

## ПЕРЕСТРОЙКА ПОЛЫХ РЕЗОНАТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

*И. Т. Бызова*

Приведены результаты использования газового разряда для перестройки полых резонаторов. Перестройка может осуществляться двумя путями: изменением разрядного тока и наложением на разряд внешнего постоянного магнитного поля, близкого к резонансному. Первый путь дает меньшие относительные потери, чем второй. Максимальная перестройка при сравнительно малых относительных потерях была получена с разрядниками, электроды которых представляли собой две тонкие металлические нити, натянутые вдоль оси разрядной трубы на расстоянии нескольких *мм* друг от друга.

Электронная перестройка полых резонаторов в широком интервале частот представляет интерес для многих задач высокочастотной техники. Если ввести в резонатор ионизированный газ, то собственная частота резонатора будет зависеть от параметров плазмы; меняя параметры плазмы, можно перестраивать резонатор. Такая перестройка неизбежно сопровождается увеличением высокочастотных потерь, т. е. снижением добротности.

В работе сделана попытка найти оптимальные условия для получения максимальной перестройки с помощью газового разряда при минимальных высокочастотных потерях.

Для перестройки резонаторов можно использовать явление циклотронного резонанса электронов плазмы [1]. Проводимость газоразрядной плазмы при наложении на нее постоянного магнитного поля *H*, перпендикулярного к электрическому высокочастотному полю, выражается тензором [2]. В направлении высокочастотного электрического поля *E* проводимость имеет вид [1]:

$$\sigma_E = \sigma_r + i\sigma_i = N \frac{e^2}{m} \left[ \frac{\nu(v^2 + \omega^2 + \omega_H^2) + i\omega(v^2 + \omega^2 - \omega_H^2)}{(v^2 - \omega^2 + \omega_H^2)^2 + 4\omega^2\nu^2} \right]. \quad (1)$$

Здесь *N* — концентрация электронов *e*, *m* — заряд и масса электрона, *v* — частота столкновений электрона с молекулами и ионами газа,  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота внешнего высокочастотного поля,  $\omega_H = eH/mc$  — циклотронная частота, *c* — скорость света.

Перестройка резонатора с плазмой обусловлена, главным образом, наличием реактивной составляющей проводимости  $\sigma_i$ . Активная часть проводимости  $\sigma_r$  определяет высокочастотные потери в плазме и приводит к снижению добротности резонатора. Добиться перестройки резонатора, содержащего плазму, можно двумя путями. Первый путь — изменение концентрации электронов, что можно осуществить, например, меняя разрядный ток. Второй путь предполагает использование явления циклотронного резонанса электронов плазмы. Перестройка в этом случае осуществляется изменением внешнего постоянного магнитного поля.

И в том, и в другом случае изменение реактивной части проводимости сопровождается изменением активной ее части. Сравним от-

носительные высокочастотные потери этих методов. Для этого найдем из выражения (1) отношение  $\sigma_r / \sigma_i$ :

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_i} = \frac{\nu}{\omega} \frac{\nu^2 + \omega^2 + \omega_H^2}{\nu^2 + \omega^2 - \omega_H^2}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что при наличии магнитного поля  $H$  отношение  $\sigma_r / \sigma_i$ , всегда больше, чем в случае  $H = 0$ , т. е. применение магнитного поля должно привести к увеличению относительных потерь.

В некоторых практических применениях важно знать не только величину относительных потерь, но и скорость изменения потерь при увеличении реактивной составляющей проводимости, т. е. величину  $d\sigma_r / d\sigma_i$ .

