

СВЧ 3D сборка на полиимидном шлейфе для систем в корпусе

В.П. Тимошенко, Д.В. Родионов, А.И. Хлыбов, А.С. Мусаткин, Д.В. Вертянов

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Национальный исследовательский университет МИЭТ, valeri04@hotmail.com

Аннотация — В работе исследовались особенности 3D сборки СВЧ трактов высокочастотных интегральных микросхем и устройств. Рассмотрены расчеты волнового сопротивления микрополоскового и копланарного трактов. Проведены экспериментальные исследования СВЧ параметров и сравнение с теоретическим расчетом.

Ключевые слова — 3D СВЧ сборка, интегральная микросхема, S - параметры, полиимид, гибкая разводка.

I. ВВЕДЕНИЕ

Основные тенденции в микроэлектронике связаны со снижением массогабаритных параметров, повышением быстродействия и снижением потребляемой мощности. Технология трехмерной (3D) интеграции играет существенную роль в улучшении параметров изделий электронной техники. Ключевыми приемами 3D интеграции является использование ультратонких (20-35 мкм) кристаллов, собранных в пакет (стек) с применением коммутационных подкристалльных плат-интерпозеров (interposer) со сквозными металлизированными переходными отверстиями [1]. Данная технология хорошо работает для относительно низкочастотных сигналов. В случае сигналов СВЧ диапазона существуют ограничения, связанные с изготовлением трактов передачи на проводящем кремниевом основании (чип кристалла, интерпозер). Эту проблему можно успешно разрешить используя гибкий полиимидный шлейф, включающий СВЧ тракты, а также низкочастотные сигнальные линии, шины питания и земли (рис. 1.). Причем, применение полиимидного шлейфа возможно как для соединения интегральных схем, так и для печатных плат, собираемых в 3D пакет.

В связи с этим актуальной задачей является разработка СВЧ трактов на полиимидной подложке, а также измерение и исследование их параметров в широком частотном диапазоне.

II. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ СВЧ ТРАКТОВ НА ПОЛИИМИДОМ ОСНОВАНИИ

На полиимидной пленке возможно формирование как 50 - омных, так и 75 - омных микрополосковых и копланарных трактов (рис. 2.), применяемых в СВЧ технике. При расчете волнового сопротивления таких конструкций используются экспрессный (инженерный) или более точный теоретический (научный с применением вычислительной техники) подходы.

