

УДК 621.372.09

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ ВОЛНОВОД, ЗАПОЛНЕННЫЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ СТОЛБОМ С БЕГУЩИМИ СТРАТАМИ

A. A. Зайцев, Г. С. Леонов

Экспериментально исследуется распространение электромагнитных волн через волновод, заполненный слоистым положительным столбом. Влияние слоистой структуры столба определялось по изменению характеристики распространения волны при прямом возбуждении бегущих страт и при искусственном изменении параметров самовозбуждающихся страт. Показано, что наличие в разряде бегущих страт вызывает увеличение ослабления амплитуды проходящей волны в несколько раз и увеличение сдвига фазы на 20—30%. Величина ослабления зависит от длины страт. Бегущие страты являются также причиной существования отраженной волны, фаза которой периодически колеблется за счет движения страт. Изучается механизм колебаний амплитуды и фазы проходящей волны и рассматриваются условия, при которых указанные колебания отсутствуют.

1. Эксперименты [1, 2] по исследованию распространения электромагнитных волн через волноводы, заполненные плазмой положительного столба, показали, что если концентрация электронов мала по сравнению с критическим значением $n_{kp} = m \omega^2 / 4\pi e^2$ (ω — круговая частота поля, e и m — заряд и масса электрона), то измеряемые величины сдвига фазы ($\Delta\beta$) и ослабления волны ($\Delta\alpha$) удовлетворительно описываются формулами, полученными в первом приближении теории возмущений [1]:

$$\Delta\beta = \frac{\lambda_b}{2\lambda} \zeta A_F \sigma_{1i} \bar{n} L; \quad (1)$$

$$\Delta\alpha = \frac{\delta_{1r}}{\delta_{1i}} \Delta\beta. \quad (2)$$

Здесь \bar{n} — средняя по сечению столба концентрация электронов; σ_{1i} и σ_{1r} — реактивная и активная составляющие высокочастотной проводимости плазмы, отнесенные к одному электрону; L — длина заполненного участка волновода; λ_b и λ — длина волны в волноводе и в свободном пространстве соответственно; $\zeta = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ — волновое сопротивление свободного пространства; A_F — коэффициент формы, определяющийся распределением концентрации электронов и СВЧ поля по сечению волновода.

Однако, начиная с $\bar{n} = (0,1 \div 0,2) n_{kp}$, наблюдалась сильные расхождения измеряемых и вычисляемых величин $\Delta\beta$ и $\Delta\alpha$, намного превышающие поправки второго приближения. Эти расхождения были особенно заметны для разрядов Ne и Ar при давлениях 10^{-1} —1 мм рт. ст. В разряде He при тех же давлениях значительные расхождения начинались с больших значений \bar{n} .

Предположим, что различная степень расхождения измеренных и вычисленных величин $\Delta\beta$ и $\Delta\alpha$ для разных газов может быть связана

со структурой положительного столба (с наличием или отсутствием в разряде бегущих страт). Действительно, эксперименты показали, что при определенных условиях разряда в Не, в смеси Не с Не и в смеси Не с парами ртути, когда страты в столбе отсутствуют, наблюдается лучшее согласие измеренных величин $\Delta\varphi$ и $\Delta\alpha$ с вычисленными по формулам (1) и (2). Расхождения, заметно превышающие поправки второго приближения, начинаются в этом случае лишь при $\bar{n} \approx 0,5 n_{kp}$.

Целью настоящей работы является дальнейшее исследование влияния бегущих страт на характеристики распространения волн.

2. Опыты проводились в диапазоне волн ~ 10 см. Тонкостенная стеклянная трубка с внутренним диаметром 30 мм помещалась в прямоугольный волновод сечением 34×72 мм. Электроды выводились при помощи стеклянных трубок через запредельные металлические отростки [2]. Длина заполненного участка волновода равнялась 63 см. Измерялись средние величины ослабления и сдвига фазы проходящей волны, а также колебания сдвига фазы и амплитуды проходящей и отраженной волн. Схема измерений описана в [1, 2].

Влияние структуры столба на характеристики распространения волны определялось путем наблюдения за изменениями величин $\Delta\varphi$ и $\Delta\alpha$ при искусственном возбуждении бегущих страт и при изменении параметров самовозбуждающихся страт.

Для того, чтобы страты можно было возбудить искусственно [3, 4], подбирались такие условия разряда, при которых столб находился бы на границе спонтанного перехода в слоистое состояние, но оставался при этом однородным. В этом случае наложение на разряд периодического возмущения с определенной частотой вызывает появление слабых страт, которые усиливаются по всей длине столба. Периодическое возмущение осуществлялось включением в цепь разряда через трансформатор звукового генератора синусоидального напряжения [5]. С изменением частоты генератора менялась частота и соответственно длина страт. Последняя возрастала с увеличением частоты.

