

Быстродействующий каскадный ключ

с полевым управлением

Олег Бономорский

elti_bon@mail.ru

Павел Воронин

VoroninPA@mpei.ru

Николай Щепкин

ShchepkinNP@mpei.ru

Эффективность той или иной конструкции приборов силовой электроники может быть оценена величиной суммарных потерь мощности, приходящихся на единицу площади кристалла. В общем случае эти потери имеют следующие составляющие:

- потери мощности во входной цепи ключа, или потери на управление;
- статические потери мощности, или потери в проводящем и блокирующем состоянии ключа;
- динамические потери, или потери в переходном процессе переключения.

Таким образом, суммарные потери мощности могут быть определены следующим выражением:

$$P_{\Sigma} = P_{упр} + P_{ст} + P_{дин}$$

Задача оптимизации величины P_{Σ} относительно успешно решается только в случае комбинирования отдельных структур прибора в единую конструкцию, при условии, что каждая из структур является оптимизированной по конкретной составляющей и обеспечивает минимальный вклад в суммарную мощность.

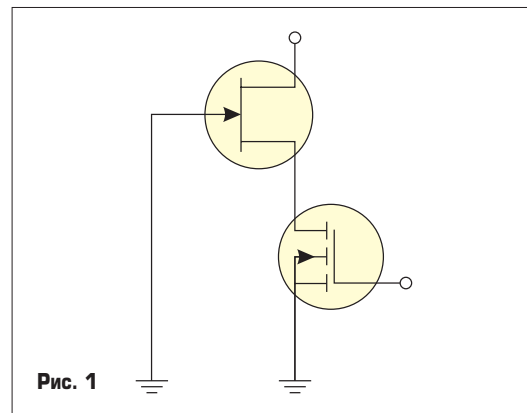
Одним из вариантов построения оптимальных структур является схема каскадного ключа, состоящая из последовательно включенных высоковольтного и низковольтного элементов структуры. Высоковольтный элемент обеспечивает блокирующие свойства ключа при минимальных токах утечки, а также минимальные остаточные падения напряжения при заданной плотности тока. Низковольтный элемент структуры «отвечает» за оптимальную динамику переключения при минимальных потерях в цепи управления.

Чтобы удовлетворить заданным требованиям, высоковольтная часть структуры должна обладать биполярным механизмом токопереноса, обеспечивающим соответствующее накопление носителей и модуляцию проводимости канала. Кроме того, для снижения потерь на дополнительное управление необходимо, чтобы высоковольтный элемент представлял собой нормально-открытую структуру, обеспечивающую проводимость тока даже при нулевом потенциале на затворе. При этом очевидно, что механизм управления подобной структурой по затвору в случае транзисторного варианта может быть только полевым. Что касается низковольтной составляющей, то при максимальных значениях ее блокирующей способности, не превышающих 100 В, наиболее близким к идеальному варианту является транзисторная ДМОП-структура с поликремниевым затвором.

Необходимым дополнением к указанным свойствам должно быть требование совместимости обеих структур в единой конструкции прибора, то есть высоковольтный элемент должен обеспечивать отсечку относительно больших внешних потенциалов на низковольтной части структуры в блокирующем и переходном состояниях. В свою очередь, переключение низковольтного транзистора должно приводить к эффективному накоплению и рассасыванию носителей в базовых областях основного силового элемента.

Таким образом, наиболее совершенной структурой каскадного ключа с точки зрения оптимизации удельных суммарных потерь мощности является последовательное соединение нормально-открытого униполярного транзистора (унитрона), обладающего механизмом модуляции внутренней проводимости (подобную структуру имеют, например, тиристор с электростатическим управлением ТЭУ и индукционный тиристор ИТ), и низковольтного МДП-транзистора (рис. 1).

Следует, однако, обратить внимание на тот факт, что с ростом тока нагрузки в приведенной схеме ключа наблюдается эффект отрицательной паразитной обратной связи по напряжению, обусловленный снижением эффективности управления униполярным транзистором при увеличении потенциала на стоке МДП. Этот эффект приводит к значительному уменьшению эквивалентной крутизны униполярного транзистора, что снижает показатель качества ключа в целом [1]. Существует несколько вариантов схемотехнических решений (рис. 2–4), компенсирующих влияние указанной обратной связи и примененных в известных разработках каскадных транзисторных структур [2, 3]. Во всех этих вариантах цепь затвора высоковольтного унитрона соединяется с общей шиной через дополнительный ключевой элемент пас-



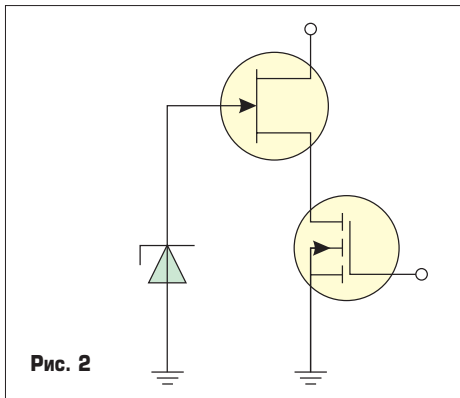


Рис. 2

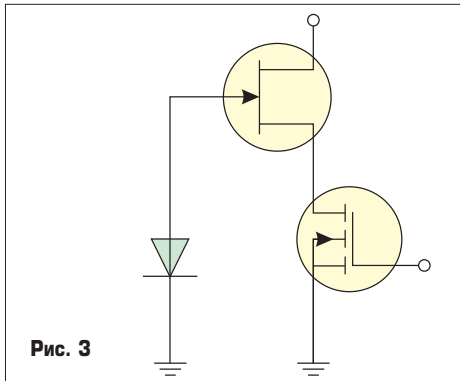


Рис. 3

сивного (стабилитрон, диод) или активного (транзистор) механизма действия. Этот дополнительный элемент обеспечивает отключение цепи управления унитаром во включенном состоянии каскода и его замыкание на общую шину в переходном режиме выключения с последующим входом в состояние блокирования. Вариант со стабилитроном обладает существенным недостатком, связанным с его относительно высоким дифференциальным сопротивлением и низким быстродействием, что вызывает дополнительную динамическую перегрузку управляющего МДП-транзистора в переходном процессе выключения. Диодный вариант не обеспечивает эффективного перезаряда входной емкости унитарона и требует дополнительных цепей запуска в переходном процессе включения, перегружающих и без того уже достаточно сложную структуру ключа. Кажется бы, относительно идеальный вариант комплементарных транзисторов обладает тем существенным недостатком, что является совершенно незащищенным в режимах токовой перегрузки, поскольку не обеспечивает пути стекания накопленных носителей, что приводит к значительным всплескам перенапряжений на управляющем транзисторе и в дальнейшем фактически вызывает его выход из строя.

Авторами статьи предложено оригинальное решение, основанное на применении в качестве дополнительного элемента n-канального МДП-транзистора, переключаемого потенциалом, наведенным в стоковой цепи аналогичного управляющего МДП-транзистора (рис. 5). Это решение обеспечивает не только требуемый механизм переключения каскодной структуры, но и приводит к автоматическому включению дополнительного МДП-транзистора в случае токовой перегрузки в ключе.

Проводилось исследование динамических характеристик предложенной структуры кас-

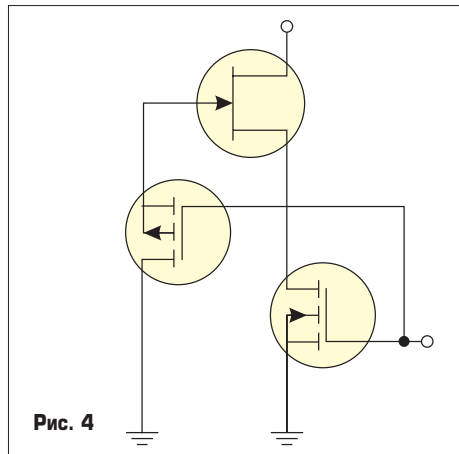


Рис. 4

кодного ключа при работе на индуктивную нагрузку в случае непрерывного тока.

Для сравнительной оценки эффективности различных вариантов схемных решений исследовались функциональные аналоги (с форсирующей емкостной цепочкой), один из которых являлся вариантом предложенного изобретения (рис. 6а), а другой в качестве элемента компенсации содержал неуправляемый диод (рис. 6б). Результаты исследований представлены на осциллограммах рис. 7, 8 для первого варианта и рис. 9, 10 — для второго. Основные динамические параметры и значения энергий потерь при переключении приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип ключа	td on, нс	td off, нс	tr, нс	tf, нс	Eon, мкДж	Eoff, мкДж
Рис. 6а	65	220	115	20	100	90
Рис. 6б	75	290	130	20	230	90

Результаты испытаний позволяют говорить о наличии так называемого эффекта «квазирегенерации» для двухтранзисторного аналога, обусловленного ускоренным перезарядом входной емкости высоковольтного унитарона за счет механизма переключения, свойственного рассматриваемой структуре, что приводит к существенному снижению потерь энергии на включение.

