

УДК 621.372.832

## ПРИМЕНЕНИЕ ШЛЕЙФНЫХ СТРУКТУР В МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ СВЧ

И. А. Петров  
ФГУП «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга»

Статья получена 23 июня 2015 г.

**Аннотация:** В статье рассматриваются принципы проектирования многоканальных СВЧ переключателей с полупроводниковыми элементами. Анализируются достоинства и недостатки различных схем переключателей. Показано, что применение шлейфных структур с короткозамкнутыми и разомкнутыми шлейфами позволяет расширять диапазон рабочих частот, увеличивать уровни переключаемой мощности, уменьшать ослабление в открытых и увеличивать ослабление в закрытых каналах, уменьшать габариты.

**Ключевые слова:** шлейфные структуры, переключатели, полупроводниковые элементы.

**Abstract:** Principles of the designing switching devices with semiconductor elements are considered in article. Value and defect of the different schemes of the switches are given analysis. Using Shunting Structures with short-circuit and open-circuit stub, allows to increase the range a worker frequencies, enlarge the level to power, reduce the weakening in opened and enlarge the weakening in closed channel, reduce the size.

**Keywords:** shunting structures, switching devices, semiconductor elements

### 1. Основные параметры переключающих ПЭ

Управляющие устройства СВЧ диапазона с полупроводниковыми элементами предназначены для управления амплитудой и фазой сигналов, переключения сигналов по различным каналам. На их основе строятся различные устройства: выключатели высокочастотные (ВВЧ), аттенюаторы электрически регулируемые (АЭР), многоканальные переключатели и переключающие матрицы,

фазовращатели. Управляющим устройствам посвящено достаточно большое количество работ, но остановимся только на некоторых из них, которые, по мнению автора, внесли определенный вклад в развитие теории и практической реализации данных устройств. Первые работы по управляющим устройствам появились в 50 – е годы 20 века, например [1], далее работы [2-4], из отечественных отметим работы [5-13].

Первоначально в управляющих устройствах применялись ПЭ не предназначенные для целей управления, это были диоды с р-п переходами, диоды Ганна, ЛПД и другие. В настоящее время в управляющих устройствах, в том числе многоканальных переключателях, в качестве ПЭ применяются р-і-п диоды и полевые транзисторы с затвором Шоттки. Эквивалентная схема бескорпусного р-і-п диода в открытом и закрытом состояниях представлены на рис. 1а и рис. 1б, соответственно, где:  $r_+$  и  $r_-$  резистивные сопротивления полупроводниковой структуры,  $C_i$  - емкость структуры [6].

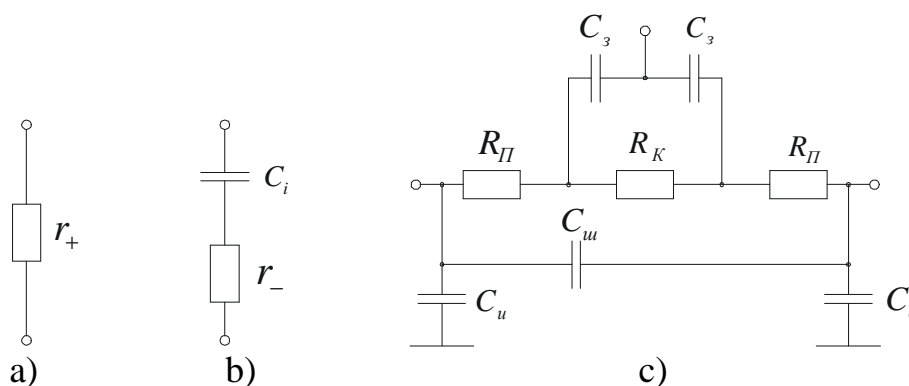


Рис. 1. Эквивалентные схемы бескорпусных ПЭ.

Эквивалентная схема полевого транзистора с затвором Шоттки, представленная на рис. 1с, более сложная [9, 10]. Но эта схема, в зависимости параллельно или последовательно транзистор включен в линию передачи, может быть пересчитана и приведена к эквивалентной схеме р-і-п диода. Поэтому, именно схемы р-і-п диода будем использовать при анализе различных вариантов построения переключателей.

