

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ И СПИНТРОНИКИ

УДК 621.382.233

АНАЛИЗ СВЧ-ПОТЕРЬ В ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ *pin*-ДИОДАХ AlGaAs/GaAs

А. К. Шестаков, К. С. Журавлев

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: zhur@isp.nsc.ru*

С помощью численного моделирования исследована зависимость величины вносимых СВЧ-потерь от параметров структуры гетероструктурного *pin*-диода. Определены механизмы возникновения этих потерь и выявлен механизм, оказывающий на потери наибольшее влияние.

Ключевые слова: *pin*-диод, СВЧ, вносимые потери.

Введение. В СВЧ-технике *pin*-диоды широко применяются в качестве управляющих элементов. На их основе создаются схемы электрически управляемых СВЧ-аттенуаторов, коммутаторов, ограничителей мощности и изготавливаются различные интегральные микросхемы. Обычный гомоструктурный *pin*-диод состоит из трёх последовательно расположенных слоёв: сильно легированной акцепторами контактной p^+ -области, слаболегированной или нелегированной i -области и сильно легированной донорами контактной n^+ -области. Концентрация носителей заряда в i -области близка к собственной концентрации носителей в нелегированном полупроводнике. При отсутствии управляющего постоянного смещения на *pin*-диоде уровень Ферми в n^+ -области лежит вблизи дна зоны проводимости, в i -области — вблизи середины запрещённой зоны, а в p^+ -области — вблизи потолка валентной зоны, поэтому суммарная величина обоих энергетических барьеров между n^+ - и i -областями и между i - и p^+ -областями примерно равна ширине запрещённой зоны полупроводника, из которого изготовлен диод. Принцип действия *pin*-диода основан на резком изменении его полного электрического сопротивления в зависимости от полярности управляющего напряжения. Для приведения *pin*-диода в открытое состояние прикладывается прямое смещение такой величины, чтобы оно превышало суммарное падение напряжения на обоих барьерах, тогда они понижаются до высоты прохождения носителей заряда из контактных областей в i -область и диод можно считать открытым. При этом в i -область одновременно из n^+ -области инжектируются электроны, а из p^+ -области — дырки. Поскольку концентрация инжектированных носителей намного выше концентрации примеси в i -области, *pin*-диод обычно работает в условиях высокого уровня инжекции. Вследствие этого в i -области появляется значительная концентрация носителей заряда и сопротивление i -области и сопротивление всего диода становятся малыми. Величина этих сопротивлений обратно пропорциональна прямому току, протекающему через диод. Зонная диаграмма *pin*-диода в случае приложенного к нему прямого открывающего смещения представлена на рис. 1, а. При приложении обратного смещения энергетические барьеры между областями с разным уровнем легирования увеличиваются, а электроны и дырки экстрагируются из i -области в контактные области, и полное сопротивление диода резко увеличивается.

