

Схмотехническое моделирование интегрально-волноводных детекторов на субмикронных диодах Шоттки

А.В. Блудов, В.И. Тимофеев, канд. техн. наук

Проведен анализ параметров и характеристик детекторов коротковолнового диапазона на диодах Шоттки. Рассмотрены факторы, влияющие на основные характеристики детектора. Приведена схемная модель диода и детектора для расчета устройств.

The analysis of parameters and characteristics of short-wave range detectors on diodes Shottki is carried out. The factors that influence on the basic characteristics of the detector are considered. The circuit model of the diode and the detector for calculation of devices is resulted.

Введение

В технике сверхвысоких частот (СВЧ) широко применяются диодные детекторные устройства. Это, в частности, системы автоматической регулировки мощности, узлы панорамных измерительных устройств, импульсные приёмные устройства и др. В таких устройствах детекторы могут использоваться как датчики мощности СВЧ (измерители мощности) и как выделяющие низкочастотную огибающую высокочастотного сигнала (панорамные измерители, приёмники СВЧ и т.д.). Наиболее важными требованиями к этому классу приборов являются чувствительность, динамический диапазон квадратичности (линейная зависимость напряжения на детекторе от падающей на него мощности), равномерность амплитудно-частотной характеристики, коэффициент стоячей волны (КСВ) и временные характеристики.

Схемная модель детектора

Схемную модель диодного детектора СВЧ (рис. 1) можно представить в виде источника напряжения E_0 с последовательным внутренним сопротивлением диода R_d , соединенного с внешней нагрузочной цепью с входным сопротивлением R_n посредством микрополосковой линии передач (МПЛ) [1].

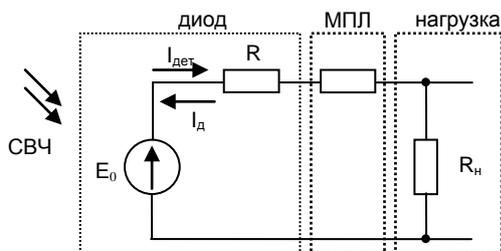


Рис. 1.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) диода с рабочей точкой для обеспечения

максимального динамического диапазона показана на рис.2. Внешнее смещение для детектора выбирается на границе квадратичного участка вольтамперной характеристики, где отклонение от квадратичности детектирования не превышает 3 дБ.

При подаче сигнала СВЧ на диод помимо тока смещения появляется дополнительная компонента тока через диод – ток детектирования $I_{дет}$, направленный противоположно по отношению к току смещения детектора I_d . Квадрат тока детектирования прямо пропорционален падающей на детектор мощности (что соответствует квадратичному участку ВАХ диода). Ток детектирования, протекая через сопротивление нагрузки, создает падение напряжения на нем [2].

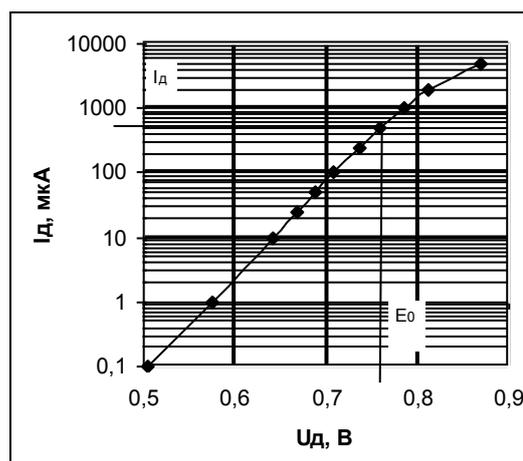


Рис. 2.

При гармоническом воздействии на входе детектора сигнал описывается функцией:

$$U = U(t) \cos \omega t.$$

Если ограничиться квадратичной характеристикой диода, то ток определяется зависимостью:

$$I_d = I_0 + S_1 U(t) \cos \omega t + S_2 U^2(t) \cos^2 \omega t,$$

где коэффициенты S_1, S_2 имеют размерность проводимости. Последнее слагаемое может быть записано:

$$S_2 U^2(t) \cos^2 \omega t = S_2 U^2(t) (0,5 + 0,5 \cos 2\omega t).$$

Составляющая тока $0,5 S_2 U^2(t)$ представляет собой результат амплитудного детектирования радиосигнала, которая выделяется

на нагрузке. Чувствительность детектора непосредственно связана с шумами диода. Их можно разделить на две компоненты: белый шум (не зависящий от частоты):

$$P_1 = t_\omega kTB,$$

и частотно зависимый фликкер-шум:

$$P_2 = \frac{f_n I}{f} kTB,$$

где t_ω, k , - константы, T - температура, f_n - «граничная частота», ниже которой фликкер-шум заметен, I - постоянный ток смещения диода, B - полоса пропускания измерительной системы. Чувствительность детектора определяется также выходным импедансом диода и токовой чувствительностью диода.

