

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Онопченко Маргарита Андреевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

Изучение характеристик переключения мощного IGBT транзистора

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19308

Научный руководитель:

к.т.н. Д. В. Сеньков

Оценка научного руководителя

отлично

« 14 » декабря 2020 г.

Преподаватель практикума

А. В. Сорокин

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 2020 г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20 _____ г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью данной работы было изучение временных характеристик IGBT транзистора. Для достижения этой цели потребовалось решить несколько задач. Измерение параметров IGBT модуля проводилось на понижающем конвертере преобразователя 380В 50Гц в 700вольт 20кГц с номинальной мощностью 60 кВт, который представляет собой часть разрабатываемой в ИЯФ СОРАН для коллайдера NICA 2.5МэВ системы электронного охлаждения. В преобразователе использовались российские 600А 1200В IGBT модули М2ТКИ-600-12К производства ОАО «Электровыпрямитель». Были сняты временные характеристики при разных токах коллектора и произведено сравнение полученных данных с теоретическими и паспортными характеристиками транзистора.

Ключевые слова: IGBT транзистор, полупроводник, ток коллектора, напряжение, времена включения и выключения.

Содержание

Аннотация.....	2
1 Введение.....	3
2 Основная часть.....	5
2.1 Теоретическая часть.....	5
2.2 Экспериментальная часть.....	11
3 Заключение.....	15
4 Список литературы.....	15

1 Введение

Управление мощными электрическими процессами является именно той проблемой, при решении которой силовые полупроводниковые приборы уже очень широко используются, а интенсивность их применения быстро возрастает. Это объясняется достоинствами силовых полупроводниковых приборов, основными из которых являются высокое быстродействие, малое падение напряжения в открытом состоянии и малый ток в закрытом состоянии (что обеспечивает малые потери мощности), высокая надежность, значительная нагрузочная способность по току и напряжению, малые размеры и вес, простота в управлении, органическое единство с полупроводниковыми устройствами информативной электроники, что облегчает объединение силовых и управляющих элементов.

Особенно быстрое распространение устройств силовой электроники началось после создания силовых полевых транзисторов (Power MOSFET) и IGBT.

Наиболее распространенными типовыми устройствами силовой электроники являются:

- бесконтактные переключающие устройства переменного и постоянного тока (прерыватели), предназначенные для включения или выключения нагрузки в цепи переменного или постоянного тока и, иногда, для регулирования мощности нагрузки;
- выпрямители, преобразующие переменное напряжение в напряжение одной полярности (однонаправленное);
- инверторы, преобразующие постоянное напряжение в переменное;
- преобразователи частоты, преобразующие переменное напряжение одной частоты в переменное напряжение другой частоты;
- преобразователи постоянного напряжения (конверторы), преобразующие постоянное напряжение одной величины в постоянное напряжение другой величины;
- преобразователи числа фаз, преобразующие переменное напряжение с одним числом фаз в переменное напряжение с другим числом фаз (обычно однофазное напряжение преобразуется в трехфазное или трехфазное — в однофазное);
- компенсаторы (корректоры коэффициента мощности), предназначенные для компенсации реактивной мощности в питающей сети переменного напряжения и для компенсации искажений формы тока и напряжения.

По существу, устройства силовой электроники выполняют преобразование мощных электрических сигналов. Поэтому силовую электронику называют также преобразовательной техникой. Устройства силовой электроники, как

типовые, так и специализированные, используются во всех областях техники и практически в любом достаточно сложном научном оборудовании.

В качестве иллюстрации укажем некоторые объекты, в которых устройства силовой электроники выполняют важные функции:

- электропривод (регулирование скорости и момента вращения и др.);
- ветро-генерирующие установки
- установки для электролиза (цветная металлургия, химическая промышленность);
- электрооборудование для передачи электроэнергии на большие расстояния на постоянном токе;
- электрометаллургическое оборудование (электромагнитное перемешивание металла и др.);
- электротермические установки (индукционный нагрев и др.);

Развитие силовой электроники изменяет и сами подходы к решению технических задач. К примеру, создание силовых полевых транзисторов и IGBT существенно способствует расширению области применения индукторных двигателей, которые в ряде областей вытесняют коллекторные двигатели.

Кроме того, устанавливаются данные устройства в источниках бесперебойного питания и в сетях с высоким напряжением. Их можно обнаружить в составе электронных схем стиральных, швейных и посудомоечных машин, инверторных кондиционеров, насосов, системах электронного зажигания автомобилей, системах электропитания серверного и телекоммуникационного оборудования.

Так, например, IGBT транзисторы прекрасно выполняют свои функции при рабочих частотах до 20-50 кГц. При более высоких частотах у данного типа транзисторов увеличиваются потери. Также наиболее полно возможности IGBT транзисторов проявляются при рабочем напряжении более 300-600 вольт. Поэтому биполярные транзисторы с изолированным затвором легче всего обнаружить в высоковольтных и мощных электроприборах, промышленном оборудовании. [1]

Существенным фактором, благотворно влияющим на распространение устройств силовой электроники, являются успехи информативной электроники и, в частности, микропроцессорной техники. Для управления мощными электрическими процессами используются все более сложные алгоритмы, которые могут быть рационально реализованы только при применении достаточно совершенных устройств информативной электроники. Эффективное совместное использование достижений силовой и информативной электроники дает действительно выдающиеся результаты.