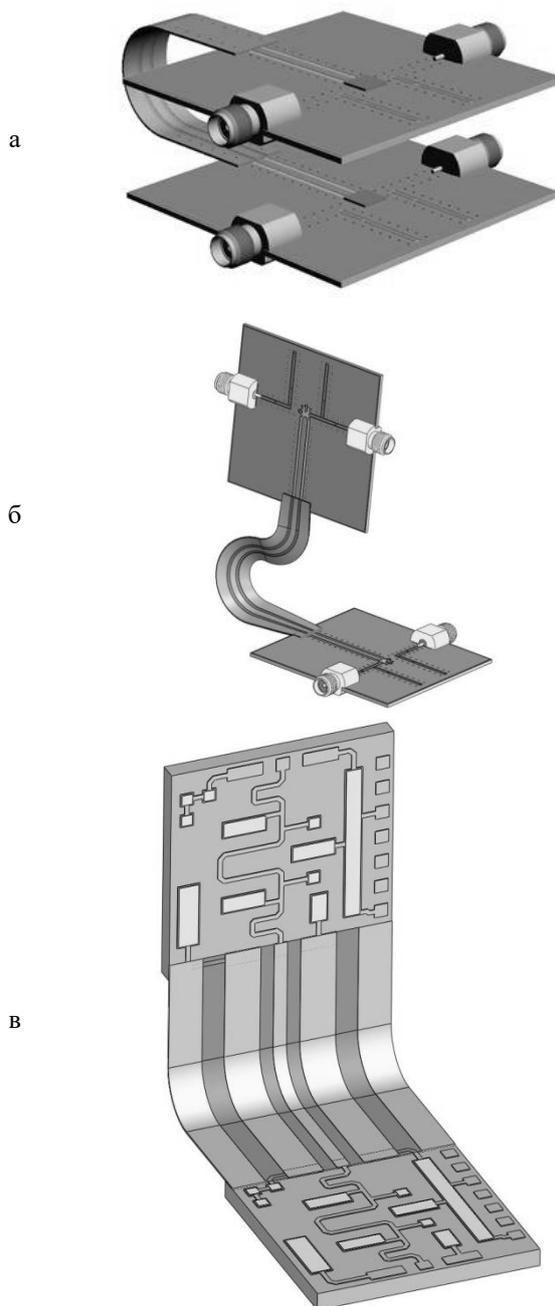


Рис. 1. Использование полиимидного шлейфа в 3D СВЧ: а, б - для печатных плат, в - для интегральных микросхем

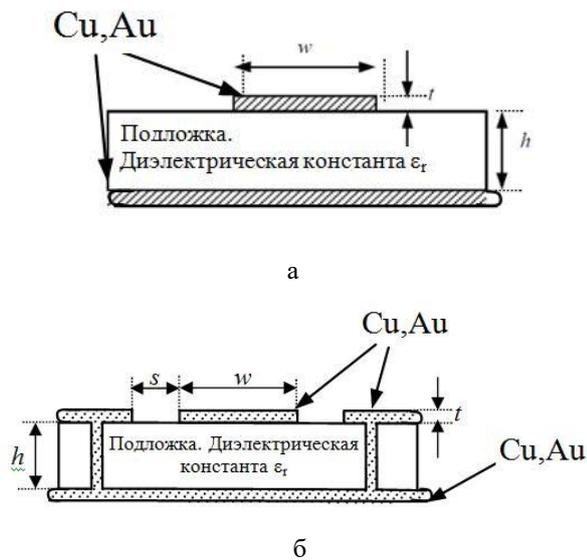


Рис. 2. СВЧ тракты: а-микрополосок, б-копланар

Для инженерных расчетов микрополосковых линий, обеспечивающих точность 15-20%, целесообразно использовать соотношение [2]:

$$Z_{0,МПЛ} = \frac{87.0}{(\epsilon_r + 1.41)^{1/2}} \ln \left[\frac{5.98h}{0.8w + t} \right]. \quad (1)$$

Достоинством микрополоска является его простота расчета и реализации. К недостаткам следует отнести дополнительную индуктивность в цепи нулевой шины. Эта "паразитная" индуктивность появляется в результате соединения соответствующих площадок на интегральной схеме и нулевой шины на обратной стороне микрополосковой конструкции.

Копланарная конструкция лишена таких недостатков, так как нулевая и сигнальные шины расположены в одной плоскости. Инженерный расчет волнового сопротивления копланарной линии осуществляется по соотношениям [3]:

$$Z_{0,КПЛ} = \frac{60.0\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{1.0}{\frac{K(k)}{K(k')} + \frac{K(k_1)}{K(k'_1)}}, \quad (2)$$

$$\text{где } k = \frac{w}{w + 2s}, \quad k' = \sqrt{1.0 - k^2},$$

$$k_1 = \frac{\tanh\left(\frac{\pi w}{4.0h}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi(w + 2s)}{4.0h}\right)}, \quad k'_1 = \sqrt{1.0 - k_1^2},$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{1.0 + \epsilon_r \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(k_1)}{K(k'_1)}}{1.0 + \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(k_1)}{K(k'_1)}},$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1.0 - k^2 \sin^2 \varphi}} d\varphi - \text{полный эллиптический интеграл первого рода.}$$

На полиимидном носителе целесообразно формирование копланарной конструкции с верхним и нижним расположением нулевой шины, которые соединены между собой посредством набора металлизированных переходных окон. Вклад боковых нулевых шин в волновое сопротивление тракта значительно меньше, чем нижних, так как толщина диэлектрика (h) обычно много меньше, чем расстояние от центрального полоска до боковой нулевой шины. Проведено моделирование волнового сопротивления СВЧ конструкции в зависимости от ширины центрального полоска и диэлектрической константы материала (рис. 3.).