Из общей теории управляющих устройств [5, 6] известно, что независимо от того, последовательно или параллельно ПЭ включен в линию передачи, при «оптимизированном» включении ослабление, вносимое устройством в открытом и закрытом состояниях, связаны с параметрами полупроводниковой структуры следующим соотношением

$$\frac{\sqrt{L_3} - 1}{\sqrt{L_{II}} - 1} = \frac{1}{(2\pi f)^2 C_i^2 r_+ r_-} = K_{\mathcal{E}}, \quad (1)$$

где  $L_{II}$  - ослабление, вносимое переключающим устройством в открытом состоянии;

$L_3$  - ослабление, вносимое переключающим устройством в закрытом состоянии;

$f$  - рабочая частота устройства;

$K_{\mathcal{E}}$  - так называемое, качество полупроводникового элемента.

Соотношение (1) верно только для «оптимизированного» включения полупроводникового элемента в линию передачи, то есть, когда реактивные параметры полупроводникового элемента, тем или иным способом компенсированы соответствующими цепями согласования. Чем меньше  $C_i$ ,  $r_+$  и  $r_-$ , тем больше качество ПЭ на заданной частоте. Однако, требование уменьшения емкости, как правило, приводит к увеличению  $r_+$  и  $r_-$ , а следовательно,  $K_{\mathcal{E}}$  может и не увеличиваться. Уменьшение  $C_i$  уменьшает размеры ПЭ, тем самым снижает допустимую мощность рассеивания  $P_{\text{расс.д.}}$ .

Другим обобщенным параметром ПЭ является критическая частота  $f_{кр}$ , это частота на которой  $K_{\mathcal{E}} = 1$  и определяется следующим выражением

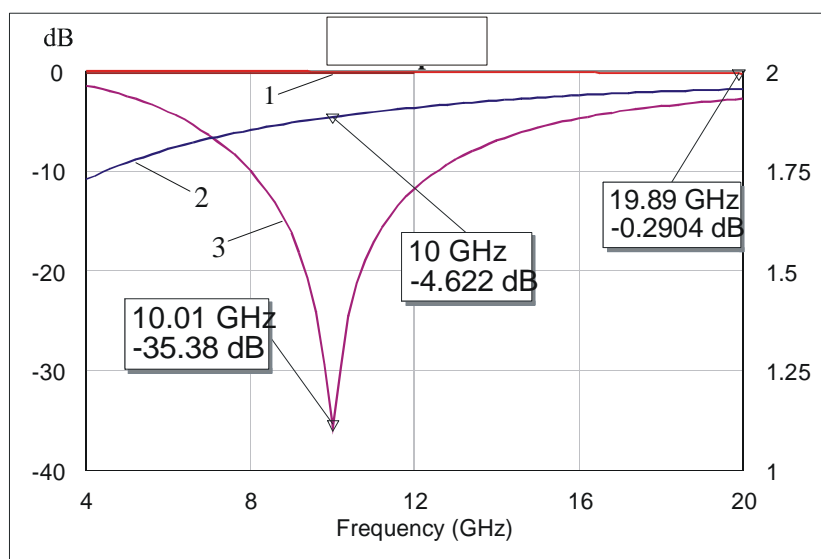
$$f_{кр} = \frac{1}{2\pi C_i \sqrt{r_+ r_-}}. \quad (2)$$

Качество и критическая частота ПЭ характеризуют его предельные возможности.

## 2. Переключающие устройства с последовательным включением ПЭ

Многоканальные переключатели могут быть выполнены с последовательным, последовательно-параллельным и параллельным включением ПЭ в линию передачи. Каналы переключателей могут разветвляться как из одной точки, так и состоять из последовательно разветвляющихся переключательных групп [7, 8], в последнем случае они имеют более широкую полосу рабочих частот.

На рис. 2. приведены частотные характеристики ослабления одного последовательно включенного в линию передачи ПЭ с параметрами  $C_i = 0,12$  пФ и  $r_+ = r_- = 1.5$  Ом. Кривая 1 соответствует открытому и кривая 2 закрытому состояниям ПЭ.



