

УДК 621.317.799:621.382

## ИЗМЕРЕНИЕ ЗАРЯДА ЗАТВОРА СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Лисенков Б. Н.

ОАО «МНИПИ»,  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Представлена методика измерения полного заряда затвора  $Q_g$ , заряда затвор-исток  $Q_{gs}$  и заряда затвор-сток  $Q_{gd}$  силового МОП транзистора.

**Ключевые слова:** заряд затвора постоянным током, плато Миллера.

## MEASURING THE GATE CHARGE OF POWER TRANSISTORS

Lisenkov B.

JSC «MNIPI»  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The paper presents a technique for measuring the total gate charge  $Q_g$ , gate-source charge  $Q_{gs}$ , and gate-drain charge  $Q_{gd}$  of a power MOSFET.

**Keywords:** gate charge with constant current, Miller plateau.

Адрес для переписки: Лисенков Б. Н., ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: lisenkovmniipi@tut.by

Основное применение изделий силовой электроники связано с преобразованием электроэнергии, причем его эффективность увеличивается с увеличением частоты. Это ставит задачу развития методов и средств измерения динамических параметров силовых приборов. Кроме того, для обеспечения надежности в жестких условиях эксплуатации, встает задача измерения этих параметров при воздействии на объект подверженный испытаниям (ОПИ) внешних влияющих факторов (ВВФ), в частности температуры и радиации.

Большое влияние на скорость переключения силовых МОП транзисторов и ее изменение в условиях ВВФ оказывает заряд затвора, необходимый для включения транзистора. Заряд затвора, как правило, указан в качестве одной из основных технических характеристик силовых МОП транзисторов.

В работе представлена методика, которая позволяет определить заряд затвор-исток  $Q_{gs}$ , заряд затвор-сток  $Q_{gd}$  и полный заряд затвора  $Q_g$  силового МОП транзистора на основании заряда его затвора постоянным током. Подобный принцип использован в современном анализаторе динамических параметров силовых полупроводниковых приборов PD1500A фирмы Keysight (США) [1].

Согласно методике, на затвор испытуемого МОП транзистора в течение импульса одновибратора длительностью  $\tau$  подают постоянный ток от регулируемого источника тока, как показано на рисунке 1. Для определенности здесь рассмотрен транзистор с  $n$ -каналом. Для транзистора с  $p$ -каналом направление токов и полярность напряжений меняются.

При отсутствии импульса, затвор ОПИ замкнут через транзистор  $T$  на корпус. Форму сигналов напряжения  $V_{gs}$ ,  $V_{dd}$  и тока  $I_d$ , возникающих под действием импульса, наблюдают с помощью осциллографа.

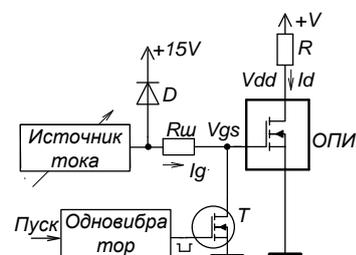


Рисунок 1 – Схема измерения заряда затвора

Диод  $D$  ограничивает максимальное напряжение на затворе ОПИ ( $<15,5$  В). Резистор  $R_{ш}$  позволяет измерить постоянный ток  $I_g$ , после его регулировки, с помощью внешнего вольтметра. Несколько номиналов резистора  $R_{ш}$  входят в комплект измерителя в качестве сменных шунтов.

Постоянное напряжение  $+V$ , поступающее на сток ОПИ через резистор  $R$ , можно изменять от 12 В до 120 В. В качестве резистора  $R$ , задающего ток  $I_d$  используют соответствующие сменные нагрузки из комплекта измерителя. Возможность регулировки  $+V$  и  $I_d$  позволяет исследовать зависимость заряда затвора ОПИ от напряжения на стоке и силы тока.

На рисунке 2 представлены диаграммы сигналов  $V_{gs}$ ,  $V_{dd}$  и  $I_d$  в соответствующих точках схемы, приведенной на рисунке 1. Момент  $t_0$  отмечает начало импульса одно-вибратора.

С момента  $t_0$  до момента  $t_2$  напряжение на затворе  $V_{gs}$  линейно нарастает. При этом увеличивается заряд затвора относительно стока и истока транзистора. Однако, с целью упрощения, этот заряд относят только к емкости затвор-исток и называют зарядом затвор-исток  $Q_{gs}$ .

В момент  $t_2$  нарастание напряжения  $V_{gs}$  прекращается и, вплоть до момента  $t_3$ , линия  $V_{gs}$  выходит на плато Миллера, на рисунке 2 это  $V_{GS(pl)}$ .

Заряд затвора  $Q_{gd}$ , возникающий на этом интервале, относят к емкости затвор-сток.

