

К. т. н. Н. Ф. КАРУШКИН, В. В. МАЛЫШКО, В. В. ОРЕХОВСКИЙ, А. А. ТУХАРИНОВ

Украина, г. Киев, ГП НИИ «Орион»

E-mail: ndiorion@tsua.net

КОММУТАЦИОННЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ УСТРОЙСТВА НА $p-i-n$ -ДИОДАХ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Представлены результаты исследований и разработки выключателей и переключателей с использованием $p-i-n$ -диодов сосредоточенного типа, обеспечивающих время переключения на уровне единиц наносекунд. С целью увеличения развязки в закрытом состоянии (потери запираания) около 40 дБ в устройствах применено каскадное включение диодов в волноводную и микрополосковую линии передачи на электрической длине $\theta = \pi/2$. Представлены результаты исследований по созданию коммутационных устройств коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн ($f = 300$ ГГц) с использованием продольно- и поперечно-распределенных $p-i-n$ -структур.

Ключевые слова: выключатель СВЧ, миллиметровый диапазон длин волн, $p-i-n$ -диод, потери пропускания, потери запираания, время переключения.

Разработкам коммутационных устройств посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов [1–5]. Однако развитие компонентной базы для создания радиоэлектронной аппаратуры миллиметрового диапазона длин волн, включая создание устройств для коммутации мощности, по-прежнему остается актуальным [6].

Известные однодиодные быстродействующие устройства миллиметрового диапазона обеспечивают развязку в закрытом состоянии (потери запираания) на уровне 20–25 дБ, что для ряда применений является недостаточным [7]. Кроме того, является проблематичным создание в коротковолновой части миллиметрового диапазона (частота $f = 300$ ГГц) коммутационных управляемых устройств с применением диодных структур сосредоточенного типа [8, 9].

В настоящей статье описаны исследования по разработке и созданию быстродействующих выключателей и переключателей миллиметрового диапазона частот (30–180 ГГц) в волноводном исполнении с каскадным включением диодов, разделенных отрезками линии передачи, с потерями запираания более 40 дБ в рабочей полосе частот 30–40%. Исследовалась также возможность создания устройств управления мощностью СВЧ в диапазоне 200–400 ГГц с использованием распределенных $p-i-n$ -структур продольного и поперечного типов.

УСТРОЙСТВА С КАСКАДНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ ДИОДОВ

Рассмотрим параметры приведенной на рис. 1 схемы каскадного включения двух диодов, модель которых состоит из нормированных активной (G) и емкостной (B) проводимостей.

Для анализа воспользуемся симметрией схемы относительно $a-a'$. Согласно [10] коэффициент передачи таких схем определяется выражением

$$T_{11} = (T_{11}^n)^2 - (T_{12}^n)^2,$$

$$\text{где } T_{11}^n = \left(1 + \frac{G + jB}{2}\right) \cdot e^{j\theta/2};$$

$$T_{12}^n = \left(1 + \frac{G + jB}{2}\right) \cdot e^{-j\theta/2};$$

индекс n — элементы матрицы передачи четырехполюсника.

С учетом того, что электрическая длина $\theta = \pi/2$, коэффициент передачи T_{11} и потери в схеме L_{Π} можно описать выражениями

$$T_{11} = -(B + GB) + j(1 + G + G^2/2 - B^2/2);$$

$$L_{\Pi} = |T_{11}|^2 = G^4/4 + G^3 + 2G^2 + 2G + B^2/4 + B^2G^2/2 + B^2G/2 + 1.$$

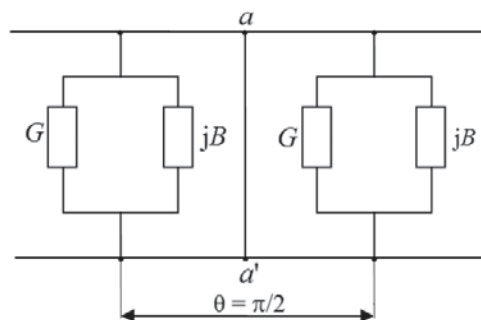


Рис. 1. Упрощенная эквивалентная схема каскадного включения двух диодов

В режиме открытых диодов и скомпенсированной емкостной проводимости $B = 0$, активная проводимость G_- мала и потери пропускания $L_{\text{ПЗ}} \approx 1 + 2G_-$.

При закрытых диодах активная проводимость диода G_+ велика, и потери запираения составляют $L_{\text{ПЗ}} = G_+^4/4$, а при включении одного диода потери запираения составляют $L_{\text{ПЗ}} = G_+^2/4$.

Выражение этого соотношения в децибелах имеет вид $L_{\text{ПЗ}}(\text{дБ}) \approx 2L_3 + 6$, а при N каскадно включенных диодах потери запираения определяются выражением $L_{\text{ПЗ}}(\text{дБ}) \approx NL_{\text{ПЗ}} + 6(N - 1)$.

Проведенный анализ простой модели включения двух диодов в линию передачи на электрической длине $\theta = \pi/2$ указывает на значительное увеличение запирающего действия выключателя при незначительном увеличении потерь в режиме пропускания.

Разработка быстродействующих выключателей миллиметрового диапазона с повышенным уровнем потерь в режиме запираения ($L_{\text{ПЗ}} \geq 40$ дБ) проводилась с использованием корпусных диодов, которые устанавливались в волноводном канале, и диодов с минимальными паразитными емкостью и индуктивностью, которые устанавливались в микрополосковую линию.

