

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 6 — 1962

## ФИЗИКА

И. М. АНДРЕЕВА, И. В. ИВАНОВ

### ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ОБЪЕМНЫХ РЕЗОНАТОРОВ СВЧ

Исследована возможность применения полупроводниковых диодов для электрического управления частотой объемных резонаторов СВЧ. Показано, что при изменении напряжения смещения на диоде, включенном в цепь коаксиального резонатора, частота резонатора меняется от 0 до 20%. Добротность резонаторов подобного типа имеет порядок 100.

В последнее время полупроводниковые диоды находят широкое применение не только для детектирования и параметрического усиления. Предложено использовать диоды для создания переключателей, модуляторов [1, 2], аттенуаторов [3, 4] и фазовращателей [5] в диапазоне сверхвысоких частот. Цель настоящей работы — выяснить возможность применения полупроводниковых диодов, разработанных для параметрических усилителей, для перестройки частоты объемных резонаторов. В качестве основной системы был выбран коаксиальный резонатор 10-сантиметрового диапазона, в торцевой части которого в разрыве центрального проводника находился диод. При изменении отрицательного смещения на диоде меняется емкость  $p-n$  перехода, что приводит к изменению резонансной частоты полости. Резонатор и его эквивалентная схема изображены на рис. 1. На схеме  $C_0$  — емкость  $p-n$  перехода,  $R_s$  — сопротивление растекания,  $G$  — проводимость потерь  $p-n$  перехода и  $L$  — индуктивность ввода. Реактивное сопротивление коаксиального резонатора в сечении  $a-a$ , где расположен диод, представлено сопротивлением  $Z_r$ . На резонансной частоте сумма реактивных сопротивлений в любом сечении резонатора, в том числе в сечении  $a-a$ , должна быть равна нулю. Пренебрегая проводимостью потерь  $G$ , из этого требования получаем уравнение резонансных частот

$$|Z_r| = Z_0 \operatorname{tg} \frac{\omega}{c} l = \frac{1}{\omega C_0} - \omega L. \quad (1)$$

Здесь  $l$  — длина резонатора,  $c$  — скорость света,  $Z_0$  — волновое сопротивление резонатора на основной волне ТЕМ, а  $C_0$  и  $L$  — параметры диода. Задаваясь резонансной частотой и волновым сопротивлением резонатора, из (1) можно получить бесконечное число резонансных

длин полости, соответствующих основному и высшим типам колебаний ТЕМ. Подставляя затем крайние значения емкости диода, соответствующие границам допустимых изменений отрицательного смещения, и полагая  $L = 3 \cdot 10^{-9}$  гн, можно рассчитать диапазон электрической перестройки резонатора на разных типах колебаний. Расчет для одного из диодов (емкость которого при изменении напряжения смещения от  $-1$  до  $-6$  в меняется от 1,05 до 0,62 пф) дал для относительной перестройки частоты на основном, втором и третьем типах колебаний значения 20, 12,5 и 8% соответственно. Резонансная частота при среднем значении емкости диода  $C_0 = 0,73$  пф равна 3000 мгц. Эксперимен-

