

УДК 621.372.543.2

Измерение параметров р-і-п диодов в волноводно-щелевой линии на частотах миллиметрового диапазона длин волн

Хохановская Ю. А., Омеляненко М. Ю.

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

E-mail: khokhanovska.julia@gmail.com

В работе предложена методика, позволяющая с достаточной точностью измерить параметры р-і-п диодов в открытом и закрытом состояниях. Метод не требует установки референсной плоскости и позволяет провести измерения непосредственно в электродинамической системе проектируемой гибридно-интегральной схемы (ГИС). Предложенная методика применима также для детекторных и смесительных диодов и даёт возможность с приемлемой точностью и быстротой найти характеристики, адекватные условия их работы в составе разрабатываемых устройств.

Ключевые слова: р-і-п диод; параметры р-і-п диодов; волноводно-щелевая линия; гибридно-интегральные схемы

DOI: [10.20535/RADAP.2018.75.5-8](https://doi.org/10.20535/RADAP.2018.75.5-8)

Введение

Современные сверхвысокочастотные системы часто строятся по волноводно-планарной технологии, сочетающей использование объемного волновода (для реализации антенных устройств, фильтров, циркуляторов и т.п.) и интегральных схем СВЧ [1]. При этом использование в качестве электродинамической основы гибридно-интегральных схем волноводно-щелевой линии (ВЩЛ) дает ряд преимуществ над их микрополосковой реализацией — широкополосный интерфейс с объёмной частью строится проще, а потери в элементах намного меньше, что в особенности сказывается в миллиметровом диапазоне длин волн [2, 3].

Хорошо известно, что разработка содержащей полупроводниковые элементы интегральной схемы требует измерения их параметров в используемой волноведущей среде, поскольку к эквивалентной схеме будут отнесены все дифракционные поправки к низкочастотному представлению элементов. Сказанное касается даже одного и того же типа системы — например, в [4] приводятся результаты измерений параметров транзисторов, полученные в 50-омных микрополосковых линиях с различными типами подложек и размерами, причем их значения отличаются более, чем на 10 %.

В большинстве случаев подобные измерения проводятся с помощью анализаторов цепей, в комплект которых входят контактные устройства, сконструированные для измерений в определенной ли-

нии передачи — обычно микрополосковой или копланарной, — и плохо сочетающиеся с ВЩЛ. Однако даже в случае использования совершенных переходов на ВЩЛ значительные ошибки измерений будут вноситься неизбежными погрешностями в определении положения референсной плоскости, вклад которых растет с ростом частоты измерений.

В данной работе предложена простая и эффективная методика измерения параметров р-і-п диода в ВЩЛ, не требующая трудоемких процедур, связанных с установкой положения референсной плоскости. Сама процедура измерений в чем-то похожа на хорошо известный метод Дешана [5], однако использует особенности измеряемого объекта для исключения референсных измерений в их традиционном виде.

1 Описание методики измерений

Схема измерений, показанная на рис. 1 а, содержит генератор СВЧ, направленный ответвитель, короткую измерительную секцию ВЩЛ с установленным диодом и подвижный короткозамыкатель в прямоугольном волноводе. Секция ВЩЛ снабжена двумя высококачественными плавными переходами, имеющими обратные потери не менее 20 дБ в диапазоне частот измерений (рис. 1 б). В соответствии с изображенной схемой для разности $1 - |\Gamma_{in}|^2$

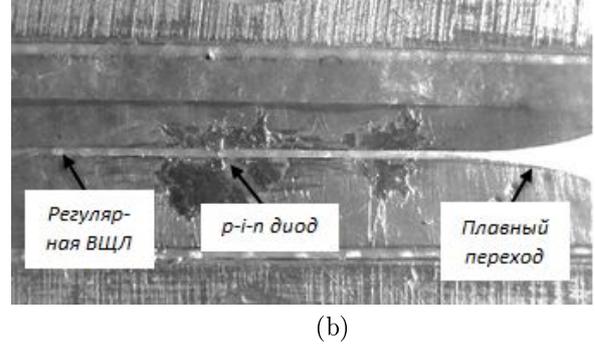
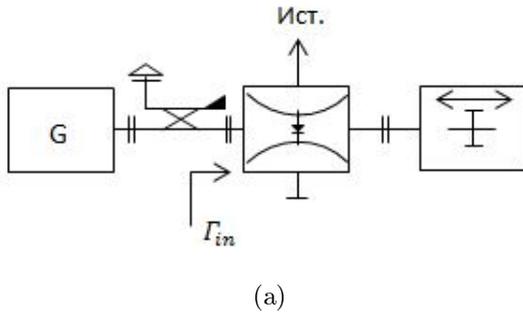