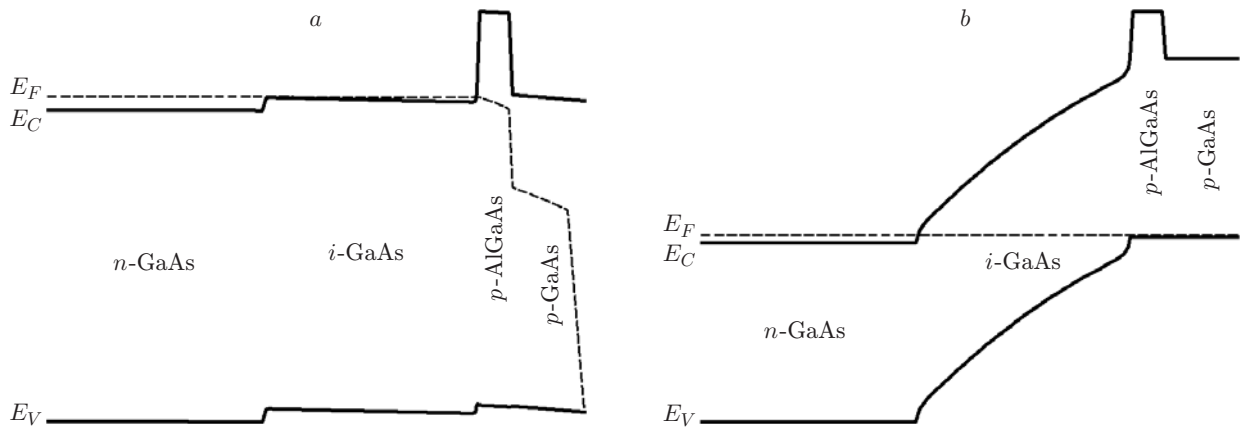


Рис. 1. Зонная диаграмма гетероструктурного *pin*-диода AlGaAs/GaAs: *a* — при приложении прямого смещения, *b* — без приложенного смещения

Дальнейшим усовершенствованием конструкции *pin*-диода является использование гетероструктуры. Широкозонный слой добавляется между одной из контактных областей и *i*-областью для увеличения энергетического барьера между ними, что позволяет накапливать в *i*-области большее количество носителей заряда и за счёт этого повышать её проводимость. Зонная диаграмма гетероструктурного *pin*-диода AlGaAs/GaAs без приложенного смещения представлена на рис. 1, *b*. Из рисунка видно, что добавление широкозонной области препятствует проникновению электронов из *i*-области в контактную p^+ -область и их рекомбинации, но в то же время не препятствует инжекции дырок из p^+ -области в *i*-область.

Свойство *pin*-диода быстро менять своё сопротивление при изменении приложенного управляющего напряжения различной полярности используется также для управления СВЧ-компонентой сигнала. Переменный СВЧ-сигнал — это сигнал, который появляется под воздействием прикладываемого переменного напряжения и пропускается через диод вместе с управляющим постоянным сигналом. Частота переменного сигнала обычно составляет несколько гигагерц. Изменение постоянного смещения позволяет менять сопротивление *pin*-диода и тем самым управлять амплитудой переменного сигнала. При приложении обратного управляющего смещения диод закрывается и переменный сигнал не проходит через него [1, 2].

Вносимые потери и механизмы их возникновения. Для описания высокочастотных характеристик СВЧ-приборов широко используют *S*-параметры, или матрицу рассеяния, элементами которой являются коэффициенты прохождения и отражения сигнала. *S*-параметры определяются путём измерений амплитуды входного и выходного напряжений. При этом измерить их проще, чем другие СВЧ-параметры (*H*, *Z* и *Y*), для нахождения которых требуется проводить измерения в режимах холостого хода или короткого замыкания, что не всегда возможно, а в некоторых ситуациях может привести к выходу прибора из строя. Одним из важных параметров диода является коэффициент прохождения переменного сигнала в прямом направлении, или «вносимые потери». Вносимые потери задаются элементом матрицы рассеяния S_{21} , который равен отношению амплитуды выходного переменного сигнала к амплитуде входного переменного сигнала и показывает степень ослабления сигнала при прохождении через диод. Чем меньше вносимые диодом СВЧ-потери в открытом состоянии, тем эффективнее он работает.

Важно знать не только величину вносимых потерь, но и иметь представление о механизмах их возникновения. Понимание физических процессов, задающих механизмы потерь, и вклад каждого из этих механизмов в общую величину потерь позволят более эффективно бороться с потерями ещё при изготовлении структуры для *pin*-диода. Доминирующими

механизмами возникновения потерь являются рассеяние носителей заряда (нагрев структуры) и рекомбинация (излучательная и безызлучательная) неравновесных носителей заряда. Рассеяние носителей заряда можно разделить на два вида: рассеяние на примесях и дефектах и рассеяние на энергетических барьерах, возникающих между областями с разными уровнями легирования. При приложении прямого открывающего смещения к диоду барьеры спрямляются не полностью, поэтому носители заряда всё же рассеиваются на них. Величина потерь при рассеянии на барьерах зависит от высоты барьеров. Потери определяются концентрациями примеси в контактных областях и в i -области и величиной напряжения, приложенного к диоду.