2 Основная часть

2.1 Теоретическая часть

Устройство IGBT транзистора

IGBT (Insulate Gate Bipolar Transistor) (Биполярный транзистор с изолированным затвором в русской транскрипции) представляет собой электронный силовой прибор, который используется в качестве мощного электронного ключа, устанавливаемого в импульсные источники питания, инверторы, а также системы управления электроприводами.

Из названия этого транзистора можно заключить, что он совмещает в себе особенности полевого и биполярного транзисторов, работающих в ключевом режиме.

Суть его работы заключается в том, что полевой транзистор управляет мощным биполярным. В результате переключение мощной нагрузки становится возможным при малой мощности управления, так как управляющий сигнал поступает на затвор полевого транзистора.

Внутренняя структура IGBT.

IGBT – это составной полупроводниковый прибор, который можно представить, как каскадное подключение двух электронных входных ключей, которые управляют окончательным плюсом. На рисунке 1 показана обычно применяемая эквивалентная внутренняя IGBT, но стоит отметить, что эта схема не полностью объясняет работу транзистора.

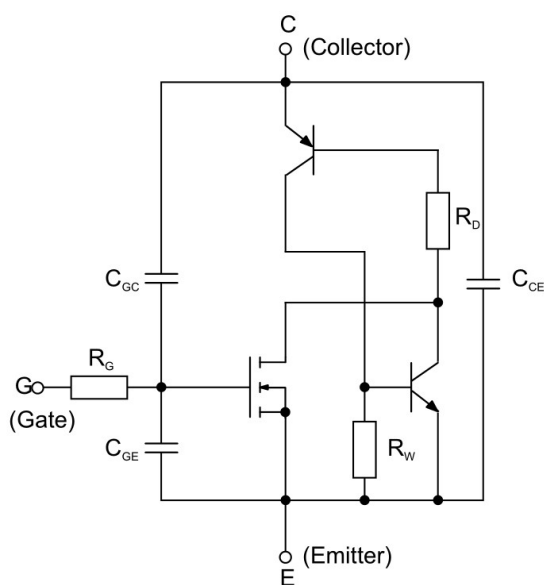


Рисунок 1. Внутреннее устройство IGBT

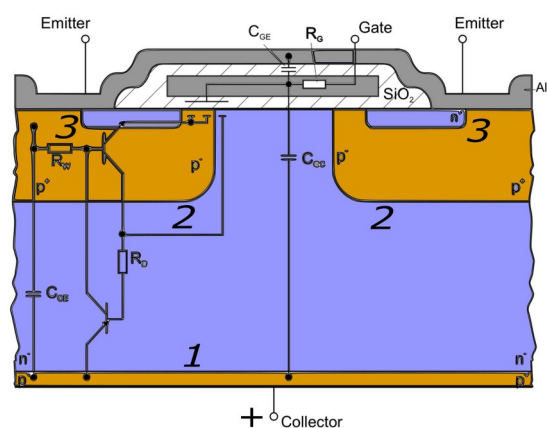


Рисунок 2. Структура кристалла IGBT с планарным затвором

Рисунок 2 показывает внутреннее устройство кристалла транзистора. Силовой р-п-р транзистор образуется нижней коллекторной р+ областью, широкой зоной п- и верхним р+ каналом по бокам прибора. Пока на затвор транзистора не подано напряжение переход 2 закрыт. Если теперь подать отпирающее напряжение на затвор создается индуцированный проводящий канал между п+ и п- областями и базовая область п- обогащается неосновными носителями (дырками) при наличии которых (так же, как и в классическом биполярном транзисторе) начинает протекать ток через переход 2, что эквивалентно току коллектор-эмиттер транзистора. При этом стоит отметить, что обогащается не сам обратно смещенный переход силового транзистора (область р+ п- перехода 2 на рисунке 2), а область посередине транзистора, из которой уже начинается растекание неосновных носителей в область р+ п-. При этом это растекание носит лавинообразный характер и переход 2 очень быстро открывается от середины к краям. Этому соответствует как раз схема на рис. 1, где силовой р-п-р и «паразитный, получающийся совместно с MOSFET» п-р-п транзисторы образуют внутреннюю положительную обратную связь. Видно, что такая схема имеет склонность к защелкиванию в открытом состоянии. Долгое время этот тиристорный эффект, препятствующий закрытию транзистора пока есть ток коллектора, был проблемой, препятствующей развитию IGBT приборов. Эту проблему решил А. Накагава в 1984 году, запатентовав структуру не защёлкивающегося IGBT транзистора. Эффект обеспечивался, кроме прочего, правильным выбором градиента концентрации носителей в области р+ р- (база п-р-п, коллектор р-п-р), что приводит к быстрому вымыванию током неосновных носителей и закрытию перехода 2. Однако, стоит отметить, что для того чтобы этот эффект сработал требуется подавать отрицательное, запирающее, напряжение на затвор транзистора, иначе (при нулевом напряжении, формально запирающем) есть вероятность, что транзистор все же защелкнется. Поэтому управляющие цепи современных IGBT приборов (двайверы) все спроектированы на подачу на затвор транзистора двухполярного напряжения - положительного (+12.. +15В) отпирающего и отрицательного (-10.. -15В) запирающего)

Основным достоинством (кроме малой мощности управления) IGBT является значительное снижение последовательного сопротивления силовой цепи в открытом состоянии. Благодаря этому снижаются тепловые потери на замкнутом ключе.