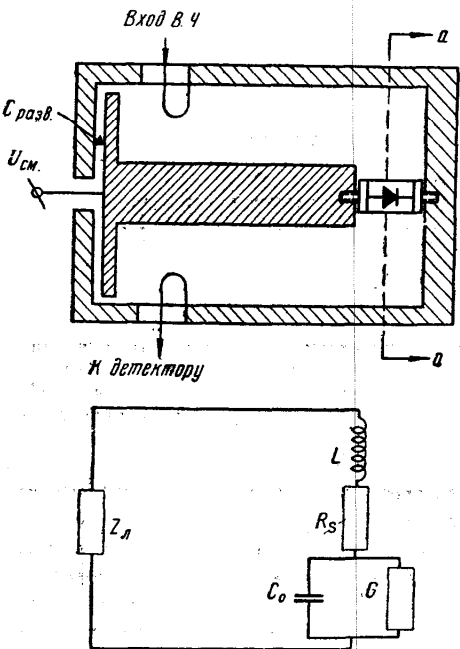


Рис. 1. Конструктивная и эквивалентная схемы резонатора

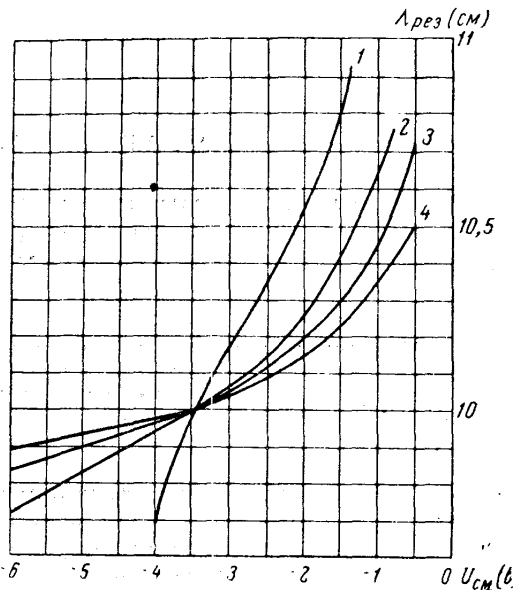


Рис. 2. Зависимость резонансной длины волны резонаторов, возбужденных на разных типах колебаний ТЕМ от напряжения смещения на диоде. Номера на кривых соответствуют типам колебаний

тальное определение интервала электрической перестройки резонаторов, работающих в данном диапазоне на различных типах колебаний, можно осуществить с помощью измерительной линии. Если поместить диод в разрыв центрального проводника непосредственно у короткозамкнутого нагрузочного конца измерительной линии, то в ней установится картина стоячих волн, которая будет аналогична распределению поля в коаксиальном резонаторе, изображенном на рис. 1. Если мысленно помещать поперечную перегородку в первый, второй и т. д. минимумы стоящей волны (считая от диода), то получится набор резонаторов, колеблющихся на основном, втором и т. д. типах колебаний. При изменении отрицательного смещения на диоде минимумы стоячих волн перемещаются относительно их начального положения. Изменяя частоту сигнала — генератора, можно последовательно вернуть на прежние места третий, второй и первый минимумы. Наибольшее изменение частоты генератора потребуется для возвращения на прежнее место первого минимума стоячей волны, ближайшего к диоду. Это изменение частоты непосредственно дает возможные диапазоны перестройки резонаторов, возбужденных на разных типах колебаний ТЕМ. Величины

относительной перестройки частоты, полученные на измерительной линии для различных типов колебаний резонаторов и для различных диодов, представлены в табл. 1. На рис. 2 изображены характерные зависимости резонансной частоты коаксиальных резонаторов с волновым сопротивлением, равным сопротивлению измерительной линии ИКЛ-10 (50 ом) от напряжения смещения на диоде. Средняя частота диапазонов перестройки  $f_0 = 3000$  мгу.

Таблица 1

Тип колебаний	Диод № 692			Диод № 842		Диод № 2449		Диод П-14	
	$\Delta f/f_0$ , %	$U$ , см (е)	$C_{\max} \div C_{\min}$ , пф	$\Delta f/f_0$ , %	$U$ , см (е)	$\Delta f/f_0$ , %	$U$ , см (е)	$\Delta f/f_0$ , %	$U$ , см (е)
Основной*	12	1,5÷4		9,2	2÷3,8	12	4÷5	9,9	0,5—6
Второй . . . . .	9,1	1÷6	1,05÷0,62	8,7	1÷5	9,3	1÷6	5,5	0,5—6
Третий . . . . .	6	1÷6	1,05÷0,62	5	1÷6	6	1÷6	4,5	0,5—6
Четвертый . . .	4,7	1÷6	1,05÷0,62	3,7	1÷6	4,4	1÷6	3	0,5—6

\* Пределы изменения частоты, измеренные на основном типе колебаний, соответствуют неполному интервалу изменений напряжения смещения, что связано с ограниченностью диапазона сигнал-генератора.

Как следует из табл. 1 и рис. 2, наибольший диапазон перестройки получается на первом, основном типе колебаний, последовательно уменьшаясь при переходе к высшим типам колебаний. Резонаторы, перестраиваемые с помощью полупроводниковых диодов, обладают относительно невысокой добротностью, что связано со значительными потерями энергии на сопротивлении  $R_S$  диода. Расчет дает следующие значения добротности  $Q_{1,2}$  для резонаторов с волновым сопротивлением 50 ом, имеющих длины 0,5 и 5,5 см и колеблющихся на основном и втором типе колебаний соответственно:  $Q_1=15$ ;  $Q_2=65$ . Резонансная частота 3000 мгу, параметры диода:  $C_0=0,73$  пф,  $R_S=7,7$  ом (диод № 692, табл. 1). Рост добротности с переходом к высшим типам колебаний связан с увеличением запаса колебательной энергии в распределенной части резонатора.

