Институту магистратуры СПбГУТ 5 лет

УДК 621.37

Построение схем замещения полупроводникового диода для моделирования режимов его включения и выключения

Шушпанов Д. В.✉**, Евдокимов А. С.**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи: *одним из основных элементов в ключевых схемах является полупроводниковый (n/n) диод. Он используется как отдельный выпрямительный элемент, а также является составной частью практически каждого силового транзистора. Поэтому для корректного расчета ключевого преобразователя напряжения (потери, КПД, пульсации) необходимо правильно рассчитать токи и напряжения при переключении n/n диода. Принимая во внимание существующие исследования модели n/n диода, используемой в программах моделирования, необходимо отметить, что она не отражает реальных физических процессов, возникающих в ключевом режиме работы n/n диода.* ***Целью работы*** *является рассмотрение возможности построения схем замещения n/n диода, временны́е диаграммы которых будут близки на качественном уровне временны́м диаграммам тока и напряжения на n/n диоде.* ***Новизна работы*** *заключается в том, что рассматриваются два состояния диода (открытое и закрытое), каждое из которых представляется цепью второго порядка. Показано, что индуктивность в схеме замещения n/n диода является не индуктивностью выводов диода, а результатом действия электромагнитных процессов, происходящих в самом n/n диоде при его включении/выключении.* ***Результат:*** *получены схемы замещения n/n диода для моделирования режимов его включения и выключения.* ***Теоретическая/Практическая значимость:*** *полученные схемы замещения позволяет лучше понять физику процессов, происходящих в n/n диоде при его включении/выключении. Объяснено появление диффузионной емкости n/n диода с точки зрения теории электромагнитного поля. Полученные схемы замещения n/n диода позволят более корректно моделировать процессы включения и выключения n/n диода, что очень важно при моделировании быстрых и медленных процессов в ключевых устройствах.*

Ключевые слова: *схема замещения, диод, проводник, диэлектрик, емкость диода, индуктивность диода*

Введение

С развитием полупроводниковой базы (высокоскоростные транзисторы, диоды) все более остро стоит вопрос моделирования радиоэлектронных устройств, состоящих из этой компонентной базы. Для корректного моделирования переходных процессов в современных радиоэлектронных устройствах, работающих в ключевом режиме, необходимо моделировать как медленные (ниже частоты переключения ключевых приборов), так и быстрые (проходящие при переключении ключевых приборов) процессы.

Библиографическая ссылка на статью:
Шушпанов Д. В., Евдокимов А. С. Построение схем замещения полупроводникового диода для моделирования режимов его включения и выключения // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 1. С. 5. EDN: IJMIOZ

Reference for citation:
Shushpanov D., Evdokimov A. Construction of Equivalent Circuits of a Semiconductor Diode to Simulate Its Modes (On and Off) // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 1. P. 5. EDN: IJMIOZ

© Шушпанов Д. В., Евдокимов А. С., 2024

Одним из основных элементов любой ключевой схемы является полупроводниковый (п/п) диод. Он используется как отдельный выпрямительный элемент, а также является составной частью практически каждого силового транзистора. Поэтому для корректного расчета ключевого преобразователя напряжения (потери, КПД, пульсации) необходимо правильно рассчитать токи и напряжения при переключении п/п диода.

В предыдущей статье [1] на макете и в программе моделирования Micro-CAP v.12 рассматривались временны́е диаграммы тока и напряжения на диоде при его включении и выключении. Было показано, что «классическая» модель диода, используемая в программах моделирования (на примере программы Micro-CAP v.12), не отражает реальных физических процессов, возникающих в п/п диоде при его включении/выключении. В качестве макета (схема испытаний) использовался генератор прямоугольных импульсов и RD-цепь (рисунок 1).

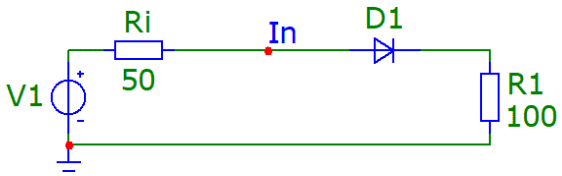


Рис. 1. Схема испытаний [1]

Генератором прямоугольных импульсов выступал встроенный генератор измерительного прибора HANDYSCOPE HS3, поэтому для его схемы замещения использовался источник напряжения с внутренним сопротивлением 50 Ом (см. рисунок 1). Напряжение генератора прямоугольных импульсов менялось от –7 до +7 В с частотой 100 кГц и длительность импульса 4,8 мкс (фронт включения 50 нс и фронт выключения 75 нс определялись из измерений). В качестве RD-цепи (рисунок 1) использовалось сопротивление 100 Ом и три различных диода. Измерялось напряжение: с выхода генератора; на резисторе 100 Ом (ток через диод); на диоде с помощью математики осциллографа. В качестве осциллографа использовался 4-канальный осциллограф TPS 2024B (200 МГц, 2 106 отсчетов за 1 с).

В качестве примера работы диода в ключевом режиме рассмотрим измеренные и рассчитанные в [1] временны́е диаграммы входного напряжения, напряжения и тока через диод при включении (рисунки 2а, 2б) и выключении (рисунки 2в, 2г) диода UF4005. Для удобства сравнения экспериментальных и смоделированных кривых они представлены в одинаковых цветах: желтый — напряжение генератора, зеленый — напряжение на резисторе (ток через диод), красный — напряжение на диоде, черный — мощность, выделяемая на диоде (показана только в модели).