**Рис. 2.** Частотные характеристики последовательного ПЭ.

Кривая 2 рассчитана для не оптимизированного включения ПЭ, так как емкость  $C_i$  ни каким образом не компенсируется и соотношение (1) не выполняется. В результате ослабление, вносимое закрытым ПЭ, с ростом частоты уменьшается и на частоте 10 ГГц становится менее 5 дБ. Для компенсации реактивного емкостного сопротивления ПЭ, параллельно можно подключить ин-

дуктивность для получения параллельного колебательного контура. Однако, на практике оптимизированное включение ПЭ последовательно в линию передачи, в большинстве случаев, не используется. Объясняется это двумя факторами. Во-первых, подключение параллельной индуктивности достаточно сложно реализовать, а к р-і-п диоду практически невозможно, из-за необходимости подачи на него управляющего напряжения. Во-вторых, оптимизированное включение носит резонансный характер и возможно только на одной частоте рис. 2 (кривая 3), при отклонении от которой развязка резко уменьшается.

При создании широкополосных и сверхширокополосных управляющих устройств в подавляющем большинстве используется не оптимизированное последовательное включение полупроводникового элемента в линию передачи. Полупроводниковые диоды и транзисторы постоянно совершенствуются с целью снижения емкости полупроводниковой структуры. Например, серийно выпускаемый р-і-п диод 2A553A-3 имеет емкость порядка 0,03 пФ.

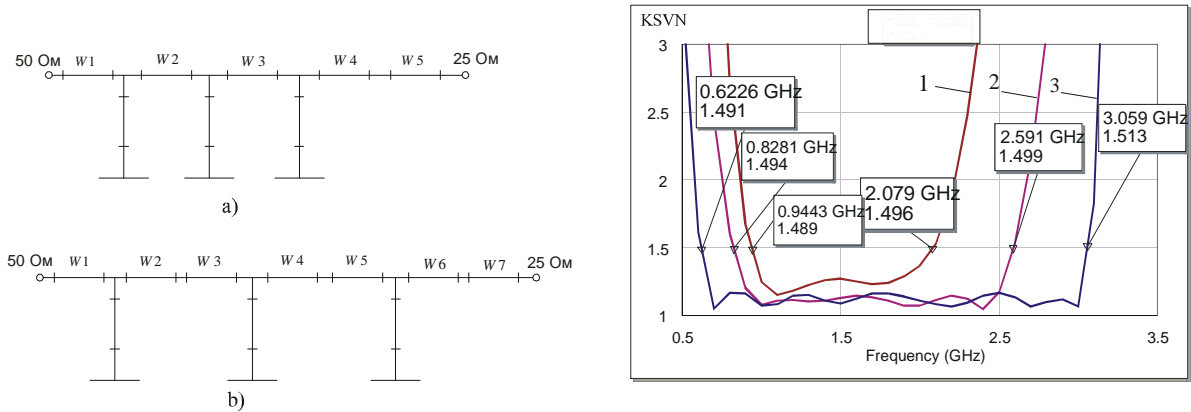
Для увеличения ослабления в закрытом состоянии в линию необходимо включать несколько ПЭ. В этом случае оптимальное расстояние между ПЭ определяется следующим выражением [2]

$$\ell_{opt.} / \lambda_B = 1/4 - \arctg(4\pi\rho_0 f_B C_i) \quad (3)$$

где,  $\lambda_B$  -длина волны на верхней частоте  $f_B$  рабочего диапазона,  $\ell_{opt.}$  - оптимальное расстояние между диодами.

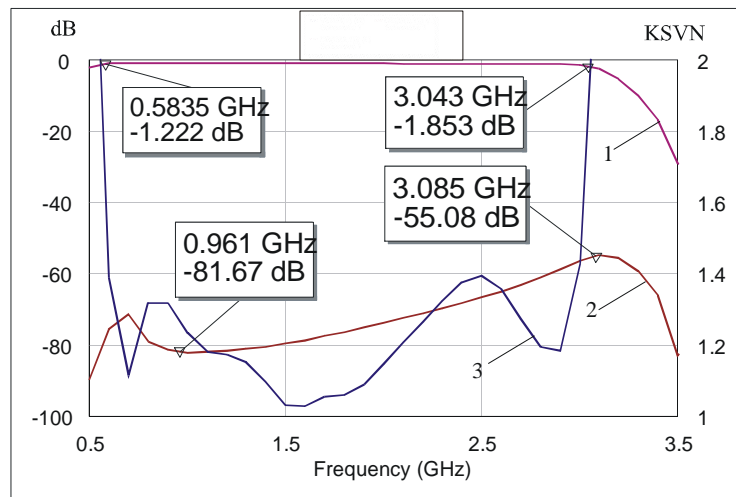
В работе [12] приводится пример проектирования переключателя с последовательным включением р-і-п диодов в линию передачи. Для подачи управляющих токов на диоды используются высокоомные четвертьволновые короткозамкнутые шлейфы, при этом рассматриваются три варианта. В первом варианте шлейфы подключаются традиционно, к 50-омной линии передачи. В этом случае коэффициент перекрытия по диапазону частот, по уровню КСВН не более 1,5, равен 2. Во втором варианте применена структура с каскадным включением П-образных широкополосных четырехполюсников с короткозамкнутыми шлейфами [13], коэффициент перекрытия увеличился до 3. В третьем ва-