Обозначим скорость изменения относительных потерь при перестройке током (при  $H = 0$ )  $(d\sigma_r / d\sigma_i)_N$ , а аналогичную величину для случая перестройки магнитным полем при неизменной концентрации  $N$  — через  $(d\sigma_r / d\sigma_i)_H$ . Сравнение величин  $(d\sigma_r / d\sigma_i)_N$  и  $(d\sigma_r / d\sigma_i)_H$  показывает, что

$$|(d\sigma_r / d\sigma_i)_N| < |(d\sigma_r / d\sigma_i)_H|. \quad (3)$$

Это неравенство получено при условии  $\nu / \omega \ll 1$ , которое выполняется для десятисантиметрового диапазона длин волн при давлениях газа несколько  $мм$  рт. ст. и при слабых высокочастотных полях [3]. Неравенство (3) выполняется для следующих значений постоянного магнитного поля:

$$0 < eH < mc(\omega - \nu); \quad mc(\omega - \nu) < eH < \infty \quad (4)$$

в промежутке

$$mc(\omega - \nu) < eH < mc(\omega + \nu), \quad (5)$$

т. е. в интервале значений магнитного поля между экстремумами функции  $\sigma_i(H)$ , потери очень велики [1]. Поэтому величины  $d\sigma_r / d\sigma_i$  и  $\sigma_r / \sigma_i$  в интервале (5) здесь не рассматриваются.

Таким образом, относительные потери и скорость увеличения потерь в случае перестройки резонатора магнитным полем больше, чем в случае перестройки разрядным током. Так как приведенные рассуждения не учитывают изменений температуры электронного газа и частоты соударений электронов с атомами, то полученные результаты могут оказаться весьма грубым приближением к действительности. Поэтому относительные высокочастотные потери двух методов перестройки сравнивались экспериментально

Схема измерительной установки дана на рис. 1. Разрядная трубка диаметром 27,2  $мм$  с плоскими электродами помещалась в середину резонатора с размерами  $34 \times 72 \times 436$   $мм$  перпендикулярно к его узким стенкам. В резонаторе возбуждались колебания типа  $H_{105}$ . Добротность резонатора с холодной разрядной трубкой  $Q_0$  была равна  $3500 \div 4000$ . Внешнее постоянное магнитное поле было направлено по оси разрядной трубки, перпендикулярно высокочастотному электрическому полю. Резонансная частота и добротность резонатора с разрядом и без разряда измерялась методом сравнения резонансных кривых [4]. При этом использовался волномер с добротностью  $10^4$  и ценой делений  $10^{-1} мгц$ . С помощью нониуса можно измерять относительные изменения частоты с точностью  $10^{-2} мгц$ .

Типичные кривые перестройки резонатора  $\Delta f$  и высокочастотных потерь в разряде  $(1/Q - 1/Q_0)$  (где  $Q_0$  — добротность резонатора с

холодным разрядником,  $Q$  — добротность резонатора с разрядом) приведены на рис. 2 и 3. Графики зависимости высокочастотных потерь в разряде от перестройки (рис. 4) подтвердили выводы теории. Перестройка разрядным током дает меньшие относительные потери, чем перестройка внешним магнитным полем.

Анализ формулы (1) показывает, что для увеличения диапазона

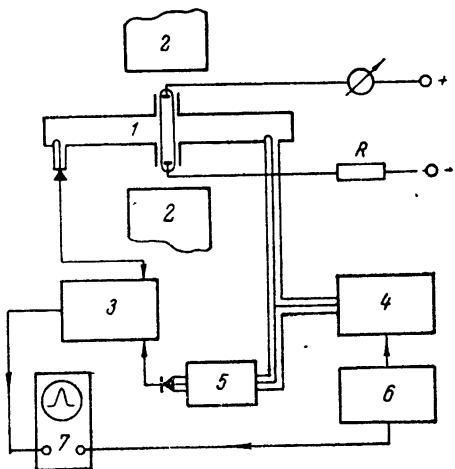


Рис. 1. Блок-схема установки:

1—измерительный резонатор с разрядной трубкой; 2—полюса электромагнита; 3—усилитель-смеситель; 4—клинстонный генератор; 5—вольномер; 6—генератор пилообразного напряжения; 7—осциллограф.