Как следует из рисунка 2, различия измеренных и рассчитанных временны́х диаграмм видны на качественном уровне, т. е. «классическая» модель п/п диода [2] не может использоваться при моделировании ключевого режима работы реального п/п диода. Таким образом, необходимо пересмотреть «классические» представления о схеме замещения п/п диода для ее корректной работы при включении и выключении диода.

«Классическая» модель п/п диода состоит из параллельного соединения нелинейного сопротивления и нелинейной емкости [2]. Резистор определяет статические характеристики п/п диода, а конденсатор — динамические. Наличие только емкости в схеме замещения п/п диода говорит о том, что напряжение на диоде будет запаздывать по сравнению со своим током. Но измеренные временны́е диаграммы при включении (см. рисунок 2а) и выключении (см. рисунок 2в) п/п диода показывают противоположную картину — ток через диод запаздывает по сравнению с напряжением на диоде. То есть теория говорит о емкостном, а измерения — об индуктивном характере временны́х диаграмм при включении и выключении п/п диода.

Наличие индуктивности в модели п/п диода обычно связывают с «паразитной» индуктивностью выводов п/п диода [3]. Но для того, чтобы было такое запаздывание тока диода, как было указано в [1], номинал индуктивности должен быть порядка долей — единиц мкГн. Это свидетельствует о совершенно другом физическом явлении, приводящем к появлению этой индуктивности в схеме замещения п/п диода.

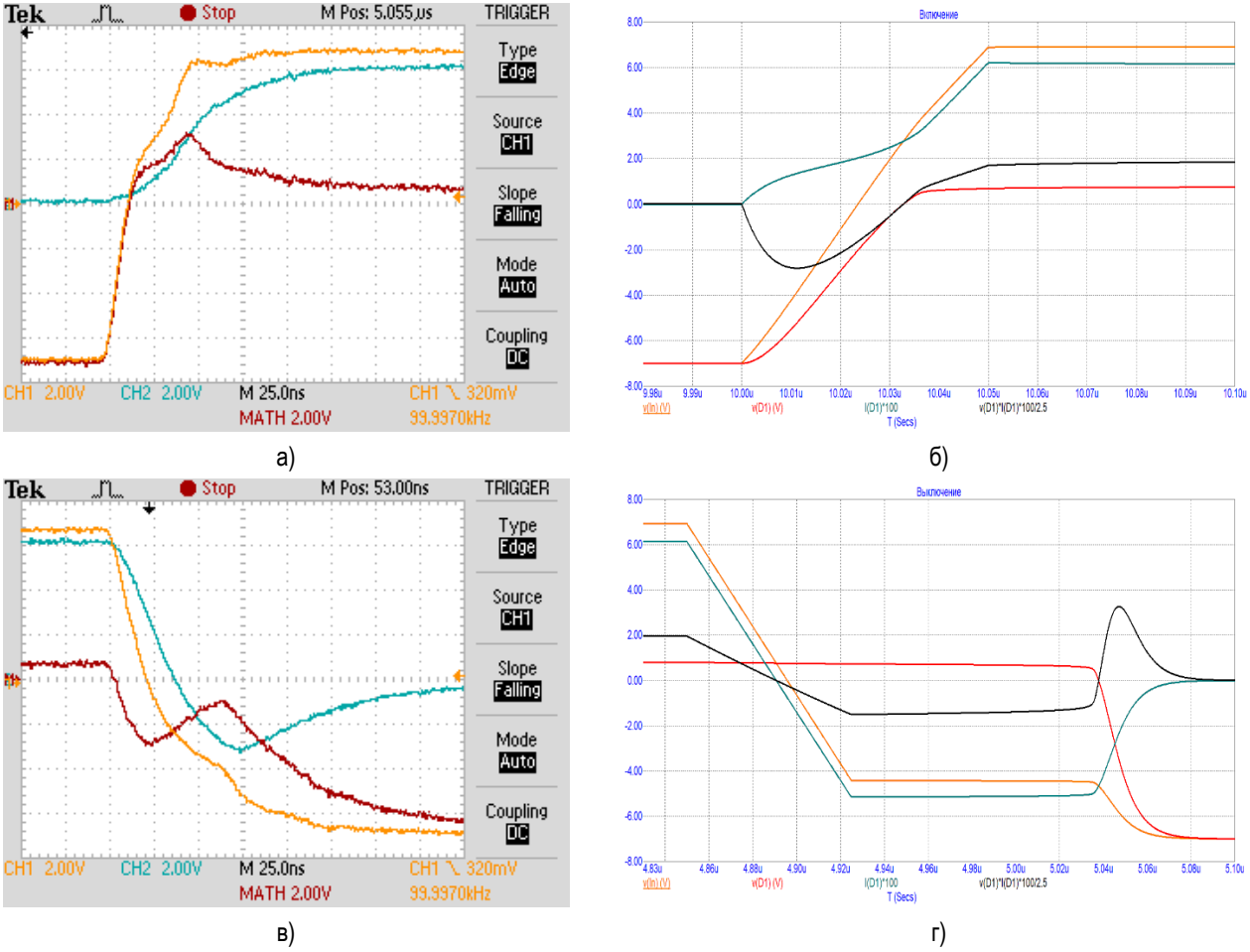


Рис. 2. Временны́е диаграммы при включении (а, б) и выключении (в, г) диода UF4005:
а, в) измеренные на макете; б, г) полученные на модели

Цель работы — рассмотреть возможность построения схем замещения п/п диода, временны́е диаграммы которых будут близки на качественном уровне временны́м диаграммам тока и напряжения на п/п диоде (см. рисунки 2а, 2в), измеренным в [1]. Элементы в полученных схемах замещения п/п диода должны иметь физический смысл, т. е. должны объясняться физическими явлениями, протекающими в п/п диоде.

