью IGBT Q9 (IRGB20B60PD1). Отпирающий входной логический сигнал поступает через коаксиальный разъем J1 на вход драйвера U1 (MAX5048), имеющего на выходе два сильноточных ключа для быстрого управления затвором Q9. Необходимое для питания первичной цепи напряжение 250 В формируется с помощью повышающего DC/DC преобразователя U2 на основе интегральной микросхемы UC3438. Обратная связь осуществляется резистивным делителем *R*11/*R*12. Высокое зарядное напряжение формируется высоковольтным источником постоянного напряжения HVDC и через составной резистор *R*9 номиналом 150 кОм параллельно подается на высоковольтный ключ и ЭОЗ. Резистор *R*10 (100 Ом) обеспечивает высокое выходное сопротивление управляющего генератора и задает требуемый ток *I* в первичных обмотках управляющих трансформаторов. Ток вторичной цепи трансформаторов через резисторы *R*1-*R*8 (5,1 Ом) формирует положительное напряжение на затворе U_{GE} транзисторов для их перехода в открытое состояние. Диод D1 служит для защиты транзистора Q9 от перенапряжения.

На основе высоковольтного ключа, состоящего из восьми 1200-В IGBT типа IRG4BH20K-L, создан 8-кВ коммутатор для питания биполярной

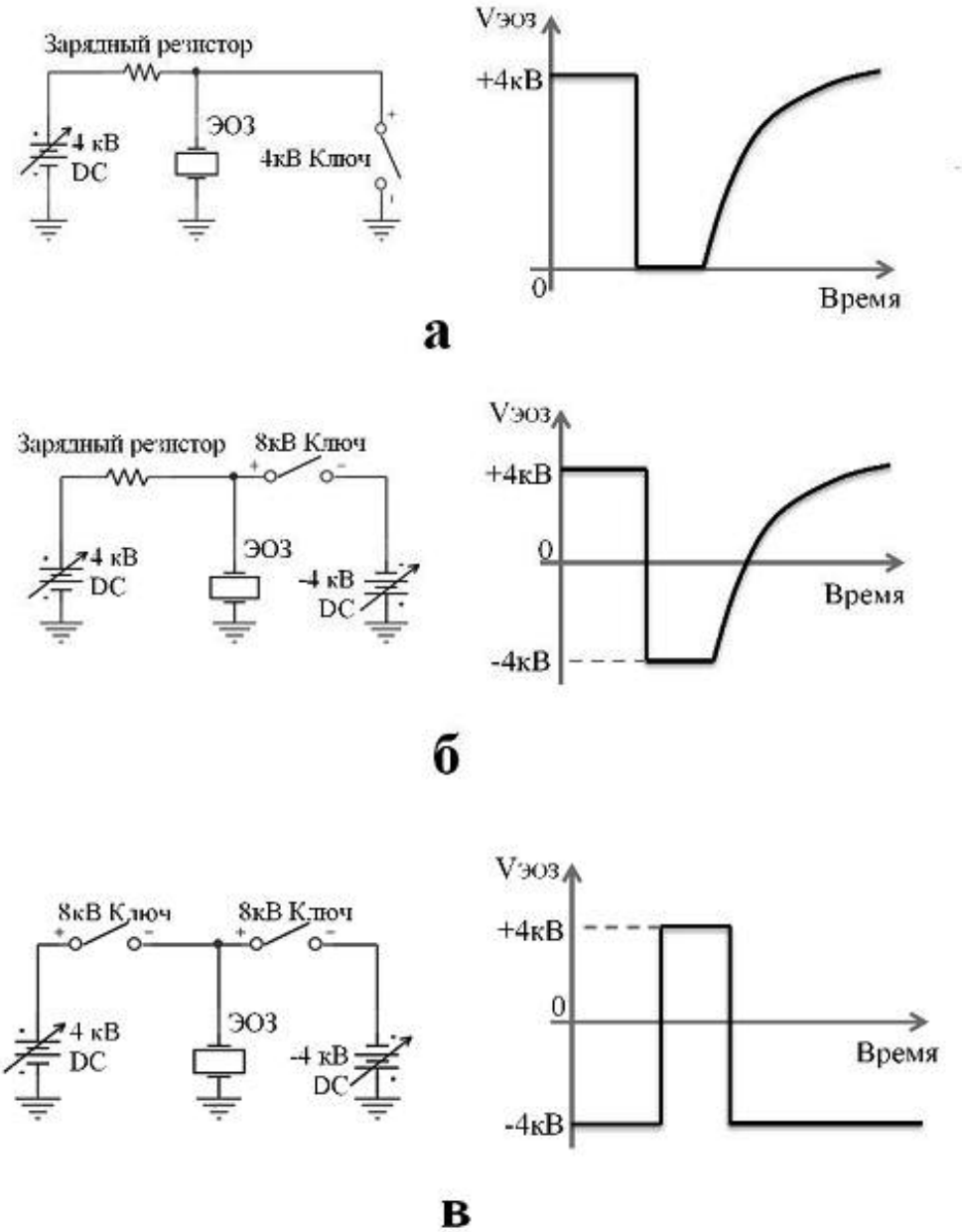

Рис. 2. Схемы включения ЭОЗ: а) униполярная схема включения ЭОЗ; б) биполярная схема ЭОЗ; в) импульсная схема ЭОЗ