К настоящему времени зависимость суммарных потерь в pin -диодах от параметров структур изучена недостаточно. Зависимость характеристик диода от параметров эпитаксиальной структуры рассматривалась в [3–7]. В этих экспериментальных работах в основном находилась зависимость параметров диода от времени жизни неравновесных носителей заряда в i -области, так как данная величина достаточно легко контролируется и измеряется [8]. В работе [9] показано, что излучательная рекомбинация играет существенную роль и определяет время жизни носителей заряда в pin -диодах. Роль других механизмов потерь, обусловленных рассеянием носителей заряда в pin -диодах, практически не исследована, по-видимому, потому, что выявить влияние этих механизмов на вносимые потери экспериментально значительно сложнее. Более полную картину вклада различных видов потерь и их зависимости от параметров структуры можно получить с помощью численного моделирования.

Целью данной работы является анализ зависимости величины вносимых потерь от параметров гетероструктуры AlGaAs/GaAs pin -диода.

Методика расчёта вносимых потерь. Для решения этой задачи было выполнено численное моделирование работы pin -диода на сверхвысоких частотах. Расчёты проводились с помощью программно-технологического комплекса "Sentaurus TCAD", разработанного фирмой "Synopsys" (США) [10]. Для расчёта S -параметров pin -диода в программу закладывалась его структура, распределение концентраций легирующих примесей, положение и размеры контактов, а затем решались уравнения непрерывности, уравнение Пуассона и уравнения транспорта носителей заряда. Находились распределения плотности тока, концентраций, подвижности и скорости носителей заряда, электрического поля, потенциала, темпов рекомбинации носителей заряда. Высоты энергетических барьеров между областями с разным легированием определялись из рассчитываемой зонной диаграммы. Стационарные распределения всех этих параметров использовались в качестве основы для расчёта нестационарных параметров. Высокочастотные параметры считались при переменном напряжении на контактах в заданном диапазоне. Итогом вычислений являлась зависимость S -параметров от частоты. Из этих данных была найдена зависимость общей величины потерь (S_{21}) от параметров структуры диода с помощью последовательного изменения необходимых параметров и расчёта величины потерь при каждом их наборе.

Описание структуры диода. В данной работе рассчитывались характеристики pin -диода, изготовленного на основе полупроводниковой гетероструктуры AlGaAs/GaAs, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии, со следующей толщиной слоёв: контактной p^+ -области 0,4 мкм, контактной p^+ -области AlGaAs 0,2 мкм, высокоомной i -области 1,2 мкм и контактной n^+ -области 1,2 мкм. Концентрация носителей заряда в контактных областях, включая область широкозонного материала, равна $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, концентрация фоновой акцепторной примеси в i -области в данном случае составляла $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Все примеси считались активированными. При расчётах предполагалось, что донорные и глубокие примеси в i -области отсутствуют. Гетероструктура для диода была выращена в Институте физики полупроводников (ИФП СО РАН, г. Новосибирск). Диод изготов-

лен в ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (НИИПП, г. Томск), где измерялись его характеристики.

Экспериментально измеренные статические вольт-амперные характеристики данного диода и частотная зависимость вносимых им потерь сравнивались с результатами расчётов и было показано их соответствие. Это является подтверждением того, что используемая модель подходит для исследований *pin*-диода и полученные с её помощью результаты правильно описывают работу прибора на сверхвысоких частотах.

Результаты расчётов. *Частотная зависимость потерь.* Зависимость вносимых диодом потерь от частоты его работы представлена на рис. 2. Из рисунка видно, что с увеличением частоты потери в *pin*-диоде уменьшаются. На графике стационарной вольт-амперной характеристики (вставка на рис. 2) показано, что до достижения прямым приложенным к диоду смещением величины 1,43 В (отмечено точкой) диод закрыт, его сопротивление велико, а протекающий через него ток мал. При превышении этого напряжения сопротивление диода снижается и ток начинает быстро расти, а диод открывается. Когда диод открыт, он пропускает переменный сигнал и в таком режиме работы рассчитывались вносимые СВЧ-потери. Амплитуда прикладываемого переменного напряжения была значительно меньше по сравнению с постоянным управляющим напряжением, поэтому переменный сигнал заметно не менял установившегося распределения параметров в диоде.

Для нахождения зависимости потерь, вносимых *pin*-диодом, проведён ряд расчётов, при которых менялся только один из параметров гетероструктуры, а остальные оставались постоянными. Основным параметром гетероструктуры *pin*-диода, в наибольшей степени влияющим на его характеристики, была толщина *i*-области, так как именно в ней и на её границах происходили все процессы рассеяния и рекомбинации. Потери определялись для двух граничных частот работы диода: минимальной 0,5 ГГц и максимальной 40 ГГц.

Зависимость потерь от параметров гетероструктуры. Зависимость величины вносимых потерь от толщины структуры рассчитывалась следующим образом. В первую очередь вычислялась зависимость величины вносимых потерь от толщины *i*-области. При увеличении толщины прикладываемое постоянное управляющее напряжение повышалось настолько, чтобы полное омическое сопротивление диода в стационарном случае оста-

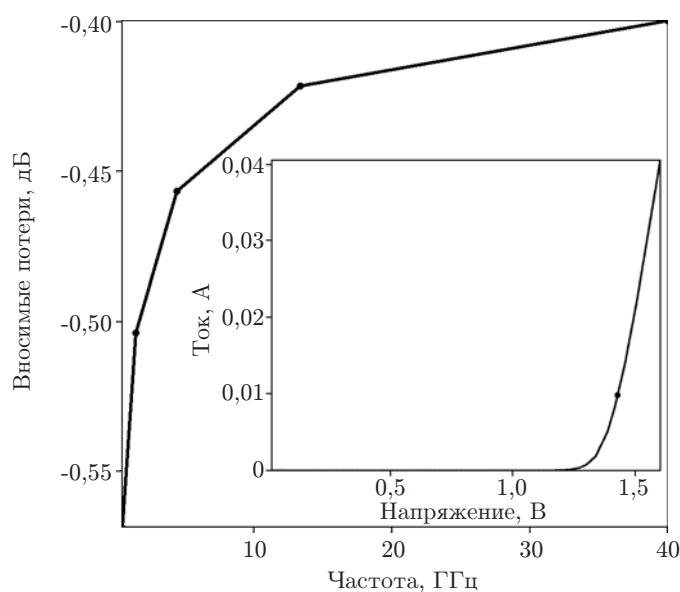


Рис. 2. Потери в гетероструктурном *pin*-диоде в зависимости от частоты. На вставке представлена вольт-амперная характеристика диода в прямом смещении

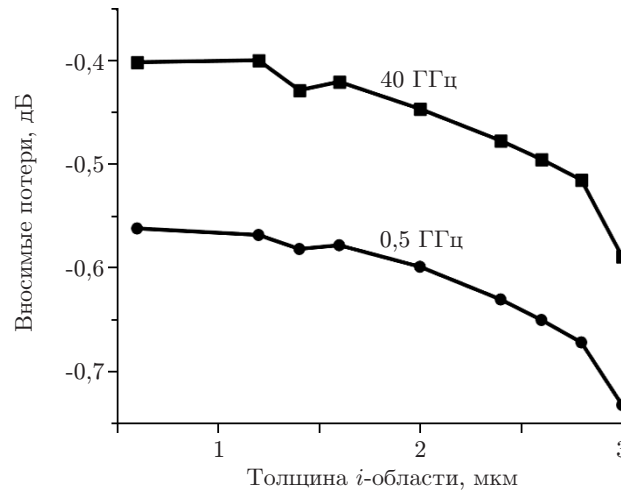


Рис. 3. Потери в гетероструктурном *pin*-диоде в зависимости от толщины *i*-области на частотах работы диода 0,5 и 40 ГГц

валось постоянным для поддержания одинакового режима работы прибора. Зависимость вносимых диодом потерь от толщины *i*-области при постоянном общем омическом сопротивлении диода представлена на рис. 3. Толщина варьировалась от 0,6 до 3 мкм.