Условное схемное обозначение транзистора IGBT, приведенное на следующем рисунке (рис.3) указывает, что в его составе есть полевая и биполярная части.

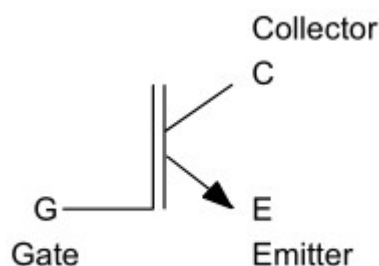


Рисунок 3. Графическое изображение IGBT в схемах

Как уже указывалось, IGBT модули используются в качестве коммутационных элементов, переключающихся между закрытым (непроводящим) состоянием, и открытым (проводящим) под воздействием сигнала управления. При этом основной характеристикой транзистора, наряду с максимальным рабочим напряжением и максимальным рабочим током коллектора является время, за которое он переходит из одного состояния в другое. Это время не только определяет максимальную рабочую частоту преобразовательных схем, использующих IGBT, но и задает уровень тепловых потерь в кристалле транзистора, так называемых динамических потерь, потерь при коммутации тока. Рассмотрим процессы включения и выключения подробнее.

Типовые диаграммы тока и напряжения на выводах транзистора [2], соответствующие режиму «hard switching» - жесткой коммутации тока при индуктивной нагрузке, т.е. выключения транзистора под полным током приведены на рисунке 5. Схема жесткой коммутации показана на рис. 4. На ней можно увидеть транзистор, индуктивно-резистивную нагрузку и схему свободного хода (обратный диод), в которую и происходит переключение тока при коммутации.

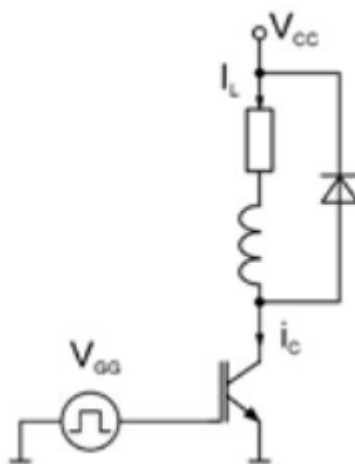


Рисунок 4. Схема коммутации тока на индуктивную нагрузку.