Выключатели инверсного типа с корпусными диодами

Выключатели такого типа находят применение в РЛС для защиты приемника и для стробирования сигналов работы передающего и приемного трактов импульсами различной длительности.

Использование корпусных $p-i-n$ -диодов для работы в миллиметровом диапазоне имеет ограничения из-за больших значений паразитных параметров корпуса и элементов его монтажа, поскольку в этом случае их размеры соизмеримы с длиной волны. Вследствие этого при расчетах корпус не может рассматриваться как включенная емкость сосредоточенного типа. С точки зрения реализации параллельного резонанса (высокоимпедансного состояния) в схеме диода в режиме пропускания СВЧ-мощности целесообразнее корпус диода рассматривать как радиальную линию, расположенную у основа-

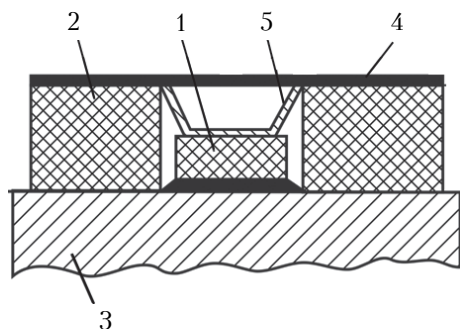


Рис. 2. Конструкция переключательного диода: 1 — диодная структура; 2 — рубиновая втулка; 3 — медное основание; 4 — крышка; 5 — золотая плющона

ния широкой стенки волновода [11]. При этом размеры корпуса должны обеспечивать трансформацию входного импеданса линии передачи к клеммам диодной структуры.

Величина и характер импеданса такой радиальной линии, частотные зависимости ее входной проводимости, а также активная и реактивная составляющие диодной структуры (рис. 2, 3) в режимах положительного и отрицательного смещений приведены и подробно рассмотрены в [7, 12]. Результаты этих исследований были использованы при разработке выключателя с каскадным включением диодов.

На рис. 4 представлены экспериментальные частотные зависимости потерь пропускания и потерь запираения выключателя с диодами корпусного типа, включенными каскадно в волноводную линию передачи. Выключатель, содержащий два диода, обеспечивает коммутацию СВЧ-мощности с развязкой в режиме запираения более 40 дБ в рабочей полосе примерно 20% за время не хуже 2 нс.

В ряде случаев для повышения уровня коммутируемой СВЧ-мощности целесообразно включать в сечение волновода параллельно два дио-

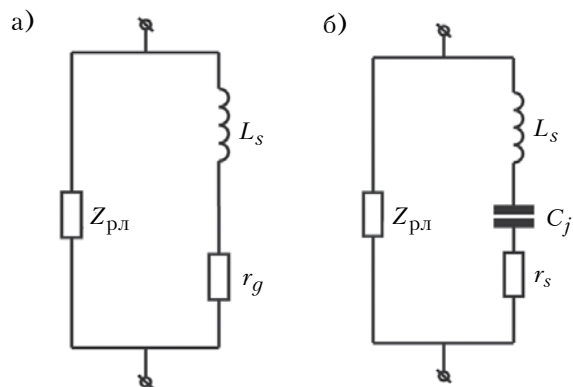


Рис. 3. Эквивалентная схема переключательного диода при положительном (а) и отрицательном (б) электрическом смещении:

r_g — дифференциальное сопротивление диода; L_s — индуктивность монтажа; C_j — емкость диодной структуры; r_s — сопротивление потерь; $Z_{\text{р.л}}(r)$ — импеданс радиальной линии, приводимый к диодной структуре

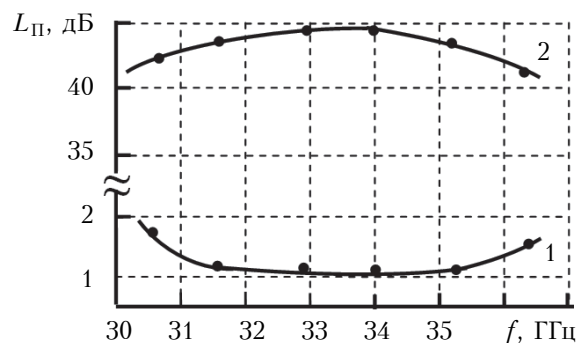


Рис. 4. Экспериментальные зависимости потерь пропускания (1) и потерь запираения (2) выключателя с диодами корпусного типа, включенными каскадно в волноводную линию передачи

да, конструкция которых представлена на рис. 2. Конструктивно выключатели такого типа выполнены в виде волноводных вставок с выводом для внешнего управляющего напряжения в боковой стенке волновода. Волноводные вставки, содержащие два диода, включенные параллельно в одном сечении волновода, создают возможность переключения каналов передачи электромагнитной энергии с использованием волноводных тройников.

Переключатели на два направления в миллиметровом диапазоне имеют следующие параметры:

- рабочая полоса частот 10%;
- время переключения 5 нс;
- потери запираения между каналами 25 дБ;
- потери пропускания 1,2–1,5 дБ;
- уровень переключаемой мощности не менее 2 Вт;
- диапазон температуры $-40...+60^{\circ}\text{C}$.

Следует отметить, что в качестве диэлектрических втулок для сборки диодов для коммутационных устройств в миллиметровом диапазоне длин волн использованы промышленные часовые рубиновые камни, обладающие необходимыми для этих целей чистотой обработки и прочностью и имеющие широкую номенклатуру размеров. Так, в коротковолновой части СВЧ-диапазона ($f = 150$ ГГц) использованы рубиновые втулки высотой 0,15–0,2 мм, внешний и внутренний диаметр которых составляет 0,4 и 0,2 мм, соответственно.