рианте применены Т – образные четырехполосники, коэффициент перекрытия увеличился до 5. На рис. 3 приведены исходные П и Т – образные шлейфные структуры. На рис. 4 приведены частотные характеристики КСВН всех трех перечисленных вариантов.



**Рис. 3.** П и Т – образные структуры. **Рис. 4.** Характеристики КСВН вариантов.

На рис. 5 приведены частотные характеристики двухканального переключателя, где 1 – ослабление в открытом канале, 2 – ослабление в закрытом канале, 3 – КСВН входа. В каждый канал включено по четыре последовательных ПЭ с параметрами  $C_i = 0,3$  пФ и  $r_+ = r_- = 1,5$  Ом. В качестве исходной применена Т – образная шлейфная структура.



**Рис. 5.** Частотные характеристики переключателя.

Переключатели с последовательным включением ПЭ достаточно просто реализуются на полосковых линиях передачи, но основным недостатком является то, что развязка в закрытых каналах значительно уменьшается с ростом частоты. Применение ПЭ с малой емкостью и включение нескольких ПЭ в кана-

лах приводит к увеличению ослабления в открытом канале и снижению уровне коммутируемой мощности.

### 3. Переключающие устройства с последовательно – параллельным включением ПЭ

На рис. 6 приведена эквивалентная схема переключателя 1x4 [11], в котором первый канал открыт, а остальные закрыты. Каналы разветвляются с последовательным включением ПЭ.

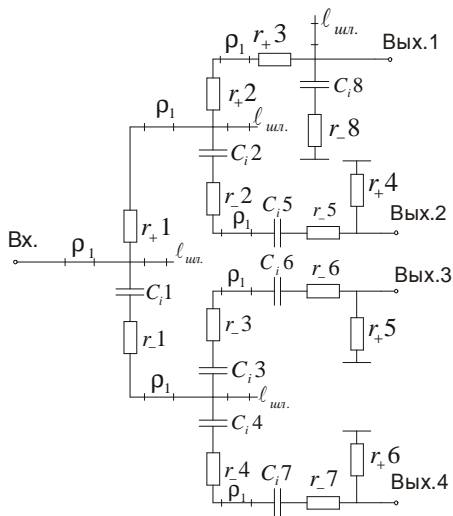


Рис. 6. Эквивалентная схема.

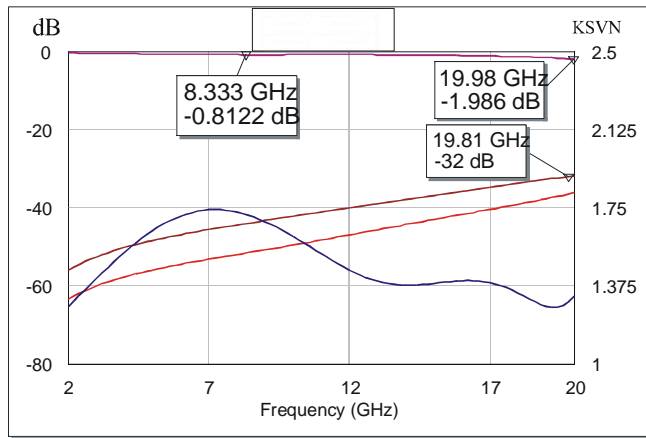


Рис. 7. Характеристики переключателя.