Дуальность проводника и диэлектрика

Так как п/п диод в зависимости от приложенного к нему напряжения может представляться в одном из двух состояний (включенном и выключенном), рассмотрим сначала схемы замещения проводника и диэлектрика. В [4] были измерены частотные характеристики модуля и фазы комплексного сопротивления простейшего проводника — электрического провода (рисунок 3а) и была представлена схема его замещения в форме параллельного колебательного контура (рисунок 3в). В [5] были измерены частотные характеристики модуля и фазы комплексного сопротивления диэлектрика (рисунок 3б) и была представлена его схема замещения в форме последовательного колебательного контура (рисунок 3г).

В [5] было показано, что в схеме замещения любого реального физического элемента всегда будут присутствовать идеальные сопротивление, емкость и индуктивность, т. е. согласно закону сохранения энергии в любом физическом элементе всегда будут действовать электрическое и магнитное поле, а также проводимость [5]. Основной вопрос — в какой области частот какое из явлений (действие электрического поля, действие магнитного поля или проводимость) будет превалировать и каким явлением можно пренебречь (его суммарный вклад минимальный).

В схеме замещения диэлектрика (рисунок 3г) основным параметром является емкость C. Наличие там сопротивления R_C связывают с тем, что относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика является не постоянной, а частотно-зависимой комплексной величиной [5–8]:

$$\hat{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega). \quad (1)$$

Из-за того, что диэлектрик обладает весьма малой (по сравнению с основным явлением диэлектрика – поляризацией) электропроводностью, т. е. в диэлектрике возникает и существует сравнительно устойчивое состояние с чрезвычайно малой электронной проводимостью [6, 7], в схеме замещения диэлектрика возникает сопротивление утечки R_l, подключенное параллельно емкости C (см. рисунок 3г).

