

Широкополосный р-і-п диодный переключатель 8-миллиметрового диапазона с малыми потерями для радиометра Дайка

Хохановская Ю. А., Омеляненко М. Ю.

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”

E-mail: khokhanovska.julia@gmail.com

В работе приводятся результаты разработки широкополосного волноводно-щелевого р-і-п диодного переключателя 8-миллиметрового диапазона с малыми потерями и высокой развязкой с изолированным плечом. Высокие качественные показатели переключателя – прямые потери 1,5 дБ, развязка не менее 29,5 дБ – получены благодаря последовательной тщательной разработке каждого из узлов переключателя, включающей измерение параметров используемых диодов непосредственно в линии интегральной схемы переключателя, электродинамический анализ переключающего узла и цепей питания диодов. Всё это позволило реализовать переключатель с высокими качественными параметрами при использовании доступных и недорогих диодов. Параметры устройства позволили с успехом использовать его в качестве переключателя Дайка в высокочувствительном радиометре миллиметрового диапазона длин волн.

Ключевые слова: р-і-п диодный переключатель; миллиметровый диапазон; интегральные схемы

DOI: [10.20535/RADAP.2019.76.58-62](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.76.58-62)

Введение

Непрерывное совершенствование технологии производства полупроводниковых элементов, в частности р-і-п диодов, позволило использовать их во входных цепях приемопередатчиков [1], в том числе и миллиметрового диапазона длин волн [2]. Наилучшие характеристики диодов (емкость менее 0,04 пФ, индуктивность порядка 8 пГн и сопротивление менее 2 Ом), которые обеспечивают вносимые потери переключателя порядка 1,5 дБ и развязку до 30 дБ на частоте 76 ГГц, реализуются в структурах, входящих в состав специализированных монолитных интегральных схем [3]. Коммерчески доступные р-і-п диодные переключатели SPDT в диапазоне частот до 75 ГГц имеют потери порядка 5 дБ при развязке 60 дБ, 4 дБ при развязке до 40 дБ и 1,6 дБ при развязке 20 дБ [4, 5], что является неприемлемым для реализации многоканального малошумящего приемника высокочувствительного радиометра миллиметрового диапазона длин волн. В данной работе сообщается о результатах разработки широкополосного р-і-п диодного переключателя для радиометра Дайка диапазона частот 35-59 ГГц.

1 Разработка ГИС переключателя

Разработка переключателя для радиометра Дайка имеет ряд существенных особенностей, обусловленных его установкой на входе высокочувствительного приемника теплового излучения. Например, чувствительность радиометра полной мощности излучения, работающего в полосе частот $\Delta f = 80$ МГц со временем усреднения 10 мсек при суммарных шумах антенны и приемника равных 900 К, составляет 1 К. Включение дополнительного источника диссипативных потерь с их величиной в 1,5 дБ (эта величина типична для имеющихся на рынке монолитных схем SPDT-переключателей) приводит к ухудшению чувствительности до 1,56 К, то есть на 56%. Помимо требования малых вносимых потерь переключатель в радиометре Дайка (далее переключатель Дайка, ПД) должен обеспечивать развязку не менее 20 дБ, что, по результатам оценок, обеспечит не более чем однопроцентное влияние неидеальности ПД на результаты измерения шумовой температуры. Критичным также является вносимый переключателем КСВ.

С целью выполнить перечисленные требования в качестве электродинамической основы гибридно-интегральной схемы (ГИС) ПД выбрана односторонняя волноводно-щелевая линия (ВЩЛ), потери в которой в миллиметровом диапазоне длин волн