На выходах, за вторым ПЭ после последнего разветвления, включены параллельные ПЭ. Входные емкостные проводимости закрытых каналов и параллельного ПЭ, подключенные к линии передачи открытого канала, значительно ограничивают верхнюю рабочую частоту. Для их компенсации, линии передачи переключателя выполнены в виде каскадного соединения четырехполюсников с разомкнутыми шлейфами. Частотные свойства таких структур, как и структур с короткозамкнутыми шлейфами, подробно описаны в работе [13]. Точки разветвления каналов и точки подключения параллельных ПЭ выбираются в точках подключения разомкнутых шлейфов. Уменьшая длину шлейфов  $l_{шл}$ , подключенных в этих точках, можно выполнить условие  $C_{исх.шл.} = C_{ук.шл} + C_{вх.зк}$ , т.е. суммарная емкость укороченного шлейфа и емкость закрытого канала (или параллельного диода) должна быть равна емкости шлейфа исходной структуры.

На рис. 7 приведены частотные характеристики такого переключателя, рассчитанные в диапазоне от 2 до 20 ГГц. Расчеты проводились для  $C_i = 0,2$  пФ,  $r_+ = r_- = 1,5$  Ом. Из приведенных характеристик видно, что ослабление в открытом канале не превышает 1,6 дБ, КСВН входа не более 1,7, развязка на частоте 20 ГГц не менее 36 дБ. Для увеличения развязки на выходах можно включить дополнительные параллельные ПЭ на расстоянии  $\lambda/4$  друг от друга.

#### 4. Переключающие устройства с параллельным включением ПЭ

Рассмотрим переключатели с параллельным включением ПЭ. В работе [3], для компенсации емкостей параллельных ПЭ, предложено использовать полосовой фильтр с четвертьволновыми короткозамкнутыми шлейфами и связями В работе [4] такой фильтр был применен для создания p-i-n диодного переключателя. Переключатели на основе полосового фильтра реализуются на воздушно-полосковой линии передачи и часто применяются для переключения высоких (до сотен ватт) уровней мощности в непрерывном режиме. Для создания подобных переключателей также можно использовать структуру, состоящую из каскадного соединения П – образных широкополосных четырехполюсников с короткозамкнутыми шлейфами. Как показано в работе [13], коэффициент перекрытия по диапазону рабочих частот не будет превышать 2,2.

На рис. 8 приведена эквивалентная схема открытого канала переключателя 1x4 с параллельным включением ПЭ в линию передачи [8]. Первый канал открыт, остальные закрыты, два последних канала условно не показаны.

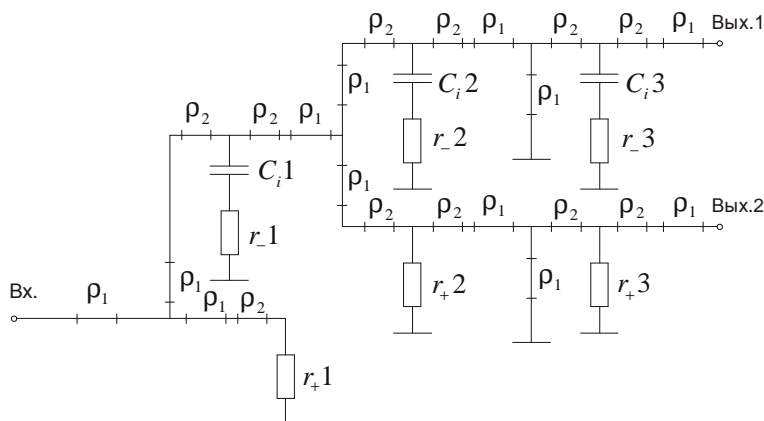


Рис. 8. Эквивалентная схема.



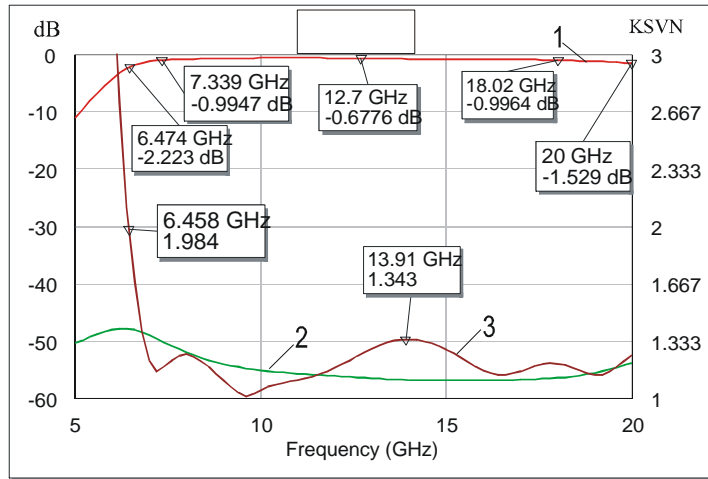


Рис. 9. Характеристики переключателя.