Выключатели на диодах с минимальным значением паразитных параметров

Частотные зависимости потерь запираения описанных выше выключателей имеют, как правило, резонансный характер. Этот недостаток можно устранить, применив каскадное включение диодов с минимальными паразитными параметрами в линию передачи с малым волновым сопротивлением ($Z_B \approx 30–50$ Ом).

При разработке выключателей на $p-i-n$ -диодах с малыми паразитными параметрами в качестве линии передачи была использована несимметричная полосковая линия (НПЛ), образованная за счет частичного перекрытия металлических линий, нанесенных на противоположные стороны плоскопараллельной диэлектрической подложки — несимметричной щелевой линии (НЩЛ). В данном случае НЩЛ помещается в стандартный волновод в E -плоскости и включает в себя переходные распределенные участки согласования волновых сопротивлений.

Предложенная конструкция НЩЛ позволяет выполнять линию передачи практически с любым волновым сопротивлением. Кроме того, НЩЛ обладает широкополосностью и простотой конструктивной реализации полупроводниковых СВЧ-элементов на ее основе в комбинации с несимметричной полосковой линией. Подобное соединение микрополосковых линий в миллиметро-

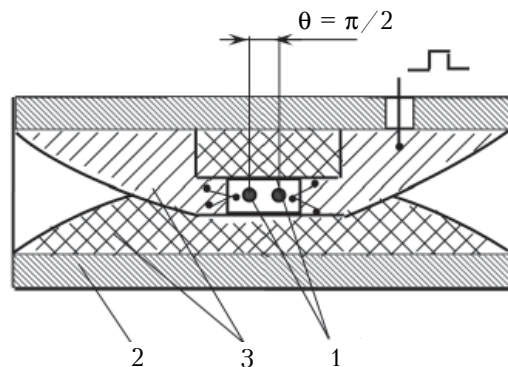


Рис. 5. Конструкция выключателя:
1 — $p-i-n$ -диоды; 2 — волновод; 3 — НЩЛ

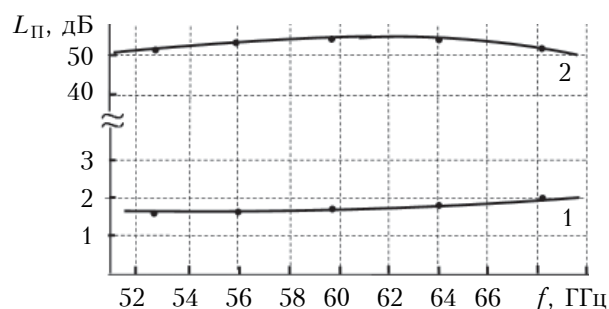


Рис. 6. Частотные характеристики потерь пропускания (1) и потерь запираения (2) выключателя, представленного на рис. 4

вом диапазоне применено при разработке фазовых манипуляторов [13]. Материалом для такой линии выбран металлизированный дюрюид с толщиной диэлектрического слоя 0,254 мм, малыми погонными потерями и диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,5$. Особенностью выключателя является наличие в микрополосковой линии вставки, состоящей из двух $p-i-n$ -диодов, расположенных последовательно на расстоянии $\theta \approx \pi/2$ друг от друга на общем металлическом основании. Электрофизические параметры среды такой вставки выбраны близкими к параметрам линии передачи.

Конструкция выключателя приведена на рис. 5, а его типичные частотные характеристики потерь пропускания и запираения — на рис. 6. Потери запираения выключателя такого типа составляют около 50 дБ при прямом электрическом смещении на диодах в рабочей полосе не менее 30% при воздействии непрерывной СВЧ-мощности не менее 1 Вт. Повышенная устойчивость работы достигнута за счет того, что вставка с диодами смонтирована на теплоотводе, позволяющем снизить их тепловое сопротивление.

Приведенные частотные характеристики обеспечиваются при емкости диодов не более 0,018 пФ и волновом сопротивлении линии передачи 30–50 Ом. Напряжение обратного смещения составляет -10 В, ток прямого смещения — примерно 10 мА, время переключения СВЧ-мощности — не более 10 нс.

УСТРОЙСТВА С ДИОДНЫМИ СТРУКТУРАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ТИПА

В коротковолновой части СВЧ-диапазона применение обычных плоскостных диодных структур сосредоточенного типа представляется проблематичным, поскольку они должны иметь очень малые размеры. В связи с этим возрастает необходимость исследования объемных явлений в полупроводниках распределенного типа, весьма перспективных для создания элементов электронной техники на более высоких частотах. Применение в миллиметровом диапазоне нашли выключатели, выполненные на продольно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структуре, расположенной в сечении волновода [14, 15].

Для построения эквивалентной схемы слоистой структуры и определения ее параметров использовались результаты расчета слоистой металлодиэлектрической структуры конечной длины, расположенной в прямоугольном волноводе [16].

Рассмотрим представленную на **рис. 7** слоистую $p-i-n$ -структуру. Ее характеристики рассеяния можно получить из решения задачи отражения волны H_{01} от полубесконечной металлической ступеньки в прямоугольном волноводе, узкое сечение которого заполнено высокоомным полупроводником. Для данной конкретной задачи должно выполняться условие $d/\lambda_\epsilon \ll 1$, где d — толщина i -области, λ_ϵ — длина волны в i -области.