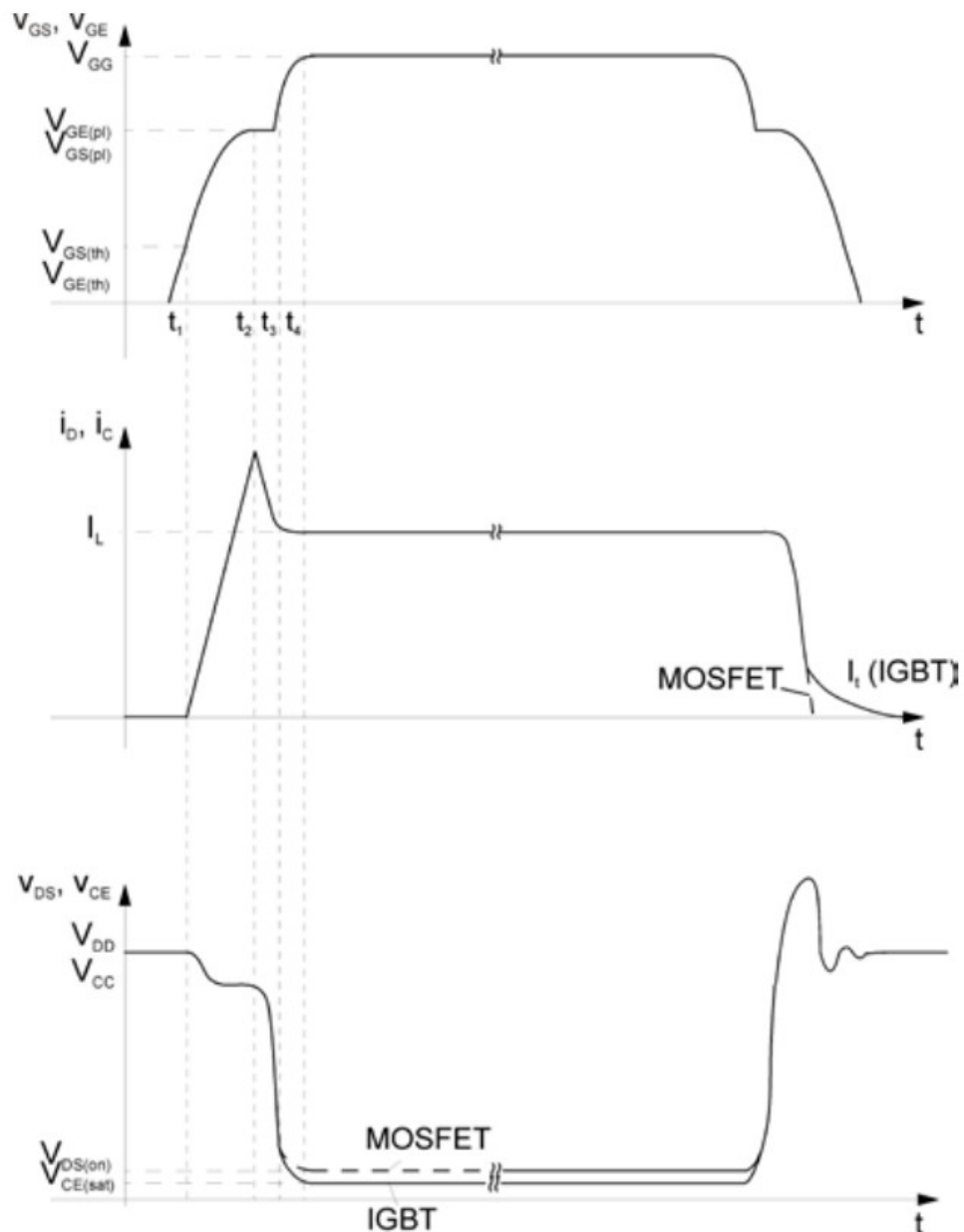


Рисунок 5. Диаграммы сигналов на силовом ключе.

На первом графике показано управляющее напряжение. Схема управления, конечно же, формирует чисто прямоугольный сигнал, однако на самом затворе форма напряжения принимает именно указанный вид, и это прямо связано с процессами, происходящими в силовом ключе при переходе прибора в проводящее состояние.

Процесс включения можно разбить на 4 зоны [2]:

- 1) До t_1 . **Блокировка.** Происходит заряд емкости затвора, напряжение затвора нарастает до порога включения. Ток коллектора равен нулю.
- 2) От t_1 до t_2 . **Нарастание тока коллектора.** После того, как напряжение на затворе превысило пороговый уровень, база силового транзистора начинает обогащаться неосновными носителями, как было описано ранее и происходит линейное нарастание коллекторного тока. В затвор

транзистора на этом этапе втекает ток, обеспечивающий дальнейший заряд емкости затвора.

- 3) От t_3 до t_4 . **Обратное восстановление диода свободного хода.** Это зона, в которой ток коллектора нарастает не за счет тока нагрузки – ток нагрузки уже полностью протекает через транзистор, а за счет процесса обратного восстановления в диоде схемы свободного хода. Суть процесса обратного восстановления, вкратце, в следующем: Пока ток в транзисторе нарастал, он уменьшался в диоде обратного хода – режим жесткой коммутации подразумевает, что ток в нагрузке не прекращается, просто коммутируется между диодом и ключом. Когда ток в диоде уменьшился до нуля начинает происходить запирающее р-п перехода, однако некоторое время, которое называется временем обратного восстановления, зона перехода обогащена носителями заряда и они, проходя через переход вызывают существенный ток неосновных носителей – обратный ток диода. Этот ток добавляется в транзисторе к току нагрузки, вызывая пик тока. Так как диод закрывается, напряжение $V_{кэ}$ начинает падать. При этом продолжается потребление тока затворной цепью, что проявляется как плоская полочка в напряжении затвор-эмиттер. Ток идет на перезарядку емкости Миллера (коллектор – затвор, нарисована посередине кристалла на рис.2) при спаде напряжения коллектор – эмиттер.
- 4) **Насыщение.** Транзистор полностью открылся, напряжение коллектор – эмиттер упало до минимума. Транзистор находится в насыщении.

Процесс выключения выглядит несколько проще и может быть разбит на две части:

- 1) **Выключение.** При снятии управляющего напряжения в затворную цепь начинает идти ток обратной полярности, перезаряжающий сначала емкость затвора, это приводит к уменьшению напряжения на затворе и закрытию индуцированного канала, обогащающего базу р-п-р транзистора IGBT неосновными носителями. Начинается вымывание неосновных носителей из области базы – начинает расти напряжение за счет того, что он начинает выходить из насыщения. При этом происходит, кроме прочего, перезаряд емкости Миллера, что проявляется как полочка в затворном напряжении. После того как $V_{кэ}$ достигает максимума неосновные носители, наконец, начинают кончаться и начинается следующий этап
- 2) **Спад тока.** Ток через транзистор спадает. При этом он открывает диод обратного хода и пока тот полностью не открылся в напряжении коллектор – эмиттер появляется пик, который, в целом, определяется индуктивностью цепи между диодом коллектором транзистора и скоростью спада тока коллектора.
- 3) **Хвост.** Определяется вымыванием неосновных носителей из р-п-р транзистора после того как силовой р-п-р закрылся. Продолжается до

тех пор, пока напряжение затвор-исток не станет отрицательным и не «выгонит» эти носители из р- области (рис. 2).