Проблема согласования импедансов сравнительно проста, поскольку при прямом смещении СВЧ-импеданс диода не высокий.

Чувствительность детектора по току определяется как отношение приращения выпрямленного тока при номинальной мощности СВЧ сигнала [3]:

$$\beta = \frac{\partial I}{\partial P}$$

Схемная модель диода Шоттки, включенного в линию передачи, приведена на рис. 4. Величина β может достигать значений больше 2400 В/Вт на нагрузке 600 Ом. Зависимость напряжения на сопротивлении нагрузки детектора R_H от мощности сигнала показана на рис.3.

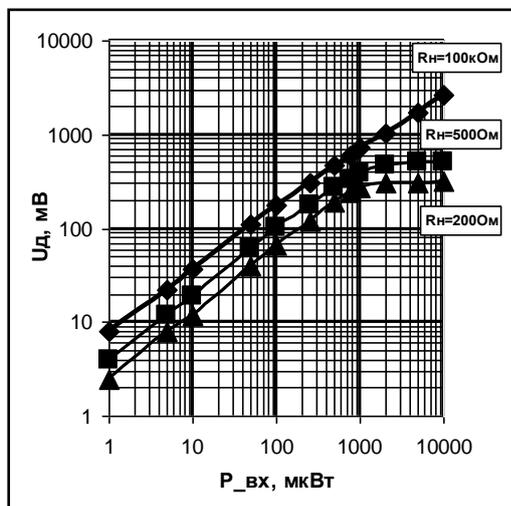


Рис. 3.

При детектировании тока динамический диапазон детектора тем больше, чем больше сопротивление нагрузки, однако, с ростом сопротивления нагрузки могут ухудшаться временные характеристики прибора. Как правило, после детектора включается усилитель. Высокое значение входного сопротивления усилителя может приводить к увеличению коэффициент шума цепи. Это, в свою очередь, снижает порог

чувствительности детектора. С другой стороны, чем меньше сопротивление нагрузки, тем лучше его временные характеристики, но ниже чувствительность, так как при меньшей входной мощности (рис. 3) наступает насыщение детектора (отклонение от квадратичности). Таким образом, условием, близким к оптимальному по всему спектру параметров является равенство сопротивлений нагрузки и внутреннего сопротивления детектора. Практически достижимым значением динамического диапазона рассматриваемых детекторов в широкополосных измерительных панорамах является значение 50 дБ.

Поскольку емкость диода достигает значений около 30 пФ, постоянная времени детектора в основном зависит от сопротивления нагрузки. При нагрузке 200 Ом без искажений и затяжек фронтов проходят сигналы с временами нарастания и спада 1 нс.

Полоса пропускания детектора определяется его цепями согласования по входу и выходу. По результатам измерений можно прийти к выводу о достижении заданной полосы пропускания во всем сечении волновода с неравномерностью менее 1 дБ. Однако, чем шире полоса пропускания, тем меньше чувствительность и выше КСВ. В узкой полосе частот можно получить КСВ менее 2 и чувствительность более 2500 В/Вт.

Схемная модель детекторного диода, включенного в линию передачи, показана на рис.4. Подобная модель диода [1] используется в пакете схемотехнического проектирования SPICE. При моделировании емкость корпуса диода C_c и последовательная индуктивность (индуктивность выводов) L_s считаются сосредоточенными элементами, зависящими от геометрических параметров диода и конструкции волновода, в который включается диод. Последовательное сопротивление диода R_s , емкость перехода C_j и сопротивление перехода R_j определяются свойствами полупроводниковой структуры диода.

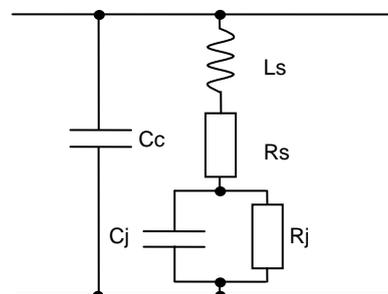


Рис. 4.

В расчете они также рассматриваются как сосредоточенные элементы со значениями, близкими к измеренным на низких частотах. Емкость корпуса и последовательная

индуктивность являются основными факторами, определяющими как параметры согласующей цепи, так и максимальную полосу пропускания устройства. Последовательное сопротивление и емкость перехода ограничивают чувствительность детектора. Потери мощности входного сигнала, приведенные к R_j будут равны:

$$L_{dB} = 10 \lg \left(1 + \frac{R_s}{R_j} + \omega^2 C_j^2 R_s R_j \right)$$

Как показывают оценки, при детектировании слабых сигналов можно принять допущение о том, что величины R_s , R_j и C_j приблизительно равны параметрам диода, измеренным на низких частотах в режиме малого сигнала и при рабочем напряжении смещения.