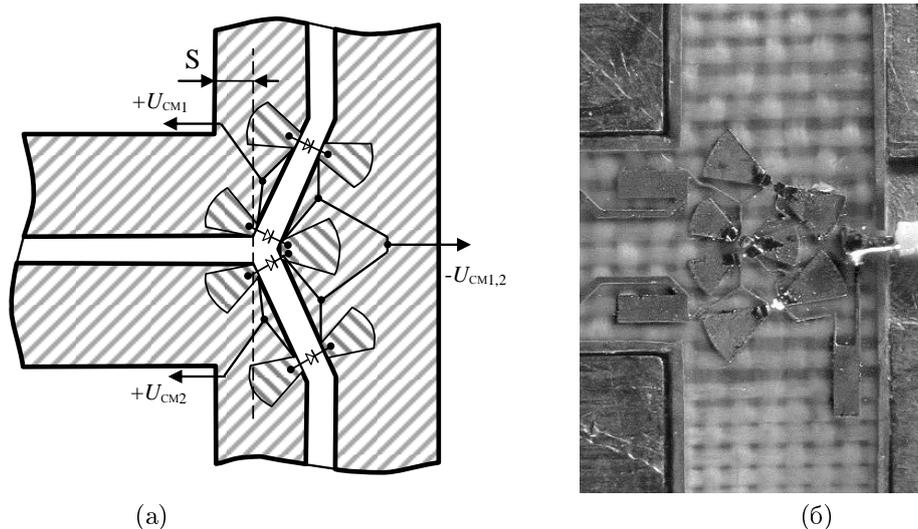


Рис. 1

незначительны. Существенным отличием от известной топологии SPDT на ВЩЛ [6] является то, что диоды установлены на противоположной гребням стороне подложки ВЩЛ и подсоединены к ней с помощью радиальных шлейфов, которые одновременно служат для подачи смещения на диоды (рис. 1 а, б). Помимо этого, как видно из рисунка, выходные порты расположены под углом девяносто, а не 120 градусов по отношению ко входному, что существенно упрощает изготовление входного блока 15-канального радиометра с электронным сканированием луча в целом. Помимо значительного снижения коммутационных помех (источник смещения $U_{см}$ полностью изолирован от “земли”) предложенная топология ГИС ПД позволила реализовать высокие требования к переключателю, несмотря на применение в нем доступных и недорогих p-i-n диодов с балочными выводами.

В основу разработки положены измеренные по специально разработанной методике [7] параметры p-i-n диода в ВЩЛ. Эквивалентные схемы диода в открытом и закрытом состояниях приведены на рис. 2 а. Здесь $L_d = 0,022$ нГн; $C_d = 0,028$ пФ; $R_d = 8$ Ом. Теоретическая частотная характеристика потерь в ВЩЛ с установленным параллельно диодом в его открытом и закрытом состояниях представлена на рис. 2 б (кривые 1, 2 соответственно). Расчеты проведены в приближении теории длинных линий для ВЩЛ с волновым сопротивлением $Z_0 = 170$ Ом (материал Rogers RT5880 толщиной $d=127$ мкм, ширина щели $w=150$ мкм, волноводная камера $a \times b = 5,2 \times 3,4$ мм). Здесь же точками изображены экспериментально полученные результаты. Видно достаточно хорошее соответствие экспериментальных и теоретических результатов, что, конечно, является следствием измерения параметров диода непосредственно в используемой линии передачи. Для дальнейшего важно отметить, что моделирование в программной среде электродина-

мического анализа «Microwave Studio» дало результаты (штриховые линии 3, 4 на рис. 2 б), даже приближенно не описывающие результаты данного эксперимента. Это, по-видимому, связано с неадекватностью использованной модели диода как сосредоточенного элемента в программном пакете.

В связи со сказанным с целью использовать возможность расчетов в указанном пакете программ для моделирования диода в его открытом состоянии он заменялся тонкой полоской металла с соответствующей протяженностью. Такое представление оказалось чрезвычайно продуктивным, что, в частности, иллюстрирует кривая 5 на рис. 2 б, которая удовлетворительно описывает результаты проведенных измерений.