и импульсной схемы ЭОЗ. В остальном схема генератора импульсов аналогична представленной на рис. 3. Разработанные высоковольтные генераторы обладают высокой надежностью, компактностью (габаритные размеры 130x110 мм) и, благодаря модульности, легко модифицируется под требуемое напряжение.

Результаты. Выходные характеристики

При исследовании работы высоковольтного генератора на емкостную нагрузку использовался измерительный щуп Tektronix P6015A с полосой пропускания 75 МГц и осциллограф LeCroy WaweSurfer 432 с полосой 500 МГц. Осциллограммы напряжения, полученные для 4-кВ унипо-лярной схемы включения ЭОЗ (см. рис. 2, а) в разных временных масштабах, показаны на рисунке 4, а. На представленных зависимостях видна высокая степень однородности вершины импульса; время восстановления напряжения по уровню 0,99 составляет около 7,5 мкс.

В процессе исследований возникла проблема измерения формы напряжения на ЭОЗ из-за высокой скорости коммутации ключа. Штатные быстродействующие осциллографические пробники имеют недостаточное рабочее напряжение (500 В), высоковольтный же пробник Tektronix P6015A имеет полосу частот f = 75 МГц, что соответствует времени нарастания около 0,35/f = 4,7 нс и не позволит отобразить фронт исследуемого сигнала.

Кроме того, процедура измерения напряжений с наносекундными временами нарастания и спада является нетривиальной, так как пробник регистрирует не только падение напряжения на объекте, но и производную от магнитного потока, пронизывающего пространство между объектом и щупом. В результате регистрируемая форма импульса зависит от его расположения в пространстве.

В силу вышесказанного для измерения времени спада напряжения была применена методика, основанная на измерении тока, протекающего через емкость оптического затвора. Схема измерения представляет собой модифицированную схему униполярного включения ЭОЗ (рис. 2, а) с последовательно соединенным токоограничивающим и измерительным резистором в разрядной цепи емкости. В качестве измерительного резистора использовался специальный низкоиндуктивный токовый шунт (R = 0,1 Ом). Собственное время отклика шунта не превышало 1 нс. Зависимость силы тока, протекающего через конденсатор, имитирующий электрооптический затвор, от времени на фронте спада для 8-кВ биполярной схемы представлены на рис. 4, б.

Время нарастания напряжения на конденсаторе по уровням 0,1 и 0,9 вычислялось путем нахождения двух временных точек на осциллограмме, соответствующих делению импульса тока на три зоны с соотношением площадей 10%, 80% и 10%, соответственно.

Результаты измерения времени спада импульса при напряжениях 4 и 8 кВ от емкости коммутируемой нагрузки представлены на рис. 5. Типичные значения емкостей электрооптических затворов для модуляции добротности Nd: YAG-лазера лежат в диапазоне 10─30 пФ, что соответствует вре-

