

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет
Кафедра радиофизики

Практикум по радиоэлектронике

Лабораторная работа №11

Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)

Методическое руководство к вводной части практикума

Учебное пособие

Новосибирск
2008

УДК
ББК

Сборник содержит методическое руководство к лабораторной работе №11 практикума по радиоэлектронике для студентов второго курса физического факультета и геолого-геофизического факультета (специальность "геофизика"). Описание лабораторной работы содержит теоретическую и практическую части, где приведены основные сведения, необходимые для понимания, расчетов и выполнения практических заданий.

Лабораторная работа посвящена изучению полупроводниковых ключевых элементов на базе IGBT, ознакомлению с их основными рабочими параметрами. Работа проводится методом макетирования на специальном демонстрационном модуле.

Составитель:

О.В. Беликов

Рецензент:

Издание подготовлено в рамках выполнения инновационно-образовательной программы *«Инновационные образовательные программы и технологии, реализуемые на принципах партнерства классического университета, науки, бизнеса и государства»* национального проекта «Образование»

© Новосибирский государственный университет, 2008

Оглавление

1. Введение	4
2. Теоретические сведения.....	5
3. Частотные характеристики	7
4. Потери мощности	9
5. Линейный источник тока	9
6. Практические задания	10
6.1 Измерение ВАХ IGBT	10
6.2 Измерение динамических характеристик IGBT.....	10
6.3 Измерение параметров источника тока	11
7. Контрольные вопросы.....	11
Литература	12
Приложение	12

Лабораторная работа №11

Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT)

Цель лабораторной работы: ознакомление с биполярным транзистором с изолированным затвором; знакомство с ключевым и линейным режимами работы транзистора. В методическом пособии излагаются теоретические сведения, необходимые для выполнения практических заданий, а также приводятся справочные данные и формулы для расчёта основных параметров изучаемых транзисторов.

В задачу студента входит изучение динамических и статических параметров транзисторов, выполнение оценочных расчетов.

Оборудование: Двухканальный осциллограф, источник напряжения 30÷40V, два цифровых вольтметра.

Материалы и комплектующие

Демонстрационный модуль с *IGBT*.

Резисторы: ПЭВ-50 220Ω, МЛТ-2 560Ω.

1. Введение

Трудно представить современный электронный прибор без импульсного источника питания, ключевого стабилизатора или ШИМ – генератора. Компактность и надёжность работы таких устройств в значительной степени зависит от элементной базы силовой схемы. Основанием таких схем является инвертор (устройство для преобразования постоянного тока в переменный ток), выполненный на активных полупроводниковых ключах. Преобразователи прошлого столетия, работающие в диапазоне мощностей от единиц ватт до единиц киловатт, в большинстве проектировались на биполярных транзисторах, работающих в ключевом режиме. Основной недостаток таких ключей состоит в том, что биполярный транзистор управляется током. Потому, появляется трудность при проектировании преобразователей большей мощности: приходится использовать каскадные схемы, тем самым, увеличивая количество транзисторов, вследствие чего возрастают тепловые потери и снижается надёжность работы. Значительно позже после биполярных транзисторов появились полевые транзисторы. Их преимущество перед предшественниками заключается в том, что это потенциальный элемент, а не токовый (полевой транзистор управляется напряжением, а не током). Однако и эти элементы не лишены недостатков: ввиду конструктивной особенности полевые транзисторы низковольтные.

Для большинства полевых транзисторов максимальное напряжение между «стоком» и «истоком» не превышает трёхсот вольт. Хотя современные производители радиоэлектронных компонент и выпускают полевые транзисторы на напряжение до киловольта, но такие элементы имеют существенный недостаток: в открытом состоянии переход транзистора между «стоком» и «истоком» представляет активное сопротивление, величина которого составляет несколько Ом. Такое ограничение усложняет проектирование преобразователей на большое напряжение. В начале 80-х годов прошлого столетия появилась идея создания универсального ключа путём объединения преимуществ биполярного транзистора (большое допустимое напряжение между «коллектором» и «эмиттером») с преимуществами полевого транзистора (минимальные затраты энергии на управление). Прибор получил название: *insulated gate bipolar transistor (IGBT)*, что в переводе означает биполярный транзистор с изолированным затвором. Входная часть такого транзистора как у полевого, выходная как у биполярного.

2. Теоретические сведения

Схематическое обозначение *IGBT* показано на рис. 1. Транзистор имеет три вывода: *G* – «затвор», *C* – «коллектор», *E* – «эмиттер». Входная часть транзистора изображается как вход МОП-транзистора с индуцированным каналом, выходная часть как выход биполярного *p-n-p* транзистора. Упрощенная эквивалентная схема *IGBT* изображена на рис. 2. Интересно, что «коллектору» *IGBT* соответствует «эмиттер» выходного биполярного *p-n-p* транзистора, а «эмиттеру» «коллектор».

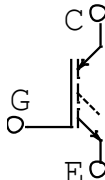


Рис. 1

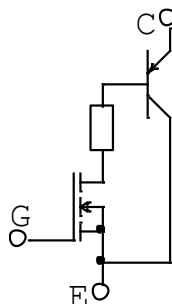
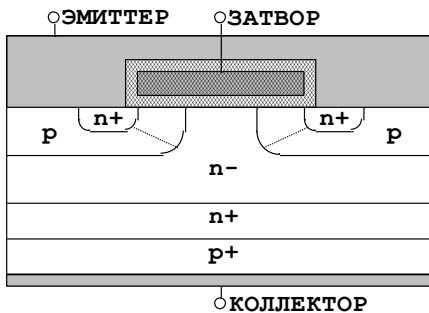
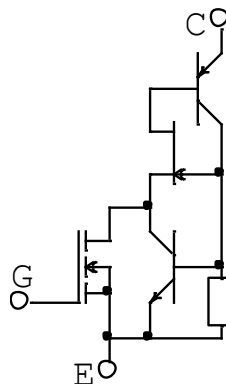


Рис. 2

Остановимся подробнее на структуре *IGBT*. В закрытом состоянии транзистора напряжение между «коллектором» и «эмиттером» оказывается приложенным к объединённой области *n-* (рис. 3). При прикладывании к «затвору» положительного потенциала, в *p*-области появляется проводящий канал (на рис.3 канал обозначен пунктирной линией) и начинает течь ток из области *n-* в область *n+* (открывается МОП-транзистор), обеспечивая открытие биполярного *p-n-p* транзистора. Из рис. 3 видно, что эквивалентная схема *IGBT* будет несколько отличаться от той, что изображена на рис. 2. Входной МОП-транзистор шунтируется паразитным *n-p-n* транзистором, возникшим при изготовлении.



Итак, структуру *IGBT* можно представить эквивалентной схемой, изображённой на рис. 4. Промежуточный *n*-канальный полевой транзистор выполняет роль динамического сопротивления, которое уменьшается в открытом состоянии *IGBT* и пропускает ток через базовую область биполярного *p-n-p* транзистора тем самым, уменьшая остаточное напряжение в области *n-* (рис. 3). Большую опасность представляет паразитный биполярный *n-p-n* транзистор; совместно с выходным *p-n-p* транзистором они образуют паразитный тиристор, который может перейти в открытое состояние (в литературе это называется эффектом «защёлкивания» *IGBT*), вследствие чего *IGBT* потеряет управляемость.



Современные *IGBT* практически лишены такого недостатка; «защёлкивание» транзистора может наблюдаться при превышении предельной допустимой частоты переключения транзистора.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) *IGBT* изображена на рис. 5. Величина порогового напряжения (минимальное напряжение между «затвором» и «эмиттером», при котором транзистор начинает открываться) составляет примерно 5V. Полное отпирание гарантируется при напряжении между «затвором» и «эмиттером» больше или равным 15V.

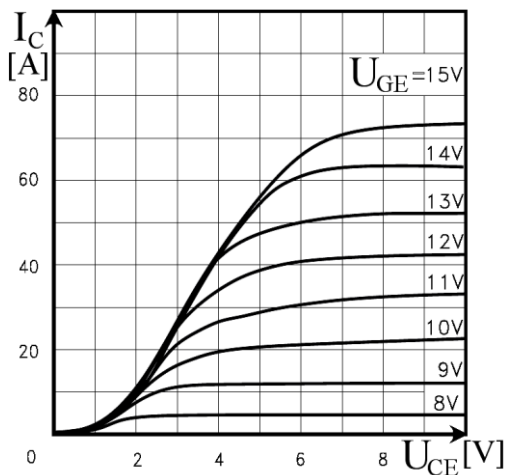


Рис. 5

3. Частотные характеристики

Как и предшествующие полевые и биполярные транзисторы, *IGBT* тоже не лишён паразитных параметров. Потому *IGBT* имеет конечное время переключения. Задержки на включение и выключение *IGBT* вызваны наличием паразитных ёмкостей C_{GE} , C_{GC} , C_{CE} (рис. 6). Часто в техническом описании указываются приведённые ёмкости:

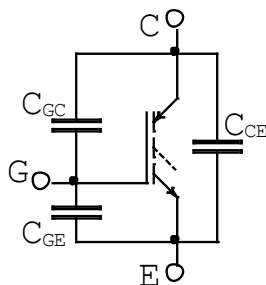


Рис. 6

входная ёмкость *IGBT*: $C_{ies} = C_{GE} + C_{GC}$

выходная ёмкость *IGBT*: $C_{oes} = C_{CE} + C_{GC}$

передаточная (проходная) ёмкость *IGBT*:

$C_{res} = C_{GC}$, которая имеет дополнительное название: ёмкость Миллера. Эта ёмкость образует отрицательную паразитную обратную связь между входом и выходом транзистора, тем самым, препятствуя процессам отпирания – запираения транзистора. Остановимся подробнее на включении транзистора. При подаче на «затвор» *IGBT* импульса прямоугольной формы, начинается зарядка входной ёмкости с постоянной времени

$$\tau_{ON} = r \cdot C_{iss}$$

где r – выходное сопротивление генератора импульса прямоугольной формы. Зарядка продолжается до порогового значения напряжения, после чего начинает изменяться напряжение между «коллектором» и «эмиттером» (транзистор начинает открываться). Далее ввиду наличия обратной связи начинает изменяться входная ёмкость. Произведём расчёт динамической входной ёмкости: $\Delta I_C = S \cdot \Delta U_{GE}$

$\Delta U_{OUT} = -R \cdot \Delta I_C$, где ΔI_C – приращение тока «коллектора» *IGBT* (рис. 7), S

– крутизна. Откуда: $\Delta U_{OUT} = -k_U \cdot \Delta U_{GE}$, где $k_U = R \cdot S$ – коэффициент усиления. При этом выходной ток генератора импульсов прямоугольной формы будет включать ток, протекающий через ёмкость C_{GE} , и ток через

ёмкость C_{GC} : $\Delta I = \frac{\Delta U_{GE}}{X_{GE}} + \frac{\Delta U_{GE} - \Delta U_{OUT}}{X_{GC}}$, где $X_{GE} = \frac{1}{j\omega C_{GE}}$,

$X_{GC} = \frac{1}{j\omega C_{GC}}$; $\Delta I = \frac{\Delta U_{GE}}{X_{dyn}}$, $X_{dyn} = \frac{1}{j\omega C_{dyn}}$, C_{dyn} – динамическая

входная ёмкость. Приворняв эти значения тока получим:

$$\frac{1}{X_{dyn}} = \frac{1}{X_{GE}} + \frac{1}{X_{GC}} + \frac{k_U}{X_{GC}}, \text{ откуда } \boxed{C_{dyn} = C_{GE} + (1 + k_U) \cdot C_{GC}}$$

Увеличение входной ёмкости приводит к увеличению времени открывания *IGBT*. Постоянная времени этого процесса: $\tau_r = r \cdot C_{dyn}$. В практике имеют место случаи, когда динамическая входная ёмкость *IGBT* на порядок больше статической ёмкости; при этом существенно возрастает время открывания транзистора. В процессе зарядки динамической ёмкости появляется коллекторный ток, максимальное значение которого достигается при окончании зарядки. Далее процесс зарядки продолжается снова с постоянной времени τ_{ON} . Процесс выключения *IGBT* аналогичен процессу включения. Вначале разряжается входная ёмкость *IGBT* до некоторого порогового потенциала, при котором начинает запирается транзистор (начинает меняться напряжение между «коллектором» и

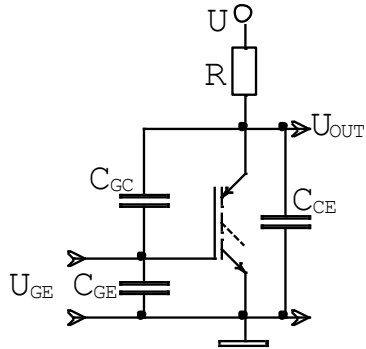


Рис. 7

«эмиттером»). Далее происходит перезарядка ёмкости Миллера, после чего снова разряжается входная ёмкость *IGBT*.