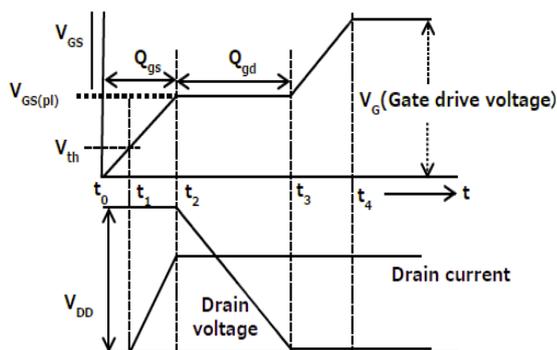


Рисунок 2 – Диаграммы сигналов на электродах ОПИ при измерении

В момент  $t_1$  напряжение на затворе ОПИ достигает порогового значения  $V_{th}$ , транзистор начинает открываться, а ток  $I_d$  нарастать. С этого момента напряжение на стоке начинает уменьшаться. С момента  $t_2$  спад  $V_{dd}$  становится линейным вплоть до момента  $t_3$ , когда транзистор открывается полностью.

Момент  $t_4$  отмечает окончание импульса одновибратора и окончание процесса заряда затвора. Полный заряд затвора  $Q_g$  за это время будет равен произведению постоянного тока, поступающего на затвор, за время заряда  $\tau = t_4 - t_0$ .

С практической точки зрения, значение полного заряда затвора важно знать при том напряжении  $V_{gs}$  когда силовой МОП транзистор гарантировано включится в условиях ВВФ.

Как правило, максимальное значение напряжения на затворе составляет  $\pm 20$  В, но, с учетом требований надежности, разработчики аппаратуры выбирают его в диапазоне от  $\pm 10$  В до  $\pm 15$  В. Большинство изготовителей нормируют значение полного заряда затвора при напряжении на затворе  $\pm 10$  В.

Согласно предлагаемой методике силу постоянного тока  $I_g$  регулируют так, чтобы в момент  $t_4$  напряжение  $V_{gs}$  достигло значения при котором транзистор будет открыт, например, +10 В. Поскольку на затвор транзистора поступает постоянный ток, накапливаемый на нем полный заряд затвора  $Q_g$  в кулонах равен произведению силы постоянного тока  $I_g$  в амперах на длительность интервала заряда в секундах. С целью упрощения расчета, длительность интервала заряда (длительность импульса одновибратора) выбрана равной  $1 \cdot 10^{-4}$  с.

Для иллюстрации методики измерения и расчета, на рисунке 3 представлена осциллограмма  $V_{gs}$  (2В/дел, 10 мкс/дел.) при тестировании МОП транзистора IRFP4137.

На основании осциллограммы, напряжение  $V_{gs}$  в момент окончания заряда составляет 10 В (2В/дел $\times$ 5дел). При этом на  $R_{ш}$  (1 кОм  $\pm$  1%), рисунок 1, мультиметром измерено падение напряжения 0,865 В.

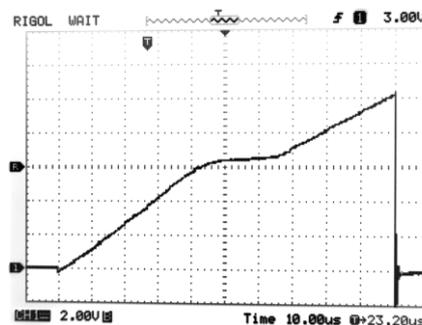


Рисунок 3 – Осциллограмма напряжения  $V_{gs}$

Находим ток затвора  $I_g = 0,865 \text{ В} / 10^3 \text{ Ом} = 8,65 \cdot 10^{-4} \text{ А}$ . При этом полный заряд затвора равен  $Q_g = 8,65 \cdot 10^{-4} \text{ А} \times 10^{-4} \text{ с} = 86,5 \text{ нК}$ . Эта величина соответствует диапазону допустимых значений  $Q_g$  для IRFP4137 (от 83 нК до 125 нК).

Меняя соответствующим образом  $I_g$ , согласно методике, можно измерить  $Q_{gs}$  и  $Q_{gd}$ .

Разработанная схема и методика измерения заряда затвора реализованы в макете измерителя динамических параметров силовых полупроводниковых приборов, внешний вид которого и технические характеристики, при измерении времени включения и выключения, силовых транзисторов представлены ранее [2].

Макет измерителя изготовлен в единичном экземпляре для исследований влияния ВВФ на динамические параметры силовых МОП транзисторов в ЦКП «Радиационный центр» при ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению». Стабильность параметров силовых транзисторов, режим работы которых зачастую сопоставим с их предельными возможностями, должна быть высокой, поскольку даже небольшие изменения их параметров под действием ВВФ увеличивают вероятность отказа аппаратуры в жестких условиях эксплуатации.

### Литература

1. PD1500A Series Dynamic Power Device Analyzer/Double-Pulse Tester for discrete IGBT, SiC, and GaN devices, data sheet [электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.keysight.com/find/PD1500A](http://www.keysight.com/find/PD1500A).
2. Лисенков, Б. Н. Измерение динамических параметров полупроводниковых приборов / Б. Н. Лисенков // Материалы 16-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение–2023», Минск, 15–17 нояб. 2023 г. – Минск, БНТУ. – 2023 – с. 58–60.