Результаты, отображенные на рис. 2 б, показывают, что основное внимание при разработке переключателя должно быть уделено выполнению требований к изоляции выключенного плеча. В результате проведенного анализа было установлено, что помимо очевидных причин её ухудшения — значительной индуктивности выбранных диодов — имеется еще одна, связанная с топологией переключающего узла ПД. На рис. 3 сплошными линиями изображены частотные зависимости затухания в изолированном плече для трёх значений расстояния S точки разветвления щелей ВЩЛ от стенки волноводной камеры, формирующей выходные порты переключателя (рис. 1 а). Видно, что развязка с изолированным плечом быстро ухудшается при смещении точки разветвления щели к границе входного волновода. Наоборот, при смещении к середине выходного волновода развязка растёт, а её частотная зависимость уменьшается. Еще одной особенностью, связанной с упомянутым упрощением конфигурации переключателя, является появление высокочастотного резонанса на характеристике, связанного с резонансным возбуждением сверхразмерной области в месте разветвления волноводов. По-видимому, это явление

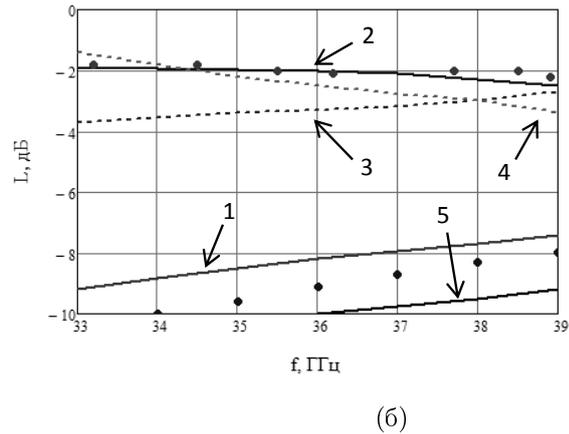
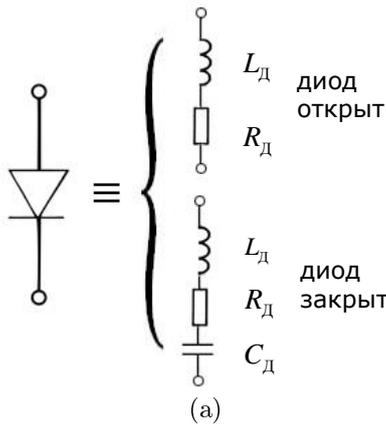


Рис. 2

аналогично описанному в [8]. Включение в систему поглотителя позволило полностью выровнять характеристику (штриховая линия на рис. 3), причем с целью избежать дополнительных потерь поглотитель располагался в специальной полости в стенке волновода, так что в сам канал волновода он не погружался. Из рис. 3 также видно, что экспериментальные результаты достаточно хорошо совпадают с результатами расчетов.

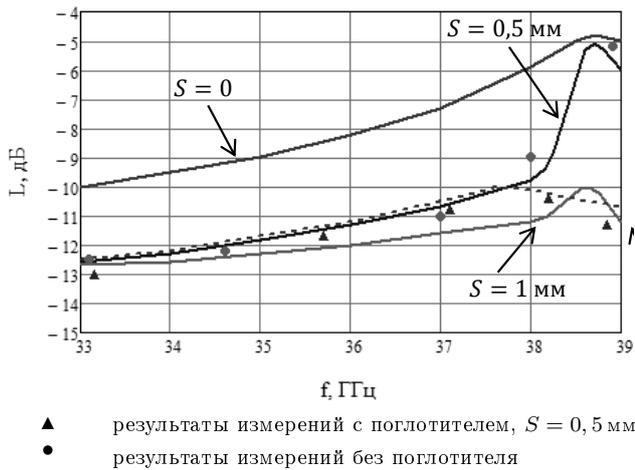


Рис. 3

С целью уменьшить влияние значительной индуктивности диодов на характеристики развязки радиусы радиальных шлейфов (рис. 1а) уменьшались до размеров, при которых достигался необходимый уровень их ёмкостного реактивного сопротивления. Последнее рассчитывалось в пакете программ «CST Microwave Studio», а начальное значение радиусов определялось из соотношений, приведенных в [9]. На рис. 4 представлены результаты расчета частотной зависимости указанной величины входного сопротивления радиального шлейфа в плоскости соединения его с регулярной микрополосковой линией шириной $w=150$ мкм. Расчеты выполнены для толщины диэлектрика $d=127$ мкм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,2$; угол раскрытия сектора $\varphi = 40^\circ$. Кривые 1-5 относятся к секторам с радиусами 0,9 мм, 1,024 мм, 1,15 мм, 1,275 мм и 1,4 мм,

соответственно. Кривая 6 — результат расчета для сектора, к основанию которого подсоединены две высокоомные короткозамкнутые четвертьволновые линии, которые, как видно, значительно повышают его резонансную частоту. На этом же рисунке (кривая 7) изображена частотная зависимость реактивного сопротивления диода (с противоположным знаком). Видно, что, выбирая должным образом радиус сектора, можно достичь необходимого значения резонансной частоты системы “сектор-диод-сектор” и тем самым улучшить частотную характеристику развязки переключателя.