Искусственное возбуждение бегущих страт производилось в разряде смеси Не с Не при токах i от 100 до 600 мА и парциальных давлениях компонент от 0,1 до 0,2 мм рт. ст. В чистом Не в том же диапазоне давлений газа и тока разряда существуют самовозбуждающиеся страты, резкость которых одинакова по всей длине положительного столба. В этом случае длину страт можно было менять методом захвата частоты страт частотой внешнего генератора [4]. При этом в области захвата длина страт могла изменяться в 1,5—2 раза, а их резкость (интенсивность) оставалась практически постоянной.

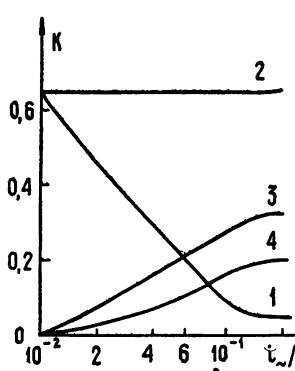


Рис. 1.

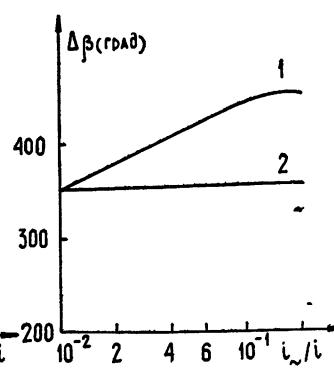


Рис. 2.

3. На рис. 1 и 2 приводятся результаты, полученные при искусственном возбуждении страт в разряде смеси Ne + He при парциальных давлениях компонент соответственно 0,11 и 0,14 мм рт. ст. и токе 350 мА. На рис. 1 по оси ординат отложены средние величины коэффициента прохождения (кривые 1, 2) и коэффициента отражения (кривые 3, 4) СВЧ мощности, на рис. 2—средняя величина сдвига фазы волны. По оси абсцисс на обеих рисунках отложена амплитуда колебаний тока, возбуждаемых внешним генератором.

Кривые 1 на этих рисунках соответствуют возбуждению колебаний тока на частоте 30,5 кГц, которая является резонансной для страт. Кривые 2 получены при частоте колебаний тока 2 кГц. Эта вторая частота была выбрана вдали от резонансной частоты, так что страты здесь не возбуждались. Колебания тока на частоте 2 кГц приводили лишь к синфазным (с одинаковой фазой по всей длине столба) колебаниям параметров плазмы. Как видно из рис. 1 и 2, такие колебания не приводят к сколь-нибудь заметному изменению средних величин ослабления и сдвига фазы проходящей волны. Возбуждение же страт (кривые 1) вызывает ослабление проходящей СВЧ мощности в 8—10 раз и увеличение сдвига фазы на 20—30%.

Величины ослабления и сдвига фазы возрастают с увеличением отношения амплитуды колебаний тока i к средней величине разрядного тока \bar{i} . Это возрастание связано с тем, что по мере увеличения амплитуды колебаний тока искусственно возбуждаемые страты становятся более резкими [5].

В отсутствие страт заполненный участок волновода был согласован с остальной частью волноводного тракта (коэффициент стоячей волны не превышал 1,2). Возбуждение страт приводило к нарушению согласования. Вследствие того, что при движении страт граница слоистого заполнения волновода колеблется на величину, равную длине страты l , фаза отраженной волны периодически меняется на величину $2\pi(2l/\lambda_b)$, где λ_b —длина волны в волноводе. В условиях опыта $\lambda_b \approx 14$ см, так что размах колебаний фазы составляет 360° при длине страты $l = 7$ см и 720° при длине страты $l = 14$ см. Последнее означает, что если коэффициент стоячей волны определяется при помощи измерительной линии и при этом в качестве индикатора используется прибор постоянного тока, то наличие отраженной волны может остаться незамеченным.

В описываемых экспериментах мощность отраженной волны измерялась при помощи циркулятора. Измерения производились при двух направлениях распространения падающей волны: от анода к катоду (рис. 1, кривая 3) и от катода к аноду (кривая 4). Как видно из рис. 1, величина отраженной СВЧ мощности меньше в случае распространения волны от катода к аноду. Эта разница объясняется тем, что в условиях искусственного возбуждения область резких страт занимает только часть положительного столба со стороны анода [5]. При распространении волны от катода к аноду СВЧ мощность, отраженная от области резких страт, частично поглощается на примыкающем к катоду участке однородного столба.