При увеличении толщины *i*-области диода вносимые им СВЧ-потери возрастают. Для определения причин возрастания СВЧ-потерь была вычислена зависимость омического сопротивления *i*-области от её толщины. Результаты расчёта приведены на рис. 4, также показаны значения омического сопротивления сильно легированных контактных *n*- и *p*-областей, полученные при вычислении зависимости.

Для определения сопротивлений рассматриваемых областей вычислялось падение напряжения на каждой из них при открытом диоде и делилось на полный ток, протекающий через диод. Из представленного рисунка видно, что сопротивление *i*-области растёт линейно с увеличением её толщины, а сопротивление контактных областей остаётся примерно постоянным. Если бы вносимые диодом потери определялись только рассеянием носителей

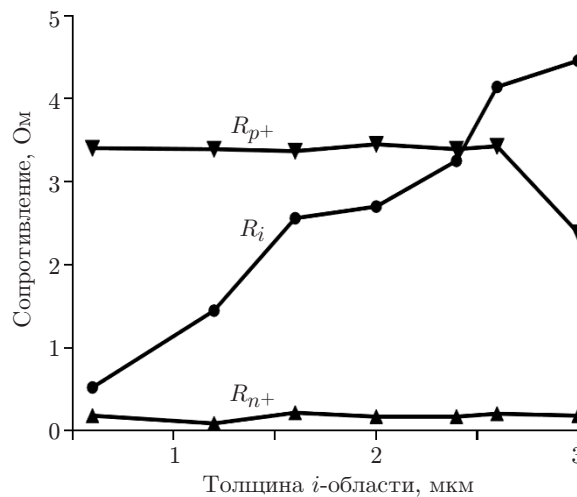


Рис. 4. Зависимости омических сопротивлений контактных областей и слабо легированной области в стационарном случае от толщины *i*-области

заряда в i -области, то можно было бы ожидать, что потери возрастали с толщиной линейно, но, как показывают расчёты, это не так. Другие механизмы потерь вносят также заметный вклад, в частности излучательная рекомбинация носителей заряда и их рассеяние на энергетических барьерах между областями с разными уровнями легирования. Степень влияния рекомбинации на потери можно приблизительно оценить, посчитав интегральный темп рекомбинации в стационарном случае в зависимости от толщины i -области. Более точный расчёт темпа рекомбинации в нестационарном случае на сверхвысоких частотах требует отдельных достаточно сложных и трудоёмких вычислений.

Зависимость интегрального темпа излучательной рекомбинации в стационарном случае по всей площади диода от толщины i -области представлена на рис. 5, *a*. Из проведённой оценки видно, что с увеличением толщины i -области интегральный темп излучательной рекомбинации сначала повышается до толщины 2 мкм из-за роста концентрации носителей заряда в i -области, вследствие чего носители рекомбинируют чаще. При дальнейшем увеличении толщины интегральный темп рекомбинации начинает падать в результате того, что хотя суммарная концентрация носителей заряда, находящихся в i -области, продолжает расти, их средняя плотность падает, к тому же электроны и дырки оказываются пространственно разнесены электрическим полем, присутствующим в i -области. В нестационарном случае темп рекомбинации будет подавлен по сравнению со стационарным за счёт того, что период действия приложенного переменного напряжения на носители заряда меньше времени их жизни, обусловленного излучательной рекомбинацией. Поэтому вероятность рекомбинации носителей заряда за время нахождения в i -области будет уменьшена.