В качестве исходной здесь применена структура, состоящая из каскадного соединения Т – образных широкополосных четырехполюсников с короткозамкнутыми шлейфами [8, 13]. Коэффициент перекрытия по диапазону рабочих частот такого переключателя может достигать 3,5. Для расширения частотного диапазона нормированное волновое сопротивление отрезков, обозначенных  $\rho_1$  менее 0,8. Отрезки, обозначенные  $\rho_2$ , имеют нормированное волновое сопротивление более 1 и служат для компенсации емкостей ПЭ, подключенных к линии передачи открытого канала. На рис. 9 приведены частотные характеристики переключателя, рассчитанные от 5 до 20 ГГц. Расчеты проводились для ПЭ с параметрами:  $C_i = 0.2$  пФ,  $r_+ = r_- = 1.5$  Ом, допустимая мощность рассеивания  $P_{\text{расс.д.}} = 2$  Вт. Примерно такие параметры имеет р – i – n диод 2A546A-5. В диапазоне от 6,5 до 18 ГГц КСВН входа переключателя не превышает 1,4, ослабления открытого канала менее 1 дБ, развязка соседнего канала более 50 дБ.

На рис. 10 приведены графики мгновенных напряжений на активных сопротивлениях диодов при СВЧ сигнале на входе мощностью 1 Вт на частоте 13 ГГц. Кривые 1 и 2 соответствуют напряжениям на резисторах  $r_+1$  и  $r_+2$ , а кривые 3, 4 и 5 на резисторах  $r_-1$ ,  $r_-2$  и  $r_-3$ .

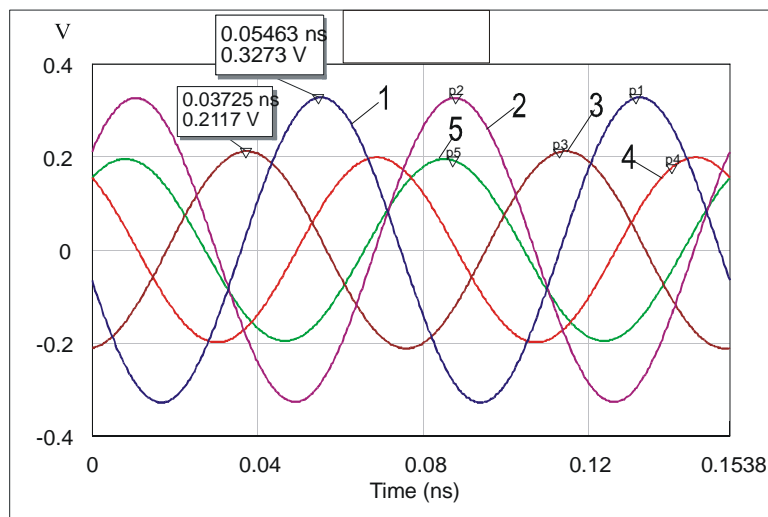


Рис. 10. Мгновенные значения напряжений на  $r_+$  и  $r_-1$ .

Максимальное мгновенное напряжение на сопротивлении  $r_+1$  и равно 0,33 В. Аналогично можно определить напряжения на других частотах, например, 7 и 20 ГГц. Эти напряжения, соответственно, равны 0,55, и 0,44 В. Зная максимальные напряжения на сопротивлениях ПЭ, можно определить коэффициент  $\eta$ , характеризующий, какая часть от входной мощности рассеивается на сопротивлении. Этот коэффициент равен

$$\eta = P_{\text{расс.д.}} / P_{\text{вх.}} = U_{\text{макс.}}^2 / 2rP_{\text{вх.}}, \quad (4)$$

где,  $P_{\text{расс.д.}}$  - мощность, рассеиваемая на диоде,  $P_{\text{вх.}}$  -мощность на входе устройства,  $U_{\text{макс.}}$  -мгновенное максимальное значение напряжения на сопротивление. Учитывая, что напряжения  $r_+1$  получены при  $P_{\text{вх.}} = 1$  Вт, коэффициент  $\eta$  для частот 7, 13 и 20 ГГц будут, соответственно, равны 0,1, 0,036 и 0,065.

