УДК 621.382

КОМПАКТНАЯ (ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ) МОДЕЛЬ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

Нгуен Чонг Тхань, Стемпицкий В.Р.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vstem@bsuir.by

Аннотация: в работе представлена разработка и верификация компактной (электрической) модели биполярного транзистора с изолированным затвором (БТИЗ). В основе модели лежит физически обоснованный подход, сочетающий эквивалентную схему прибора с системой уравнений, описывающих ключевые процессы: перенос носителей заряда в биполярной структуре, модуляцию проводимости базы, а также эффекты ударной ионизации. Модель была реализована на языке описания аппаратуры Verilog-A в среде Cadence. Проведено моделирование переходных процессов выключения при различных сопротивлениях затвора и снято семейство выходных статических характеристик, что подтвердило адекватность модели и ее пригодность для анализа работы прибора в реальных схемах с индуктивной нагрузкой. Преимуществом представленной компактной модели является высокая вычислительная эффективность при сохранении точности.

Ключевые слова: биполярный транзистор с изолированным затвором, компактная модель, силовая электроника, схемотехническое моделирование, Verilog-A, Cadence, выходные характеристики.

I. ВВЕДЕНИЕ

Биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ, англ. IGBT) – это силовой полупроводниковый прибор, созданный для минимизации высоких потерь в открытом состоянии, характерных для мощных полевых транзисторов. На рисунке 1,а показана структура БТИЗ, а на рисунке 1,б – его эквивалентная схема. Наличие дополнительного p-n-перехода позволяет инжектировать в эпитаксиальный слой большое количество неосновных носителей заряда. Это снижает его сопротивление в открытом состоянии благодаря эффекту модуляции проводимости. Таким образом, БТИЗ сочетает в себе высокую токовую нагрузочную способность мощного биполярного транзистора с простотой управления затвором, как у мощного полевого транзистора.

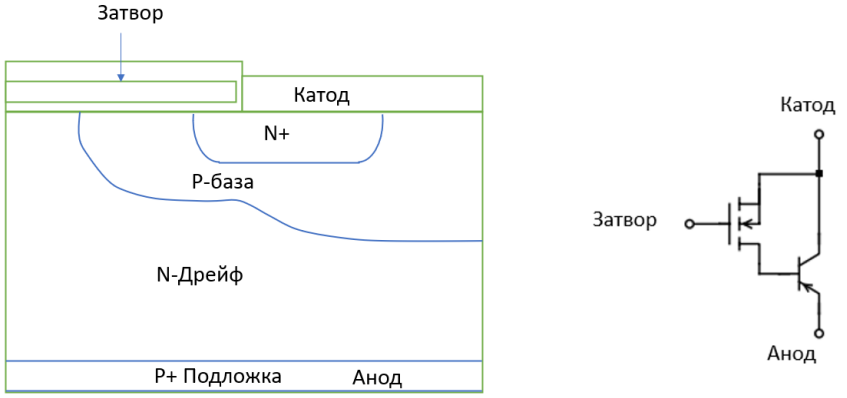


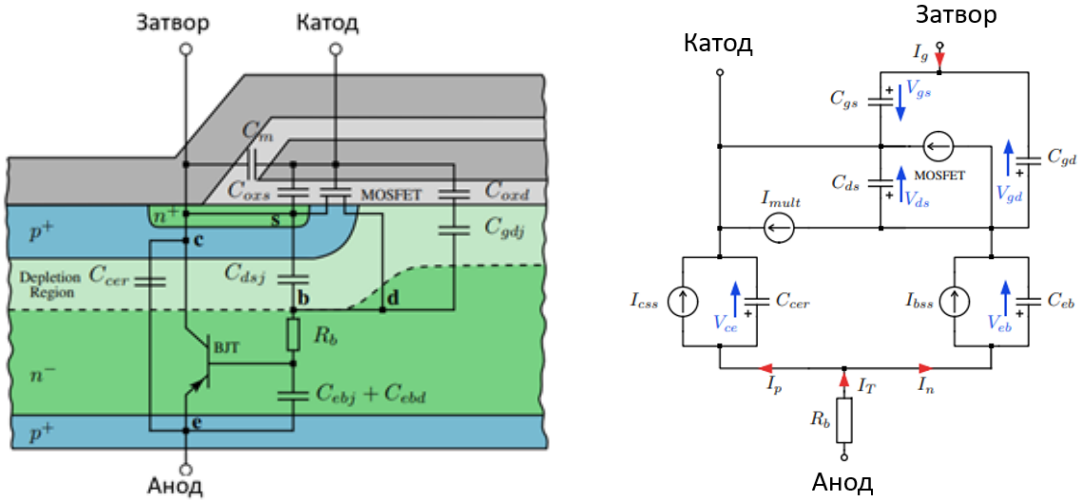
Рисунок 1. Структура NPT-БТИЗ на объемном кремнии (а) и его эквивалентная схема (б)

