

УДК 621.382

DOI: 10.17223/00213411/62/6/151

*Э.В. СЕМЕНОВ¹, О.Ю. МАЛАХОВСКИЙ²***НЕКВАЗИСТАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ p - n -ПЕРЕХОДА БЕЗ РЕКУРСИИ
НА ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОМ УРОВНЕ**

Рассмотрена модель p - n -перехода, позволяющая адекватно описывать неквазистатические эффекты накопления и релаксации неравновесных носителей заряда. При этом уравнение диффузионного заряда записано в замкнутой, разрешенной относительно диффузионного заряда форме. Это позволило компьютерное программирование данной модели представить так, что у пользователя нет необходимости самостоятельно реализовывать рекурсию, разрешающую дифференциальное уравнение диффузионного заряда. В результате неквазистатическая модель p - n -перехода представлена в виде эквивалентной схемы, содержащей только обычные квазистатические элементы систем автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: p - n -переход, диффузионный заряд, неквазистатическая модель, обратное восстановление.

Введение

Известно, что классическая SPICE-модель полупроводникового диода неудовлетворительно описывает процесс накопления и релаксации неравновесных носителей заряда, который происходит при открывании и обратном восстановлении диода соответственно [1]. Это связано с тем, что количество заряда неравновесных носителей q_d рассчитывается по безынерционной (квазистатической) формуле

$$q_d = T i(t), \quad (1)$$

где $i(t)$ – описываемый вольт-амперной характеристикой (ВАХ) ток электропроводности; T – время жизни неравновесных носителей заряда.

Данная формула содержит внутреннее противоречие – с одной стороны, подвижность неравновесных носителей заряда полагается конечной, так как учитывается конкретное значение времени жизни. С другой стороны, по (1) получается, что при ступенчатом появлении тока $i(t)$ заряд неравновесных носителей мгновенно достигает установившегося значения, а при ступенчатом исчезновении $i(t)$ – мгновенно обнуляется.

Последнее обстоятельство не соответствует действительному поведению p - n -переходов, в особенности в режиме обратного восстановления. Экспериментально установлено, что после ступенчатого возникновения или исчезновения тока $i(t)$ (тока электропроводности, описываемого ВАХ) диффузионный заряд меняется экспоненциально [1]. Поэтому работающие в соответствии с (1) SPICE-модели дают большую погрешность в импульсных режимах работы диодов и биполярных транзисторов.

Основная идея для усовершенствования модели (1), изложенная во многих работах, состоит в замене алгебраического уравнения (1) на дифференциальное следующего вида [2, 3]:

$$q_d(t) = T i(t) - \tau_d dq_d(t)/dt, \quad (2)$$

где τ_d – постоянная времени релаксации диффузионного заряда.

Основной недостаток такого формального описания q_d состоит в том, что последнее уравнение не является разрешенным относительно q_d (в отличие от (1)). При компьютерной реализации модели p - n -перехода уравнение (2) разрешается при помощи рекурсивного алгоритма. Реализовать его на пользовательском уровне (без специального взаимодействия с симулятором) довольно сложно.

Результатом изложенного недостатка является практическое отсутствие неквазистатических компьютерных моделей в библиотеках элементов, поставляемых крупными производителями полупроводниковых приборов.

Кроме того, по индукции формула (2) может быть расширена только в классе линейных дифференциальных уравнений конечного порядка с соответствующим усложнением формы записи.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала
«Известия высших учебных заведений. Физика»
осуществляется на платформе
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>