Следует отметить, что величине 50-омного стандартного волнового сопротивления соответствует ширина полоска (w) от 90 мкм до 117 мкм. Учитывая технологические ограничения на минимальный топологический зазор, который составляет порядка 100 мкм, важную роль играет измерение реальной величины диэлектрической проницаемости полиимида. Прямые измерения емкости на этих частотах практически невозможны, поэтому определение диэлектрической проницаемости в указанном диапазоне частот проводилось путем измерения скорости распространения сигнала в полосковой линии рефлектометрическим методом [4].

В микрополосковых линиях основными типами волн являются волны ТЕМ-типа. Скорость распространения волны определяется следующим образом: $v = c/(\epsilon_{эфф})^{1/2}$, где $(\epsilon_r + 1)/2 < \epsilon_{эфф} < \epsilon_r$ (ϵ_r - диэлектрическая проницаемость материала подложки, на которой выполнена микрополосковая линия, с - скорость света).

В микрополосковых линиях с относительно широкой сигнальной шиной ($w \gg h$) вся энергия электрического поля концентрируется в диэлектрике под полоском, поэтому $\epsilon_{эфф} = \epsilon_r$, таким образом $\epsilon_r = (c/v)^2$ (v - скорость распространения волны в материале). Измеряя время (T) прохождения сигнала через полосковую линию известной длины (L), можно определить скорость распространения волны (рис. 4.). Для отраженного сигнала скорость распространения определяется двойным пробегом сигнала $v = 2L/T$.

Следует отметить, что при прохождении сигнала через СВЧ конструкцию фронт зондирующего перепада (10 пс) ухудшился до 33,5 пс. Используя известное выражение $f = 0.35/t_r$, где t_r - длительность фронта проходного сигнала, получаем значение полосы пропускания 10,4 ГГц [5].

На рис. 5. приведены экспериментальные исследования зависимости диэлектрической проницаемости от частоты для СВЧ гибкого копланарного шлейфа.