Рассматривая указанные процессы видно, почему возникают дополнительные тепловые потери при коммутации тока: так как ток коллектора и напряжение $V_{КЭ}$ изменяются не мгновенно, их произведение дает нам мгновенную мощность, которая в основном выделяется в виде тепла в кристалле IGBT. Это тепловыделение носит название динамические потери. Если бы транзистор вел себя как сопротивление, линейно изменяющееся от нуля до бесконечности эти потери составили бы $\frac{1}{4} I_{k\max} V_{КЭ\max} t_{вкл}$. Однако, так как процессы нарастания/ спада тока и спада/нарастания напряжения разделены, то потери (без учета времени обратного восстановления диода) составят $\frac{1}{2} I_{k\max} V_{КЭ\max} t_{вкл/выкл}$. Время включения складывается из времени нарастания тока t_r и времени спада напряжения t_{on} , а время выключения – из времени нарастания напряжения t_{off} и времени спада тока t_f . Понятно, что чем более быстродействующий прибор мы возьмем, тем меньше будут динамические потери. На практике именно эти потери, вернее возможность кристалла их отводить на внешний радиатор охлаждения, и определяют рабочую частоту IGBT модулей.

2.2 Экспериментальная часть

Схема эксперимента

Измерение параметров IGBT модуля проводилось на понижающем конвертере преобразователя 380В 50Гц в 700вольт 20кГц с номинальной мощностью 60 кВт, который представляет собой часть разрабатываемой в ИЯФ СОРАН для коллайдера NICA 2.5МэВ системы электронного охлаждения. Блок схема преобразователя приведена на рисунке 6. В нем используются российские 600А 1200В IGBT модули М2ТКИ-600-12К производства ОАО «Электровыпрямитель». Характеристики: напряжение затвор-эмиттер и коллектор эмиттер снимались с транзисторов понижающего преобразователя, которые как раз работают в режиме жесткой коммутации тока. Ток в индуктивности понижающего преобразователя изменяется слабо, коммутируясь между ключами VT1, VT2 и обратным диодом D1. Измерения (рис. 7) проводились на токе 200А и токе 10А, что позволяет наблюдать зависимость временных характеристик от тока коллектора.

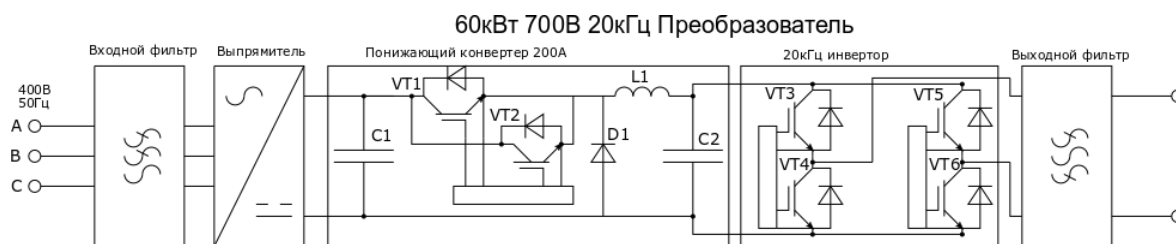


Рисунок 6. Блок схема преобразователя, на котором измерялись параметры IGBT

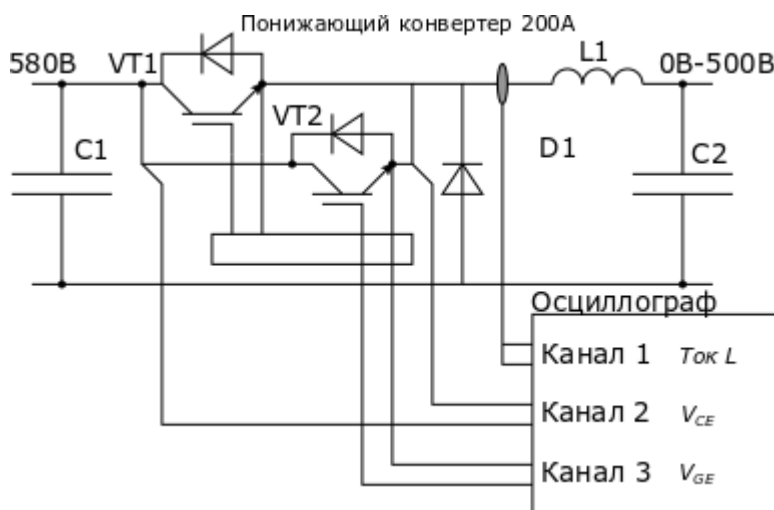


Рисунок 7. Схема измерения характеристик IGBT транзистора.

