

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

С. А. ШАБОЯН

СИЛОВОЙ ИНТЕГРАЛЬНЫЙ КЛЮЧ

Силовые интегральные ключи, созданные благодаря усовершенствованию технологии производства полупроводниковых приборов, обладают существенными преимуществами по сравнению с современными базовыми элементами преобразовательной техники—тиристорами.

В настоящее время широкий круг задач не может быть положительно решен с помощью тиристорных преобразователей, т. к. в одних случаях они не могут обеспечить требуемую точность и быстродействие, в других—не удовлетворяют требованиям по весо-габаритным характеристикам.

Диапазон применения силовых интегральных ключей в таких ведущих отраслях индустрии, как станкостроение (в приводе подачи станков с ЧПУ на основе серийного асинхронного двигателя с силовыми интегральными ключами—коммутаторами), атомная энергетика, робототехника, преобразователи на базе интегральных ключей и т. д., за счет полной управляемости и высоких частотных свойств позволяют обеспечить формирование синусоидального напряжения с предельной частотой до нескольких сот Гц с неограниченной скоростью изменения частоты выходного напряжения [1].

Рассмотренные выше сферы не исчерпывают всей ожидаемой области применения силовых интегральных ключей, которая весьма многогранна и включает в себя наряду с массовыми потребителями, такими, как электропривод, вторичные источники питания, большое количество малых потребителей: электрохимические и электроэрозионные методы обработки. В качестве примера могут быть отмечены агрегаты бесперебойного питания, в которых силовые интегральные ключи используются для точной стабилизации и фильтрации больших токов.

Силовые транзисторы. Большинство современных переключающих транзисторов биполярные, имеют $n-p-n$ структуру с гребенчатой топологией и изготавливаются по мезопланарной технологии методом двойной или тройной диффузии на основе кремниевых пластин, полученных методом эпитаксии или по технологии «встречной диффузии» с последующей шлифовкой и полировкой рабочей стороны [2].

Надежную работу силового транзистора часто обеспечивают, подключая к нему дополнительные элементы. Для увеличения коэффи-

циента усиления собирают схему Дарлингтона с ускоряющим диодом, а для защиты от перенапряжения и протекания рекуперативных токов инвертора (рис. 1) подключают между эмиттером и коллектором силовой быстродействующий диод. Эти дополнительные элементы приводят к ряду нежелательных трудностей, монтажные провода между ними становятся источниками паразитных индуктивностей и емкостей, конструкция такого ключа становится относительно громоздкой и требует подбора элементов, в связи с чем повышается стоимость преобразуемой энергии.

Учитывая все эти недостатки силовых ключей с отдельными элементами, становится необходимым создание специальных транзисторных ключей.

Силовой интегральный ключ. Основные требования к силовым интегральным ключевым элементам, предназначенным для инверторных схем, работающих в режиме широтно-импульсной модуляции при сетевом напряжении 380 В, следующие:

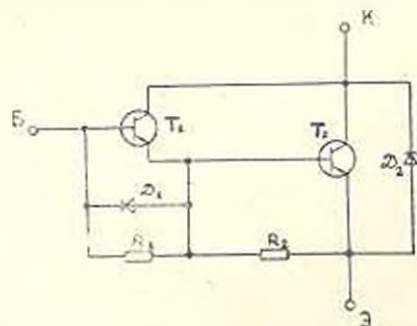


Рис. 1. Электрические схемы силового интегрального ключа.

— максимальный импульсный ток коллектора $I_{к\max} = 125 \text{ А}$;

— обратное напряжение коллектор-базы $U_{кб0} = 800 - 1000 \text{ В}$;

— время спада $t_{\text{сп}} = 2 - 3 \text{ мкс}$;

— коммутационная импульсная мощность $P_{\text{ки}}$ при напряжении коллектор-эмиттера 700 В — 40 кВт;

— коэффициент передачи тока $A_{\text{шт}}$ при номинальном токе 60 А и $U_{кб} = 3 \text{ В}$ — не менее 50.

Расчет обратных коллекторных характеристик был проведен в приближении резкого коллекторного перехода с учетом 50%-го технологического запаса по обратному напряжению $U_{кб0}$ с использованием выражения:

$$U_{кб} = E_{кр} W_k - \frac{W_k^2}{2} \cdot \frac{q N d_k}{\epsilon \epsilon_0}, \quad (1)$$

где $q = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ Кл}$ — заряд электрона; $\epsilon = 12 \text{ ф/м}$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м}$ — диэлектрическая проницаемость кремния и вакуума; $E_{кр} = 10^5 \text{ В/см}$ ($N d_k$) — критическое поле; $W_{kr} = 110 \text{ мкм}$ — ширина коллекторной области.

Выявлено коллекторного $n-p$ перехода на поверхности осуществляется кислотно-струйным травлением, обеспечивающим необходимую геометрию факки, что исключает поверхностный пробой $p-n$ перехода. Одной из наиболее важной и вместе с тем сложной задачей является проектирование и расчет топологии силового ключа, включающего в себя четыре интегральных силовых элемента, отдельный рас-

чет, а также их компоновку и оптимальное расположение на кремниевой пластине, обеспечивающей требуемые статические и динамические параметры ключа.

Топология ключа включает в себя (рис. 2) входной и выходной транзисторы T_1 и T_2 , соединенные по схеме Дарлингтона, ускоряющий диод D_1 , обеспечивающий запираание транзистора T_2 при форсированном выключении, и силовой быстродействующий диод D_2 , обеспечивающий протекание рекуперативных токов во время переходных процессов в мостовых инверторных схемах. Резисторы R_1 и R_2 получают произвольно при технологическом процессе изготовления ключа и величина их не превышает нескольких десятков Ом.

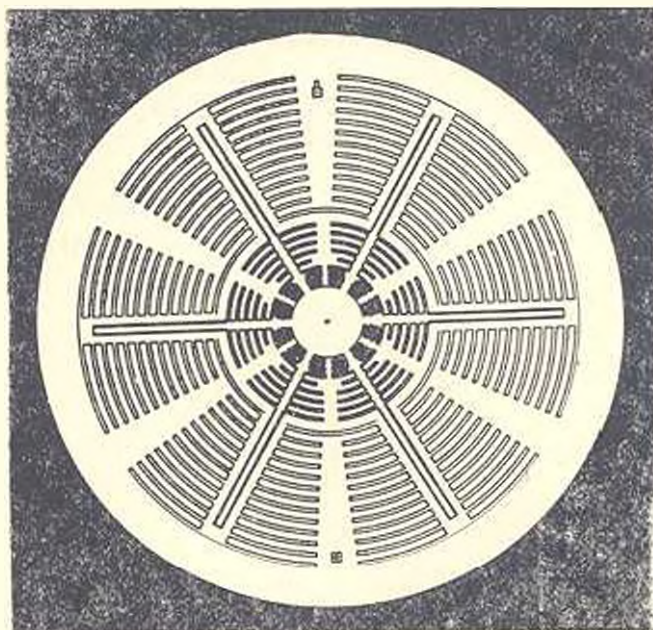


Рис. 2. Топология силового интегрального ключа.

При расчете коэффициента передачи тока составного транзистора обычно исходят из выражения:

$$h_{212} = (1 + h_{211}) h_{211}, \quad (2)$$

где h_{211} и h_{212} — коэффициент передачи тока входного и выходного транзисторов.

Для такой зависимости h_{212} обычного транзистора в режиме насыщения получено выражение с учетом эффекта модуляции проводимости коллектора [3]:

$$h_{212(1,2)} = h_{2120} \left\{ 1 - \frac{I_{c(1,2)} W_K^2}{Q_0 4 D_{3K}} \left(1 - \frac{W_K U_{c(1,2)} P_{c(1,2)}}{2 \rho_K W_K I_{c(1,2)}} \right)^2 \right\}^{-1}. \quad (3)$$

где $h_{21э}$ — малосигнальное значение $h_{21э}$; Q_6 — число Гуммеля для базовой области; ρ — удельное сопротивление коллекторной области; P — длина периметра эмиттера; W_e — эффективная ширина эмиттерной гребенки. (Индексы 1 и 2 относятся к входному и выходному транзисторам, соответственно).

Для отношений P_2/P_1 и $I_{к2}/I_{к1}$ получено значение 4 при средней ширине эмиттерных гребенок $W_e = 300\text{--}360$ мкм. В режиме насыщения и при номинальных токах средние значения: $h_{21э} \approx 7$ и $h_{21э} \approx 9$, а согласно зависимости (2): $h_{21э} \approx 70$.

Ускоряющий диод D_1 создан в виде планарного p — n перехода (1—1,5 мкм) фосфора, что обеспечивает минимальную эффективность данного p — n перехода во время выключения. Длина периметра планарного диода D_1 , рассчитанного на пропускание запирающего тока $I_{6\text{обр}}$ транзистора T_2 12—15 А, равна 7—8 см. Исходя из допустимой импульсной плотности тока ≈ 200 А/см и эффекта оттеснения тока к краям гребенки, эффективно инжектируемая ширина края гребенки составляла 100 мкм.