перестройки резонатора выгодно иметь разряд с возможно большей концентрацией электронов  $N$ , а для уменьшения высокочастотных потерь, вносимых разрядом, частота столкновений электронов с атомами

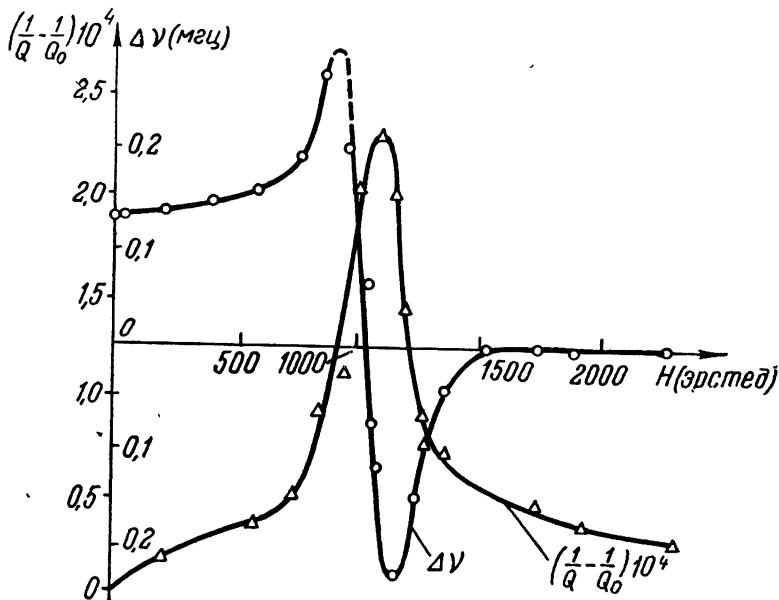


Рис. 2. Зависимость высокочастотных потерь в разряде  $(1/Q - 1/Q_0)$  и перестройки резонатора  $\Delta f$  от величины внешнего постоянного магнитного поля  $H$  ( $N_e = 0,95 \text{ мм рт. ст.}$ ).

должна быть возможно меньшей. Для выполнения этих условий был использован тлеющий разряд между электродами — двумя тонкими