Эквивалентная схема слоистой полуограниченной структуры представлена на **рис. 8, а**.

Коэффициенты отражения $K_{\text{отр}}$ и прохождения $K_{\text{пр}}$ такой схемы определяются выражениями

$$K_{\text{отр}} = \frac{Y_1 - (Y_2 - j\omega C)}{Y_1 + (Y_2 + j\omega C)}, \quad (1)$$

$$K_{\text{пр}} = \frac{2Y_2}{Y_1 + (Y_2 + j\omega C)}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$.

Эквивалентная схема слоистой структуры длиной l представлена на **рис. 8, б**. Ее параметры могут быть выражены через геометрические размеры, длину волны и диэлектрическую проницаемость следующими формулами:

$$K_{\text{отр}} = 2\omega CY_2 (Y_1^2 + Y_2 + \omega C^2 \operatorname{tg} ql) \times \\ \times [2\omega CY_2 + (Y_1^2 + Y_2^2 - \omega^2 C^2) \operatorname{tg} ql - \\ - j \cdot 2Y_1 (Y_2 - \omega C \operatorname{tg} ql)]^{-1}, \quad (3)$$

где $q = \sqrt{K^2 - \frac{\pi}{a}}$; $K = 2\pi/(\lambda_\epsilon)$;

$$Y_1 = \frac{a/b}{20\pi} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_\epsilon}{2a}\right)^2} \text{ [Ом}^{-1}\text{]}; \quad (4)$$

$$Y_2 = \frac{a/d}{20\pi} \sqrt{\epsilon - \left(\frac{\lambda_\epsilon}{2a}\right)^2} \text{ [Ом}^{-1}\text{]}; \quad (5)$$

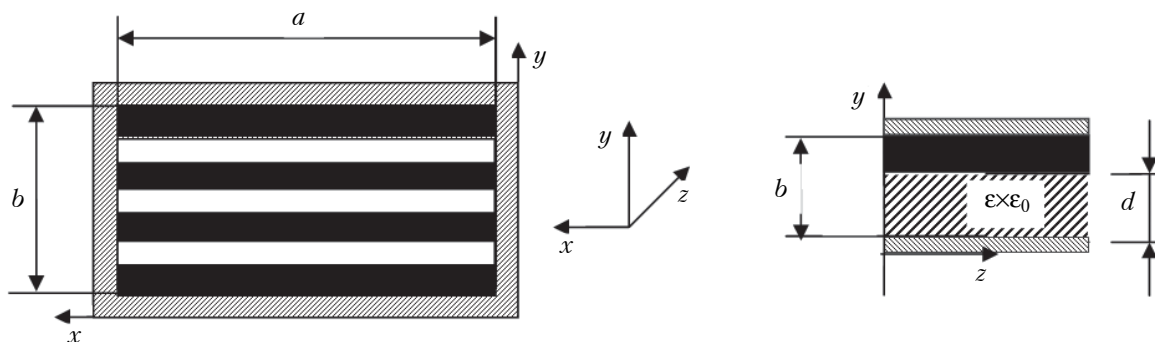


Рис. 7. Слоистая металлодиэлектрическая структура:

a — размер широкой стенки волновода; b — размер узкой стенки волновода; z — ось, вдоль которой распространяется электромагнитная волна

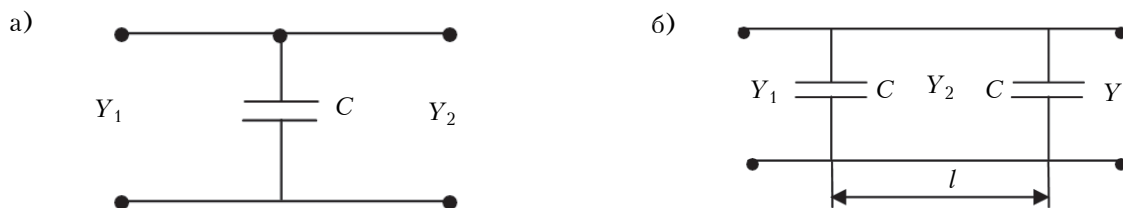
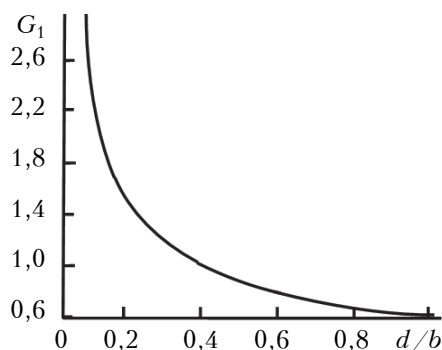
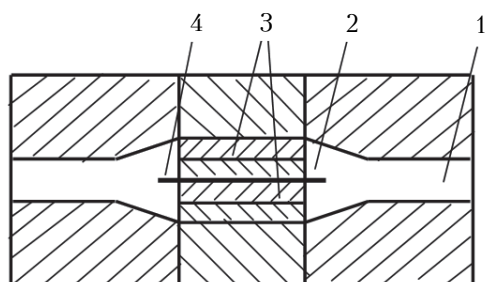


Рис. 8. Эквивалентная схема слоистой полуограниченной структуры (а) и слоистой структуры длиной l (б): Y_1, Y_2 — волновая проводимость; C — емкость

