

<i>Алексеев Ростислав Александрович</i>	—	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, RostAlexeev@mail.ru
<i>Котельников Юрий Петрович</i>	—	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, kotel@mail.ifmo.ru

2 ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.317.7.027.3; 621.319.027.3 ПОСТРОЕНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МОДУЛЯТОРА С НАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИМ ЗАТВОРОМ В СОСТАВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА

Д.С. Терновский, В.В. Тогатов

Рассмотрен режим сверхбыстрого включения МОП-транзистора, при которых время переключения прибора не превышает единиц наносекунд. Дано объяснение механизма сверхбыстрого переключения. Приведены результаты экспериментов, подтверждающих механизм сверхбыстрого переключения. Рассмотрена возможность построения высоковольтного модулятора с наносекундным фронтом на основе эффекта сверхбыстрого переключения МОП-транзистора. Приведены структурная схема и характеристики разработанного высоковольтного импульсного модулятора для управления электрооптическими затворами с амплитудой импульса до 6 кВ и фронтом, не превышающим 5 нс.

Ключевые слова: высоковольтная техника, импульсная техника, техника наносекундного диапазона, электрооптический затвор.

Введение

При формировании высоковольтных импульсов напряжения с наносекундным фронтом используются электронные коммутаторы, построенные на основе различных физических механизмов [1–3]. В последнее время появилась информация о разработке высоковольтных модуляторов с наносекундным фронтом, построенных на основе высоковольтных МОП-транзисторов [4]. Известно, что типовые времена переключения этих транзисторов составляют десятки наносекунд, в то время как фронт импульсов напряжения на выходе модуляторов не превышает единиц наносекунд. В известной нам литературе объяснения механизма такого быстрого переключения МОП-транзисторов не дано.

Данная статья посвящена анализу режима сверхбыстрого переключения МОП-транзистора, его реализации при включении полевого прибора и построению на его основе высоковольтного модулятора с наносекундным фронтом.

Анализ режима сверхбыстрого включения

Исследуется процесс включения МОП-транзистора в схеме, приведенной на рис. 1. Силовая часть схемы, помимо исследуемого транзистора T_2 , включает сопротивление нагрузки R_3 и высоковольтный источник V_n . Схема дополнена элементами L_c и L_i , учитывающими индуктивности выводов транзистора и токоподводящих дорожек в цепях стока и истока, а также емкостями $C_{зи}$ и $C_{зс}$. Схема управления состоит из стандартного

драйвера M_1 и усилительного каскада на p -канальном транзисторе T_1 . Схема дополнена цепью отрицательного смещения, подаваемого на затвор T_2 . Она включает регулируемый источник U_{OBR} и резистор R_2 .

На вход исследуемого транзистора T_2 со стока T_1 подаются прямоугольные импульсы напряжения с амплитудой U_{IP} . Так как сопротивление канала T_1 равно 0,02 Ом, а импульсный ток стока, идущий на перезаряд емкостей $C_{зи}$ и $C_{зс}$, может достигать 50 А, то источник входного напряжения в первом приближении можно рассматривать как идеальный источник э.д.с. На этапе задержки емкость $C_{зи}$, заряженная к моменту включения до обратного напряжения U_{OBR} , резонансно перезаряжается через индуктивность в цепи истока $L_{и}$. Если напряжение, подаваемое в цепь затвора, равно U_{IP} и сопротивление в цепи затвора близко к нулю, то ток истока в момент окончания задержки ($t = t_3$) оказывается равным

$$i_{и}(t_3) = \sqrt{\frac{C_{зи}}{L_{и}} \left[(U_{IP} + U_{OBR})^2 - (U_{IP} - U_{пор})^2 \right]} \quad (1)$$

Здесь $U_{пор}$ – пороговое напряжение, определяющее момент окончания задержки

$u_{зи}(t_3) = U_{пор}$. Оценим величину $i_{и}(t_3)$, если в качестве коммутирующего МОП-транзистора используется IRFBE30 со следующими параметрами: крутизна $s = 3$ А/В, пороговое напряжение $U_{пор} = 4$ В, емкость затвор-исток $C_{зи} = 1,3$ нФ и индуктивность в цепи истока $L_{и} = 5$ нГн. При максимальном размахе входного напряжения $U_{пр} = U_{обр} = 20$ В величина оказывается равной 18,7 А. Этот ток резко возрастает, если индуктивность в цепи истока $L_{и}$ становится ниже 5 нГн. Как будет показано ниже, увеличение принципиально важно