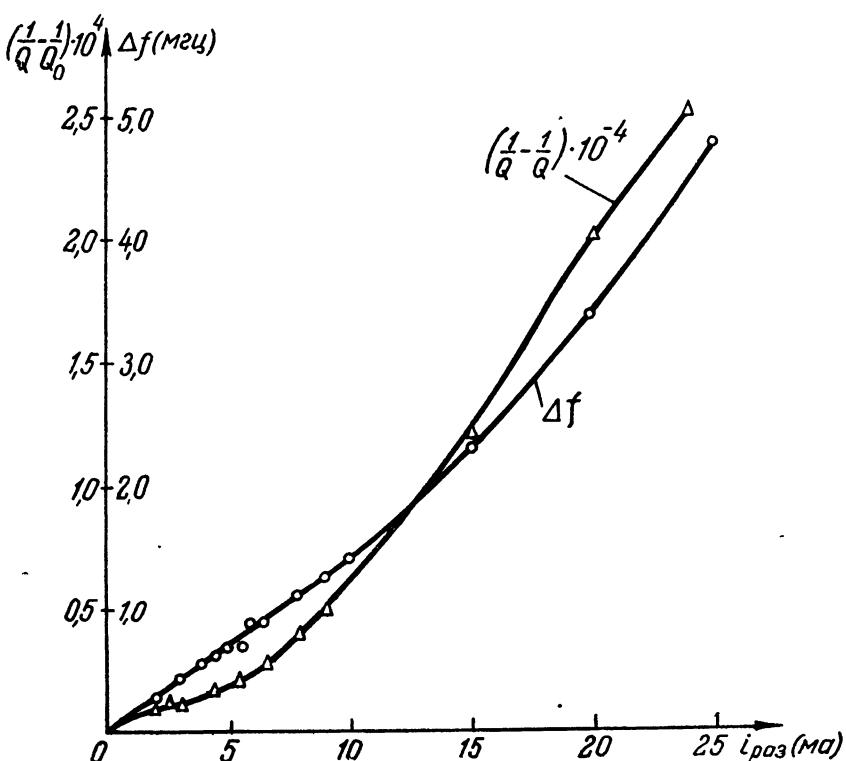


Рис. 3. Зависимость высокочастотных потерь в разряде и перестройки резонатора от разрядного тока  $i_{раз}$  (Ne 0,95 мм рт. ст.).

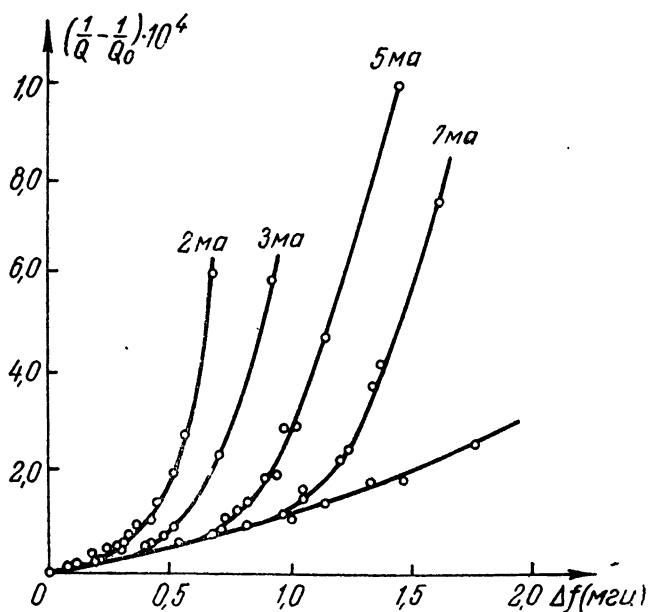


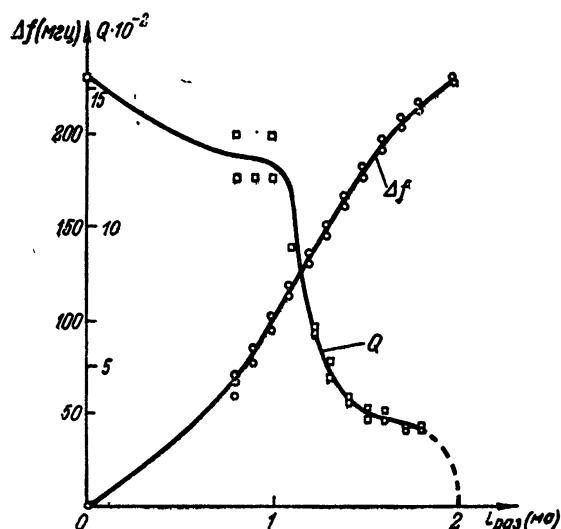
Рис. 4. Связь между высокочастотными потерями в разряде и изменением резонансной частоты резонатора при перестройке разрядным током  $i_{раз}$  (нижняя кривая) и магнитным полем при неизменном разрядном токе (боковые ветви) (Ne 0,85 мм рт. ст.).

параллельными металлическими нитями. Электроды располагались на расстоянии  $d=5 \div 7 \text{ мм}$  друг от друга вдоль оси трубы. Конфигурация постоянного электрического поля этой системы такова, что на расстоянии, превышающем  $d$ , напряженность электрического поля мала и, следовательно, на периферии разряда низка температура электронов. Низкая температура электронного газа приводит к уменьшению высокочастотных потерь в разряде и уменьшению диффузии электронов из разрядного промежутка. Диффузия частиц на электроды затрудняется также тем, что поверхность электродов относительно мала. Следует ожидать, что в разряде такой конфигурации концентрация электронов выше, чем в разряде между плоскими электродами.