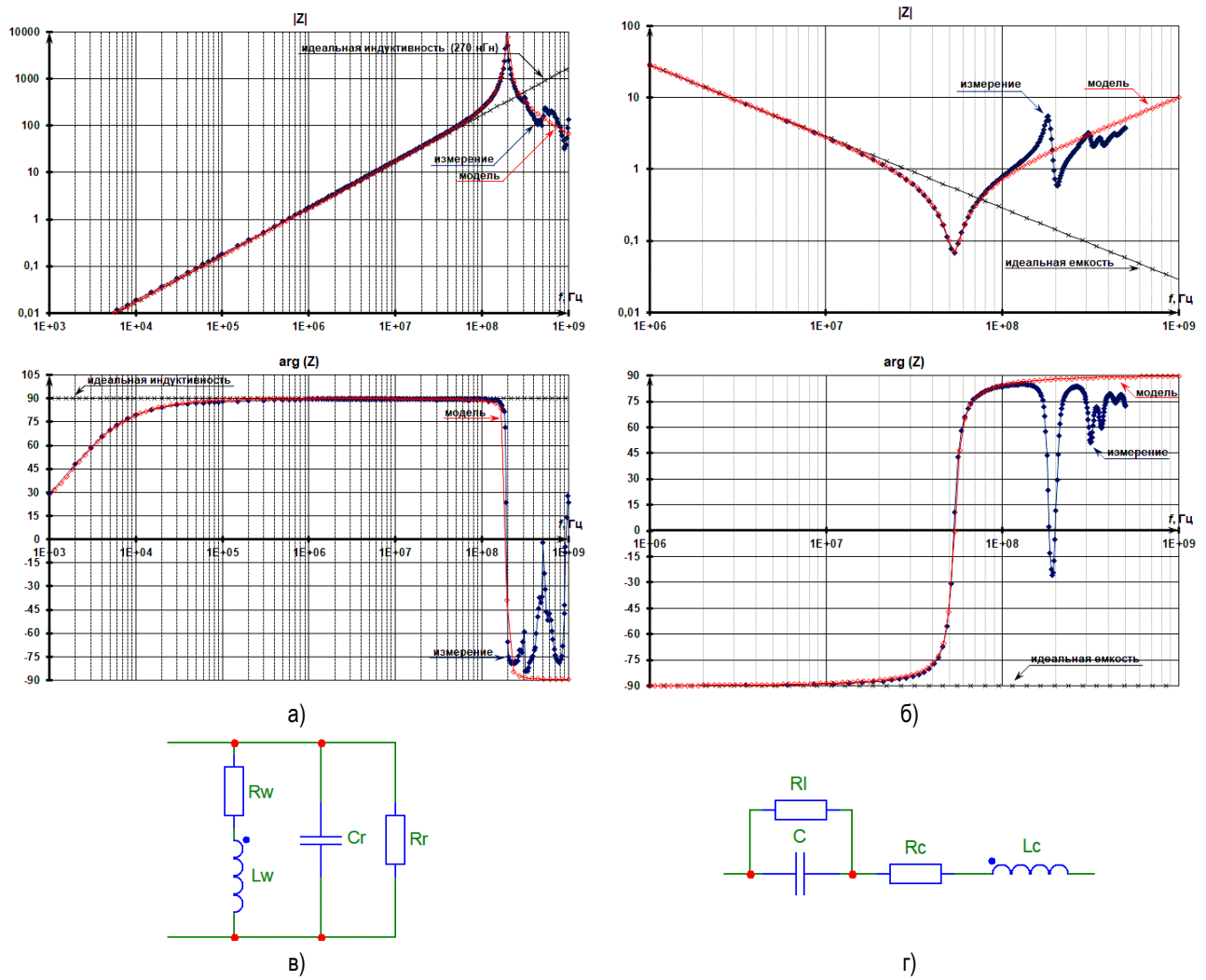


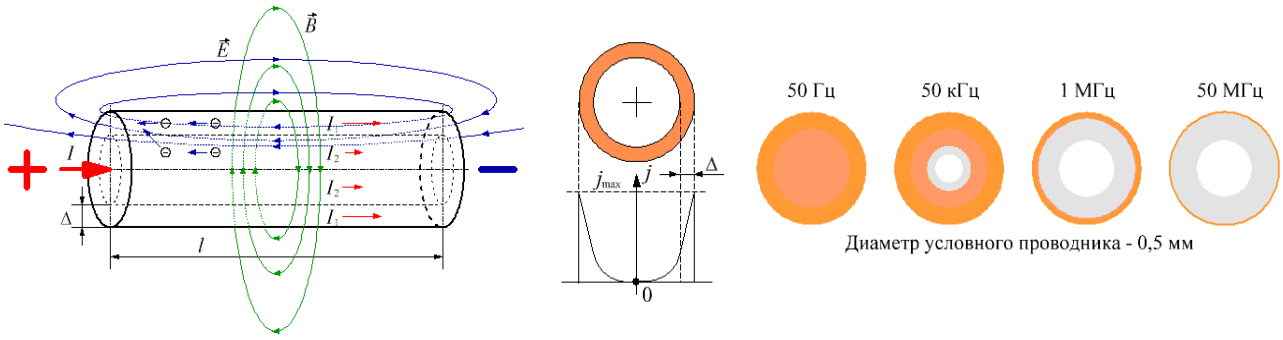
Рис. 3. Частотные характеристики модуля и фазы комплексного сопротивления провода при ∅ = 1,5 мм и длине 38 см (а, в) и диэлектрика (б, г): а, б) измеренное значение; в, г) схема замещения

«Паразитная» индуктивность L_C в схеме замещения диэлектрика появляется, как было сказано в [5], за счет действия переменного магнитного поля, которое возникает в диэлектрике при протекании через него переменного электрического тока.

Для схемы замещения провода (см. рисунок 3в) основными параметрами являются омическое сопротивление провода R_W, характеризующее тепловое действие провода, и индуктивность провода L_W, возникающая из-за действия переменного магнитного поля, которое появляется при протекании переменного электрического тока через проводник.

В [9] с помощью скин-эффекта была объяснена причина появления конденсатора C_R и параллельного резистора R_R (как сопротивление утечки из-за наличия узкого скин-слоя Δ) в схеме замещения провода (см. рисунок 3в). Рассмотрим еще раз данное объяснение.

В проводе длиной l из-за приложенного к нему напряжения течет электрический ток, создающий вихревое магнитное поле $\vec{B}$ (рисунок 4а). При переменном электрическом токе в проводе возникает переменное вихревое магнитное поле, порождающее переменное вихревое электрическое поле $\vec{E}$, которое выталкивает электроны к поверхности провода, где они продолжают дальше протекать. То есть возникает поверхностный эффект, или скин-эффект: плотность тока максимальна у поверхности провода и падает по мере проникновения к центру проводника [10]. Упрощено можно сказать, что вблизи поверхности провода на глубине Δ (см. рисунки 4а, 4б), которая называется толщиной скин-слоя, в проводе протекает ток I_1, который больше тока I_2, протекающего в сердцевине провода; другими словами, происходит запаздывание отрицательных зарядов в центре провода (рисунок 4а).



а) б) в)

Рис. 4. Пояснения к возникновению емкости провода из-за скин-эффекта:
а) провод; б) распределение плотности тока *j;* в) зависимость скин-слоя от частоты сигнала

При протекании переменного электрического тока в электрическом проводе происходит перераспределение заряда в сердцевине провода то на одном, то на другом конце провода, что равносильно перезаряду обкладок конденсатора. И, начиная с некоторой частоты переменного тока, толщина скин-слоя Δ будет значительно мала (см. рисунок 4в), основная масса заряженных частиц будет двигаться только по поверхности провода, оставшиеся же заряды, двигающиеся в сердцевине провода от одного конца провода к другому, не будут успевать выходить из провода во внешнюю цепь (период переменного тока становится больше времени протекании заряда от одного конца провода до другого), перезаряжая границы (концы) провода. И провод становится уже просто емкостью или диэлектриком, так как толщина скин-слоя Δ значительно мала по сравнению с диаметром провода и фаза комплексного сопротивления провода близка к –90 ° (см. рисунок 3а).