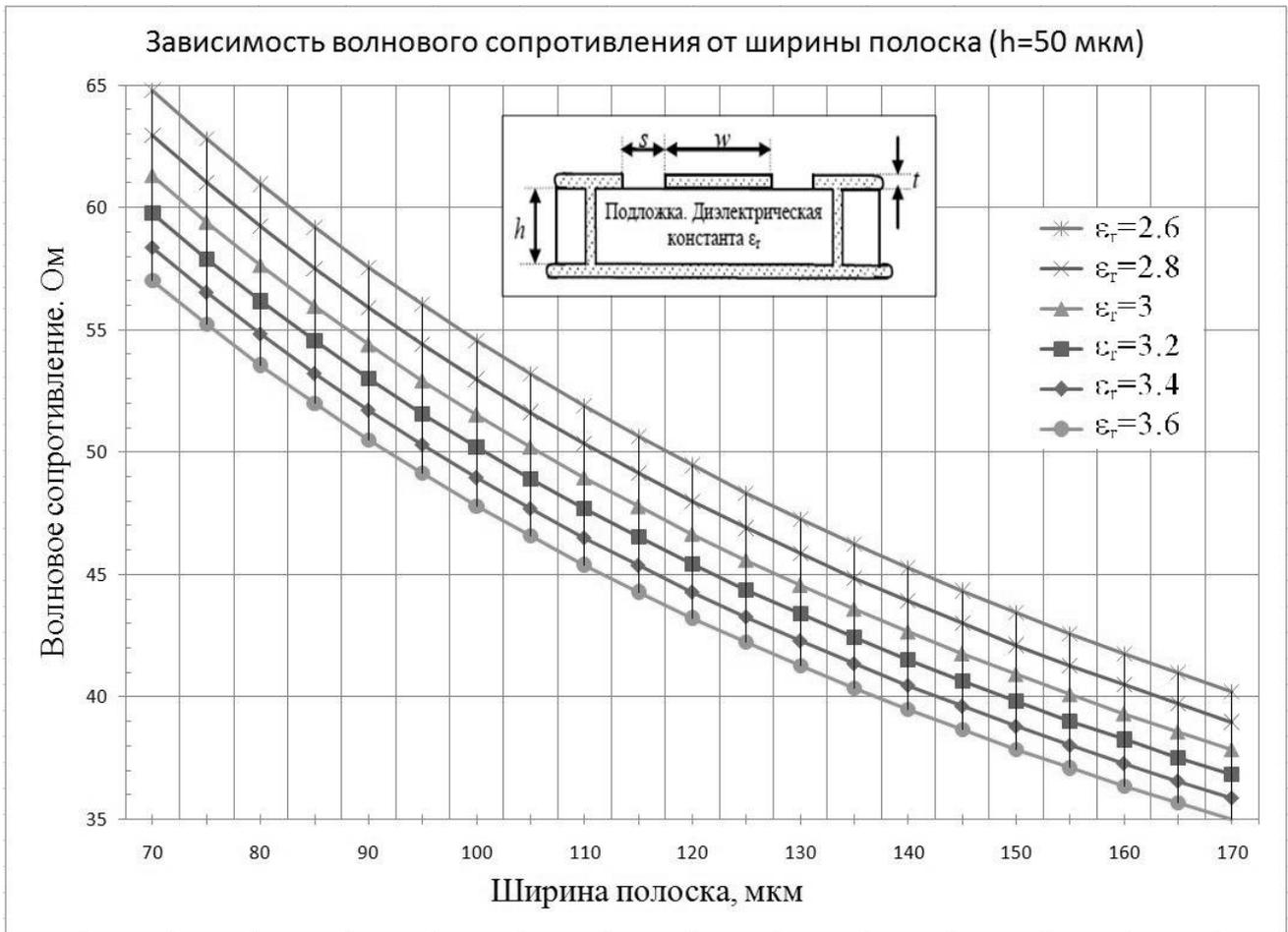


Рис. 3. Влияние геометрических размеров полоска на волновое сопротивление СВЧ копланарной конструкции



Рис. 4. Прохождение прямого и отраженного сигналов в СВЧ полиимидной копланарной конструкции (длина линии 3,6 см, ширина полоска 100 мкм)