4. Исследование зависимости прохождения волны от длины страт l при практически постоянной их интенсивности показало, что наихудшее прохождение имеет место, когда длина страт равна длине волны в заполненном волноводе λ_b или ее половине, а наилучшее прохождение, когда величина l расположена посередине между λ_b и $\lambda_b/2$. В общем случае условие наихудшего прохождения можно записать в виде

$$l = m \frac{\lambda_b}{2} \quad (m=1, 2, \dots). \quad (3)$$

На рис. 3 для иллюстрации приведены осциллограммы проходящего сигнала для разряда в неоне при давлении газа 0,15 мм рт. ст. и токе разряда 0,3 а. При изменении тока в пределах от 0,25 до 0,35 а длина волн в волноводе изменялась от 14 до 15 см. Осциллограмма б) соответствует случаю самовозбуждающихся страт, имеющих частоту 28 кгц и длину 14,5 см. Отношение i_{\sim}/i составляет около 2%. Осциллограмма в) получена для случая, когда в цепи разряда возбуждаются колебания тока с частотой 22,7 кгц, при этом отношение i_{\sim}/i равно 10%. Длина страт здесь равна 10 см. Для осциллограммы г) в разряде возбуждены колебания той же амплитуды, но частота равна частоте самовозбуждающихся страт. Для осциллограммы а) разрядный ток отсутствует.

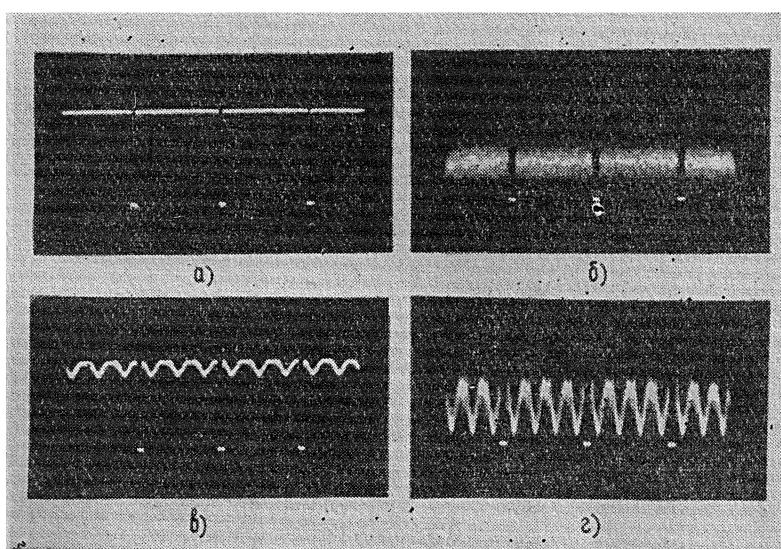


Рис. 3.

Сравнивая осциллограммы рис. 3, можно видеть, что возбуждение колебаний тока с частотой, равной частоте самовозбуждающихся страт, вызывает увеличение колебаний проходящей СВЧ мощности, однако средняя величина при этом практически не меняется. Возбуждение же колебаний тока другой частоты, вызывающее изменение длины страт, приводит к резкому изменению среднего уровня проходящей мощности.

На рис. 4 дана зависимость ослабления проходящей СВЧ мощности от разрядного тока. Кривая 1 получена для самовозбуждающихся страт длиной 14,5 см, кривая 2—для страт с навязанной им длиной 10 см. Как видно из рисунка, значение концентрации электронов (в использованных условиях оно пропорционально току разряда), при котором происходит «отсечка» волны, для полосы «непропускания» примерно в 1,5 раза меньше, чем для полосы «пропускания».

Условие (3) совпадает с условием резо-

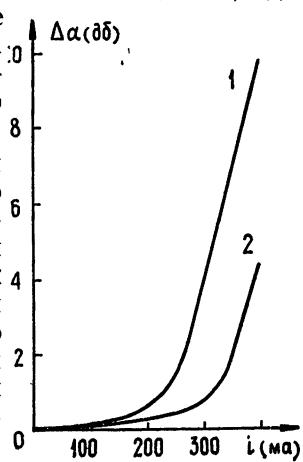


Рис. 4.

нанса, полученным в работе [6]. Однако для вычисления величины ослабления применяемое в [6] приближение слабой модуляции недостаточно.

5. В ряде работ [7, 8] указывалось, что амплитуда и фаза волны, прошедшей через газоразрядную плазму, оказывается промодулированной. Авторы [7] предполагают, что наблюдаемая модуляция может быть связана с наличием в разряде бегущих страт. Однако такой вывод не является однозначным, поскольку наряду со стратами в разряде существуют и другие колебания, причем некоторые из них (анодные колебания, колебания головы столба) могут возникать и исчезать вместе со стратами и иметь совпадающие частоты. Как страты, так и колебания других типов обычно сопровождаются колебаниями разрядного тока, которые, в свою очередь, должны вызывать модуляцию проходящей СВЧ волны.

Ниже рассматривается модуляция, связанная непосредственно с движением страт. