

МОДЕЛЬ ДИОДА С НАКОПЛЕНИЕМ ЗАРЯДА ДЛЯ АНАЛИЗА СХЕМ ГЕНЕРАЦИИ СВЕРХКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

А. М. Бобрешов, Ю. И. Китаев, В. А. Степкин, Г. К. Усков

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 27.09.2012 г.

Аннотация: Проведен анализ методов моделирования диодов с накоплением заряда. Показана необходимость учета влияния токов утечки заряда из активной области и образованного ими «паразитного» заряда, накапливающегося в легированных областях диода, на процесс быстрого восстановления его обратного сопротивления. Разработана модель диода с накоплением заряда, с учетом основных нелинейных процессов в режиме генерации сверхкоротких импульсов.

Ключевые слова: сверхкороткий видеоимпульс, диод с накоплением заряда, резкое восстановление, паразитный заряд, моделирование нелинейных эффектов.

Abstract: Analysis of step recovery diode models for design methods is presented. It is shown that leakage current influence have to be taking into account. Nowel SRD model including nonlinear processes for modeling the ultrashort pulses generation is developed.

Key words: step recovery effect, ultra-short pulses, step recovery diode, nonlinear effects modeling.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно разрабатываются радиосистемы, использующие в качестве сигналов сверхкороткие импульсы (СКИ) субнаносекундной длительности. Наиболее важными параметрами генерируемого СКИ для приложений радиолокации и связи являются частота повторения импульсов и их амплитуда, которые определяются переходными процессами в схеме генератора и особенностями работы ключевого элемента. В качестве последних могут использоваться полупроводниковые размыкатели тока с малым временем переключения, например различные виды диодов с накоплением заряда (Step Recovery Diode, или SRD) [1, 2].

В настоящее время разработан ряд моделей SRD [3–5], которые используются в системах компьютерного проектирования электронных устройств. Однако при моделировании генераторов сверхкоротких импульсов с индуктивным накопителем энергии некоторые свойства диодов, наблюдаемые экспериментально, в существующих моделях не отражены. Например, энергия импульса, формируемого при моделировании, линейно возрастает с увеличением накопленного

в диоде заряда, в то время как в эксперименте наблюдается ее насыщение [6] (рис. 1).

АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ SRD

Зачастую в качестве упрощенной модели диода рассматривается p - i - n структура, которая описывает большинство известных SRD. Она содержит три области: сильнолегированные p^+ и n^+ области, и тонкий слой собственного полупроводника между ними (активная область или I -область).

Работа SRD в режиме переключения, включает две стадии – стадию накопления заряда в активной области прибора и стадию его рассасывания. На границе раздела легированных областей и I -области образуются полупроводниковые переходы. Накопление заряда в I -области происходит, когда эти переходы смещаются в прямом направлении, и осуществляется инжекция дырок и электронов из p^+ и n^+ областей в активную область диода. Таким образом, она заполняется электронно-дырочной плазмой и становится участком полупроводниковой структуры, обладающим высокой проводимостью. При смене полярности напряжения на диоде под действием электрического поля заряд активной области начинает рассасываться. Состояние с высокой проводимостью сохраняется, пока концентрация носителей, находящихся в плазме, не будет равна нулю.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (Соглашение № 14В.37.21.0620 от 20.08.2012 г. и № 14.В37.21.1168 от 14.09.2012 г.).

© Бобрешов А. М., Китаев Ю. И., Степкин В. А., Усков Г. К., 2012

В течение этой фазы диод ведет себя аналогично конденсатору большой емкости [4].

После полного рассасывания заряда из активной области диода быстро восстанавливается его состояние высокого сопротивления, и ток через SRD резко уменьшается, что эквивалентно уменьшению емкости. В таком режиме работы диод может рассматриваться как нелинейная емкость. Поэтому очевидно, что в качестве наиболее простой модели диода с накоплением заряда может использоваться идеализированная эквивалентная схема [3,4], содержащая две емкости C_{np} и $C_{обр}$ и переключатель с нулевым временем переключения, коммутирующий эти емкости. C_{np} представляет собой аналог диффузионной емкости I слоя диода на стадии накопления. После смены полярности напряжения, приложенного к диоду, эта емкость начинает разряжаться по аналогии с рассасыванием заряда I -области. В момент времени, когда заряд станет равным нулю, происходит мгновенное переключение на вторую емкость — $C_{обр}$, которая фактически представляет собой барьерную емкость SRD.