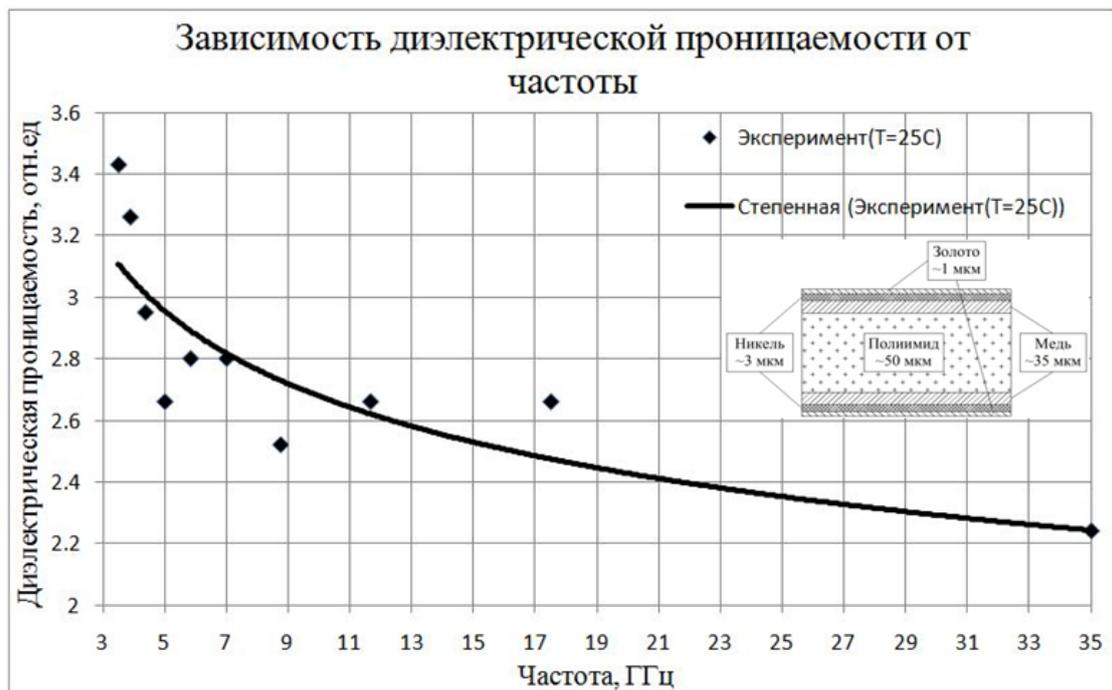
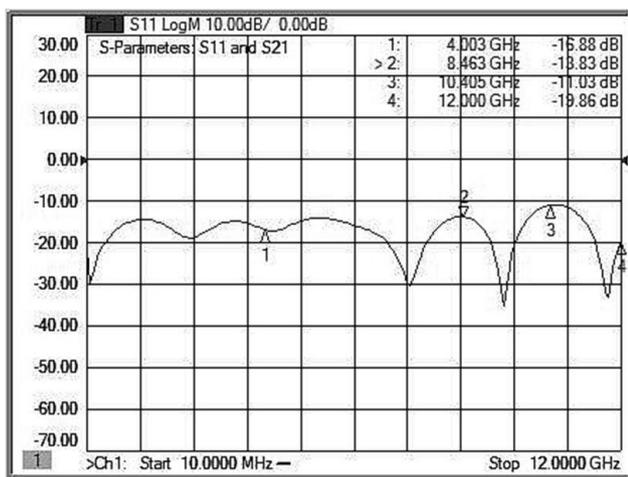
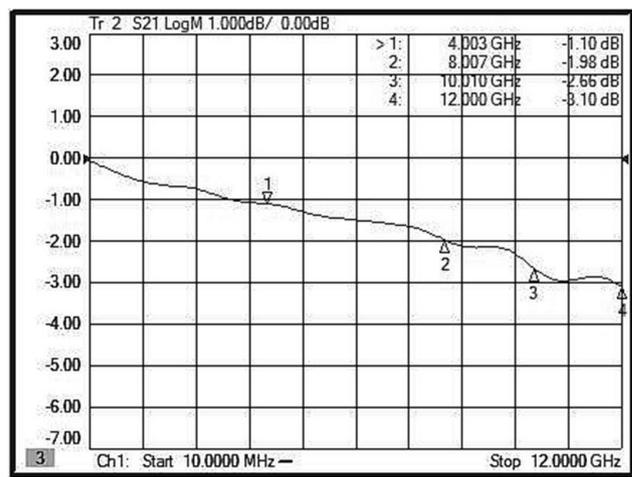


Рис. 5. Диэлектрическая проницаемость полиимида, как функция от частоты



а



б

Рис. 6. Зависимость S параметров полиимидного тракта: а - измерения входного согласования (S11), б - измерение потерь (S21)

Следует отметить значительное снижение диэлектрической проницаемости при увеличении частоты от 3,4 до 2,25. Низкочастотные экспериментальные измерения диэлектрической константы емкостным методом дают значения 3,6-3,7, что соответствует удельной емкости 0,43 пФ/мм² для полиимида толщиной 50 мкм. Результаты, приведенные на рисунках 4, 5, получены с помощью стробоскопического осциллографа Keysight DCA-X 86100D с блоком рефлектометра N1055A.