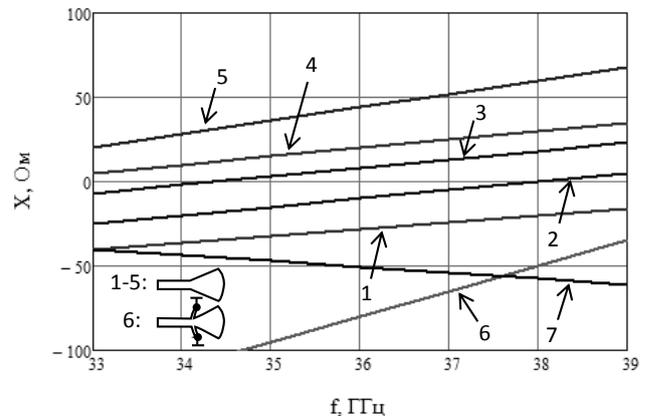


Рис. 4

Расстояние между диодами в выходных плечах ПД рассчитывалось в терминах теории длинных линий из условия резонансного прохождения при запертых диодах.

2 Экспериментальные результаты

Проведенные экспериментальные исследования изготовленных образцов переключателя полностью подтвердили результаты моделирования. Полученные частотные зависимости вносимых потерь, изоляции и КСВ со входа представлены, соответственно, на рис. 5, 6, 7, причем сплошными кривыми

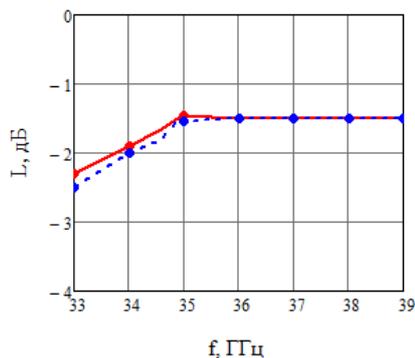


Рис. 5

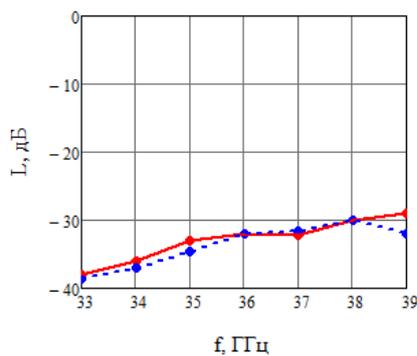


Рис. 6

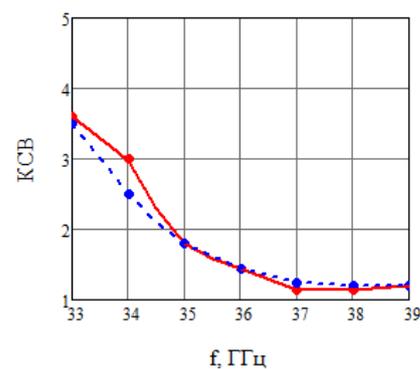


Рис. 7

изображены эти зависимости для первого, а штриховыми — для второго состояния переключателя. Видно, что изоляция запираемого плеча в рабочем диапазоне частот 35-39 ГГц составляет не менее 29,5 дБ, а потери в открытом плече не превышают 1,5 дБ. При этом последняя величина включает потери в плавных переходах и подводящих линиях, длина которых была значительной и в реальном устройстве с используемым переключателем может быть существенно уменьшена. По нашим оценкам потери в открытом плече переключателя при этом должны составить не более 0,8 дБ, что является, наряду с величиной развязки, одним из лучших показателей качества для подобных устройств на сегодня.