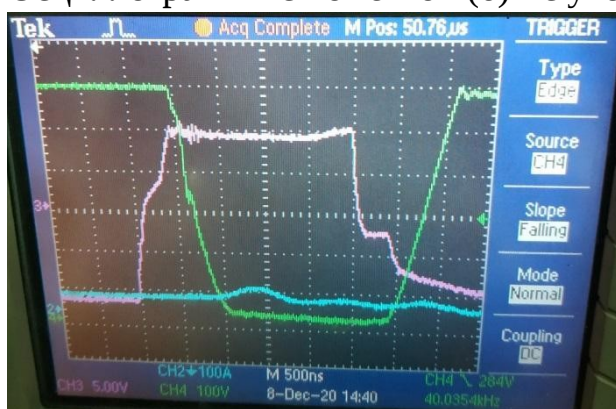
Результаты измерений

Ниже приведены осциллограммы напряжений на транзисторе и ток через дроссель L1. Ток измерялся бесконтактным датчиком. Непосредственно снимать показания тока коллектора транзистора в силовой схеме довольно

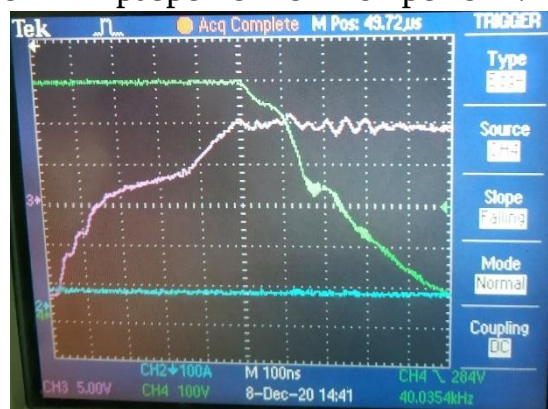
сложно, так как все связи силовых элементов для уменьшения индуктивности соединений выполняются с помощью плоских компланарных шин (busbars), на которые невозможно подключить датчик тока. Однако время нарастания и спада тока вполне возможно оценить по косвенным признакам в соответствии с диаграммами на рис. 5. На всех осциллограммах сиреневый луч (канал 3) это напряжение затвор – эмиттер, зеленый луч (канал 4) – напряжение коллектор – эмиттер, а синий луч (канал 2) показывает ток, протекающий в силовой цепи.

Рис .8. показывает процессы включения IGBT модуля в условиях малого тока коллектора, рисунок 9 – включение транзистора при большом токе коллектора. Рисунки а) показывают процесс в общем, рис б) с увеличенным разрешением по времени.

Осциллограммы с пометкой (б) - с увеличенным разрешением по времени.

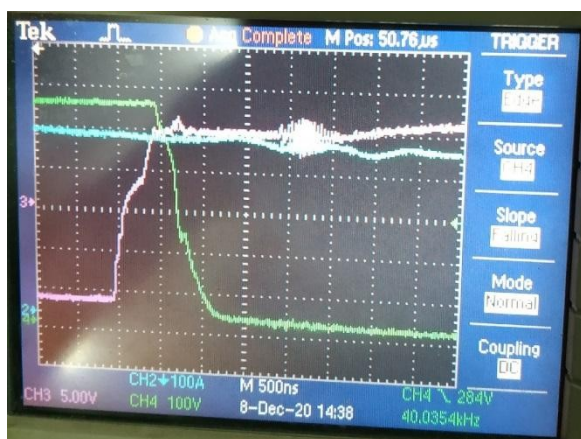


а)

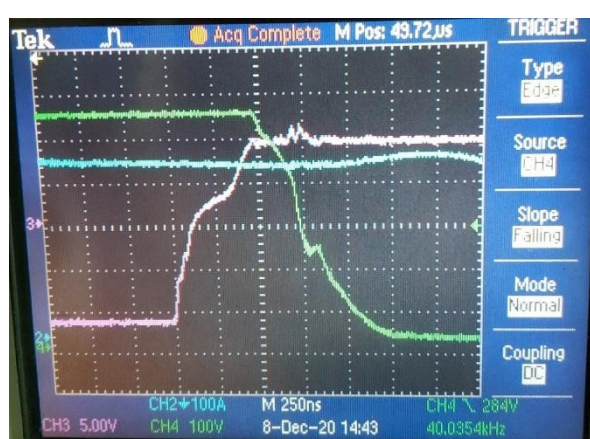


б)

Рисунок 8. Осциллограммы напряжений на IGBT при включении при $I_k 10A$

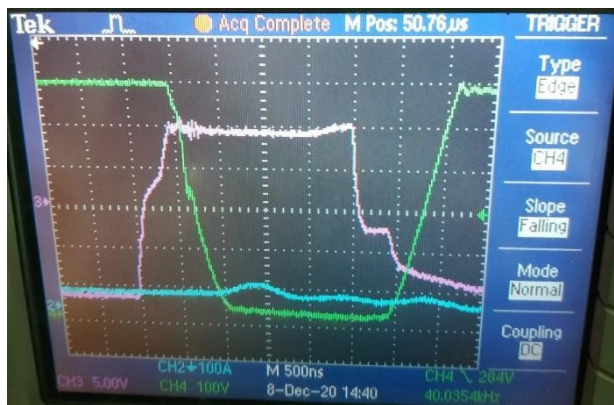


а)