для реализации режима сверхбыстрого включения МОП-транзистора. $i_{и}(t_3) \approx i_{и}(t_3) :$

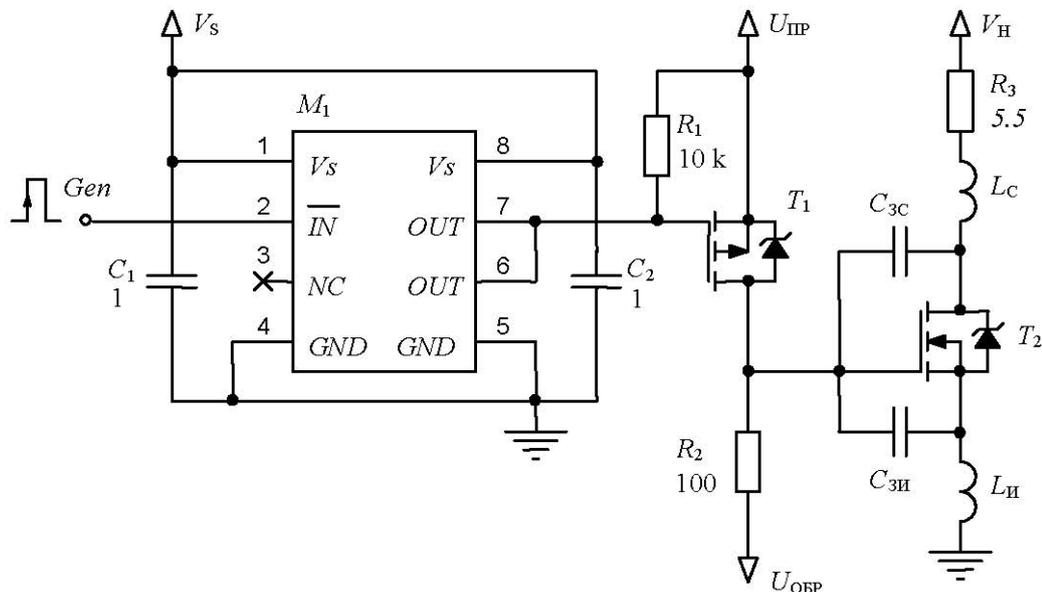


Рис. 1. Схема для исследования процесса включения МОП-транзистора: M_1 – MIC4421ABM, T_1 – IRF7416, T_2 – IRFBE30

После окончания этапа задержки начинается рост тока стока. Как и в работе [5], при анализе процесса включения будем использовать кусочно-линейную аппроксимацию передаточной характеристики МОП-транзистора. Согласно этой аппроксимации, ток стока равен

$$i_c = \begin{cases} 0 & \text{при } U_{зи} \leq U_{пор} \\ s(U_{зи} - U_{пор}) & \text{при } U_{зи} > U_{пор} \end{cases}, \quad (2)$$

где s – крутизна транзистора, $U_{зи}$ и $U_{пор}$ – напряжение затвор-исток и пороговое, соответственно. Можно показать, что при сформулированных допущениях процесс нараст-

тания тока стока при включении МОП-транзистора описывается выражением

$$i_c(t) = I_{пр} \left(1 - e^{-\frac{t}{sL_{и}}} \right) + i_{и}(t_3) e^{-\frac{t}{sL_{и}}}. \quad (3)$$

Здесь – установившееся значение тока стока в активном режиме, определено в (1). При выводе уравнения (3) за начало отсчета $t = 0$ принят момент окончания этапа задержки.

$$I_{пр} = s(U_{пр} - U_{пор}) i_{и}(t_3) \quad (4)$$

Из выражения (3) следует, во-первых, что рост тока стока при включении происходит с постоянной времени. Во-вторых, при $t = 0$ ток стока скачком увеличивается до значения $\tau = sL_{и}i_{и}(t_3)$. Этот результат является принципиальным, так как определяет режим

сверхбыстрого включения полевого прибора. Физический смысл такого режима заключается в том, что до тех пор, пока ток стока не достигнет величины, отрицательная обратная связь, обусловленная индуктивностью $L_{и}$, в приборе отсутствует. При этом рост

тока стока вплоть до значения $i_{и}(t_3)$, $i_{и}(t_3)$ не превышает единиц наносекунд и

определяется темпом заряда емкости $C_{зи}$ большим током $i_{и}(t_3)$. В дальнейшем рост тока стока осуществляется в соответствии с уравнением (3) с постоянной времени. В наибольшей степени режиму сверхбыстрого включения отвечают МОП-транзисторы с малой индуктивностью в цепи истока, имеющие отрицательное смещение в цепи затвора в момент включения. Отрицательное смещение увеличивает время заряда емкости $C_{зи}$ до напряжения $U_{пор}$. При этом ток в цепи истока к моменту окончания этапа задержки

$$\tau = sL_{и}i_{и}(t_3) \quad (5)$$

очевидно, что режим сверхбыстрого включения может быть реализован только при условии незначительной индуктивности в цепи стока.

Возможность реализации режима сверхбыстрого включения полевого прибора подтверждена нами прямыми экспериментами. На рис. 2 приведены три осциллограммы включения высоковольтного транзистора IRFBE30 на омическую нагрузку 5,5 Ом при напряжении источника питания 400 В. Осциллограмма 1 соответствует включению транзистора прямоугольным импульсом затворного напряжения с амплитудой 10 В без предварительного обратного смещения на затворе. Осциллограммы 2 и 3 соответствуют включению транзистора, при котором импульс затворного напряжения с той же амплитудой подавался на затвор, предварительно смещенный обратным напряжением 10 В и 20 В соответственно. Каждая из трех осциллограмм имеет два явно выраженных участка.

Первый – режим сверхбыстрого включения, не превышающий 3 нс, второй – установление стационарного состояния с постоянной $sL_{и}$. Зависимость тока истока в момент окончания задержки от обратного напряжения $U_{обр}$ дается выражением (1). При указанных выше значениях параметров транзистора IRFBE30 величины тока $i_{и}(t_3)$, $i_{и}(t_3)$, рассчитанные по формуле (1) для трех значений обратного напряжения 0, 10, 20 В,

оказались равными 4,2, 9,75 и 15 А. Соответствующие экспериментальные значения $i_{и}(t_3)$, найденные из осциллограмм на рис. 2, составили 7,2, 14,4 и 21,6 А. Отмеченное различие связано с тем, что время переключения транзистора в этом режиме хоть и мало, но конечно. Поэтому к моменту, когда ток стока достигает тока истока, последний успевает существенно возрасти относительно своего значения в момент окончания задержки.

На рис. 3 приведены три осциллограммы включения того же транзистора IRFBE30 на нагрузку 43 Ом при напряжении источника 400 В и прямом затворном напряжении $U_{пр} = 10$ В. Так как крутизна этого транзистора составляет $s = 3$ А/В, то он заведомо включался с заходом в режим насыщения. При этом ограничение тока стока осуществлялось на уровне 9 А. Осциллограмма 1 снималась при отсутствии напряжения обратного смещения в цепи затвора, а осциллограммы 2 и 3 – при наличии предварительного обратного смещения 10

и 20 В соответственно. Как и в предшествующем случае (рис. 2), расчетные значения тока $i_n(t_3)$, соответствующие обратным напряжениям в цепи затвора 0, 10 и 20 В, равны 4,2, 9,75 и 15 А. Два последних значения тока превосходят ток, определяемый внешней цепью и равный 9 А. Поэтому на осцилло-граммах 2 и 3 режим сверхбыстрого включения реализуется вплоть до ограничения тока. При этом время включения составляет 2–3 нс.