Рис. 1. Схема измерений (а), секция ВЦЛ с установленным диодом (б)

можем записать

$$1 - |\Gamma_{in}|^2 = \Delta^2 = \frac{4g_T}{(1 + g_T)^2 + b_T}, \quad (1)$$

где

$$g_T = \frac{G_d + \operatorname{Re}(Y_{lin})}{Y_0},$$

$$b_T = \frac{B_d + \operatorname{Im}(Y_{lin})}{Y_0} = \frac{b_d + \operatorname{Im}(Y_{lin}(x))}{Y_0},$$

Y_0 — волновая проводимость секции ВЦЛ; G_d, B_d — активная и реактивная составляющие проводимости диода; $\operatorname{Re}(Y_{lin}), \operatorname{Im}(Y_{lin})$ — активная и реактивная составляющие входной проводимости измерительной секции справа от диода, $b_d = B_d/Y_0$. Подчеркнем, что поскольку современные p-i-n диоды в открытом и закрытом состояниях имеют малые потери (активное сопротивление диода r_d не превышает 10 Ом), потерями в ВЦЛ априори пренебречь нельзя. При этом

$$\frac{\operatorname{Re}(Y_{lin})}{Y_0} = \tanh(\alpha'l') \frac{1 + \tan^2(\beta'l')}{\tanh^2(\alpha'l') + \tan^2(\beta'l')};$$

$$\frac{\operatorname{Im}(Y_{lin})}{Y_0} = -\tan^2(\beta'l') \frac{1 - \tanh(\alpha'l')}{\tanh^2(\alpha'l') + \tan^2(\beta'l')}.$$

Поскольку обратные потери в плавном переходе незначительны, фазовый набег и потери в линиях справа от диода могут быть представлены в виде

$$\beta'l' = \beta_{ВЦЛ} l_{ВЦЛ} + \beta_{ПР} l_{ПР} = \theta + \beta_{ПР} l_{ПР};$$

$$\alpha'l' = \alpha_{ВЦЛ} l_{ВЦЛ} + \alpha_{ПР} l_{ПР} \approx q,$$

где индексы у переменных относятся к ВЦЛ и прямоугольному волноводу и учтено, что потери в последнем пренебрежимо малы, а величина $l_{ВЦЛ}$ при движении короткозамыкателя не изменяется. С учетом сказанного соотношение (2) можно записать в виде

$$\frac{\operatorname{Re}(Y_{lin})}{Y_0} = q \frac{1 + x^2}{q^2 + x^2}; \quad \frac{\operatorname{Im}(Y_{lin})}{Y_0} = -x \frac{1 - q^2}{q^2 + x^2}, \quad (3)$$

где $x = \tan(\theta + \beta_{ПР} l_{ПР}), \theta = \text{const}$.

Проведем некоторые численные оценки для потерь реальных ВЦЛ. Так, линия с шириной щели $w = 150$ мкм, изготавливаемая на основе современного фольгированного диэлектрика толщиной 140 мкм, диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,65$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\tan(\delta) = 0,0009$, в диапазоне частот 36-39 ГГц имеет потери, не превышающие 0,10 дБ/см (в диапазоне частот 75-78 ГГц — величину 0,20 дБ/см). Для величины $\alpha'l'$ это дает оценку $\alpha'l' \approx q \approx 0,012$.