Работу такой модели можно описать следующим выражением:

$$Q(V) = \begin{cases} C_{np}(V - V_0), & V \geq V_0; \\ C_{обр}(V - V_0), & V < V_0, \end{cases}$$

где V — напряжение на диоде, V_0 — контактная разность потенциалов диода.

Восстановление высокого сопротивления происходит настолько быстро (десятки пикосекунд), что в большинстве практических применений может считаться мгновенным. Однако замедление переходных процессов в схеме часто бывает обусловлено влиянием емкости диода в непроводящем состоянии и конечным временем переключения с C_{np} на $C_{обр}$.

Так в [5] приведена модель, учитывающая конечное время переключения. Зависимость заряда от напряжения на диоде выражается соотношением:

$$Q(V) = \begin{cases} C_{обр} V, & V \leq 0 \\ \frac{C_{np} - C_{обр}}{2V_0} \left(V + \frac{C_{обр} V_0}{C_{np} - C_{обр}} \right) - \frac{C_{обр}^2}{2(C_{np} - C_{обр})} V_0, & 0 < V < V_0 \\ C_{np} V - \frac{C_{np} - C_{обр}}{2} V_0, & V \geq V_0 \end{cases}.$$

Однако такие модели слишком просты, чтобы корректно описать процесс резкого восстановления высокого обратного сопротивления SRD. В рассмотренных моделях не учитываются такие параметры реальных диодов как времена жизни носителей зарядов, которые определяются процессом рекомбинации. Кроме того, в них не учитывается тот факт, что из активной области диода происходит утечка заряда: некоторые электроны преодолевают потенциальный барьер и проникают в p^+ область, дырки проникают в n^+ область диода. А так же, вследствие амбиполярной диффузии часть электронов и дырок оказывается в собственном полупроводнике за границей активной области диода. В результате накапливается некоторый «паразитный» заряд [6], существенной особенностью которого является тот факт, что его рассасывание приводит к замедлению процесса переключения диода в состояние с высоким сопротивлением и потере энергии формируемого импульса. Таким образом, в модели SRD необходим учет процессов, описанных выше.

МОДЕЛЬ SRD

С учетом вышесказанного была предложена модель диода, учитывающая накопление и утечку заряда I -области, время переключения и влияние на эти процессы прямого тока накачки SRD. В модели выделены следующие стадии процесса: стадия накопления заряда в диоде; стадия рассасывания заряда активной области диода; стадия рассасывания «паразитного» заряда диода.

Для стадии накопления заряда в диоде предполагается, что процессы инжекции носителей в активную область диода стационарны. Тогда для заряда активной области диода Q_{in} запишем следующее выражение:

$$\frac{dQ_{in}}{dt} = I - I_R - I_L, \quad (1)$$

где I — ток в цепи диода, I_R — ток рекомбинации заряда в активной области диода, I_L — ток утечки заряда из активной области диода.

Причем ток рекомбинации

$$I_R = \frac{Q_{in}}{\tau_m} + K \cdot Q_{in}^2,$$

где τ_m — время жизни заряда в активной области диода, K — коэффициент пропорциональности. Квадратичное слагаемое в этой форму-

ле соответствует прямой рекомбинации электронов и дырок, а линейное — рекомбинации с участием промежуточных центров рекомбинации (ловушек). Экспериментальные исследования показывают, что рекомбинация с участием ловушек сильно преобладает над прямой рекомбинацией [7], поэтому в модели ограничимся линейной зависимостью тока рекомбинации от величины накопленного заряда.