На осциллограмме 1 экспериментальное значение тока $i_n(t_3)$ равно 6 А, что близко к расчетному значению. После достижения этой величины темп роста тока резко снижается, и дальнейшее изменение тока вплоть до ограничения осуществляется в соответствии с постоянной установления. Таким образом, рассмотренные экспериментальные зависимости тока стока на рис. 2 и 3 хорошо укладываются в концепцию сверхбыстрого включения транзистора. $\tau = sL_{\text{и}}$

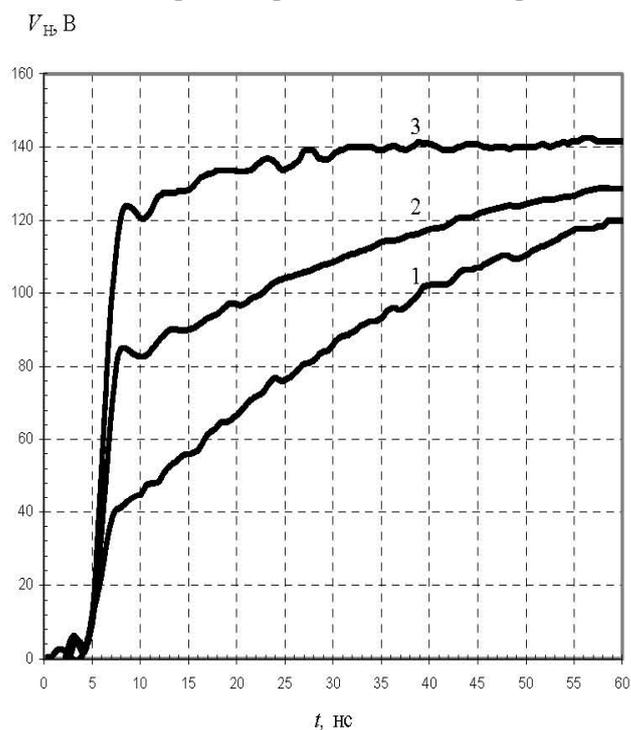


Рис. 2. Осциллограмма напряжения при включении транзистора IRFBE30 на резистивную нагрузку $R_3 = 5,5$ Ом, $V_H = 400$ В, $U_{\text{ПР}} = 10$ В;
1 – $U_{\text{ОБР}} = 0$ В; 2 – $U_{\text{ОБР}} = 10$ В; 3 – $U_{\text{ОБР}} = 20$ В

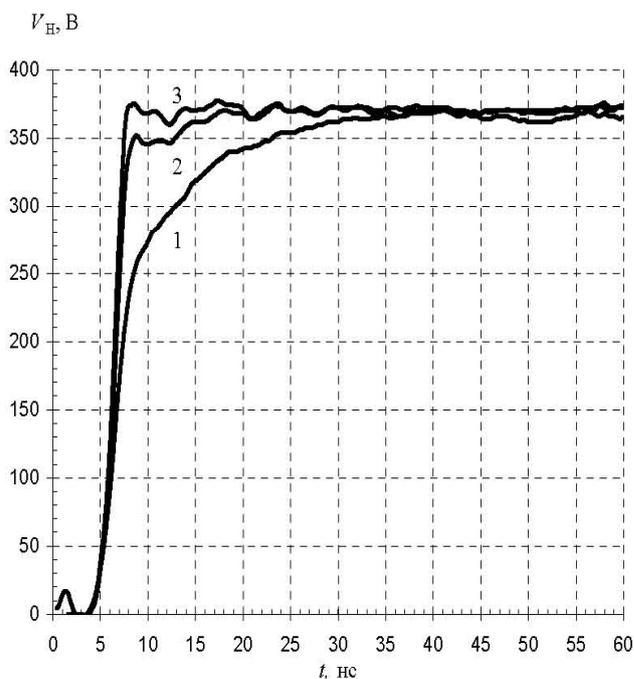


Рис. 3. Осциллограмма напряжения при включении транзистора IRFBE30 на резистивную нагрузку $R_3 = 43 \text{ Ом}$, $V_H = 400 \text{ В}$, $U_{\text{ПР}} = 10 \text{ В}$;
 1 – $U_{\text{ОБР}} = 0 \text{ В}$; 2 – $U_{\text{ОБР}} = 10 \text{ В}$; 3 – $U_{\text{ОБР}} = 20 \text{ В}$.

В рамках общепринятых представлений длительность процесса включения определяется зарядом собственных емкостей транзистора. В этом смысле при подаче в цепь затвора предварительного обратного смещения время включения должно увеличиться, так как при включении происходит дополнительный перезаряд емкостей транзистора. Однако в режиме сверхбыстрого включения, согласно сказанному выше, имеет место обратная картина, что и подтверждается результатами прямых экспериментов.