Ещё одним механизмом возникновения потерь является рассеяние носителей заряда на энергетических барьерах между областями с различным легированием. Зависимость суммарной высоты всех барьеров в диоде от толщины i -области представлена на рис. 5, *b*. Величина всех барьеров определялась из рассчитанной зонной диаграммы при различных толщинах i -области и постоянном полном омическом сопротивлении диода.

Для нахождения доминирующих механизмов потерь все зависимости сводились на одном графике со специально подобранными коэффициентами для приведения их к единому масштабу для сравнения поведения при увеличении толщины i -области. Потери на рас-

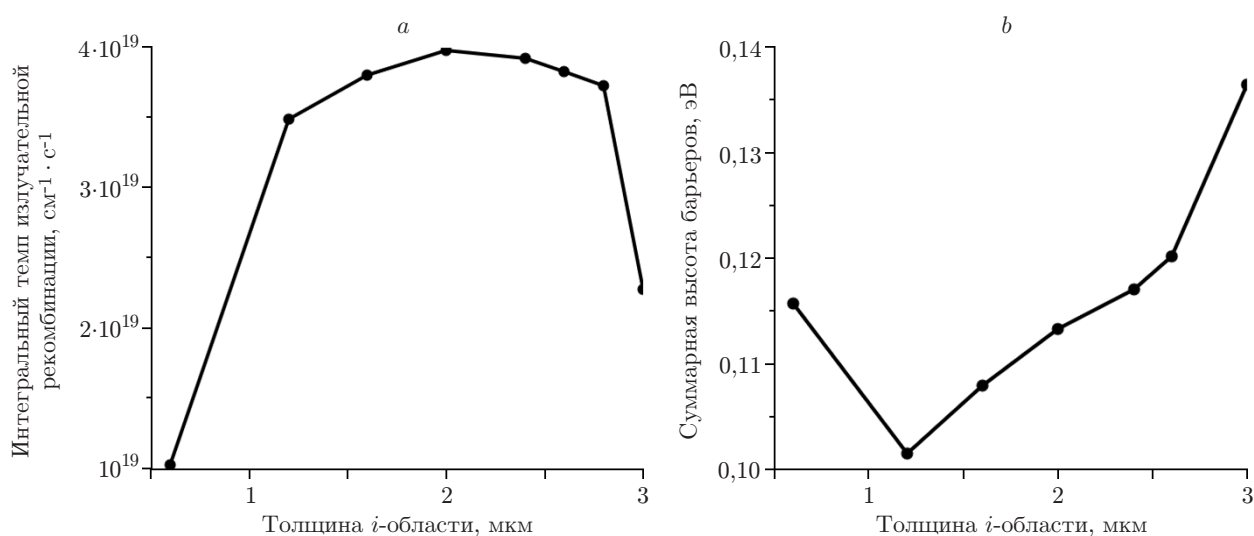


Рис. 5. Зависимости толщины i -области: *a* — от интегрального темпа излучательной рекомбинации в pin -диоде, *b* — от общей высоты всех энергетических барьеров

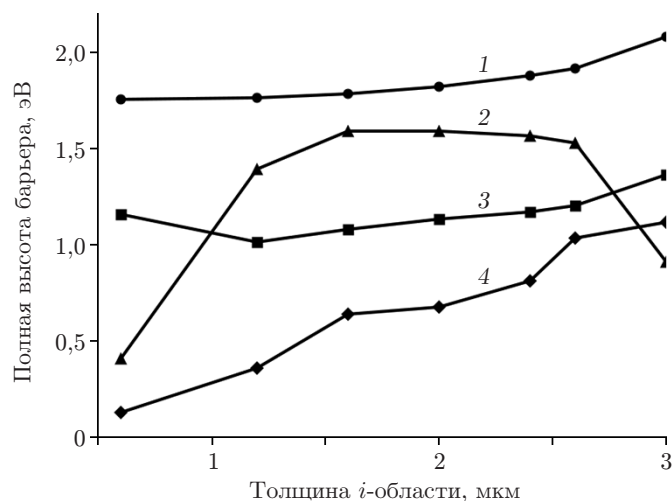


Рис. 6. Зависимости величины вносимых потерь, обусловленной различными механизмами, от толщины i -области (кривая 1 — вносимые потери, 2 — интегральный темп рекомбинации, 3 — суммарная высота барьеров, 4 — сопротивление i -области)