Из теории Шокли для полупроводниковых переходов следует, что ток утечки I_L заряда из активной области пропорционален квадрату накопленного заряда

$$I_L = \beta \cdot Q_{in}^2.$$

Таким образом, для зависимости заряда, накопленного в I -области, от тока накачки в стационарном режиме в соответствии с (1) предлагается следующая аппроксимация:

$$I = \alpha \cdot Q_{in} + \beta \cdot Q_{in}^2, \quad (2)$$

где α и β — коэффициенты аппроксимации. Линейный член характеризует рекомбинацию носителей заряда Q_{in} , а квадратичный — токи утечки носителей заряда из I -области в легированные. Наличие квадратичной составляющей тока может быть объяснено прямой рекомбинацией зарядов в активной области, однако, в литературе при рассмотрении кремниевых полупроводниковых приборов обычно используется линейная зависимость тока рекомбинации от заряда [7], то есть, доминирующей является рекомбинация с участием промежуточных центров. Поэтому квадратичная составляющая тока обусловлена, главным образом, током утечки заряда из активной области диода. Вычисление тока утечки с использованием соотношений, применяемых в теории полупроводниковых переходов, также приводит к квадратичной зависимости тока от заряда.

Для «паразитного» заряда на стадии накопления выполняется следующее равенство:

$$\frac{dQ_{ext}}{dt} = I_L - \frac{Q_{ext}}{\tau_{ext}}, \quad (3)$$

где τ_{ext} — время жизни носителей «паразитного» заряда Q_{ext} .

Увеличение «паразитного» заряда происходит за счет токов утечки. Второй член в правой части уравнения соответствует рекомбинации этого заряда.

Стадия рассасывания зарядов, накопленных в полупроводниковой структуре, наступает после смены полярности напряжения на диоде.

Благодаря накопленному заряду в активной области, через диод протекает обратный ток. В величину тока вносят свой вклад различные процессы, среди которых можно выделить рассасывание электронно-дырочной плазмы в I -области под действием электрического поля, ее рекомбинацию, рассасывание и рекомбинацию паразитного заряда в сильнолегированных областях полупроводниковой структуры диода.

На стадии рассасывания заряда в диоде ток через него $I < 0$. Ток утечки $I_L \approx 0$ вследствие того, что рассасывание заряда происходит при обратном смещении на переходах активной области с n^+ и p^+ областями диода, «высота» барьеров увеличивается и поэтому утечка электронов и дырок из активной области диода практически отсутствует. Динамика заряда Q_{in} определяется как решение уравнения (1) с учётом равенства $I_L = 0$. Динамику заряда Q_{ext} можно описать выражением, следующим из (3), так же в предположении равенства нулю тока утечки.

Для неосновных носителей заряда, накопленных вне активной области, потенциальные барьеры на границе с активной областью не препятствуют их движению. Однако рассасывание заряда Q_{in} происходит при небольшом падении напряжения на диоде. Поэтому обеднённые области полупроводника не проникают глубоко в n^+ и p^+ слои, так что рассасывание заряда из указанных слоёв происходит вследствие диффузии, то есть медленно по сравнению с рассасыванием заряда из активной области диода. Вышесказанное и объясняет возможность использования условия $I_L = 0$ как при решении уравнения (1), так и уравнения (2) для данной стадии.

На рассматриваемой стадии процесса имеет большое значение напряжение на диоде и ток диода как функции времени. В работе [8] приводятся выражения для аппроксимации зависимости тока через диод от приложенного напряжения на стадии высокой обратной проводимости. Что же относительно зависимости тока от напряжения на стадии быстрого восстановления непроводящего состояния, указанный процесс моделируется переключением диффузионной и барьерной емкостей диода (в момент времени, когда заряд Q_{in} становится равным нулю). Более предпочтительным будет моделирование восстановления высокого обрат-