Смысл режима сверхбыстрого включения можно пояснить и иначе. Максимальная скорость роста тока в полевом транзисторе ограничена величиной

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{max}} = \frac{U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}}}{L_{\text{и}}}$$

В кремниевых МОП-транзисторах $U_{\text{зи}} \leq 20 \text{ В}$, так как при больших напряжениях возможен пробой диэлектрика (оксида). Если принять $U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}} = 15 \text{ В}$, а $L_{\text{и}} = 10 \text{ нГн}$, то $A/\text{нс}$. Режим сверхбыстрого включения позволяет обойти это ограничение за счет предварительной накачки тока в индуктивности истока, осуществляемой по цепи затвора.

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{max}} = 1,5$$

Схема модулятора

Режим сверхбыстрого включения использован нами при создании высоковольтных модуляторов с наносекундными фронтами для управления электрооптическими затворами. Импульсы напряжения, формируемые этими модуляторами, при амплитуде 2–6 кВ характеризуются длительностью фронта 2–4 нс [6].

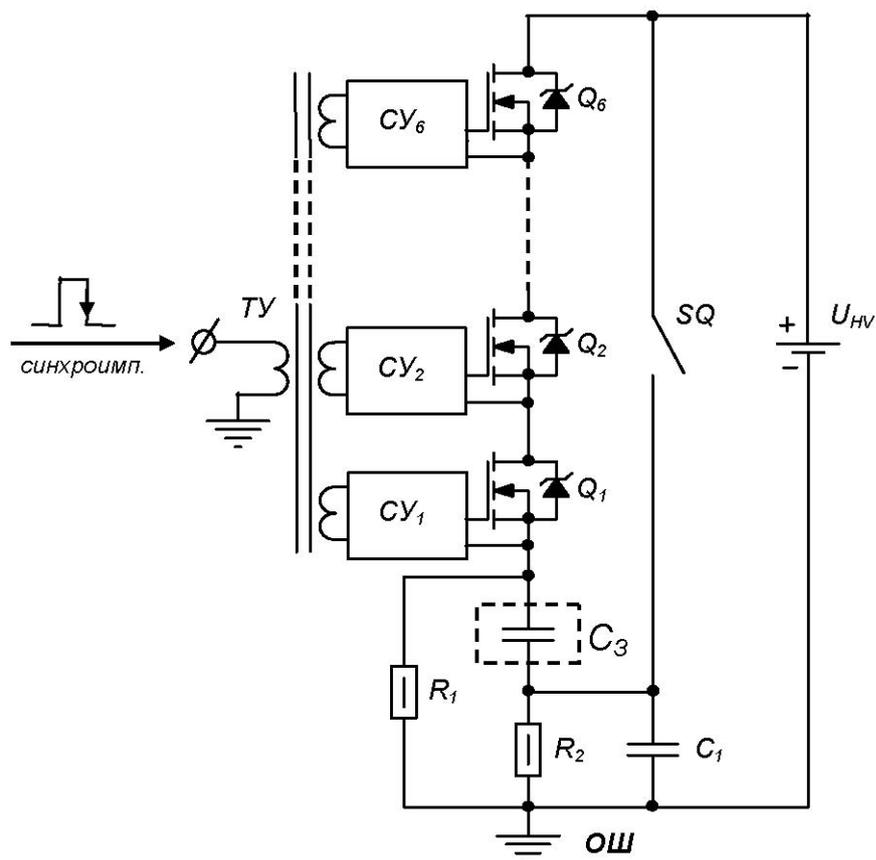


Рис. 4. Схема модулятора

Схема модулятора представлена на рис. 4. Нагрузкой является емкость электрооптического затвора C_3 . Модулятор включает в себя источник высокого напряжения U_{HV} . Функции коммутирующего элемента выполняет последовательное соединение высоковольтных МОП-транзисторов Q_1-Q_6 . Каждый транзистор имеет независимую схему управления CY_1-CY_6 . Подача синхроимпульсов осуществляется с помощью трансформатора управления ТУ.