БТИЗ завоевали широкое признание у разработчиков в качестве альтернативы мощным биполярным транзисторам в таких применениях, как силовые преобразователи и системы приводов двигателей. Для проектирования силовых электронных схем на основе БТИЗ необходимо проводить схемотехническое моделирование, чтобы анализировать поведение приборов в составе конечного устройства. Однако модели, доступные в большинстве коммерческих симуляторов, изначально были разработаны для описания микроэлектронных компонентов и не всегда пригодны для точного моделирования БТИЗ или других силовых полупроводниковых приборов.

II. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

На рисунке 2 показана детализированная эквивалентная схема БТИЗ [1], совмещённая со структурной схемой. Элементы на схеме отображают нелинейные физические процессы, присущие различным

областям его структуры. Базовая эквивалентная схема БТИЗ, представляющая собой биполярный транзистор, управляемый базовым током, представляющим ток стока полевого транзитора, обозначена соответствующими символами на рисунке 2,а. Компоненты, подключённые к выводам эмиттера (e), базы (b) и коллектора (c), относятся к биполярной части структуры, а элементы между затвором (g), истоком (s) и стоком (d) – к части VDMOSFET. За исключением ёмкости металлизации (Cm) и оксидной ёмкости (Cox), все остальные ёмкости в модели являются сильно нелинейными. Ключевым элементом модели является применяемая в ней детализированная теория переноса носителей заряда для биполярных структур. Именно она позволяет точно рассчитывать коллекторный ток в условиях высокого уровня инжекции и совместное движение электронов и дырок внутри структуры прибора.



а б

Рисунок 2. Физическая структура и эквивалетная схема БТИЗ в соответствии с моделью NPT-IGBT [1] и моделью Хефнера-Диеболта [2]

Электрическая схема, соответствующая системе уравнений модели БТИЗ, описанной в [2], показана на рисунке 2,б. В данной модели pnp-биполярный транзистор заменён источниками тока Icss и Ibss, которые отображают установившиеся токи коллектора и базы. Для моделирования падения напряжения в электропроводящей модулированной базе сопротивление базы Rb подключено к анодному выводу [3]. Для учёта эффекта ударной ионизации и связанного с ним явления умножения носителей в области базы, при котором генерируются дырки, в модель введён дополнительный источник тока Imult [2].

Все параметры IGBT и уравнения, описывающие данную компактную модель, приведены в работе Хефнера [3].

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В CADENCE

Компактная модель БТИЗ была реализована на языке описания аппаратуры verilog-a. На рисунке 3 показана тестовая схема для определения основных характеристик БТИЗ. Параметры элементов схемы: Rl = 30 Ом, LL = 80 мкГн, V0 = 300 В. Импульс затвора Vg имеет фронт и спад длительностью 20 нс и длительность включенного и выключенного состояния 30 мкс.

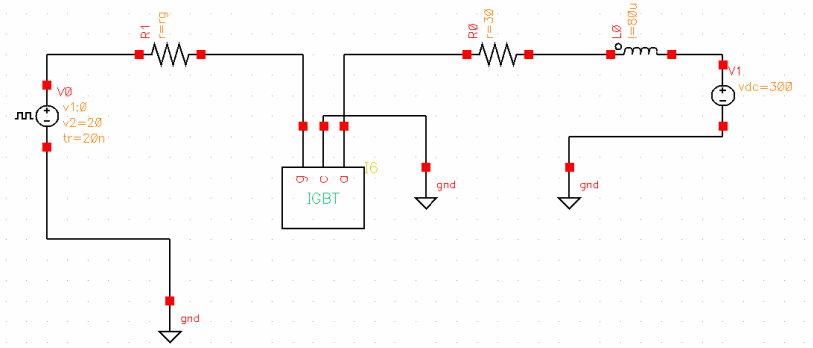


Рисунок 3. Тестовая схема с индуктивной нагрузкой для моделирования характеристик выключения IGBT

На рисунке 4 представлены результаты моделирования процесса выключения IGBT для различных значений сопротивления затвора Rg = {0.1, 1, 2, 3} кОм. На рисунке 5 представлено семейство выходных характеристик: зависимости тока коллектора Ic от напряжения коллектор-эмиттер Vce при различных напряжениях на затворе Vg = (5, 6, 7, 9 В).