Соображения относительно преимуществ разрядника с двумя параллельными электродами-нитями носят чисто качественный характер, так как расчет указанной системы очень сложен. С разрядниками такой конструкции была получена максимальная перестройка при минимальных потерях.

Измерения производились в диапазонах длин волн 10 см и 3 см. Схемы измерений аналогичны изображенной на рис. 1. В диапазоне 3 см использовался цилиндрический резонатор диаметром 24 мм с двумя электродами-нитями, натянутыми вдоль оси на расстоянии 3 мм друг от друга и изолированными от корпуса. Разряд осуществлялся между нитями; корпус резонатора присоединялся к одному из электродов. Резонатор возбуждался на волне  $H_{118}$ . Связь резонатора с клистроном и детекторной головкой осуществлялась посредством индуктивных щелей в торцах. Разрядные трубы такой конструкции наполнялись аргоном и неоном до давления от  $5 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$  до нескольких  $\text{мм рт. ст.}$  Максимальная перестройка частоты резонатора, заполненного разрядом, была порядка 200 мгц при изменении добротности от 300 до 1500 (рис. 5).

Рис. 5. Зависимость перестройки резонатора и его добротности от разрядного тока ( $N_e = 5,4 \text{ мм рт. ст.}$   
 $\Delta f = 0$  соответствует частоте  $f = 9275 \text{ мгц}$ ).



В диапазоне 10 см использовались сплющенные разрядные трубы с нитями, натянутыми вдоль оси. Трубы помещались в прямоугольный резонатор с размерами  $34 \times 72 \times 436 \text{ мм}$ . Резонатор возбуждался на волне  $H_{107}$ . Измерения производились с неоновым и гелиевым наполнением в интервале давлений от 0,4 до 6  $\text{мм рт. ст.}$  Результаты измерений приведены на рис. 6, 7. Для давлений 1,7  $\text{мм}$  и 2,1  $\text{мм}$

сравнивались относительные потери в гелии и неоне. Для этого были построены кривые зависимости потерь в разряде, т. е. величины  $1/Q - 1/Q_0$  от перестройки резонатора. Относительные потери в неоне оказались меньше, чем в гелии.

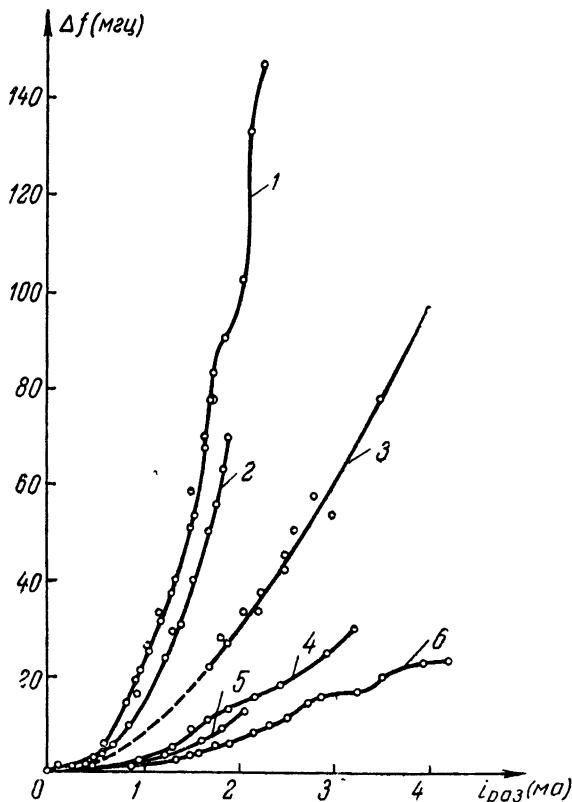


Рис. 6. Зависимость перестройки резонатора от разрядного тока в диапазоне 10 см (наполнение—Ne):