В паузе между импульсами высокое напряжение блокируется транзисторами Q_1-Q_6 , напряжение на затворе C_3 равно нулю. При подаче синхроимпульса на вход модулятора трансформатор управления ТУ передает команду на включение каждой схемы управления СУ. Схемы управления одновременно включают высоковольтные МОП-транзисторы в режиме сверхбыстрого включения. Это позволяет зарядить емкость электрооптического затвора C_3 большим импульсным током за единицы наносекунд. Ток заряда замыкается по контуру $(+)U_{HV}-Q_6-Q_1-C_3-C_1-OШ((-)U_{HV})$. Емкость конденсатора C_1 много больше емкости затвора C_3 .

В схеме предусмотрена подача уставки высокого напряжения при помощи выключателя SQ . Этот выключатель также обеспечивает работу модулятора в режимах «switch-on» (с положительным фронтом) и «switch-off» (с отрицательным фронтом).

В отличие от существующих, разработанный модулятор выполнен в виде единой печатной платы, на которой расположен и высоковольтный источник. Для работы в режиме «switch-off» на плате предусмотрен разъем, к которому подключается дополнительный высоковольтный источник. Этот источник разработан нами и может поставляться в комплекте с модулятором. Модулятор (рис. 5) включает следующие основные компоненты: быстродействующий электронный коммутатор, блок накопительных конденсаторов, заряжаемых в паузе между импульсами, управляющие драйверы, трансформатор, с помощью которого осуществляется запуск модулятора, высоковольтный источник питания для формирования выходных импульсов в режиме «switch-on» и низковольтный – для цепей управления. Модулятор управляется внешними синхроим-

пульсами с частотой до 10 кГц. Регулировка амплитуды выходного импульса осуществляется либо встроенным потенциометром, либо дистанционно через входной разъем. Для контроля состояния платы используется светодиодная индикация, а при отсутствии высокого напряжения генерируется логический сигнал «Error». Питание платы осуществляется от низковольтного источника 5–30 В.

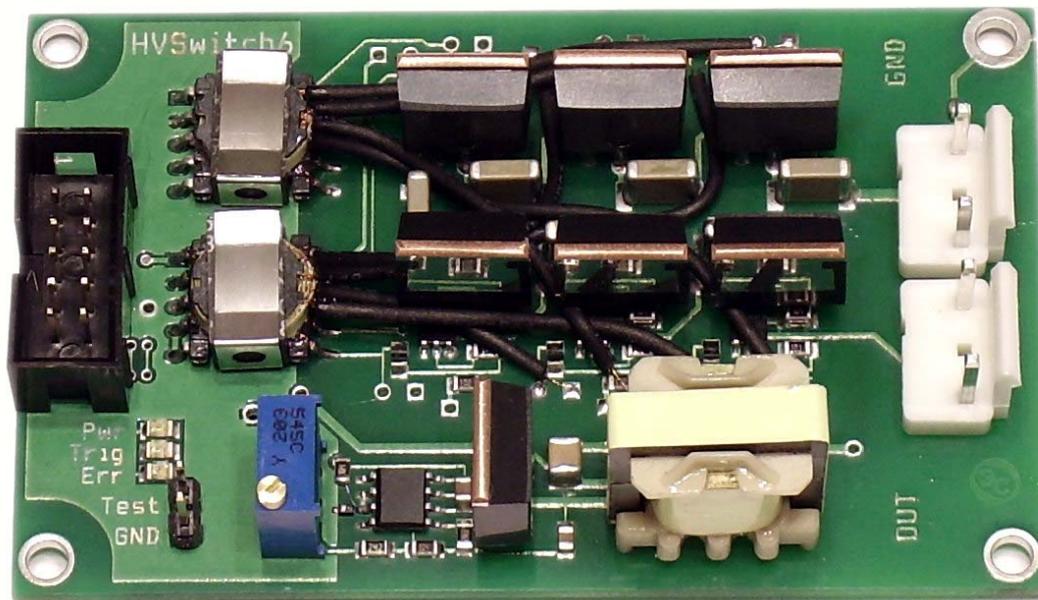


Рис. 5. Электрическая плата модулятора

Импульс напряжения, формируемый модулятором, приведен на рис. 6. Длительность фронта составляет не более 3 нс при амплитуде 4 кВ.