Пренебрегая в (2) и (3) величинами порядка q^2 , получим, что минимум величины $\Delta^2(x)$ и, соответственно, максимум $|\Gamma_{in}|^2$ реализуется при $x = 0$. С ростом величины потерь минимум функции $\Delta^2(x)$ незначительно смещается в сторону больших (при $b_d < 0$) или меньших (при $b_d > 0$) значений x , что иллюстрируется графиками на рис. 2. Графики построены для $b_d < 0$, трех величин активного сопротивления в последовательной эквивалентной схеме диода ($r_d = 4, 8, 10$ Ом) и двух значений потерь в ВЦЛ: $L = 0, 1$ дБ/см (сплошные кривые) и намеренно завышенной их величины $L = 0, 2$ дБ/см (штриховые). Видно, что во всем диапазоне изменения рассмотренных параметров величина x , при которой наблюдается максимальное значение коэффициента отражения, не превышает величины $\sim 0,3$, что соответствует отклонению длины $l_{ПР}$ от положения, в котором находился бы поршень в отсутствии потерь в ВЦЛ, всего на 0,04λ.

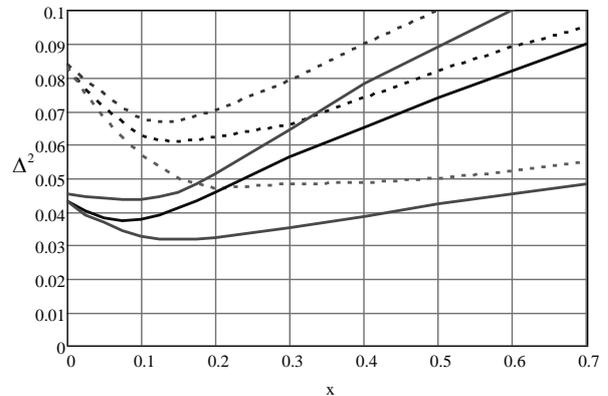


Рис. 2. Зависимости $\Delta^2(x)$ для разных значений величины активного сопротивления диода и потерь

Таким образом, вследствие малости потерь можно считать величину x равной нулю, а координату установки короткозамыкателя l_{ref} , при которой наблюдается максимум отраженной мощности, считать эквивалентом координаты установки диода в ВЩЛ. Иными словами, положение поршня с высокой точностью соответствует положению референсной плоскости, нахождение которой является трудоемким процессом в любых стандартных методиках измерения импеданса.

После определения положения референсной плоскости комплексную проводимость диода найти несложно. Действительно, анализируя зависимость квадрата модуля входного коэффициента отражения

$$|\Gamma_{in}|^2 = \frac{\left(1 - g_d - \frac{Re(Y_{in}(x))}{Y_0}\right)^2 + \left(b_d + \frac{Im(Y_{in}(x))}{Y_0}\right)^2}{\left(1 + g_d + \frac{Re(Y_{in}(x))}{Y_0}\right)^2 + \left(b_d + \frac{Im(Y_{in}(x))}{Y_0}\right)^2} \quad (4)$$

от переменной x , видим, что при малых потерях она достигает минимума при выполнении условия резонанса $(b_d - Im(Y_{in}(x)))/Y_0 = 0$. При этом, как показывают аналогичные предыдущим расчеты, связанное с потерями отклонение от этого условия, выраженное в значениях координаты короткозамыкателя, составляет величину не более 0.02λ . Таким образом, измеряя значение координаты короткозамкнутого поршня, при котором имеется минимум коэффициента отражения, можем найти реактивную составляющую проводимости диода: $b_d = ctg(\beta_{ПП} l_{ПП})$. Под значением координаты $l_{ППmin}$ в данном случае следует, очевидно, понимать смещение поршня относительно его положения при максимальном отражении.

Необходимо отметить, что предлагаемая методика применима для нахождения параметров различных диодов. Используя ее, например, для смесительных или детекторных диодов, можем найти активную составляющую проводимости, измеряя значение КСВ в минимуме отражения. В случае p-i-n диодов в полностью открытом или закрытом состоянии измерить активную составляющую затруднительно из-за её плохой различимости на фоне даже малых потерь в секции ВЩЛ. Опыт, однако, показывает, что эта величина может быть независимо и точно измерена на низких частотах. Будучи включенной в схему диода, содержащую измеренные в СВЧ диапазоне реактивные составляющие проводимости, она адекватно отразит его поведение в реальном устройстве.