При создании силового быстровосстанавливающегося диода D_2 был использован коллекторный p — n переход транзистора T_2 , что и обеспечивает требуемое напряжение блокировки. Быстродействие диода D_2 обеспечивается путем снижения жизни неосновных носителей заряда τ_p (дырок) в его базе до значений $\sim 0,1\text{--}0,5$ мкс, при котором обеспечивается время восстановления обратного напряжения на диоде $\sim 0,8\text{--}0,9$ мкс. Регулирование τ_p эффективно достигается путем локального облучения полупроводниковых структур через маски на электронном ускорителе. Расчет площади S_d диода D_2 был осуществлен при условии, чтобы прямое падение $U_{пр}$ при токе $I_D = 60$ А не превышало ~ 2 В.

Отдельные элементы ключа расположены центрально-симметрично (рис. 2), что обеспечивает максимум однородности распределения протекающих токов. В таблице приведены основные электрические параметры силового ключа.

Таблица

Параметр	$I_{кн\text{ макс}}, \text{ А}$	$U_{к\text{ бо}}, \text{ В}$	$U_{кн\text{ макс}}, \text{ В}$ при $I_{к2} = 0,5 \text{ А}$ $I_{кн\text{ мин}}$ при $h_{21э} = 20$	$h_{21э}$ при $I_{к2} = 0,5 \text{ А}$ $I_{кн\text{ макс}}$ $U_{к2} = 3 \text{ В}$	$t_{св}, \text{ мкс}$ при $I_{к2} = 0,5 \text{ А}$ $I_{кн\text{ макс}}$ $U_{к2} = 20$ $I_{6\text{обр}} = 10 \text{ А}$
Значения параметров	125	800—1000	2,6	50	3

На рис. 3 представлены типичные выходные ВАХ силового интегрального ключа и зависимость $h_{21\pi}$ от тока коллектора.

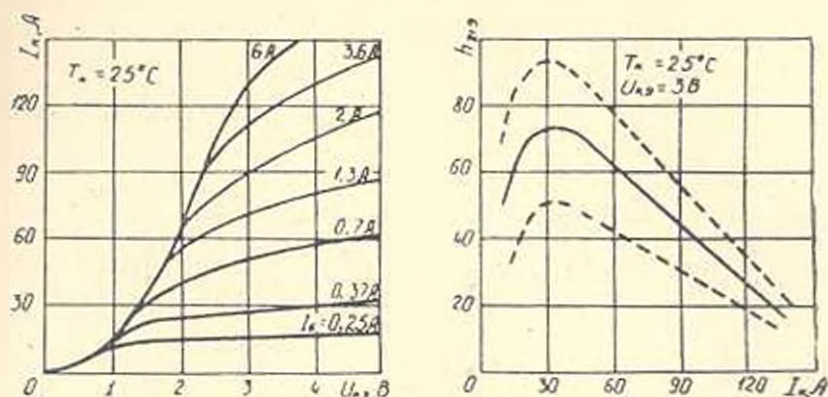


Рис. 3. а) Типичные выходные ВАХ силового интегрального ключа; б) зависимость коэффициента усиления $h_{21\pi}$ от тока коллектора силового интегрального ключа.

СКТБ ИТ

5. III. 1984.

II. Հ. ՇԱՐՈՅԱՆ

ՈՒԺԱՅԻՆ, ԻՆՏԵԳՐԱԼ ԲԱՆԱԼԻ

Ա մ փ ո փ ո մ

Աշխատանքում բերված են 125 Ա հոսանքի և 800—1000 Վ լարման սիլիցիումային ինտեգրալ բանալիների մշակման և պատրաստման առանձնահատկությունները, ինչպես նաև նրանց հիմնական էլեկտրական բնութագրերը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кузьмин В. А. Расчет силовых полупроводниковых приборов.— М.: Энергия, 1980.
2. Шабоян С. А. Силовые транзисторы на большие токи.—Электротехника, 1982, 3, с. 9—11.
3. Вярдянян А. А., Шабоян С. А. Особенности распределения токов вдоль эмиттерных гребенок силовых транзисторов.—Изв. АН Арм. ССР, (сер. ТН), 1984, т. XXXVII, № 2, с. 35—39.