- 1) давление  $p = 1,5$  мм рт. ст.,  $Q_0 = 1200$ ,  $Q = 130$ ;
- 2)  $p = 2,1$  мм рт. ст.,  $Q_0 = 850$ ,  $Q = 490$ ;
- 3)  $p = 1,7$  мм рт. ст.,  $Q_0 = 560$ ,  $Q = 310$ ;
- 4)  $p = 0,7$  мм рт. ст.,  $Q_0 = 990$ ,  $Q = 130$ ;
- 5)  $p = 6,1$  мм рт. ст.,  $Q_0 = 1100$ ,  $Q = 820$ ;
- 6)  $p = 4,1$  мм рт. ст.,  $Q_0 = 660$ ,  $Q = 220$ .

Добротность  $Q$  указана при максимальном токе разряда.

Кратко результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. Максимальная перестройка резонаторов при минимальных потерях была получена с разрядниками, имеющими электроды в виде двух тонких нитей, натянутых на расстоянии нескольких мм друг от друга.

2. Максимальная перестройка при минимальных потерях в десятисантиметровом диапазоне была получена с разрядниками, наполненными неоном при давлениях от 1,5 мм до 2 мм рт. ст., в трехсантиметровом диапазоне—с разрядником, наполненным неоном до давлений 5,4 мм рт. ст.

3. Наложение на разряд внешнего постоянного магнитного поля увеличивает относительные потери высокочастотного поля.

В заключение считаю необходимым выразить благодарность Ю. В. Горохову за внимательное руководство работой.

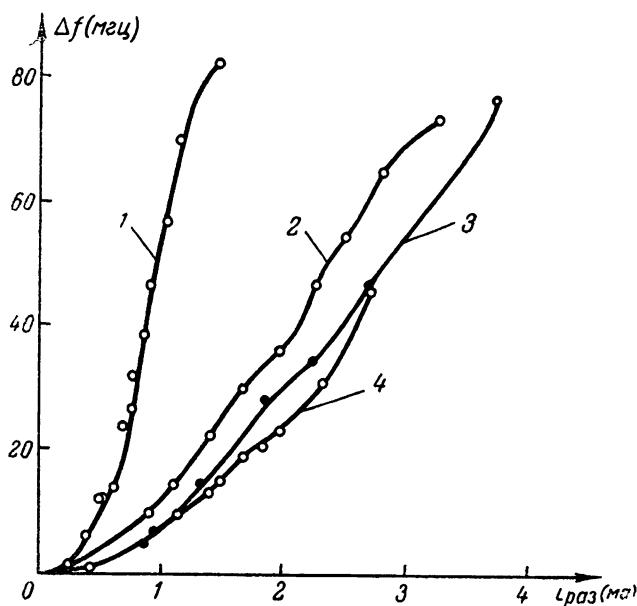


Рис. 7. Зависимость перестройки резонатора от разрядного тока в диапазоне 10 см (наполнение—He):

- 1)  $p = 3,7 \text{ мм рт. ст.}, Q_0 = 640, Q = 230;$
- 2)  $p = 2,1 \text{ мм рт. ст.}, Q_0 = 630, Q = 310;$
- 3)  $p = 1,7 \text{ мм рт. ст.}, Q_0 = 420, Q = 230;$
- 4)  $p = 5,8 \text{ мм рт. ст.}, Q_0 = 560, Q = 290.$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. В. Горохов, Радиотехника и электроника, 1, 794 (1956).
2. В. Л. Гинзбург, Теория распространения радиоволн в ионосфере, ГИТЛ, М., 1949.
3. Н. Маргенау, Phys. Rev., 69, 508 (1946).
4. Р. А. Валиков, В. Н. Сретенский, Радиоизмерения на сверхвысоких частотах, Воениздат, М., 1958.

Московский государственный университет

Поступила в редакцию  
8 января 1958 г.