2 Обсуждение результатов

Приемлемую точность предложенной упрощенной методики нахождения параметров эквивалентной

схемы p-i-n диода проиллюстрируем следующим примером. Предположим, что измеряются параметры p-i-n диода с балочными выводами, который в полностью открытом состоянии представляет собой последовательно включенное активное сопротивление $r_d = 8$ Ом и индуктивность $L_d = 0,230$ нГн, а в закрытом состоянии — последовательное включение r_d , L_d и емкости $C_d = 0,05$ пФ. Измерения проводятся в ВЩЛ с волновым сопротивлением $Z_0 = 170$ Ом и замедлением $P = 1$ на частоте $f = 36$ ГГц. Потери в ВЩЛ составляют 0,1 дБ/см. Рассчитанные по (1)-(4) точные значения координат короткозамыкателя для случая открытого диода составляют $l_{ref} = 0,01$ см и $l_{ППmin} = 0,379$ см. Полагая, что имеется возможность установить указанные координаты короткозамыкателя экспериментально, находим соответствующее нормированное значение проводимости индуктивности: $b_d = ctg(\beta_{ПП}(l_{ПП} - l_{ref})) = -2,662$, что дает экспериментально найденное значение индуктивности $L_{d \text{ экс}} = 0,277$ нГн, то есть величину, отличающуюся от требуемого значения на +20%. Для закрытого диода можем получить $l_{ref} = 0,413$ см; $l_{ППmin} = 0,446$ см. Используя найденное значение $L_{d \text{ экс}} = 0,277$ нГн, находим $C_{d \text{ экс}} = 0,0424$ пФ (ошибка 15%). Полученные данные типичны для предлагаемого метода, который, несмотря на кажущуюся существенную неточность, позволяет быстро оценить параметры диода в электродинамической системе реальной ГИС на частотах миллиметрового диапазона. Надо понимать, что альтернативой ему является методика, предполагающая неизбежные действия по установлению референсной плоскости — процедуры, точность которой может быть еще хуже.

Выводы

Таким образом, в работе была предложена простая и эффективная с точки зрения использования методика измерения основных параметров p-i-n диода непосредственно в электродинамической системе ГИС. Результаты измерения параметров диодов с успехом использовались в разработке входного модулятора высокочувствительного радиометра Дайка миллиметрового диапазона длин волн.

References

- [1] Morgan M. and Weinreb S. (2005) Techniques for the Integration of High-Q Millimeter-Wave Filters in Multi-Function MMIC Modules. *Microwave Journal*, Vol. 48, No 5, pp. 182-196.
- [2] Fang B., Pu Y., and Luo Y. (2016) A Novel Wideband Antipodal Fin-line Waveguide-to-Microstrip Transition Structure for Ka-band Applications. *27th International Symposium on Space Terahertz Technology*, Nanjing, China, April 13-15.

- [3] Tan B., Yassin G., Grimes P., Leech J., Jacobs K., Withington S., Tacon M. and Groppi C. (2010) A 700 GHz unilateral finline SIS mixer fed by a multi-flare angle smooth-walled horn. *Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy V*, Vol 7741, 774110-1. DOI: 10.1117/12.856711
- [4] Mitsubishi Electric (2011) *Low Noise GaAs HEMT MGF4941AL*.
- [5] Altman J. L. (1965) *Microwave Circuits (Electronic & Communication)*. Van Nostrand Reinhold Inc, 462 p.

Вимірювання параметрів р-і-п діодів у хвилевідно-щілинній лінії на частотах міліметрового діапазону довжин хвиль

Хохановська Ю. О., Омеляненко М. Ю.