Схемы замещения п/п диода

Рассмотрим теперь п/п диод в двух состояниях: в выключенном как диэлектрик и в открытом как проводник. В этом случае открытый п/п диод представляется параллельным колебательным контуром (см. рисунок 3в), а закрытый п/п диод — последовательным колебательным контуром (см. рисунок 3г). Когда п/п диод закрыт (к нему приложено обратное напряжение), емкость в схеме замещения диэлектрика представляет барьерную емкость п/п диода, равную [11]:

$$C_{\text{БАР}} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S_{\text{p-n}}}{L_{\text{p-n}}(U)}, \tag{2}$$

где ε_0 = 8,854187817·10^{-12} Ф/м — электрическая постоянная; ε — относительная диэлектрическая проницаемость запертого п/п диода; $S_{p\text{-}n}$ — площадь *p-n* перехода; $L_{p\text{-}n}(U)$ — ширина *p-n* перехода (области пространственного заряда) в зависимости от приложенного обратного напряжения U, так как п/п диод при обратном смещении [11] представляет собой плоский конденсатор емкостью, равной:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}, \tag{3}$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика расположенного между обкладками конденсатора; S — площадь обкладки конденсатора; d — расстояние между обкладками.

Из-за того, что запертый диод представляет собой диэлектрик, а у схемы замещения диэлектрика, как было сказано выше, существует «паразитная» индуктивность L_C за счет действия переменного магнитного поля, возникающего при протекании переменного электрического тока через диэлектрик, то в схему замещения запертого п/п диода также необходимо добавить последовательную индуктивность.

В качестве сопротивления утечки конденсатора R_l (см. рисунок 3г) в схеме замещения запертого п/п диода будем использовать сопротивление запертого диода. В этом случае схему испытаний (см. рисунок 1) со схемой замещения запертого состояния п/п диода можно представить в виде схемы, изображенной на рисунке 5а. Схема сделана в программе FASTMEAN [12, 13]. В ней барьерная емкость диода представлена емкостью C_1 = 20 пФ; индуктивность, возникающая за счет действия переменного электрического поля, порождающего переменное магнитное поле, представлена индуктивностью L_1 = 2 мкГн. Последовательное сопротивление R_3, моделирующее последовательное сопротивление R_C в схеме замещения диэлектрика (см. рисунок 3г), в схеме замещения запертого п/п диода (см. рисунок 5а) практически не оказывает никакого эффекта из-за того, что оно последовательно подключено с внутренним сопротивлением 50 Ом.

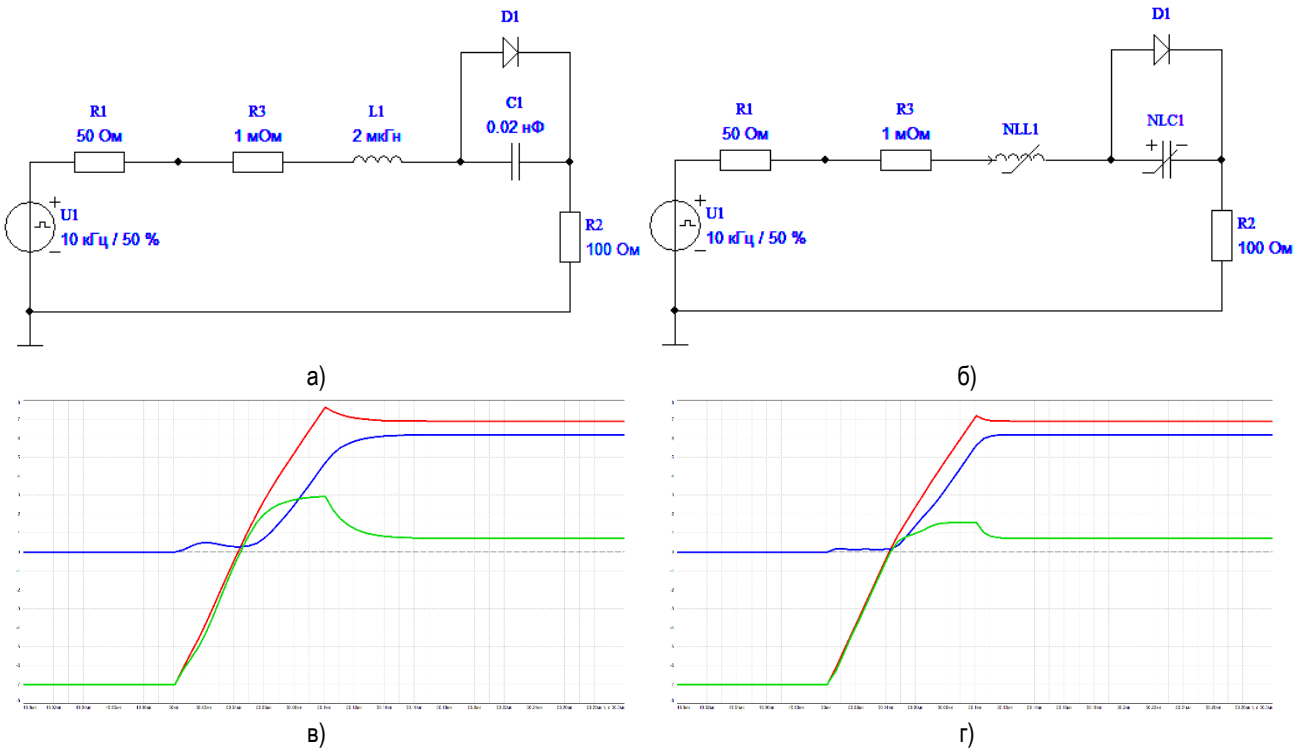


Рис. 5. Схемы замещения при включении п/п диода (а, б) и полученные для них временны́е диаграммы (в, г)

Если в качестве сопротивления утечки R_l использовать диод D_1 с кусочно-линейной вольтамперной характеристикой (сопротивление в открытом состоянии составит 0,1 Ом, сопротивление в закрытом состоянии – 1 МОм, напряжение отсечки – 0,7 В), то данную схему замещения (см. рисунок 5а) можно использовать для моделирования включения п/п диода. В этом случае получаем следующее временны́е диаграммы входного напряжения, напряжения и тока через диод при его включении (см. рисунок 5в), которые уже будут качественно близки измеренным временны́м диаграммам при включении п/п диода (см. рисунок 2а). Для уменьшения величины перенапряжения на диоде при его включении (см. рисунок 5г) необходимо конденсатор C_1 заменить нелинейной емкостью NLC_1 (см. рисунок 5б). Для уменьшения величины тока диода, когда он еще заперт (см. рисунок 5г), необходимо индуктивность L_1 заменить нелинейной индуктивностью NLL_1 (см. рисунок 5б). Это позволит еще больше приблизить смоделированные и измеренные временны́е диаграммы при включении п/п диода.