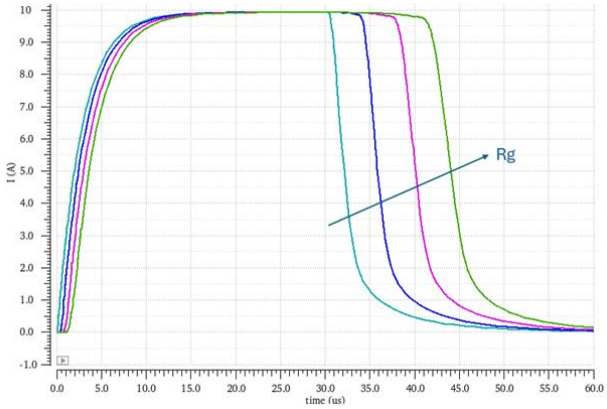


Рисунок 4. Временная диаграмма

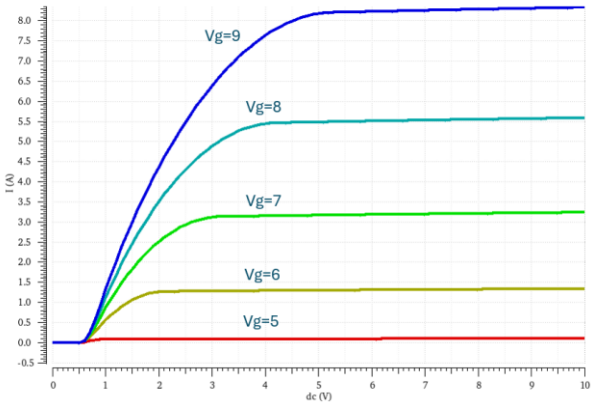


Рисунок 5. Выходные характеристики БТИЗ

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе компактная модель IGBT была успешно реализована в среде Cadence с использованием языка описания аппаратуры Verilog-A. В отличие от сложных физических моделей, требующих значительных вычислительных ресурсов, компактная модель ориентирована на точное воспроизведение внешних (терминальных) характеристик IGBT без детального моделирования внутренних физических процессов. Такой подход обеспечивает высокую вычислительную эффективность при моделировании сложных систем и обладает высокой надежностью.

ЛИТЕРАТУРА

[1] A. R. Hefner, An investigation of the drive circuit requirements for the power insulated gate bipolar transistor (igbt) // Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 6, no. 2, pp. 208–219, Apr 1991.

[2] A. R. Hefner and D. Diebolt, “An experimentally verified igbt model implemented in the saber circuit simulator,” Power Electronics, IEEE Transactions on, vol.9, no.5, pp. 532 – 542, 1994.

[3] A. R. Hefner and D. L. Blackburn, An analytical model for the steady state and transient characteristics of the power insulated-gate bipolar transistor // Solid-State Electronics, vol. 31, no. 10, pp. 1513 – 1532, 1988.

COMPACT (ELECTRICAL) MODEL OF AN INSULATED-GATE BIPOLAR TRANSISTOR

Nguyen Trong Thanh, V.R. Stempitsky

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus, vstem@bsuir.by

Abstract: this paper presents the development and verification of a compact (electrical) model of an insulated-gate bipolar transistor (IGBT). The model is based on a physically based approach combining the device's equivalent circuit with a system of equations describing key processes: charge carrier transport in the bipolar structure, base conductivity modulation, and impact ionization effects. The model was implemented in the Verilog-A hardware description language in the Cadence environment. Simulation of turn-off transients with various gate resistances was performed, and a family of output static characteristics was recorded, confirming the model's adequacy and suitability for analyzing device operation in real circuits with inductive loads. The advantage of the presented compact model is its high computational efficiency while maintaining accuracy.

Keywords. Insulated Gate Bipolar Transistor, compact model, power electronics, circuit simulation, Verilog-A, Cadence, output characteristics.