Вступ. Загально відомо, що розробка інтегральної схеми, яка містить напівпровідникові елементи, вимагає виміру параметрів цих елементів у хвилевідному середовищі, що використовується. Існуючі методи вимірювання потребують процедури калібрування, що зумовлено пошуком опорної площини – трудомісткого процесу, який у деяких випадках взагалі неможливо виконати з необхідною точністю. Зокрема, це стосується вимірювань у хвилевідно-щілинній лінії, яка є зручним електродинамічним середовищем для реалізації гібридних інтегральних схем (ГІС) в діапазоні міліметрових хвиль. У цій роботі пропонується методика для вимірювання параметрів діодів, що не потребує калібрування. Запропонований метод дозволяє знайти комплексну електропровідність змішувальних детекторів та р-і-п діодів (останні у відкритому та закритому станах) з достатньою точністю.

Опис процедури вимірювання. Схема вимірювань містить генератор СВЧ, спрямований відгалужувач, коротку вимірювальну секцію хвилевідно-щілинної лінії з встановленим діодом і рухомий короткозамикач в прямокутному хвилеводі. У результаті теоретичного аналізу було показано, що у випадку незначних втрат у вимірювальній секції процедура пошуку параметрів діода може бути зведена до вимірювання відстаней до поршня в положеннях, коли спостерігається максимум і мінімум відбиття хвилі.

Обговорення результатів. В цьому розділі приводиться оцінка помилок, властивих запропонованій методиці. Показано, що при реальних втратах у вимірювальній секції помилки при визначенні параметрів діода не перевищують 20%, що можна вважати прийнятними для розробки схем, які містять ці діоди. Окрім того, приймаємо до уваги і той факт, що запропонований спосіб не вимагає процедури встановлення опорної площини, притаманної стандартним методам вимірювання імпедансу, що є джерелом основних помилок вимірювань.

Висновок. Таким чином, в роботі була запропонована проста і ефективна з точки зору використання методика вимірювання основних параметрів р-і-п діода

безпосередньо в електродинамічній системі ГІС. Похибки вимірювання не перевищують 20% і можуть бути зменшені шляхом зменшення втрат у вимірювальній секції.

Ключові слова: р-і-п діод; параметри р-і-п діодів; хвилевідно-щілинна лінія; гібридно-інтегральні схеми

The measurement of the p-i-n diodes' parameters in the fin-line in the millimeter wave region

Khokhanovska Yu. O., Omelianenko M. Y.

Introduction. It is known, that it is desirable to measure the parameters of semiconductor elements in the transmission lines, in which they are supposed to be installed. The existing methods of measuring them need for calibration procedure, connected with finding the reference plane – a laborious procedure in some cases is generally not feasible with necessary accuracy. In particular, this applies to the requirements in the fin-line which is convenient electrodynamic medium for realization of hybrid-integrated circuits (GIS) in the millimeter wave region. In this paper we propose a technique for measuring the parameters of diodes that does not require calibration. The proposed method makes it possible to find the complex conductivity of mixing, detector and p-i-n diodes (latter being open and closed) with reasonable accuracy.

Description of measurement procedure. The measurement set-up contains a microwave generator, directional coupler for the reflected wave, a section of measuring fin-line with the diode to be tested and standard waveguide short. As a result of theoretical analysis it was shown, that in the case of insignificant losses in measuring section the procedure for finding the diode parameters can be reduced to measurements of distances between the positions of short, at which the maximum and minimum of reflected wave are observed.

Discussion. This section contains the estimation of errors inherent to the proposed method. It was shown, that with the real losses in measuring section the errors in the determining of the diode parameters do not exceed 20% that can be considered acceptable for the development of circuits containing these diodes. As an argument, the fact, that proposed method does not require procedure for establishing the reference plane, inherent to standard methods of measuring impedance, and being the source of the main measurement errors, is put forward.

Conclusion. The proposed technique allows us to quickly estimate the parameters of the diode. In this case the measurements are made in the electrodynamic system of GIS developed with these diodes that gives adequate results for its development. The measurement errors are not more than 20% and can be reduced by reducing the losses in the measuring section.

Key words: p-i-n diode; parameters of the p-i-n diode; fin-line; hybrid-integrated circuits