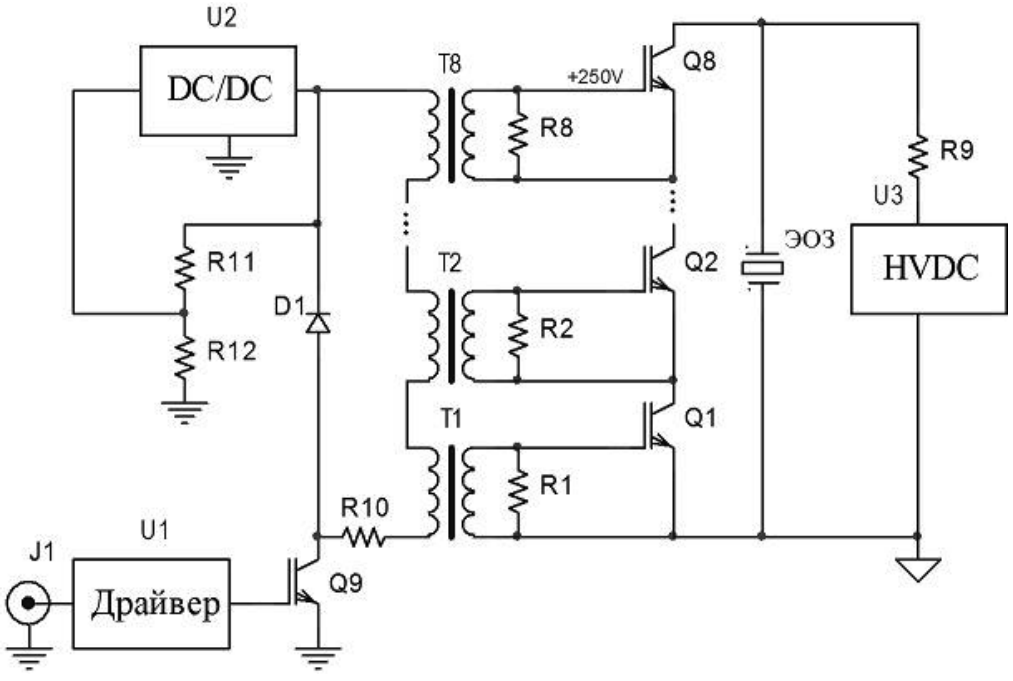

Рис. 3. Схема высоковольтного генератора

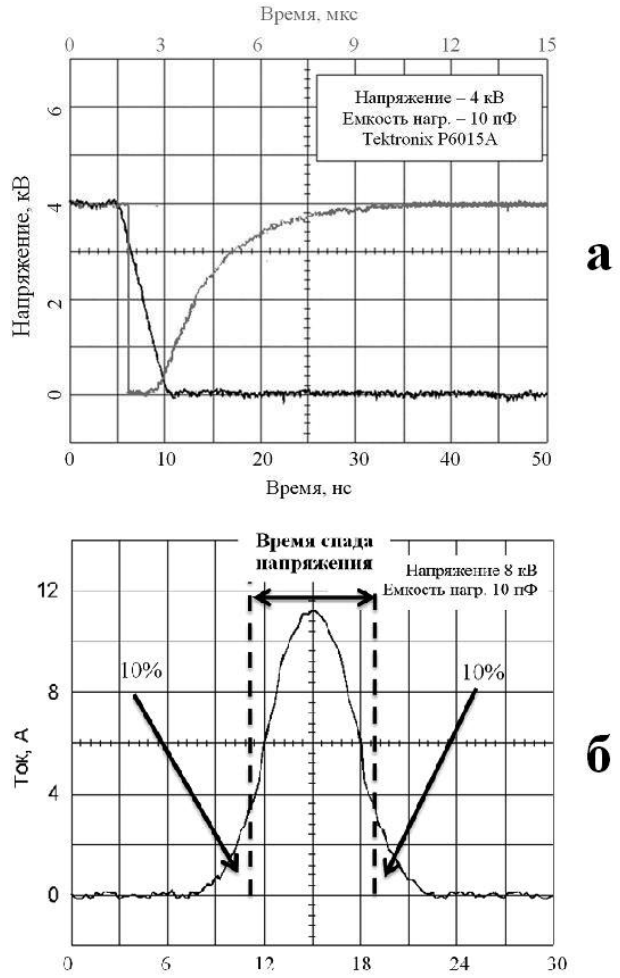

Рис. 4. Эксперименты: а) осциллограмма напряжения 4-кВ однополярной схемы включения ЭОЗ в двух временных масштабах: в микросекундном (серый график) и наносекундном (черный график) диапазонах; б) осциллограмма зависимости тока от времени на спаде 8-кВ биполярной схемы включения ЭОЗ через измерительный резистор

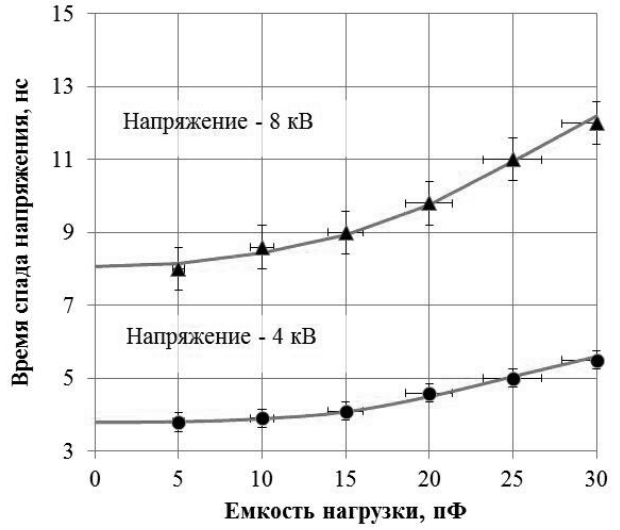

Рис. 5. Времена спада напряжения емкости с 95% доверительным интервалом: нижний график — при напряжении 4 кВ; верхний — при напряжении 8 кВ

менам спада напряжения 3,9─5,4 нс при коммутируемых 4 кВ и 7,9─11,9 нс при 8 кВ.