Поскольку добротность резонатора, работающего на основном типе колебаний, весьма мала, для экспериментального исследования были изготовлены резонаторы, рассчитанные на второй тип колебаний. Напряжение смещения, как это изображено на рис. 1, подавалось на изолированный вывод центрального проводника, замкнутого накоротко по высокой частоте через большую емкость  $C_{\text{разв}}$ . Характерные зависимости резонансной частоты от напряжения смещения, полученные для трех диодов, включенных в цепь одного из резонаторов ( $Z_0=50$  ом), изображены на рис. 3. Параметры резонаторов с различными геометрическими размерами, перестраиваемых с помощью тех же диодов, собраны в табл. 2.

Значения добротности, измеренные по ширине резонансной кривой, лежат в пределах от 30 до 100, что согласуется с результатами расчета. Большие значения добротности, как и следует ожидать, получаются для резонаторов с меньшим волновым сопротивлением; эти резонаторы обладают и большим диапазоном электрической перестройки частоты.

Длина резонатора, см	$Z_0$ , ом	Диод № 842		Диод № 3604		Диод № 8879	
		$U$ , см (в)	$\Delta f/f_0$ , %	$U$ , см (в)	$\Delta f/f_0$ , %	$U$ , см (в)	$\Delta f/f_0$ , %
6,5	122		10		8		10
	98	0 ÷ 6	12	0 ÷ 6	12	0 ÷ 9	13
	67		13		14		14
7,2	98	0 ÷ 6	11	0 ÷ 6	10	0 ÷ 9	11
	50	0 ÷ 9	21		17		18

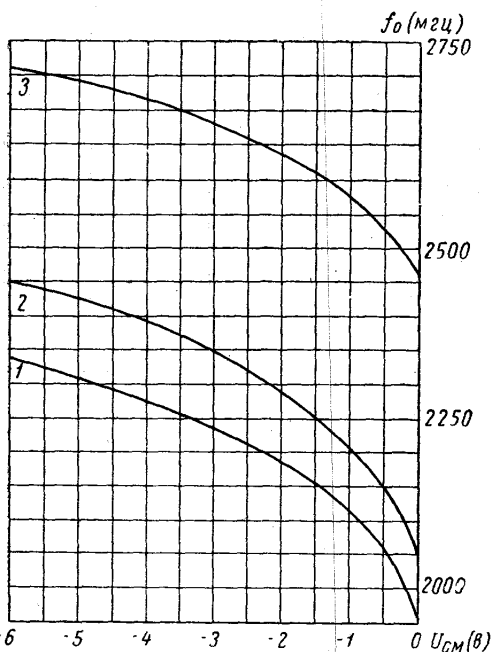


Рис. 3. Зависимость резонансной частоты от напряжения смещения: 1 — диод № 3604,  $C_{max}/C_{min} = 1,7$  пф/0,8 пф; 2 — диод № 842,  $C_{max}/C_{min} = 1,4$  пф/0,7 пф; 3 — диод № 8879,  $C_{max}/C_{min} = 0,6$  пф/0,4 пф. Длина резонатора  $l=70$  мм, волновое сопротивление  $Z_0=50$  ом

Измерения показали, что нелинейные эффекты, связанные с зависимостью емкости диода от мгновенного значения напряжения, которые должны проявляться при большом сигнале, не наблюдаются, если мощность, потребляемая в резонаторе, не превышает 0,1 мвт. Эти данные соответствуют небольшим напряжениям смещения (порядка—0,5 в), при которых крутизна изменения емкости  $\Delta C/\Delta U$  велика. При работе в области больших отрицательных смещений резонатор сохраняет линейность при входной мощности, на порядок более высокой.

В результате можно сделать некоторые выводы.

1. Полупроводниковые диоды, предназначенные для параметрических усилителей, можно использовать для электрической перестройки частоты объемных резонаторов СВЧ.

2. Диапазон перестройки коаксиальных резонаторов уменьшается при переходе к высшим типам колебаний ТЕМ, однако

добротность резонаторов при этом увеличивается.

3. Резонаторы, перестраиваемые с помощью полупроводниковых диодов, сохраняют линейность, если в полости потребляется мощность порядка 1 мвт.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Armistead M. A., Spencer E. G., Hatcher R. D. Proc. IRE, 44, No. 12, 1875, 1956.
2. Coale F. S. IRE, Trans., MTT-3, 59—61, 1955.
3. Uhler A. Proc. IRE, 46, No. 6, 1099, 1958.
4. Fleming P. L. Proc. IRE, 49, No. 11, 1690, 1961.
5. Hardin R. H., Downey E. L., Munuchian J. Proc. IRE, 48, No. 5, 944, 1960.

Поступила в редакцию  
23. 2 1962 г.

Кафедра  
теории колебаний