Таким образом, при включении п/п диода необходимо перезарядить барьерную емкость диода и последовательную индуктивность диода, которая не является индуктивностью выводов [3], а связана с изменением электрического поля при протекании переменного электрического тока [5]. Для оценки временны́х диаграмм при включении диода можно использовать линейные емкость и индуктивность. Для того, чтобы результаты моделирования были близки к измеренным, необходимо использовать нелинейные емкость и индуктивность.

Когда п/п диод открыт (к нему приложено прямое напряжение), его можно заменить схемой замещения проводника (см. рисунок 3в). В этом случае омическое сопротивление провода R_W представляет сопротивление п/п диода в открытом состоянии, а индуктивность провода L_W — индуктивность, которая появляется из-за действия переменного магнитного поля, возникающего при протекании переменного тока через открытый п/п диод.

При прямом напряжении на п/п диоде (больше порогового напряжения) динамические характеристики п/п диода определяются диффузионной емкостью, обусловленной неосновными носителями, инжектированными в базу (база — слабо легированная область *p-n* перехода, в которую преимущественно идет инжекция) [11], и соответствующая выражению:

$$C_{\text{ДИФ}} = \frac{dQ_{\text{инж}}}{dU} \approx \frac{\tau I}{N\phi_{\text{T}}}, \tag{4}$$

где $Q_{\text{инж}}$ — заряд, пролетающий через базу диода; U — напряжение прямого смещения *p-n* перехода; I — прямой ток через *p-n* переход; τ — время пролета носителей заряда через базу диода; N — коэффициент инжекции, Φ_{T} — тепловой потенциал, равный 0,025 В при температуре 300 К.

Как видно из выражения (4), диффузионная емкость п/п диода прямо пропорциональна времени пролета носителей заряда τ и силе тока I, т. е. чем больше время жизни зарядов внутри п/п диода, тем больше его диффузионная емкость. А это очень похоже на возникновение емкости провода из-за скин-эффекта, описанное ранее, таким образом, в открытом п/п диоде мы имеем похожее запаздывание зарядов, как и в проводе. Только в проводе был один вид носителей заряда (электроны), а в п/п диоде – два (электроны и дырки). Следовательно, и в проводе, и в открытом п/п диоде мы имеем переменное вихревое электрическое поле, которое зависит от протекающего через него тока. Теперь становится понятней, почему диффузионная емкость п/п диода зависит от прямого тока. Больший ток создает большее магнитное поле, что в свою очередь создает большее переменное вихревое электрическое поле, а это увеличивает емкость.

Тогда емкость C_R в схеме замещения проводника (см. рисунок 3в) представляет диффузионную емкость п/п диода, а параллельный резистора R_R – сопротивление утечки данной емкости.

В этом случае схему испытаний (см. рисунок 1) со схемой замещения открытого состояния п/п диода представляем в виде схемы, изображенной на рисунке 6а. В данной схеме диффузионная емкость п/п диода представлена емкостью C_1 = 200 пФ, индуктивность открытого п/п диода представлена индуктивностью L_1 = 1 нГн. Параллельное сопротивление R_3, моделирующее параллельное сопротивление R_R в схеме замещения проводника (см. рисунок 3в), в схеме открытого диода (рисунок 6а) практически не оказывает никакого эффекта из-за того, что оно влияет на более высоких частотах, т. е. при меньшей длительности выключения п/п диода.

Если в качестве сопротивление провода R_W использовать диод D_1 с кусочно-линейной вольт-амперной характеристикой (сопротивление в открытом состоянии, как и для R_l, составит 0,1 Ом, сопротивление в закрытом состоянии – 1 МОм, напряжение отсечки – 0,7 В), то данную схему (рисунок 6а) можно использовать для моделирования выключения п/п диода. В этом случае получаем следующие временны́е диаграммы входного напряжения, напряжения и тока через диод при его выключении (рисунок 6б), которые уже будут близки измеренным временны́м диаграммам при включении п/п диода (см. рисунок 2в). Для изменения характера тока (величина и длительность выброса, обратное время восстановления) при отключении п/п диода (рисунок 6г) необходимо емкость C_1 заменить нелинейной емкостью NLC_1 (рисунок 6в). Для осуществления задержки тока п/п диода по сравнению с напряжением при его отключении необходимо увеличить значение индуктивности L_1 до 0,5 мкГн. Это позволит еще больше приблизить смоделированные и измеренные временны́е диаграммы при выключении п/п диода.