Рис. 9. Зависимость константы G_1 от отношения d/b Рис. 10. Конструкция выключателя с продольно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структурой: 1 — волновод сечением $0,35 \times 0,7$ мм; 2 — переход с сечения $0,35 \times 0,7$ на $0,8 \times 0,7$ мм; 3 — слоистая $p-i-n$ -структура (толщина i -области 150 мкм); 4 — тонкая металлическая перегородка

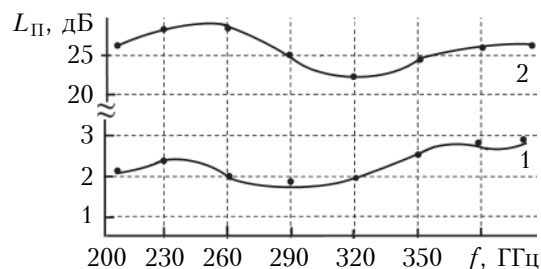
$$C = \frac{a}{1,8\pi^2} \left\{ \left[1 - \left(\frac{\lambda_{\varepsilon}}{20} \right)^2 \right] G_1 + \left[\varepsilon - \left(\frac{\lambda_{\varepsilon}}{20} \right)^2 \right] \cdot 0,7 \right\} \text{ [пФ]}. \quad (6)$$

Входящая в формулу (6) константа G_1 зависит от соотношения размеров d и b (см. **рис. 9**).

Эквивалентная схема слоистой структуры конечной длины (рис. 8, б) может быть применена при разработке полупроводниковых устройств для управления мощностью СВЧ.

На **рис. 10** представлена конструкция выключателя с продольно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структурой, предназначенного для работы в диапазоне частот 200–400 ГГц. Экспериментальные частотные характеристики такого выключателя, приведенные на **рис. 11**, указывают на возможность создания широкополосных устройств для управления уровнем СВЧ-мощности в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Однако при этом необходимо учитывать возрастание потерь в продольно-распределенных $p-i-n$ -структурах с увеличением рабочей частоты.

В обесточенном состоянии диода потери пропускания в устройстве зависят в основном от по-

Рис. 11. Частотные характеристики потерь запирающей (1) и пропускающей (2) выключателя с продольно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структурой

стоянной затухания в полупроводниковой структуре, величина которой определяется поглощением СВЧ-энергии свободными носителями a_0 , диэлектрическими потерями в полупроводнике при отсутствии носителей a_{ε} и контактными потерями a_k . Сумма $a_0 + a_{\varepsilon}$ для высокоомного кремния с проводимостью около $10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ составляет 0,3–0,4 дБ/см в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. Основной вклад в величину постоянной затухания вносят контактные потери a_k , которые увеличиваются с уменьшением длины волны. Для $p-i-n$ -структур с толщиной i -области 0,4 мм и толщиной легированных слоев порядка 0,7–1,0 мкм с проводимостью $5 \cdot 10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, контактные потери составляют 1 дБ/см на длине волны 8 мм и 14 дБ/см на длине волны 1 мм. Для уменьшения a_k в структурах, применяемых в субмиллиметровом диапазоне, необходимо уменьшать толщину легированных слоев и увеличивать их проводимость до 10^4 – $10^5 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Продольно-распределенные $p-i-n$ -структуры с малой толщиной легированных слоев и большим значением проводимости имеют относительно малое значение постоянной затухания в миллиметровом диапазоне. Уменьшить постоянную затухания можно также при частичном заполнении волноводного тракта [12]. Широкополосная компенсация отражений на входе и выходе устройства с полупроводниковой структурой, расположенной в волноводном тракте, может быть достигнута с помощью диэлектрических вставок или с помощью трансформаторов волноводного типа.

Рассмотрим полупроводниковую $p-i-n$ -структуру поперечно-распределенного типа, представленную на **рис. 12**. Эта структура представляет собой тонкую пластину высокоомного кремния, установленную поперек волновода (лучевода). По сторонам пластины ортогонально электрическому полю электромагнитной волны сформированы линейные переходы, образующие контакты, которые инжектируют дырки с одной стороны и электроны с другой в объем пластины. Изменение проводимости полупроводникового материала осуществляется подачей прямого смещения на инжектирующие контакты.

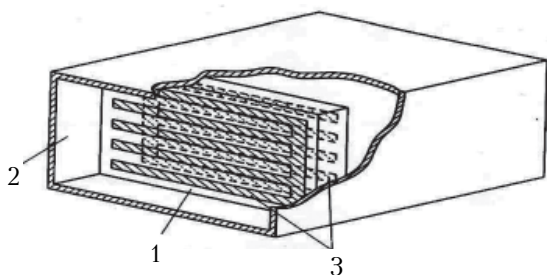


Рис. 12. Конструкция выключателя с поперечно-распределенной слоистой $p-i-n$ -структурой: 1 — кремниевая пластина; 2 — волновод; 3 — структура, в которую инжектируются дырки (с одной стороны) и электроны (с другой стороны)

Необходимо заметить, что плазма в объеме полупроводника обеспечивает требуемую величину развязки (более 20 дБ) лишь в том случае, если она равномерно распределена в объеме полупроводниковой структуры, помещенной в волновод. Этого можно достичь в том случае, когда расстояние между металлическими полосками контактной структуры равно примерно удвоенной длине амбиполярной диффузии, а падение напряжения вдоль контактных полосок невелико.