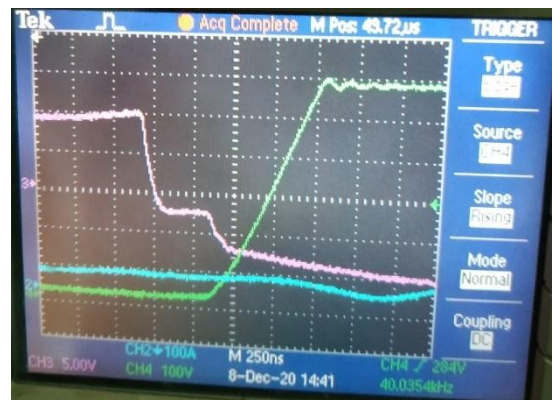


б)

Рисунок 9. Осциллограммы напряжений на IGBT при включении при $I_k 200A$



а)



б)

Рисунок 10. Осциллограммы напряжений на IGBT при выключении при $I_k 10A$



а)



б)

Рисунок 11. Осциллограммы напряжений на IGBT при выключении при $I_k 200A$

По данным осциллограммам можем измерить времена включения, нарастания, спада тока и выключения. Эти времена, для удобства, лучше рассматривать на разрешении 250 мкс.

При включении транзистора (рис 8б, рис.9б). Процесс нарастания тока длится с момента подъема напряжения на затворе и до полочки в затворном напряжении. Видно, что процесс не зависит от тока через транзистор.

Далее начинается обратное восстановление диода D1 и перезарядка емкости Миллера, а после, как и показано на диаграмме процессов в кристалле (рис. 5) спад напряжения коллектор – эмиттер.

Измеренные по осциллограммам времена составляют:

Время нарастания $t_r = 200 - 250 \text{ нс}$ (от тока нет зависимости).

Время включения $t_{on} = 500 \text{ нс}$.

Теперь рассмотрим процесс выключения (рис. 10б, рис.11б) Здесь сразу видна очень существенная зависимость процессов от тока коллектора, как и предсказывает теория. Видно и некоторое различие с рис.5 в плане того, что на реальном транзисторе сначала $V_{затвор}$ долго равно нулю, а уже затем начинается реальный рост напряжения коллектор – эмиттер. Это связано с тем, что в эксперименте использовался транзистор с trench4 технологией – в нем немного усовершенствована структура кристалла [2][3] с целью дальнейшего увеличения быстродействия и защиты от защёлкивания. Тем не

менее, принципиально процесс выключения не изменился и может быть определен как время от начала полочки в напряжении затвор-эмиттер до полного нарастания напряжения коллектор – эмиттер.

Затем начинается спад тока, который может быть определен по выбросу напряжения, связанному с паразитной индуктивностью шин.

Измеренные времена процессов:

Время выключения без тока $t_{off} = 1 \text{ мкс}$

Время выключения под током (200А), $t_{off} = 700 \text{ нс}$.

Время спада тока (время пика) $t_f = 250 - 300 \text{ нс}$

Анализ результатов

Результаты, полученные выше, сравним с табличными для данного IGBT транзистора. (рис. 12, 13)

М2ТКИ-600-12К

ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Наименование параметра	Условное обозначение	Значение параметра	Единица измерения
Тепловое сопротивление переход-корпус, IGBT (на один ключ)	R_{thjc}	≤ 0.044	°C/Вт
Тепловое сопротивление переход-корпус, диод обратного тока (на один ключ)	R_{thjcD}	≤ 0.08	
Тепловое сопротивление корпус-охладитель, $\lambda_{paste} = 1 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, на модуль (типичное значение)	R_{thck}	0.006	°C/Вт

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (при 25 °С, если не указано иное значение)

Наименование параметра	Условное обозначение	Значение параметра			Единица измерения
		мин.	тип.	макс.	
Статические характеристики					
Пороговое напряжение затвор-эмиттер ($V_{GE} = V_{CE}$, $I_C = 24 \text{ мА}$)	$V_{GE(th)}$	5	5.8	6.5	В
Напряжение насыщения коллектор-эмиттер ($V_{GE} = 15 \text{ В}$, $I_C = 600 \text{ А}$) при $T_J = 25 \text{ °C}$ при $T_J = 125 \text{ °C}$	V_{CEsat}	-	1.7 2	2.15 -	
Ток утечки коллектор-эмиттер ($V_{CE} = 1200 \text{ В}$, $V_{GE} = 0 \text{ В}$) при $T_J = 25 \text{ °C}$ при $T_J = 125 \text{ °C}$	I_{CES}	-	-	5 -	мА
Ток утечки затвор-эмиттер ($V_{GE} = 20 \text{ В}$, $V_{CE} = 0 \text{ В}$)	I_{GES}	-	-	400	нА
Характеристики на переменном токе					
Входная емкость ($V_{CE} = 25 \text{ В}$, $V_{GE} = 0 \text{ В}$, $f = 1 \text{ МГц}$)	C_{ies}	-	43	-	нФ
Обратная переходная емкость ($V_{CE} = 25 \text{ В}$, $V_{GE} = 0 \text{ В}$, $f = 1 \text{ МГц}$)	C_{res}	-	2	-	
Заряд затвора ($V_{GE} = \pm 15 \text{ В}$)	Q_G	-	5.8	-	мкКл
Характеристики переключения (индуктивная нагрузка, при $T_J = 125 \text{ °C}$)					
Время задержки включения ($V_{CC} = 600 \text{ В}$, $V_{GE} = \pm 15 \text{ В}$, $I_C = 600 \text{ А}$, $R_G = 3.6 \text{ Ом}$) при $T_J = 25 \text{ °C}$ при $T_J = 125 \text{ °C}$	$t_{d(on)}$	-	0.60 0.66	- -	мкс
Время нарастания ($V_{CC} = 600 \text{ В}$, $V_{GE} = \pm 15 \text{ В}$, $I_C = 600 \text{ А}$, $R_G = 3.6 \text{ Ом}$) при $T_J = 25 \text{ °C}$ при $T_J = 125 \text{ °C}$	t_r	-	0.23 0.22	- -	