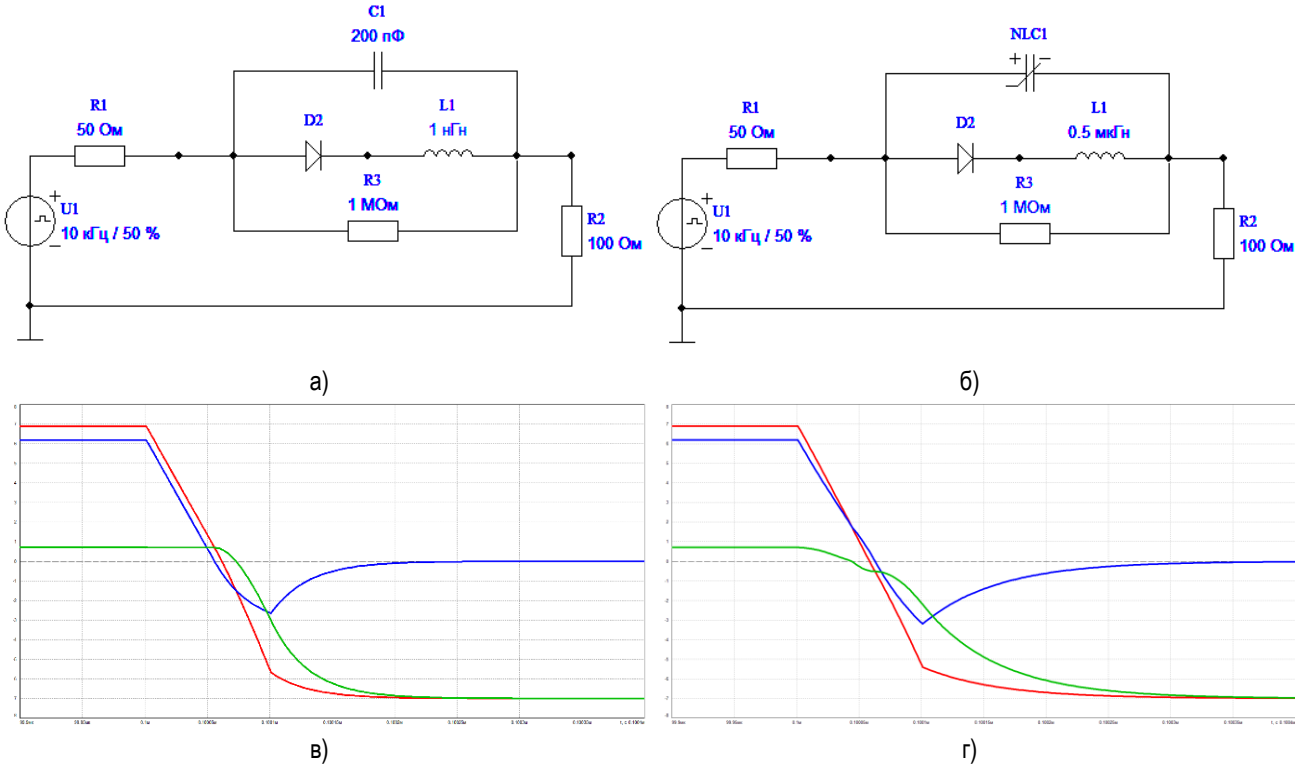


Рис. 6. Схемы замещения при выключении п/п диода (а, б) и полученные для них временны́е диаграммы (в, г)

Таким образом, при выключении п/п диода необходимо перезарядить диффузионную емкость диода и последовательную индуктивность диода, которая связана с изменением магнитного поля при протекании переменного электрического тока через открытый п/п диод (проводник). Для того, чтобы результаты моделирования были более близки измеренным, необходимо использовать нелинейную емкость и, возможно, большее значение индуктивности.

В итоге использование схем замещения проводника (см. рисунок 3в) и диэлектрика (см. рисунок 3г) для моделирования режимов выключения и включения п/п диода дает результаты (напряжение и ток через диод — см. рисунки 5, 6) качественно близкие измеренным на макете (см. рисунки 2а, 2в) в отличие от использования «классической» схемы замещения п/п диода (см. рисунки 2б, 2г), используемой в большинстве SPICE программах моделирования [2].

Выводы

В работе предложены электрические схемы замещения п/п диода для режима включения диода (см. рисунки 5а, 5в) и режима выключения диода (см. рисунки 6а, 6в). Их временны́е диаграммы входного напряжения, напряжения и тока через диод получились достаточно близкими (на качественном уровне) с измеренными временны́ми диаграммами входного напряжения, напряжения и тока через диод при включении и выключении диода (на примере диода UF4005). Это позволяет использовать данные схемы замещения п/п диода для корректного моделирования быстрых и медленных процессов в ключевых устройствах.

В схеме замещения п/п диода, как для режима включения, так и выключения диода необходимо наличие индуктивности. Данная индуктивность не является индуктивностью выводов, как обычно считается [3], а возникает из-за электромагнитных процессов, протекающих в самом п/п диоде. Это показано по аналогии со схемами замещения проводника и диэлектрика.

Данные схемы замещения п/п диода (для режима включения и выключения п/п диода) позволяют лучше понять физику процессов, происходящих в п/п диоде. В дальнейшем планируется на основании этих схем замещения сделать обобщенную схему замещения п/п диода, которая отражает все процессы, происходящие при его включении/выключении.