Также следует обратить внимание на то, что изменение относительного положения контактных полосок на противоположных сторонах кремниевой пластины не увеличивает вносимые потери при условии $\pi t/d > 2,2$, где t — толщина кремниевой пластины, d — расстояние между центрами металлических полосок. Если величина этого отношения выбрана правильно, можно использовать металлические контакты, покрывающие большую часть поверхности кремниевой пластины. Это позволяет получить более однородную по объему плазму и увеличить проводимость $p-i-n$ -структуры в режиме отражения СВЧ-мощности.

Устройства с применением поперечно-распределенных полупроводниковых $p-i-n$ -структур требуют достаточно больших токов для управления (единицы ампер) и обеспечивают быстрое действие на уровне единиц микросекунд. Лучших результатов можно достичь при использовании поверхностно-ориентированных $p-i-n$ -структур, сформированных определен-

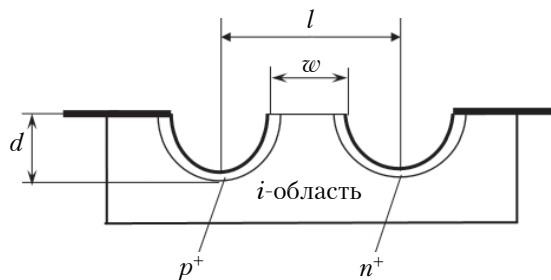


Рис. 13. Конструкция поверхностно-ориентированного диода

ным образом на одной из поверхностей полупроводниковой пластины, имеющей высокое удельное сопротивление ($\rho \geq 10000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). В такой конструкции увеличение проводимости происходит не по всему объему кремниевой пластины, помещенной в волновод, а в областях, параллельных вектору электрического поля с ориентацией H_{01} .

При разработке электрически управляемой кремниевой пластины, помещенной в волновод, учитывались электрофизические параметры известных поверхностно-ориентированных диодов. В процессе ее изготовления использовались стандартные технологические приемы. Сначала в кремнии вытравливались каналы смещения, которые имели «карманы» — участки глубиной 20–30 мкм в области легирования примесями n^+ - и p^+ -типа (рис. 13). Расстояние между карманами l выбирается из условия $l < \lambda/(2\sqrt{\epsilon})$. Ширина i -области $w \approx 30$ мкм. При соотношении размеров $w/d \approx 1$ и глубине карманов $d = 15$ мкм сопротивление полупроводникового диода составляет 2,5–3,0 Ом при токе 50 мА.

Полупроводниковая кремниевая пластина размерами 0,35×0,7 мм содержит девять каналов смещения, ортогональных электрическому полю электромагнитной волны, распространяющейся по волноводу сечением 0,35×0,7 мм. Толщина пластины равна примерно 150 мкм, что составляет половину длины волны в кремнии на частоте 300 ГГц.

На рис. 14 представлены эскизы кремниевой пластины, содержащей поверхностно-

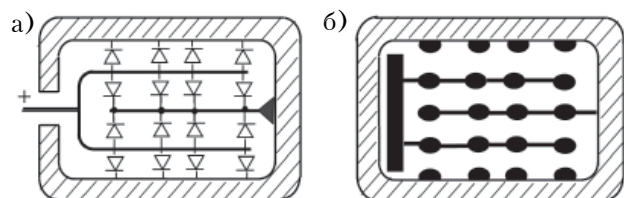


Рис. 14. Конструкция выключателя волноводного типа, содержащего поверхностно-ориентированные $p-i-n$ -структуры:

а — схема соединения поверхностно-ориентированных $p-i-n$ -структур; б — внешний вид поверхности кремниевой структуры, установленной в волновод

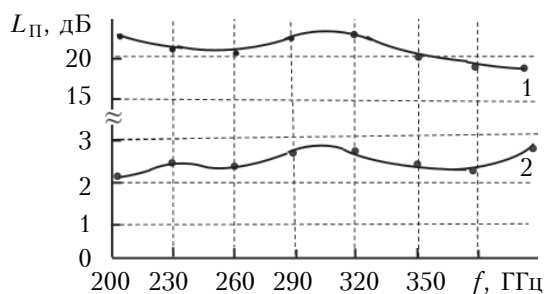


Рис. 15. Частотные зависимости потерь пропускания (1) и потерь запирающего (2) решетчатой поверхности ориентированных $p-i-n$ -структур

ориентированные $p-i-n$ -структуры, а на рис. 15 — частотные характеристики ее потерь пропускания и запираения. Потери запираения более 20 дБ достигаются при токе управления 0,5 А. Быстродействие составляет около 500 нс. Расширение рабочей полосы частот достигается установкой диэлектрических вставок с обеих сторон кремниевого окна.

Заключение

Проведенные исследования показали, что каскадное включение диодов в линию передачи позволяет увеличить потери запираения и расширить рабочую полосу быстродействующих выключателей, работающих в миллиметровом диапазоне. При этом возможно применение корпусированных диодов (для выключателей инверсного типа) и диодов с минимальным значением паразитных параметров, включенных в линию с малым волновым сопротивлением. В первом случае в качестве корпусов были использованы часовые рубиновые камни определенных размеров. Предложенная конструкция обеспечила уровень коммутируемой СВЧ-мощности выключателя не менее 2 Вт, величину потерь в режиме запираения не менее 40 дБ в рабочей полосе частот около 15% за время не хуже 2 нс. Во втором случае рабочая полоса частот выключателя, выполненного с применением несимметричной щелевой линии, содержащей вставку с диодами, составила около 40% при потерях запираения более 40 дБ.