Проведено исследование S параметров квази-копланарной конструкции для определения согласования с 50 - омным трактом, а также для измерения полосы пропускания тракта по уровню 3 дБ.

Результаты измерения S-параметров, полученные с использованием анализатора цепей Keysight PNA Network Analyzer N5227A, показывают, что согласование по входу минус 11,3 дБ (рис. 6а), полоса пропускания составляет 10,7 ГГц (рис. 6б). Из этого следует, что экспериментальные результаты, полученные с помощью анализатора цепей, соответствуют рефлектометрическим измерениям.

III. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИИМИДНОГО ШЛЕЙФА

В основу полиимидного шлейфа взят фольгированный материал марки DuPont Pyralux LF 9121R с толщиной металлизации 18 мкм.

Металлическое покрытие полиимида будет увеличиваться в ходе выполнения технологических операций, что учитывалось при моделировании структуры.

Основные технологические процессы формирования полиимидного шлейфа:

- формирование отверстий в материале $\varnothing 300$ мкм;
- механическая и химическая очистка структуры;
- металлизация отверстий в 2 этапа (1 – химическая, 2 - гальваническая);
- формирование рисунка металлизации полиимидного шлейфа;
- гальваническое наращивание меди (~15 мкм);
- никелирование (~3-5 мкм);
- иммерсионное золочение (~1 мкм).

Технологический цикл обеспечивает следующие минимальные нормы:

- отверстие \ контактная площадка – 300\600 мкм;
- проводник \ зазор – 120\150 мкм;
- толщина металлизации – 40 мкм.

IV. ВЫВОДЫ

Разработаны гибкие волноводные тракты на полиимидной основе, обеспечивающие соединение как СВЧ кристаллов ИМС, так и печатных плат в 3D исполнении. Проведены теоретические и

экспериментальные исследования устройства, подтверждающие работоспособность конструкции в диапазоне до 12 ГГц. При этом прямые потери на прохождение, включая разъемы, в диапазоне до 12 ГГц не превышают 0,0833 дБ/мм. Входное согласование не хуже минус 11,3 дБ. Входные согласование и проходные потери существенно зависят от входных/выходных разъемов. Использование более высокочастотных разъемов позволит повысить полосу пропускания конструкции до 15 ГГц.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тюльпанов, А. Васильев Сборка интегральных схем по технологии 3D-интеграции // Наноиндустрия. 2013. №7 (45). С. 28-36.
- [2] IPC-2141 - Controlled Impedance Circuit Boards and High-Speed Logic Design, April 1996, IPC-2141 URL: <http://katus.ru/nuke/modules/Downloads/pub/147/0/IPC%202141%20Controlled%20Z%20PCB%20.pdf> (дата обращения 17.02.2016)
- [3] Wadell, Brian C. - Transmission Line Design Handbook / Artech House 1991.
- [4] Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Г.В. Глебович, А.В. Андрианов, Ю.В. Введенский и др.; Под ред. Г.В. Глебовича. М.: Радио и связь. 1984. 256 с.
- [5] A. Burkhardt, C. Gregg, J. Staniforth Calculation of PCB Track Impedance, URL: <http://www.polarinstruments.com/support/cits/IPC1999.pdf> (дата обращения 16.02.2016).

3D Flexible Microwave Polyimide T-line Assembly for System in Package

V. Timoshenkov, D. Rodionov, A. Khlybov, A. Musatkin, D. Vertianov

National Research University of Electronic Technology, valeri04@hotmail.com

Keywords — Three dimension (3D) assembly; integrated circuit; S – parameters; polyimide, flexible transmission line.