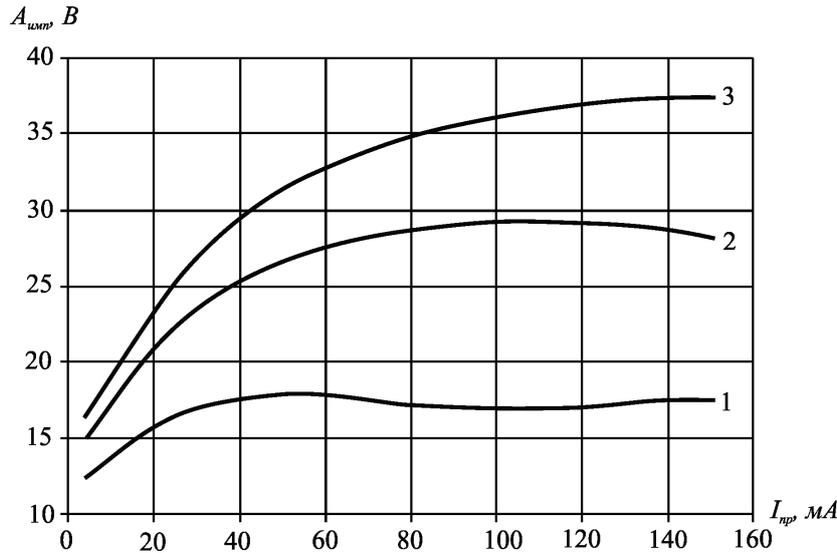


Рис. 1. Зависимости амплитуды формируемого импульса от прямого тока диода при различных напряжениях рассасывания (1 — 10 В, 2 — 15 В, 3 — 20 В)

ного сопротивления диода непрерывным процессом. С этой целью предлагается эмпирическая зависимость тока от напряжения в виде:

$$I = (A_1 Q_{in} + A_2 Q_{in}^2) U. \quad (4)$$

На стадии рассасывания заряда активной области Q_{in} выражение (1) для тока можно записать в следующем виде:

$$\frac{dQ_{in}}{dt} = -\frac{U_d}{r} - \frac{Q_{in}}{\tau_{in}}, \quad (5)$$

где U_d — напряжение на диоде, $1/r$ — обратная проводимость диода. Слагаемое $\frac{Q_{in}}{\tau_{in}}$ учитывает рекомбинацию заряда I -области. Из [8] известно, что обратная проводимость на стадии

рассасывания заряда активной области аппроксимируется выражением:

$$1/r = A Q_{in}^n, \quad (6)$$

A — коэффициент аппроксимации, $n = 2..3$.

Тогда для $n = 2$:

$$\frac{dQ_{in}}{dt} = -A \cdot Q_{in}^2 \cdot U_d - \frac{Q_{in}}{\tau_{in}}. \quad (7)$$

В работе были получены экспериментальные графики обрыва обратного тока диода при наличии накопленного заряда в области с малой напряжённостью электрического поля, то есть вне активной области диода. С целью получить эмпирическую модель рассасывания “паразитного” заряда Q_{ext} была рассмотрена следующая модель:

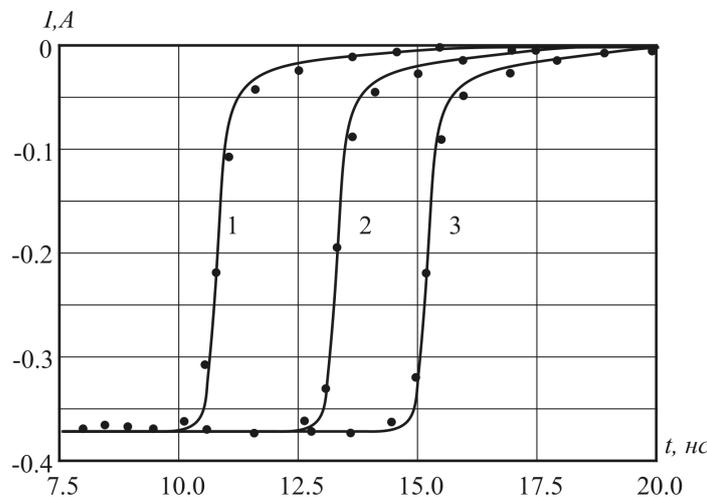


Рис. 2. Результаты эксперимента (точки) и моделирования (непрерывная линия) временных зависимостей тока диода в режиме переключения при различной величине прямого тока (1 — 80 мА, 2 — 120 мА, 3 — 160 мА)

$$\frac{dQ_{ext}}{dt} = -I - \frac{Q_{ext}}{\tau_{ext}}. \quad (8)$$

Следует заметить, что на рассматриваемой стадии процесса переключения диода $Q_{in} = 0$.

Для рассасывания паразитного заряда зависимость тока через диод от приложенного напряжения определяется формулой:

$$I = BQ_{ext}U_d \quad (9)$$

где B — коэффициент аппроксимации.