Зная коэффициент  $\eta$  и допустимую мощность рассеивания  $P_{\text{расс.д.}}$  ПЭ, можно рассчитать допустимую мощность на входе переключателя по следующей формуле

$$P_{\text{вх.дон.}} = P_{\text{расс.д.}} / \eta_{\text{макс.}} \quad (5)$$

Таким образом, допустима коммутируемая мощность на входе переключателя, на соответствующих частотах, равна 20, 55 и 31 Вт. Максимальную мощность переключатель коммутирует в центральной части рабочего диапазона, на краях диапазона коммутируемая мощность уменьшается, но даже на частоте 20 ГГц не менее 30 Вт.

## **Выводы**

1. Переключатели с последовательным включением ПЭ легко реализуются на полосковых линиях передачи, но развязка в закрытом канале может резко уменьшаться с ростом частоты. Для увеличения развязки необходимо применять ПЭ с малой емкостью и включать в линию несколько ПЭ, однако при этом увеличивается ослабление в открытом канале.

2. В переключателях с последовательно-параллельным включением ПЭ легко получить высокую развязку в закрытых каналах. Применение структур с разомкнутыми шлейфами позволяет компенсировать емкостные проводимости закрытых каналов и параллельных ПЭ, что снижает ослабление в открытом канале.

3. Переключатели с параллельным включением ПЭ являются наиболее оптимальными с точки зрения получения минимального ослабления в открытом канале и максимальной развязки в закрытом. При использовании в качестве исходных структур ППФ или каскадного соединения П-образных шлейфных четырехполюсников, коэффициент перекрытия по диапазону частот около 2. При использовании каскадного соединения Т-образных шлейфных четырехполюсников, коэффициент перекрытия по диапазону частот до 3,5.

## **Литература**

1. Armistead M.A., Spencer E.G. and Hatcher R.D. Microwave Semi-Conductor Switch. // Proc. IRE, vol. 44, p. 1875, December, 1956.
2. Carver R.V. Theory of TEM Diode Switching. // IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques., vol. MTT-9, 1961, № 3, pp.224-238.

3. Ficher R.F. Broadband Microwave Diode switches // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques. 1965. v. MTT-13. № 5. P. 706-709.

4. White J.E., Mortenson K.E. Diode SRDT Switch at High Power With Octave Microwave Bandwidth // IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques. 1968. v. MTT-16. № 1.

5. СВЧ устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет. / Под ред. И.В. Мальского, Б.В. Сестрорецкого. М.: Сов. Радио, 1969.

6. Либерман Л.С., Сестрорецкий Б.В., Шпирт В.А., Якубень Л.Н. Полупроводниковые диоды для управления СВЧ мощностью. // Радиотехника, 1972, т.27, № 5.

7. Воробьевский Е.М. Многоканальный переключатель. / Авторское свидетельство, №451150, Н01р 1/10. Заявлено 06.04.1972. Опубликовано 25.11.1975, бюллетень №43.

8. Петров И.А. Многоканальный переключатель / Авторское свидетельство № 881902 Н01Р 1/15.. Приоритет от 06.09.1976. Опубликовано 15.11.1981, бюллетень № 42.

9. Чижов А.И., Орлов О.С. Расчет и анализ характеристик широкополосных дискретных фазовращателей. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1983. вып. 5. С. 13-16.

10. Орлов О.С., Чижов А.И., Фефелов А.Г., Прудовский В.И. Выключатели СВЧ на полевых транзисторах с затвором Шоттки. // Электронная техника. Сер. 1 «Электроника СВЧ», 1986, вып.3, с.50-54.

11. Петров И.А. Многоканальные СВЧ переключатели с полупроводниковыми элементами на основе широкополосных согласующих структур. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 4. С. 60-66.

12. Лобанов Б.С., Петров И.А., Неганов В.А. Структурный синтез СВЧ устройств с использованием шлейфных четырехполюсников. Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники». М., ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2014, № 1. 15с. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/6/text.pdf>

13. Петров И.А. Частотные свойства реактивных симметричных четырех-полюсников на основе шлейфных структур. Электронный журнал «Журнал радиоэлектроники». М., ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 2014, № 1. 21с. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/7/text.pdf>