Выводы

Разработанная ГИС переключателя отвечает высоким требованиям малых вносимых потерь и малого вносимого КСВ в диапазоне частот 35-39 ГГц. Полученные результаты достигнуты путем последовательного анализа всех его составных частей — измерения параметров диодов в электродинамической системе ГИС, анализа топологии переключающего узла и цепей питания диодов. На всех этих этапах результаты моделирования проверялись экспериментально. Всё это дало возможность реализовать высокие требования к переключателю при использовании доступных и недорогих диодов в миллиметровом диапазоне длин волн. Переключатель с успехом использовался в составе радиометрического приемника с электронным сканированием луча.

References

[1] Mazri T., Riouch F., and EL Amrani N. (2012) A Reconfigurable Microstrip Antenna Array Using SPST Switches at UMTS Band. *International Journal of Microwaves Applications*. Vol 1, No 1, pp. 48-51.

- [2] Gresham I., Jain N., Budka T., Alexanian A., Kinayman N., Ziegner B., Brown S. and Staecker P. (2001) A compact manufacturable 76-77-GHz radar module for commercial ACC applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 49, Iss. 1, pp. 44-58. DOI: 10.1109/22.899961
- [3] Tanaka Y., Uda H., Hayashi H., Ueda H. and Usui M. (2002) A 76-77 GHz High Isolation GaAs PIN-Diode Switch MMIC. *R&D Review of Toyota CRDL*. Vol. 37, No 2, pp 19-26.
- [4] L3 Narda-Miteq: Solid State PIN Diode Switches L3 Narda-Miteq. Available at: <https://nardamiteq.com/page.php?ID=489&Z=Solid+State+PIN+Diode+Switches>.
- [5] Ducommun Microwave SPDT Switches. Available at: <https://www.ducommun.com/engineeredolutions/microwave/spdt-switches.aspx>
- [6] Menzel W. and Callsen H. (1983) Integrated Fin-line Components And Subsystems At 60 And 94 Ghz. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 31, Iss. 2, pp. 142-146. DOI: 10.1109/tmmt.1983.1131448
- [7] Khokhanovska Yu. O. and Omelianenko M. Yu. (2018) The measurement of the p-i-n diodes parameters in the fin-line in the millimeter wave region, *Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia*, Iss. 75, pp. 5-8. DOI: 10.20535/RADAP.2018.75.5-8
- [8] Solbach K., Callsen H. and Menzel W. (1981) Spurious Resonances in Asymmetrical Fin-Line Junctions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 29, Iss. 11, pp. 1193-1195. DOI: 10.1109/tmmt.1981.1130530
- [9] Sorrentino R. and Roselli L. (1992) A new simple and accurate formula for microstrip radial stub. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Vol. 2, Iss. 12, pp. 480-482. DOI: 10.1109/75.173401

Широкоугловий p-i-n діодний перемикач 8-міліметрового діапазону з малими втратами для радіометра Дайка

Хохановська Ю. О., Омеляненко М. Ю.

Вступ. В роботі представлені результати розробки широкоуглового p-i-n діодного перемикача для радіометра Дайка 8-міліметрового діапазону довжин хвиль.

Основні вимоги до низьких втрат та високої ізоляції були досягнуті завдяки ретельній розробці топології гібридної інтегральної схеми (ГІС) хвилевідно-щільної лінії. Розробка заснована на якісному дослідженні кожного з вузлів перемикача, що включає в себе вимірювання параметрів використовуваних діодів безпосередньо в лінії інтегральної схеми перемикача, електродинамічний аналіз перемикаючого вузла та кіл живлення діодів. Вимірювані параметри ГІС (втрати нижче 1,5 дБ, включно із втратами в колах живлення, та розв'язка більше 29,5 дБ) є одними з найкращих у таких пристроях.