Зависимость тока через диод для различных режимов работы, полученная при моделировании, приведена на рисунке 2 (точками отмечены экспериментально полученные данные). Из рисунка видно хорошее совпадение с экспериментально полученной характеристикой.

Таким образом, уравнения модели (1), (3), (7), (8) описывают основные физические процессы в диоде при работе в режиме переключения: накопление заряда в активной области диода; накопление «паразитного» заряда, вследствие утечки носителей из I -области; комбинация заряда в диоде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие в настоящее время модели диодов с накоплением заряда являются сильно упрощенными и не учитывают физические процессы в полупроводниковой структуре прибора, влияющие на процесс переключения. При протекании через диод прямого тока помимо накопления носителей заряда в активной области диода происходит их утечка в сильнолегированные области, вследствие чего накапливается паразитный заряд. Рассасывание этого заряда замедляет процесс переключения диода, что в свою очередь ограничивает амплитуду и длительность формируемых импульсов при работе в режиме генерации.

Бобрешов А. М., д. ф.-м. н., профессор, декан физического факультета, зав. кафедрой электроники Воронежского государственного университета
Тел.: +7 (910) 479-79-45
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

Китаев Ю. И., к. т. н., доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета.
Тел.: +7 (910) 344-71-78
E-mail: kitaev@phys.vsu.ru

В настоящей работе предложена модель диода с накоплением заряда, которая позволяет проводить анализ работы диода с накоплением заряда в режиме переключения, учитывая основные процессы, протекающие в полупроводниковой структуре при работе диода в устройстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грехов И. В. Полупроводниковые наносекундные диоды для размыкания больших токов / И. В. Грехов, Г. А. Месяц // Успехи физических наук, 2005. — т. 175. — №7. — С. 735—744.
2. Носов Ю. П. Полупроводниковые диоды с накоплением заряда и их применение / Ю. П. Носов [и др.] под ред. Ю. П. Носова, М: Советское радио, 1966. — 152с.
3. Moll J.L. P-n junction charge storage diodes / J. L. Moll, S. Krakauer, R. Shen // Proc. IRE, 1962, 50, (1), P. 43—53
4. Moll J. L. Physical Modeling of the Step Recovery Diode for Pulse and Harmonic Generation Circuits / J. L. Moll, S. A. Hamilton // Proceedings of the IEE. — Vol. 37. — P. 1250—1259.
5. Zhang Jian Computer-Aided Design of Step Recovery Diode Frequency Multipliers / Jian Zhang, Antti Raisanen // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1996. — Vol. 44. — № 12. — P. 2612—2616.
6. Бобрешов А.М. Генерация сверхкоротких импульсных сигналов / А. М. Бобрешов, В. А. Степкин, Ю. И. Китаев, Г. К. Усков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Том 14, № 3, 2011. — С. 103—108.
7. Bemsy G. Recombination in Semiconductors / G. Bemsy // Proceedings of the IRE, 1958. — P. 990—1004.
8. Кюрегян А. С. Теория дрейфовых диодов с резким восстановлением / А. С. Кюрегян. // Журнал технической физики, 2004. — Том 74. — С. 57—64.

Bobreshov A. M., Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, Dean of physics faculty, Head of the Department of Electronics, Voronezh State University
Тел.: +7 (910) 479-79-45
E-mail: bobreshov@phys.vsu.ru

Kitaev Y. I., Candidate of technical sciences, Associate Professor, Department of Electronics, Voronezh State University
Тел.: +7 (910) 344-71-78
E-mail: kitaev@phys.vsu.ru

Степкин В. А., к. ф.-м. н., ассистент кафедры электроники Воронежского государственного университета

Тел.: +7 (920) 469-45-30

E-mail: stepkin@phys.vsu.ru

Усков Г. К., к. ф.-м. н., доцент кафедры электроники Воронежского государственного университета

Тел.: +7 (952) 953-82-94

E-Mail: uskov@phys.vsu.ru

Stepkin V. A., Candidate of physical and mathematical sciences, Assistant, Department of Electronics, Voronezh State University

Тел.: +7 (920) 469-45-30

E-mail: stepkin@phys.vsu.ru

Uskov G. K., Candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Department of Electronics, Voronezh State University

Тел.: +7 (952) 953-82-94

E-mail: uskov@phys.vsu.ru