4. Потери мощности

Несмотря на все достоинства *IGBT* всё-таки не является идеальным ключом. Как и предшествующие полевой и биполярный транзисторы *IGBT* не лишён паразитных параметров. Во-первых: в открытом состоянии у *IGBT* есть не равное нулю падение напряжения на переходе «коллектор» – «эмиттер» $U_{CE(ON)}$, что приводит к наличию статических потерь мощности на транзисторе: $P_{stat} = U_{CE(ON)} \cdot I_C$. Во-вторых: как было замечено в предыдущем разделе включения/выключения *IGBT* происходит не мгновенно (конечна скорость изменения тока «коллектора»). Это приводит к наличию динамических потерь мощности:

$$P_{dyn} = f \cdot \int_0^{t_r} I_C(t) \cdot U_{CE}(t) \cdot dt + f \cdot \int_{t_f}^0 I_C(t) \cdot U_{CE}(t) \cdot dt$$

5. Линейный источник тока

Кроме ключевого применения *IGBT*, существует ещё линейный режим работы. Такой режим можно использовать, например, для построения источника тока. Безусловно, линейный источник тока имеет небольшое применения ввиду низкого КПД, по сравнению с импульсным источником тока. Однако, простота реализации такой схемы, а также отсутствия высокочастотных гармоник в выходном токе обеспечивают те преимущества, которых лишён импульсный источник.

Разумеется, источник тока можно реализовать также на биполярном и полевом транзисторах. Тем не менее, у схемы с *IGBT* есть преимущества: по сравнению с биполярным транзистором, здесь управляющим сигналом является напряжение, а не ток. Следовательно, упрощаются требования на выполнение обратной связи. По сравнению с источником тока на полевом транзисторе, схема с *IGBT* позволяет получать большее выходное напряжение.

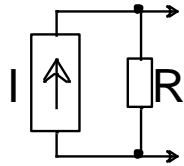


Рис. 8

Остановимся подробнее на изучении источника тока (рис. 8). У реального источника тока выходное сопротивление имеет конечное значения. Следовательно, при подключении нагрузок с разными сопротивлениями, значение выходного тока источника тоже будет отличаться. Таким образом, поочерёдно подключая к источнику тока нагрузки с сопротивлениями r_1 и r_2 и измеряя значения тока i_1 и i_2 , можно

вычислить выходное сопротивление источника по формуле:

$$R = \frac{r_1 \cdot i_1 - r_2 \cdot i_2}{i_2 - i_1} \text{ (Самостоятельно получите данную формулу).}$$

6. Практические задания

6.1 Измерение ВАХ IGBT

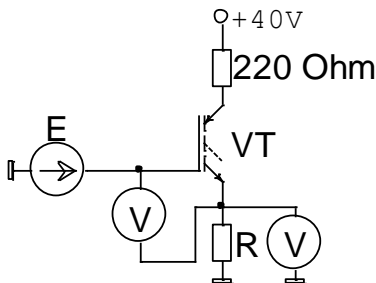


Рис. 9

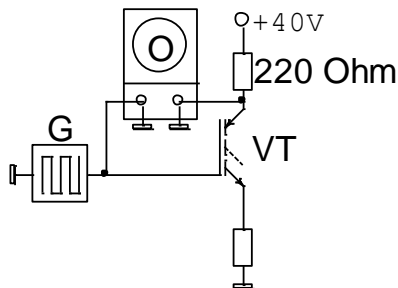


Рис. 10

Ознакомьтесь со схемой платы демонстрационного модуля, приведённой в приложении. Используя демонстрационную плату, соберите схему как показано на рис. 9. Подключите к собранной схеме два цифровых вольтметра (на схеме они обозначены V) и резистор ПЭВ-50 220Ω, как показано на рис. 9. Включите источник питания +40V. Измерьте зависимость тока «эмиттера» IGBT от напряжения «затвор» – «эмиттер» (напряжение «затвор» – «эмиттер» изменяется регулируемым источником E, находящимся в демонстрационном модуле). Постройте график: $I_E = f(U_{GE})$. Используя измерения вычислите крутизну IGBT.

Измерьте падения напряжения на переходе «коллектор» – «эмиттер» открытого транзистора.

Выставьте $I_E \sim 1\text{mA}$ (изменяя U_{GE}). Далее, при помощи коммутатора S (в демонстрационном модуле), отключите «затвор» IGBT (при этом «затвор» не должен иметь контакта с другими элементами демонстрационного модуля). Измерьте изменение тока «эмиттера» от времени: $\Delta I_E / \Delta t$.

6.2 Измерение динамических характеристик IGBT

Соберите схему как показано на рис. 10. Подключите двухканальный осциллограф (O). Используя осциллограф измерьте задержку на включения IGBT $t_{d(ON)}$, время включения t_r , задержку на выключения

$t_{d(OFF)}$, время выключения t_f . Из полученных измерений вычислите динамические и статические потери мощности на транзисторе.