Наличие встроенного антипараллельного диода в структуре дополнительного МДП-транзистора (рис. 5) обеспечивает эффективный перезаряд входной емкости унитарона через этот диод и включенный управляющий МДП-транзистор без дополнительных цепей запуска, что существенно упрощает структу-

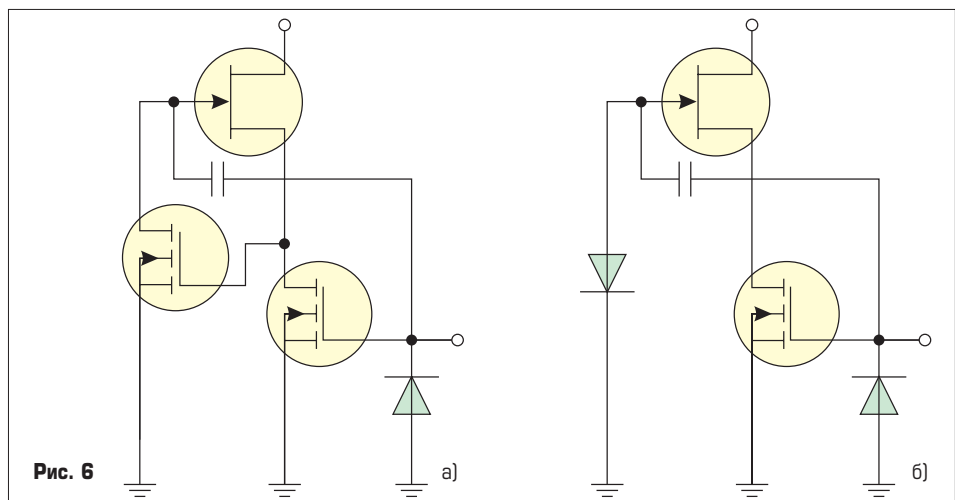


Рис. 6

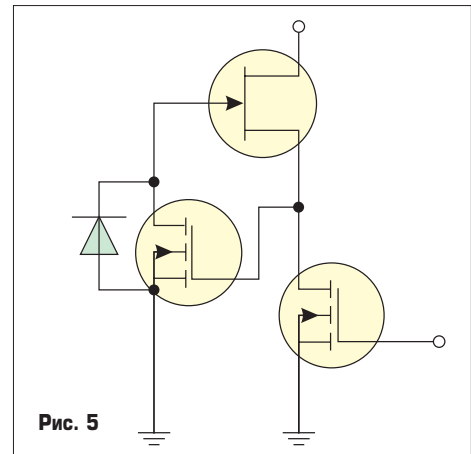


Рис. 5

ру ключа, оставляя в ней только полупроводниковые транзисторные элементы. Эффективность этого решения подтверждается исследованиями предложенной структуры. Соответствующие осциллограммы представлены на рис. 11, 12, а расчетные параметры указанных испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Тип ключа	td on, нс	td off, нс	tr, нс	tf, нс	Eon, мкДж	Eoff, мкДж
Рис. 6а без доп. цепей запуска	40	100	90	20	90	90

Полученные результаты позволяют говорить о создании относительно высоковольтного (до 1200 В) и силовоточного (до 100 А) ключа с улучшенными динамическими показателями, способного заменить соответствующие по классу напряжения транзисторы МДП и IGBT. Очевидный интерес представляет сравнительный анализ эффективности указанных функциональных аналогов, результаты исследования которых будут опубликованы в следующих номерах журнала.

Литература

1. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи. Семейства, характеристики, применение. М.: Додека — XXI. 2001.
2. Бономорский О. И., Воронин П. А. Полупроводниковое ключевое устройство с полемым управлением. Патент РФ на изобретение № 2199795. Опубл. 27.02.2003. Бюл. № 6.
3. Патент США № 5323028. Кл. 257/136. Опубл. 21.06.94.