сеяние носителей заряда в i -области пропорциональны её омическому сопротивлению, на энергетических барьерах — суммарной высоте этих барьеров, а потери, обусловленные излучательной рекомбинацией, — интегральному темпу излучательной рекомбинации во всём диоде. Результат сравнения представлен на рис. 6. Из рисунка видно, что поведение общей величины вносимых потерь при толщине i -области до 1,6 мкм обусловлено линейным ростом её сопротивления, при большей толщине потери начинают увеличиваться несколько быстрее, чем линейно, что объясняется дополнительным влиянием рассеяния на энергетических барьерах. Излучательная рекомбинация в этом случае подавлена и оказывает на величину потерь гораздо меньшее влияние.

Заключение. В данной работе произведён расчёт величины вносимых потерь от толщины i -области гетероструктурного pin -диода и исследованы механизмы возникновения потерь. Определены зависимости омического сопротивления контактных областей и слабо легированной области от толщины i -области. Также вычислены суммарный темп излучательной рекомбинации во всём диоде и суммарная высота энергетических барьеров от того же параметра структуры диода. В результате расчётов показано, что до толщины i -области 1,6 мкм основным механизмом появления вносимых потерь является рассеяние носителей заряда на примесях в i -области, при большей толщине начинает оказывать дополнительное влияние механизм, связанный с рассеянием на энергетических барьерах. Влияние излучательной рекомбинации значительно подавлено по сравнению с первыми двумя механизмами за счёт пространственного разнесения носителей заряда в i -области.

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук А. И. Торопову (ИФП СО РАН, г. Новосибирск) за предоставленную информацию о параметрах выращенных гетероструктур и д-ру физ.-мат. наук Г. И. Айзенштату (ОАО «НИИПП», г. Томск) за предоставленные экспериментальные данные по изготовленному pin -диоду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуртов В. А. Твердотельная электроника: Учеб. пособие. М.: Изд-во МИФИ, 2005. 492 с.
2. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов: Пер. с англ. /Под ред. Р. А. Суриса. М.: Мир, 1984. Кн. 1. 455 с.

3. Баров А. А., Гуцин С. М. GaAs МИС PIN диодного двухпозиционного коммутатора // Сб. докл. Второй науч.-техн. конф. «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем». Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. С. 324.
4. Калыгина В. М., Слюнько Е. С. Влияние глубокой примеси на электрические характеристики эпитаксиальных структур на основе GaAs // ФТП. 2009. **43**, вып. 10. С. 1333–1338.
5. Bellantoni J. V., Bartle D. C., Payne D. et al. Monolithic GaAs p-i-n diode switch circuits for high-power millimeter-wave applications // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 1989. **37**, N 12. P. 2162–2165.
6. Lee J.-L., Zych D., Reese E. et al. Monolithic 2–18 GHz low loss, on-chip biased PIN diode switches // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 1995. **43**, N 2. P. 250–256.
7. Heston D. D., Seymour D. J., Zych D. 100 MHz to 20 GHz monolithic single-pole, two-, three-, and four-throw GaAs PIN diode switches // IEEE MTT-S Intern. Microwave Symp. Digest. 1991. Vol. 2. P. 429–432.
8. Шуберт Ф. Светодиоды. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
9. Айзенштат Г. И., Ющенко А. Ю., Гуцин С. М. и др. Рекомбинация носителей заряда в арсенид-галлиевом *pin*-диоде // ФТП. 2010. **44**, вып. 10. С. 1407–1409.
10. TCAD Sentaurus Device User's Manual. Version G-2012.06. Mountain View: Synopsys Inc., 2012. 1368 p.

Поступила в редакцию 9 июля 2013 г.