Розробка ГІС перемикача. При розробці ГІС були враховані наступні основні чинники. Для реалізації перемикача були використані доступні та недорогі p-i-n діоди з досить великою індуктивністю (виміряне значення індуктивності $L_d=0,022$ нГ). По-друге, порти перемикача, що розміщені під кутом 120 градусів і традиційно використовуються для реалізації SPDT-перемикачів на ХЩЛ, вважалися неприйнятними з конструктивної точки зору і тому були замінені вихідними портами, розташованими під кутом 90 градусів по відношенню до вхідного. Крім того, щоб зменшити комутаційні завади при використанні перемикача як елементу радіометра Дайка, обидва електроди діодів ізольовані від "землі". В роботі було показано, що оптимізація положення точки розгалуження ХЩЛ по відношенню до точки з'єднання хвилеводів дає можливість збільшити розв'язку з ізольованим плечем перемикача. Розміщення поглинаючого матеріалу в області розгалуження дає змогу виключити резонансне збудження цієї області без збільшення втрат.

Корекція частотної характеристики розв'язки досягається оптимізацією розмірів радіальних шлейфів. Розміри шлейфів були розраховані шляхом електродинамічного аналізу з метою забезпечення реактивності, необхідної для резонансу з індуктивністю відкритого діоду, оскільки показано, що приблизні формули для розрахунку вхідної реактивності радіальних шлейфів не дозволяють робити правильні оцінки внаслідок впливу високоомної лінії, з'єднаної із шлейфами для забезпечення живлення діодів.

Висновок. Високі якісні показники перемикача - прямі втрати 1,5 дБ, розв'язка не менше 29,5 дБ - отримані завдяки послідовній ретельній розробці кожного з вузлів перемикача, що включає в себе вимірювання параметрів використовуваних діодів безпосередньо в лінії інтегральної схеми перемикача, електродинамічний аналіз перемикаючого вузла і кола живлення діодів. Все це дозволило реалізувати перемикач із якісними параметрами при використанні доступних і недорогих діодів. Крім того, параметри пристрою дозволили з успіхом використовувати його в якості перемикача Дайка у високочутливому радіометрі міліметрового діапазону довжин хвиль.

Ключові слова: p-i-n діодний перемикач; міліметровий діапазон; інтегральні схеми

Broadband p-i-n diode switch in the 8-mm wave region with low losses for Dicke radiometer

Khokhanovska Yu. O., Omelianenko M. Y.

Introduction. The paper presents the results of the development of a broadband p-i-n diode switch for the Dicke radiometer of the 8-millimeter wavelength range. The basic requirements of the low losses and high isolation were achieved due to the careful development of the topology of the fin-line hybrid integrated circuit (HIS). The development was based on the diode parameters, measured directly in the fin-line and the optimization of the branching region and diode supply circuits. The measured parameters of HIS (losses low than 1.5 dB including losses in connecting circuits and isolation more than 29.5 dB) are among the best in such devices.

Development of HIS of the switch. The following main factors were taken into account in the development of HIS. To implement the switch available and inexpensive p-i-n diodes with a sufficiently large inductance were used (measured value of inductance $L_d=0,022$ nH). Secondly, the 120-degree positioned switch ports, traditionally used for implementation of fin-line SPDT, was considered unacceptable from the constructive point of view and was replaced by 90-degree positioned output ports. In addition, in order to reduce the commutation noise when using as the element of Dicke radiometer, both diode electrodes had to be isolated throw the "ground". It was shown that optimization of the position of fin-line slot junction point with respect to the point of branching of waveguides makes it possible to increase the isolation of the disconnected arm. The placement of the absorber in the branching region excludes the resonant excitation of this region without increasing losses.

The isolation frequency response correction is achieved by optimizing the sizes of radial stubs. The dimensions of stubs were calculated by electrodynamic analysis to provide the reactance necessary for resonance with diode inductance of the open diode, since it was shown that approximate formulas available for calculation of their input reactance do not allow making correct estimates due to the influence of the high impedance lines connected to stubs to provide the diode supply.

Conclusion. Accurate, step-by-step development of HIS elements, including the measurement of diode parameters in HIS line, optimization of branching region and diode supply circuit made it possible to implement a device that meets the high requirements of small insertion loss and high isolation in 8-millimeter wavelength range. The developed switch was successfully used in the front end of Dicke radiometer with electric beam scanning.

Key words: p-i-n diode switch; millimeter wave region; integrated circuits