В результате работы были созданы генераторы для питания униполярной, двухполярной и импульсной схема возбуждения затвора (см. рис. 2). В сравнении с униполярной схемой в биполярной и импульсной времена спада увеличились почти в два раза, что связано как с меньшим быстродействием ключа, так и с большими значениями импульсного тока через ячейку Поккельса при равных значениях емкости затвора.

Заключение

Проведенные исследования позволили создать высоковольтный коммутатор на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором и серию генераторов импульсов напряжения на его основе с наносекундными временами нарастания и спада и с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Преимущество рассмотренного подхода заключается в простоте конфигурации схемы, масштабируемости, стабильности рабочих параметров в течение всего срока службы генератора, большем ресурсе работы, полном управлении состоянием прибора (как включением, так и выключением), гальванической развязке высоковольтных силовых цепей от цепей управления.

Достигнуты времена переключения 3,9─4,5 нс при коммутируемых 4 кВ и 7.9─8.3 нс при 8 кВ с модулятором добротности на основе ячейки Поккельса в качестве нагрузки. При соблюдении надлежащих мер по отводу тепла от транзисторов возможна работа с частотами повторения до 100 кГц и до 1 МГц в пачке.

Такие генераторы могут найти широкое применение не только для управления электрооптическими затворами, но и в других областях, например, для управления вытягивающей сеткой времяпролетного масс-спектрометра с задержанной экстракцией или генерации высокочастотного барьерного разряда в системах формирования электрогидродинамических потоков [19─21], а также для вывода пучка ускорителя, в системах широкополосной радиолокации и ультразвуковой локации.

Литература

1. *See B.A.* A fast, high voltage, avalanche transistor Q switch driver.— Adelaide: Electronics Research Laboratory, 1980.

2. *Baues P.*, *Ulrich M.* // J. Applied Phys. 1973. V 9. No. 44. P. 4067

3. *Kajava T., Gaeta A.L.* // Optics letters. 1996. V. 21. No. 16. P. 1244

4. *Rutten T.P., Wild N.* // Rev. Sci. Instrum. 2007. No. 78. P. 1063
5. *Koechner W.* Solid-State Lasers.— N.Y.: Springer, 2006.
6. *Kocher E.R., Novak R.P.* // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1980. No. 13. P. 542.
7. *Tomov I.V., Fedosejevs R., Richardson M.C.* // Rev. Sci. Instrum. 1979. V. 50. P. 9
8. *Roschger E., Schwarzenbach A., Balmer J.E., Weber H.P.* // Quantum Electronics. 1985. V 21. P. 465
9. *Wu Q., Tian W.* // 11th ICEPT-HDP. 2010. P.774
10. *Jinyuan L., Bing S., Zenghu C.* // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. No. 8. P.3066
11. *Dharmadhikari J.A., Dharmadhikari A.K., Mehendale N.Y., Aiyer R.C.* // Optics & Laser Technology. 1998. V. 30. No. 6. P. 447
12. *Nampoothiri A. V., Kundu T., and Bhanu P.* // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69, No. 3. P. 1240
13. *Conradi M.S.* // Rev. Sci. Instrum. 1977. V. 48. No. 3. P. 359
14. *Tamuri A.R., Bidin N., Daud Y.M.* // IJRRAS. 2010. V. 3. No. 2. P. 143
15. *Hohm D., Mirkov M., Sierra R.A., Welches R.S.* / Patent EP2054979A2. 2009.
16. *Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю.*— М.: ИПЭФ РАН, 2004.
17. *Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю.* // ПТЭ. 2006. № 1. С. 88
18. *Gaudreau P.J. et al.* / U.S. Patent 6,900,557 B1. 2005.
19. *Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А.* // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 12. С. 1093
20. *Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., Ребров И.Е., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А.* // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 222
21. *Khomich V.Yu., Malashin M.V., Moshkunov S.I., Rebrov I.E., Shershunova E.A.* / SPEEDAM 2012. Sorrento. 2012. P. 1512

High Voltage IGBT Switches for Electro-optical Shutter Control

S.I. Moshkunov, I.E. Rebrov, and V.Yu. Khomich

I

Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences.
18 Dvortzovaya nab., St.— Petersburg, 191186, Russia.
E-mail: re_i@rambler.ru

The design features of the switches based on insulated-gate bipolar transistor for Electro-optical shutter control were studied in the paper. The driver for Q-switch control was described. A series of compact generators with nanosecond rise and fall times and repetition rates up to 100 kHz were created.

PACS: 07.50.Ek, 42.79.— e
Keywords: solid-state switch, electro-optical shutter, high-voltage pulse generator.

Bibliography ─ 21 references *Received October 10, 2013*