Рисунок 12. Паспортные данные М2ТКИ-600-12К транзистора.

Время задержки выключения ($V_{CC} = 600 \text{ В}$, $V_{GE} = \pm 15 \text{ В}$, $I_C = 600 \text{ А}$, $R_G = 1.2 \text{ Ом}$) при $T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ при $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{d(off)}$	-	0.82	-	мкс
		-	0.96	-	
Время спада ($V_{CC} = 600 \text{ В}$, $V_{GE} = \pm 15 \text{ В}$, $I_C = 600 \text{ А}$, $R_G = 1.2 \text{ Ом}$) при $T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ при $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	t_f	-	0.15	-	мкс
		-	0.18	-	
Энергия потерь при включении ($V_{CC} = 600 \text{ В}$, $V_{GE} = \pm 15 \text{ В}$, $I_C = 600 \text{ А}$, $R_G = 3.6 \text{ Ом}$, $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$, $L_S = 120 \text{ нГн}$, за один импульс)	E_{on}	-	120	-	мДж
Энергия потерь при выключении ($V_{CC} = 600 \text{ В}$, $V_{GE} = \pm 15 \text{ В}$, $I_C = 600 \text{ А}$, $R_G = 1.2 \text{ Ом}$, $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$, $L_S = 120 \text{ нГн}$, за один импульс)	E_{off}	-	95	-	
Ток короткого замыкания ($t_p \leq 10 \text{ мкс}$, $V_{CC} = 900 \text{ В}$, $V_{GE} \leq 15 \text{ В}$, $V_{CEmax} = V_{CES} - L_{\sigma(CE)} \times di/dt$, $T_j \leq 125 \text{ }^\circ\text{C}$)	I_{SC}	-	2400	-	А
Внутренняя индуктивность модуля по цепи коллектор-эмиттер	$L_{\sigma(CE)}$	-	20	-	нГн
Характеристики диода обратного тока					
Прямое падение напряжения ($I_F = 600 \text{ А}$, $V_{GE} = 0 \text{ В}$) при $T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ при $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	V_F	-	2.0	2.5	В
		-	1.8	-	
Ток обратного восстановления ($I_F = 600 \text{ А}$, $V_{GE} = -15 \text{ В}$, $V_R = 600 \text{ В}$, $di_F/dt = -2400 \text{ А/мкс}$) при $T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ при $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	I_{RM}	-	170	-	А
		-	265	-	
Заряд обратного восстановления ($I_F = 600 \text{ А}$, $V_{GE} = -15 \text{ В}$, $V_R = 600 \text{ В}$, $di_F/dt = -2400 \text{ А/мкс}$) при $T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ при $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	Q_{rr}	-	25	-	мДж
		-	60	-	
Энергия обратного восстановления ($I_F = 600 \text{ А}$, $V_{GE} = -15 \text{ В}$, $V_R = 600 \text{ В}$, $di_F/dt = -2400 \text{ А/мкс}$) при $T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ при $T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$	E_{rec}	-	6	-	мДж
		-	17	-	

Рисунок 13. Паспортные данные M2TKI-600-12K транзистора (продолжение).

В паспортных данных указывается время выключения при номинальном рабочем токе 600А, однако процессы при токе 600А и токе 200А уже не сильно различаются (скорость вымывания неосновных носителей при 600А конечно ускорится, но не принципиально), что и видно по измерениям. Так как в источнике использовалось водяное охлаждение силовых элементов температуру подложки транзистора можно считать 25 градусов Цельсия.

3 Заключение

В данной лабораторной работе было проведено изучение временных характеристик IGBT транзистора M2TKI-600-12K. Были сняты временные характеристики при разных токах коллектора и произведено сравнение полученных данных с теоретическими и паспортными характеристиками транзистора. Наблюдалась зависимость времени выключения от тока через транзистор, которую предсказывает теория работы элемента. Итоговые измерения почти полностью совпали с паспортными данными.

4 Список литературы

- 1 Силовая электроника для любителей и профессионалов. Б.Ю.Семенов, М 2001г, изд Солон-Р

- 2 Application Manual Power Semiconductors, A.Wintrich и др. 2015г.
SEMIKRON
<https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-application-manual-power-semiconductors-english-en-2015.pdf>
- 3 Мощные полупроводниковые приборы, Справочник, 2008г изд.
SEMIKRON