Предложенные схемы замещения включения/выключения п/п диода сравнивались с измеренными в [1] временны́ми диаграммами тока и напряжения на п/п диоде с фронтами включения порядка 50–100 нс. Для построения более высокочастотных моделей включения/выключения п/п диода необходимо: 1) измерить частотные характеристики комплексного сопротивления диода в открытом и закрытом состоянии; 2) измерить временны́е диаграммы тока и напряжения при включении и выключении п/п диода с меньшей длительностью фронта включения/выключения при разных токах и напряжениях. Кроме того, необходимо оценить влияние измерительного оборудования на измеряемые характеристики, т. е. оценить точность и корректность измерений. Все вышеперечисленное будет исследовано в дальнейших работах по данному направлению. Поэтому в настоящей статье все временны́е диаграммы сравнивались только на качественном уровне, так как именно на качественном уровне и было в [1] показано расхождение моделируемых и измеренных временны́х диаграмм напряжения и тока в п/п диоде при его включении/выключении.

Литература

1. Шушпанов Д. В. Некорректность результатов расчета ключевого режима работы модели диода в SPICE программах моделирования // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023): сборник научных статей XII Международной научно-технической и научно-методической конференции. (Санкт-Петербург, 28 февраля – 01 марта 2023 г.). СПб.: СПбГУТ, 2023. Т. 3. С. 710–714. EDN: DEKHRH

2. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-CAP. Версии 9, 10. Смоленск: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. 617 с.

3. Розанов Ю. К., Рябчицкий М. В., Кваснюк А. А. Силовая электроника: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. 632 с.

4. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В., Фоченков Э. А. Эквивалентная схема замещения дросселя на нанокристаллическом сердечнике с большой магнитной проницаемостью // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25. № 4. С. 100–121. DOI: 10.18469/1810-3189.2022.25.4.100-121. EDN: CUURMI

5. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В. Эквивалентная схема замещения диэлектрика в широком диапазоне частот (0 Гц – 500 МГц) // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2022. Т. 25. № 3. С. 43–57. DOI: 10.18469/1810-3189.2022.25.3.43-57. EDN: ZQLKUD

6. Поплавко Ю. М. Физика диэлектриков: учебное пособие для вузов. Киев: Вища школа. Головное издательство, 1980. 400 с.

7. Рез И. С., Поплавко Ю. М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. М.: Радио и связь, 1989. 288 с.

8. Гусев Ю. А. Основы диэлектрической спектроскопии: учебное пособие. Казань: КГУ, 2008. 112 с.

9. Дмитриков В. Ф., Шушпанов Д. В. К вопросу использования емкостно-связанных элементов для объяснения взаимного влияния электрических проводов // Радиотехника. 2024. Т. 88. № 1. С. 15−30. DOI: 10.18127/j00338486-202401-03. EDN: DHBIOO

10. Матвеев А. В. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983. 463 с.

11. Троян П. Е. Твердотельная электроника: учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2006. 330 с.

12. Артым А. Д., Есполов К. Ж., Смирнов В. С., Филин В. А. Автоматизированная компьютерная программа быстрого расчета и оптимизации переходных и стационарных процессов в электрических цепях радиотехнических и телекоммуникационных устройств (FASTMEAN). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № RU 2002610191 от 15 февраля 2002.

13. Программа FASTMEAN. URL: http://www.fastmean.ru (дата обращения 14.03.2024)

Статья поступила 15 марта 2024 г.
Одобрена после рецензирования 23 марта 2024 г.
Принята к публикации 27 марта 2024 г.

Информация об авторах

Шушпанов Дмитрий Викторович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретических основ телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E–mail: dimasf@inbox.ru

Евдокимов Александр Сергеевич — студент 1-го курса магистратуры (направление 11.04.04 Электроника и наноэлектроника) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E–mail: saseva31@mail.ru

Construction of Equivalent Circuits of a Semiconductor Diode to Simulate Its Modes (On and Off)

D. Shushpanov ✉, A. Evdokimov

The Bonch-Bruevich St.-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Purpose: *The main element in switch circuits is the semiconductor diode. It is used as a separate rectifier element and is an integral part of almost every power transistor. Therefore, to correctly calculate the pulse voltage converter (losses, efficiency, ripple), it is necessary to correctly calculate the currents and voltages when switching the diode. In previous work, it was shown that the diode model used in simulation programs does not show the real physical processes occurring in the switch operating mode of the semiconductor diode. The purpose of the work is to consider the physics of processes occurring in a semiconductor diode in order to create equivalent circuits that correctly show these physical processes when the semiconductor diode is turned on and off.* ***Novelty*** *of the work lies in the fact that two states (open and closed) of the diode are considered, each of which is represented by a second-order circuit. It is shown that the inductance in the semiconductor diode equivalent circuit is not the inductance of the diode leads, but is the result of the action of electromagnetic processes occurring in the semiconductor diode itself when it is turned on/off.* ***Results.*** *The equivalent circuits of a semiconductor diode were obtained to simulate the processes of turning the diode on and off.* ***Practical relevance.*** *The resulting equivalent circuits allow us to better understand the physics of the processes occurring in the semiconductor diode when it is turned on/off. The appearance of the diffusion capacitance of the semiconductor diode is explained from the point of view of the theory of the electromagnetic field. The resulting equivalent circuits of the semiconductor diode will make it possible to more correctly simulate the processes of turning the diode on and off, which is very important when simulating fast and slow processes in switch devices.*

Keywords: *equivalent circuit, diode, conductor, dielectric, diode capacitance, diode inductance*

Information about Authors

Shushpanov Dmitry — Ph.D. of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Theoretical Foundations of Telecommunications (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E–mail: dimasf@inbox.ru

Evdokimov Alexander — a 1st Year Master's Student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E–mail: saseva31@mail.ru