Проведены испытания разработанного высоковольтного импульсного модулятора в составе лазерного излучателя, установленного в технологический комплекс, предназначенный для объемной лазерной маркировки внутри прозрачных диэлектриков. В качестве нагрузки использовался электрооптический затвор типа *QDN3* («*VITRO LASER GmbH*») на кристалле *BBO*, работающий на поперечном электрооптическом эффекте. Емкость затвора составляла 6 пФ, рабочее четвертьволновое напряжение 3,6 кВ. Излучатель представлял собой одномодовый лазер на основе кристалла *Nd3+:YVO4* с продольной импульсной диодной накачкой. Импульсы накачки с энергией до 7 мДж имели длительность 90 нс и частоту повторения до 2,5 кГц.

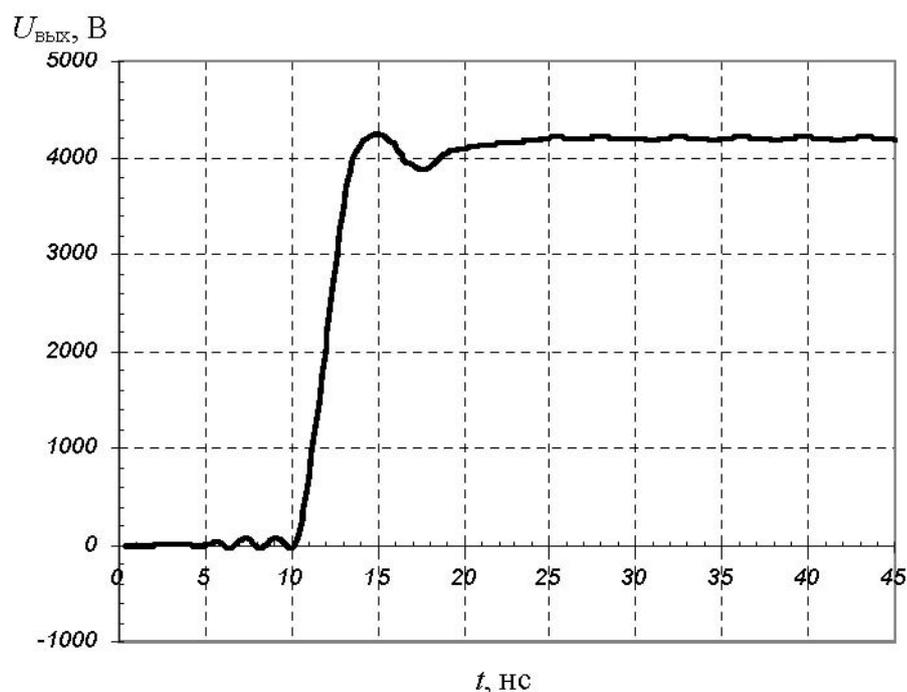


Рис. 6. Осциллограмма импульса напряжения, формируемого высоковольтным импульсным модулятором

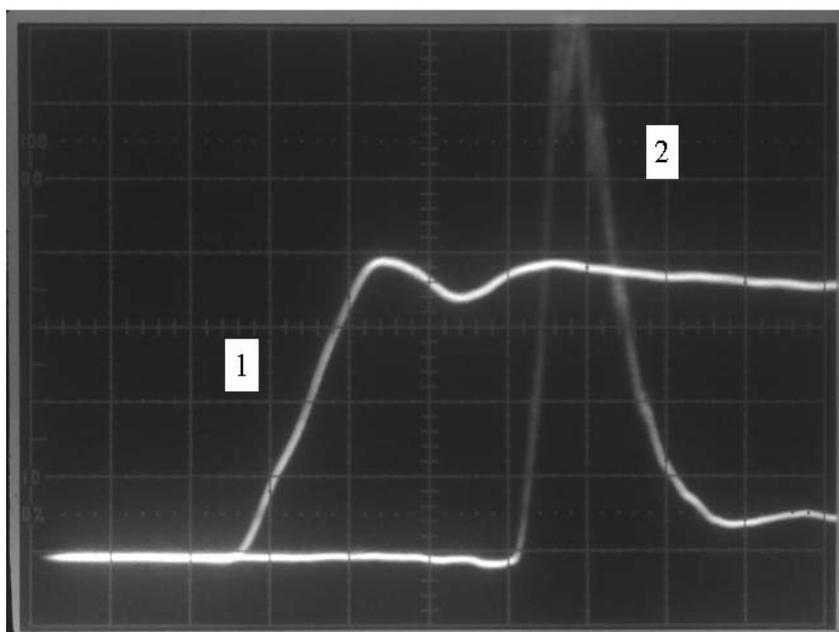


Рис. 7. Осциллограмма импульсов напряжения (1) на затворе и лазерного излучения (2).
Масштаб: напряжение на затворе – 1кВ на деление, время – 5 нс на деление