Оценивая результаты, полученные при разработке полупроводниковых коммутирующих устройств миллиметрового диапазона длин волн, можно заключить, что в коротковолновой части СВЧ-диапазона ($f > 200$ ГГц) применение $p-i-n$ -диодов с сосредоточенными параметрами является неперспективным. В этом диапазоне не представляется перспективным использование полупроводников распределенного типа, когда взаимодействие с СВЧ-энергией происходит по всему объему материала и возможно расширение полосы пропускания и улучшение условий рассеяния. При этом в качестве унифицированных элементов управляющих устройств коротковолновой части миллиметрового диапазона, а также в квазиоптических устройствах субмиллиметрового диапазона могут применяться поверхностно-ориентированные $p-i-n$ -структуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Балыко А.А., Зялутдинова О.В., Ольчев Б.М., Юсупова Н.И. Выключатели и аттенюаторы на $p-i-n$ -диодах // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. — 1991. — Вып. 7. — С. 71.
2. Макаренко В. Использование $p-i-n$ -диодов в широкополосных управляемых аттенюаторах // Электронные компоненты и системы. Телекоммуникация и связь. — 2012. — № 9. — С. 38–44.
3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Куликов М.Ю. Микрополосковый $p-i-n$ -диодный СВЧ-выключатель // Изв. вузов. Радиоэлектроника. — 2011. — Т. 54, № 4. — С. 51–60.
4. Inder J. Bahl. Control components using Si, GaAs and GaN technologies. — Artech House, 2014.
5. Caverly R.H. Microwave and RF semiconductor control device modeling. — Artech House, 2016.
6. Алавердян С.А., Боков С.И., Булгаков В.О. и др. Терагерцовый диапазон частот: электронная компонентная база, вопросы метрологического обеспечения // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. — 2012.
7. Карушкин Н.Ф. Характеристики быстродействующих амплитудных переключателей инверсного типа миллиметрового диапазона // Техника и приборы СВЧ. — 2010. — № 1. — С. 11–15.
8. Armstrong A. Monolithic control components for high power mm-waves // Microwave Journal. — 1985. — N 9. — P. 197–201.
9. Rahm M., Li J.-S., Padilla W.J. THz wave modulators: brief review on different modulation techniques // Journal of infrared, millimeter wave and terahertz waves. — 2013. — Vol. 34. — P. 1–27.
10. Вайсблат А.В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах. — Москва: Радио и связь, 1987.
11. Справочник по волноводам / Пер. с англ. под ред. Я.Н.Фельда. — Москва: Сов. радио, 1952.
12. Карушкин Н.Ф. Устройства для переключения и модуляции СВЧ-мощности в миллиметровом диапазоне // Радиофизика и электроника. — 2004. — Т. 9, № 3. — С. 596–602.
13. Карушкин Н.Ф., Симончук В.И., Малышко В.В., Ореховский В.И. Устройства для управления амплитудой и фазой СВЧ-сигналов в миллиметровом диапазоне длин волн // Техника и приборы СВЧ. — 2008. — № 1. — С. 36–41.
14. Дзехцер Г.Б., Орлов О.С. $P-i-n$ -диоды в широкополосных устройствах СВЧ. — Москва: Сов. радио, 1970.
15. СВЧ-устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет / Под ред. И.В.Мальского и Б.В.Сестрорецкого. — Москва: Сов. радио, 1969.
16. Карушкин Н.Ф., Фиалковский А.Т. Расчет слоистой металлодиэлектрической структуры конечной длины, расположенной в прямоугольном волноводе // Изв. вузов. Радиофизика. — 1976. — Т. XIX, № 8. — С. 1218–1224.

Дата поступления рукописи
в редакцию 22.06 2016 г.

М. Ф. КАРУШКИН, В. В. МАЛИШКО, В. В. ОРЕХОВСКИЙ, А. А. ТУХАРИНОВ

Україна, м. Київ, ДП НДІ «Оріон»
E-mail: ndiorion@tsua.net

КОМУТАЦІЙНІ КЕРОВАНІ ПРИСТРОЇ НА $p-i-n$ -ДІОДАХ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Представлено результати досліджень і розробки вимикачів і перемикачів з використанням $p-i-n$ -діодів скупченого типу, що забезпечують час перемикачів на рівні одиниць наносекунд. З метою збільшення втрат запирачності (приблизно 40 дБ) в пристроях застосовано каскадне включення діодів в хвильоводну і мікросмугову лінії передачі на електричній довжині $\theta = \pi/2$. У короткохвильовій частині міліметрового

діапазону довжин хвиль ($f = 300$ ГГц) представлено результати досліджень по створенню комутаційних пристроїв з використанням подовжно- і поперечно-розподілених $p-i-n$ -структур.

Ключові слова: вимикач НВЧ, міліметровий діапазон довжин хвиль, $p-i-n$ -діод, втрати пропускання, втрати замикання, час перемикавання.

DOI: 10.15222/TKEA2016.4-5.34
UDC 621.382.062.8

N. F. KARUSHKIN, V. V. MALYSHKO,
V. V. OREKHOVSKY, A. A. TUHARINOV

Ukraine, Kyiv, State enterprise «Research Institute «Orion»,
E-mail: ndiorion@tsua.net

MILLIMETER WAVE $p-i-n$ -DIODE SWITCHING CONTROLLED DEVICES

The paper presents the results of research and development of concentrated type $p-i-n$ -diodes switches providing the switching time at the level of a few nanoseconds. To increase lock losses of (~ 40 dB) the authors use a cascade connection of diodes into waveguide and microstrip transmission line of $\theta = \pi/2$ electric length. Investigation results of creation of switching devices using longitudinally and transversely-distributed $p-i-n$ -structures in the shortwave part of the millimeter wavelength range ($f = 300$ GHz) are presented.