Электрическая схема детектора миллиметрового диапазона длин волн с рабочим диапазоном частот 38–57 ГГц показана на рис. 5.

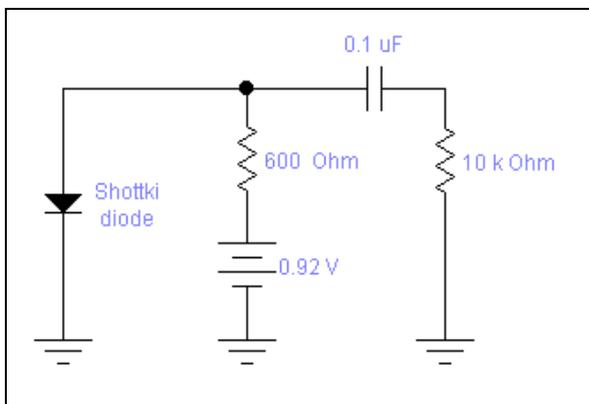


Рис. 5

Чувствительность детектора (В/Вт) при нагрузке 600 Ом в зависимости от частоты показана на рис. 6.

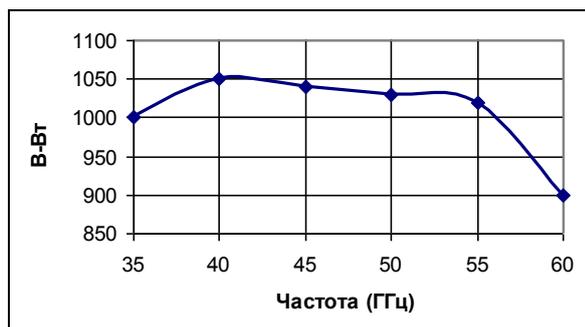


Рис. 6.

Неравномерность приведенной характеристики заметнее всего на высоких частотах, что может быть связано как с характеристиками диода Шоттки, так и с невозможностью выполнения условия относительно широкополосного согласования. Частотная зависимость коэффициента стоячей волны напряжения детектора приведена на рис. 7.

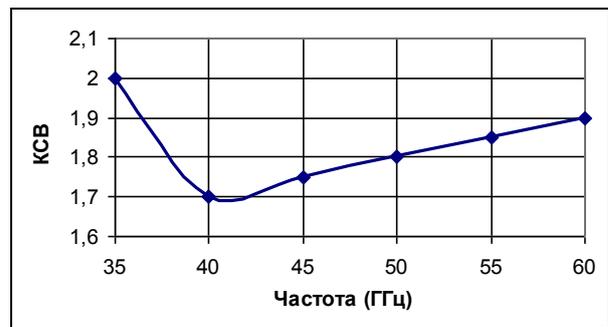


Рис. 7.

В анализируемой схеме КСВ характеризует условия согласования детектора со стороны источника сигнала с учетом согласования выходного сопротивления детектора с сопротивлением нагрузки. Приведенные зависимости чувствительности и КСВ с погрешностью до 20% (в зависимости от частотного диапазона) удовлетворяют результатам измерений.

Выводы

Приведены результаты моделирования и измерений характеристик диодного детектора. Проведен анализ факторов, определяющих чувствительность, широкополосность, КСВ, динамический диапазон и временные параметры диодного детектора. Результаты расчетов интегрально-волноводного детектора на рабочей длине 6 мм удовлетворительно согласуются с практическими результатами. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации параметров диодных детекторов.

Литература

1. **Yunghong Wu, B. Mervyn Armstrong, Harold S. Gamble, Zhirun Hu, Qiang Chen, Suidong Yang, Vincent F. Fusco, J. A. Carson Stewart**, "Microwave PtSi-Si Schottky-Barrier-Detector Diode Fabrication Using an Implanted Active Layer on High-Resistivity Silicon Substrate" // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. - vol. 46.- № 5. - 1998. - P. 641-646.
2. **K. M. Strohm, J.-F. Luy, C. Rheinfelder, F. J. Schmuckle, and W. Heinrich**, "Monolithic integrated coplanar 77 GHz SIMMWIC mixer," in Proc. 26th European Microwave Conf., Prague, Czech. Republic, Sept. -1996.- P. 293–296.
3. **H.A. Watson** Microwave semiconductor devices and their circuit applications. – New Jersey. Bell telephone laboratories, Incorporated Holmdel. 1969.