Измерьте скорость изменения напряжения «затвор» – «эмиттер» $\Delta U_{GE}/\Delta t$ в интервале времени $t_{d(OFF)}$ и в интервале времени t_f . Из полученных результатов вычислите отношение динамической ёмкости к статической C_{dyn}/C_{ies} . Используя справочные значения собственных емкостей *IGBT*, а также измеренное значение крутизны, вычислите C_{dyn} .
 $C_{ies} = 720\text{pF}$, $C_{oes} = 81\text{pF}$, $C_{res} = 17\text{pF}$.

Сравните с полученным вами значением C_{dyn}/C_{ies} .

Зарисуйте осциллограммы включения и выключения *IGBT*.

Используя коммутатор *S*, включите последовательно с выходом генератора активное сопротивление 100Ω . Во сколько раз при этом изменятся временные параметры: $t_{d(ON)}$, t_r , $t_{d(OFF)}$, t_f ?

6.3 Измерение параметров источника тока

Соберите схему линейного источника тока как показано на рис. 11. Источник переменного ЭДС *E* используется для задания тока. Операционный усилитель *K* обеспечивает отрицательную обратную связь. Для измерения выходного тока источника используется шунт *R*. Установите значение тока примерно равное 50mA . Проведите два измерения напряжения на резисторе 560Ω сразу после включения и через 10 минут. Используя справочное значение температурного коэффициента сопротивления ($10^{-3} 1/^\circ\text{C}$) вычислите, на сколько градусов прогрелся резистор за это время.

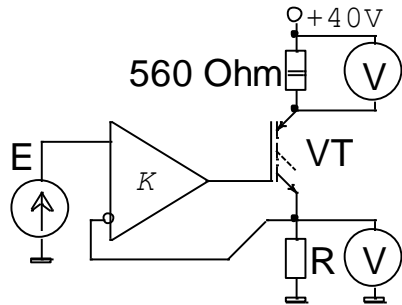


Рис. 11

Измерьте точное значение выходного тока. Далее, не выключая питания подключите параллельно сопротивлению 560Ω резистор 220Ω (для подключения резистора используйте дополнительное гнездо на плате демонстрационного модуля). Повторно измерьте значение тока. По результатам измерений вычислите выходное сопротивление источника тока.

7. Контрольные вопросы

1. Почему в работающих платах нельзя оставлять «затвор» *IGBT* незапаянным?

2. Как будет выглядеть осциллограмма отпираания – запираания *IGBT* в отсутствии динамической ёмкости?

3. Покажите на ВАХ *IGBT* область, где транзистор работает в ключевом режиме и область, которая используется для работы источника тока.

Литература

1. П. Хоровиц, У. Хилл "Искусство схемотехники". Москва "Мир" 1983г. Том 1.

2. Б.Ю. Семёнов "Силовая электроника от простого к сложному". Москва "СОЛОН-ПРЕСС" 2006г.

Приложение

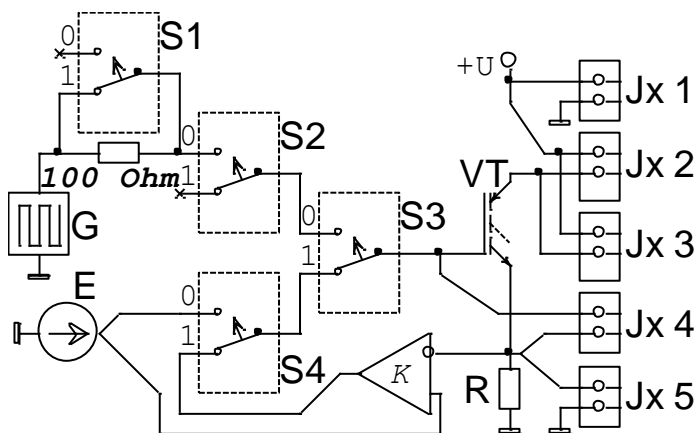


Рис. 8. Структурная схема демонстрационной платы

G – генератор прямоугольных импульсов частотой 100kHz

E – регулируемый источник ЭДС

S – ручной коммутатор ($S1 \div S4$ – набор переключателей для внутренних коммутаций)

VT – исследуемый *IGBT*

R – шунт для измерения тока «эмиттера»; сопротивление шунта: 1Ω

Jx1 \div **Jx5** – гнезда для внешних коммутации

K – операционный усилитель.