When developing switching devices intended to control the level of microwave power in the millimeter wavelength range, a number of special features arise limiting the achievement of optimal parameters. The dimensions of the metal ceramic packaged $p-i-n$ -diodes and the mounting elements of semiconductor structures become comparable with the wavelength. As a result, package cannot be considered in the calculations and in the design as the capacity of the concentrated type. In our case the diode package is considered in the form of radial line which is able to transform the input impedance of the transmission line to the terminals of the diode structures, and realize high-impedance state (parallel resonance) in the device circuit in the mode of microwave power transmission. Engineering calculations for the given parameters of the silicon mesostructures showed the possibility of creating high-speed devices for switching microwave power with good characteristics. For diode assembling industrial clockwork ruby jewels with high quality of surface finish, strength and appropriate dimensions are applied as dielectric bushings. Suffice it to say that in the frequency range of 150 GHz, we used the bushings with dimensions of external diameter $D = 0.4$ mm and a height of $h = 0.15$ mm.

The switches created provide transient units of nanoseconds, isolation more than 40 dB at relative frequency bandwidth of 30-40%. Evaluating progress in the development of millimeter wavelength devices, it should be noted that at frequencies greater than 200 GHz, the application of the concentrated type diodes is problematic. In this range it would seem to be promising to use bulk semiconductors. In this case surface-oriented $p-i-n$ -structures can be applied as unified elements of the control devices in the shortwave part of the millimeter range, as well as in quasi-optical transmission lines.

Keywords: microwave switch, millimeter wavelength range, pin diode, transmission loss, locking loss, the switching time.

REFERENCES

1. Balyko A.A., Zalyalutdinova O.V., Ol'chev B.M., Yusupova N.I. [$p-i-n$ -diodes switched and attenuators]. *Electron engineering review. Ser. 1. Microwaves electronics*, iss. 7 (1626), 1991, p. 71. (Rus)
2. Makarenko V. [Using a PIN-diode in controlled broadband attenuators]. *Journal Equis, Electronic Components and Systems*, 2012, no. 9, pp. 38-44. (Rus)
3. Usanov D. A., Skripal A. V., Kulikov M. Yu. Microstrip PIN diode microwave switch. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2011, vol. 54, no. 4, pp. 216-218. <http://dx.doi.org/10.3103/S0735272711040078>
4. Inder J. Bahl. *Control components using Si, GaAs, and GaN technologies*. Artech House, 2014, 324 p.
5. Caverly R.H. *Microwave and RF semiconductor control device modeling*. Artech House, 2016, 290 p.
6. Alaverdyan S.A., Bokov S.I., Bulgakov V.O., Zaicev N.A., Isaev V.M., Cabanov I.N., Katushkin Yu.Yu., Komarov V.V., Krenitskii A.P., Meshchanov V.P., Savushkin S.A., Syromyatnikov A.V., Yakunin A.S. [THz frequency range: electron component base, questions of metrological support]. *Electron Engineering Review, Ser. 1, Microwaves electronics, Moscow, CNII "Electronics"*, 2012. (Rus)
7. Karushkin N.F. [Characteristics of high-speed amplitude switches of the inverse-type operating in millimeter wave range]. *Tekhnika i Pribory SVCh*, 2010, no. 1, pp.11-15. (Rus)
8. Armstrong A. Monolithic control components for high power mm-waves. *Microwave Journal*, 1985, no 9, pp. 197-201.
9. Rahm M., Li J.-S., Padilla W.J. THz wave modulators: brief review on different modulation techniques. *Journal of Infrared, Millimeter Wave and Terahertz Waves*, 2013, vol. 34, pp. 1-27.
10. Vaisblat A.V. [*Microwave switching devices on semiconductor diode*]. Moscow, Radio i Sviaz', 1987, 120 p. (Rus)
11. *Waveguide Handbook*. Ed. by N. Marcuvitz. Dover Publications Inc., 1965, 458 p.
12. Karushkin N.F. [Devices for microwave power switching and modulation in millimeter wave band]. *Radiophysics and electronics*, 2004, vol. 9, no 3, pp. 596-602. (Rus)
13. Karushkin N.F., Simonchuk V.I., Malyshko V.V., Orekhovskiy V.I. [Device for control of amplitude and phase of microwave signals in the millimeter wavelength range]. *Tekhnika i Pribory SVCh*, 2008, no. 1, pp. 36-41. (Rus)
14. Dzekhtser G.B., Orlov O.S. $P-i-n$ -diody v shirokopolosnykh ustroystvakh SVCh [$P-i-n$ -diodes in broadband microwave devices]. Moscow, Sovetskoe radio, 1970. (Rus)
15. SVCh-ustroystva na poluprovodnikovyykh diodakh. Proektirovanie i raschet. [*Microwave devices based on semiconductor diodes. Design and calculation*]. Ed. by I.V. Malskii and B.V. Sestroretskii. Moscow, Sovetskoe radio, 1969. (Rus)
16. Karushkin N.F., Fialkovsky A.T. [Calculation of layered metal-dielectric structures of finite length, located in a rectangular waveguide]. *Izvestiya Vuzov. Radiofizika*, 1976, vol. XIX, no. 8, pp. 1218-1224. (Rus)