ABSTRACT

Major trends of microelectronics are associated with a reduction in weight and size parameters, increasing frequency response and decreasing power consumption. The three-dimensional (3D) technology integration is important in improving the manufacturing parameters of the electronic equipment. The key techniques of 3D integration are the usage of ultra-thin (20-35 micron) crystals stacked (stack) with Si interposer boards using through-silicon vias (TSV). This technique works well for relatively low frequency signals. In the case of microwave signals, there are limitations associated with the manufacturing of transmission lines (T-lines) on conductive silicon base (crystal chip, interposer). It is possible to resolve this issue successfully by using a flexible flat polyimide T-lines, including microwave paths, as well as the low-frequency signal lines, power bus and ground plate. Moreover, the use of polyimide with RF T-

lines may for compound both ICs and PCBs combining in 3D package.

50-ohm and 75-ohm microstrip or coplanar lines are used in the microwave technology may be formed on the polyimide film base. Microstrip advantage is in its simplicity of calculation and implementation. The disadvantage is an additional inductance in the ground plane. This "parasitic" inductance appears as a result of connecting the respective pads on the integrated circuit and a ground bus on the back side of the microstrip structure.

Coplanar structure has not these disadvantages, since ground and signal lines are arranged in one plane. It is expedient to design coplanar structures with coplanar upper and lower location of ground plane which are interconnected by sets of metallic through plate windows on the polyimide carrier. Contribution of lateral side ground to impedance is considerably smaller than the lower ones, since the dielectric thickness is usually much smaller than the distance from the central strip of the line to the ground side.

The simulation of the impedance of the microwave structure, depending on the width of the central strip and the dielectric constant of the material, was done. The magnitude of the standard 50-ohm impedance corresponds to the width of 90 to 117 microns of the strip. It plays the important role measuring the actual value of the permittivity of polyimide. Direct measurements of the capacity at microwave frequencies are almost impossible, so the determination of the dielectric constant in the specified frequency range was done by measuring the propagation speed of the strip line by Time-Domain Reflectometry (TDR) method.

Measurements show significant reduction of the dielectric constant from 3.4 to 2.25 with increasing frequency. Low-frequency experimental measurements of the dielectric constant capacitive method give values of 3.6-3.7, which corresponds to the specific capacitance of 0.43 pF/mm for 50 micron thick polyimide.

A research of S parameters of quasi-coplanar structure was done to determine the coherence with the 50-ohm impedance as well as to measure the frequency bandwidth. The results of S-parameter measurements show that the S_{11} = -11.3 dB, bandwidth is 10.7 GHz.

Three dimension (3D) assembly of microwave polyimide transmission line (T-line) for system in package was investigated. Flexible T-lines may be used for 3D RF connection of integrated circuits or RF PCBs.

Transmission lines were created using polyimide film with metallic lines deposited on it. Thickness of metal and polyimide film are 39 μ and 50 μ . Theoretical calculations and computer simulations of impedance for microstrip and coplanar lines were done. Wave impedance versus geometric dimensions and dielectric constant for transmission line were presented. Experimental research of flexible T-lines were done for the frequency range up to 12 GHz. The direct transmission losses, including RF connectors, do not exceed 0.0833 dB / mm.

REFERENCES

- [1] V.Tiulpanov A.Vasiliev Sborka integralnyh shem po tehnologii 3D integracii // Nonoindustry. 2013. N7 (45). P. 28-36.
- [2] IPC-2141 - Controlled Impedance Circuit Boards and High-Speed Logic Design, April 1996, IPC-2141 URL: <http://katus.ru/nuke/modules/Downloads/pub/147/0/IPC%202141%20Controlled%20Z%20PCB%20.pdf>
- [3] Wadell, Brian C. - Transmission Line Design Handbook / Artech House 1991.
- [4] Issledovanie obektov s pomochiu picosekundnih impulsov / G.V. Glebovitch, A.V. Andrianov U.V. Vvedenski Moscow Radio i sviaz. 1984. 256 P.
- [5] A. Burkhardt, C. Gregg, J. Staniforth Calculation of PCB Track Impedance, URL: <http://www.polarinstruments.com/support/cits/IPC1999.pdf>