$U, В$

$t, нс$

По окончании импульса накачки с импульсного модулятора на затвор подавался открывающий импульс длительностью до 200 нс. Время развития генерации находилось в пределах 30–60 нс. В результате на выходе излучателя генерировались световые импульсы на длине волны 1064 нм с энергией до 1 мДж. Отношение энергетической эффективности работы лазера в режиме модуляции добротности к соответствующему значению эффективности в режиме свободной генерации составило величину 76 %. Длительность импульса при максимальной энергии накачки составила 3,8 нс (рис. 7). Нестабильность энергии от импульса к импульсу не превышала 2,5 %. Девияция

изменений средней мощности излучения при частоте повторения 2 кГц по измерению в течение 16 часов непрерывной работы составила $\pm 1,6\%$, что практически совпало со значением девиации в режиме свободной генерации. В результате проведения ресурс-ных испытаний не выявлено каких-либо изменений в работоспособности модулятора в течение 10⁹ импульсов.

Основные технические характеристики модулятора

—	амплитуда выходного импульса	2–6 кВ
—	стабильность амплитуды	5 %
—	максимальный ток в импульсе	30 А
—	максимальная емкость нагрузки	100 пФ
—	длительность фронта	3–8 нс
—	длительность плоской части импульса	0.2–2 мкс
—	время спада	0.5 мкс
—	максимальная частота повторения импульсов	10 кГц
—	амплитуда входного синхроимпульса	3–15 В
—	напряжение источника питания платы	5–30 В
—	потребляемая мощность	2 Вт
—	рабочий температурный диапазон	(–40)–(+60) °С
—	габаритные размеры.....	50.80.24 ммз

Заключение

1. Показано, что основным фактором, ограничивающим быстродействие МОП-транзисторов, является индуктивность в цепи истока транзистора.
2. Сформулирован режим сверхбыстрого включения МОП-транзистора, позволяющий обойти существующее ограничение по скорости переключения транзистора за счет предварительной накачки тока в индуктивности цепи истока.
3. На основе режима сверхбыстрого включения разработана схема и конструкция высоковольтного модулятора с наносекундным фронтом для управления электрооптическим затвором в составе твердотельных лазеров.
4. Разработанный модулятор используется на фирме *VITRO LASER* (Германия) в составе технологического комплекса для 3D-гравировки в прозрачных диэлектриках и в Институте общей физики академии наук (ИОФАН) (г. Москва.).

Литература

1. Аристов Ю.В., Воронков В.Б., Грехов И.В., Козлов А.К., Коротков С.В. Мощный

полупроводниковый переключатель высоковольтных импульсов с наносекундным фронтом нарастания // ПТЭ. – 2007. – № 2. – С. 87–90.

2.

Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерей С.В. Формирование киловольтных наносекундных перепадов напряжения дрейфовыми диодами с резким восстановлением // ПТЭ. – 1984. – № 5. – С. 103–105.

3.

Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерей С.В. Мощный полупроводниковый генератор наносекундных импульсов // ПТЭ. – 1986. – № 1. – С. 93–94.

4.

Behlke Power Electronics (GmbH). Fast high voltage solid-state switches. – Режим доступа: <http://www.behlke.de>, своб.

5.

Clemente S., Pelly B.R., Insidori L. Силовые полупроводниковые приборы. – Воронеж, 1995. – С. 195–215.

6.

Тогатов В.В., Гнатюк П.А., Терновский Д.С. Высоковольтный импульсный модулятор с наносекундным фронтом // ПТЭ. – 2007. – № 6. – С. 134–135.

<i>Терновский Дмитрий Сергеевич</i>	—	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, dm-ternovsky@mail.ru
<i>Тогатов Вячеслав Вячеславович</i>	—	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, dm-ternovsky@mail.ru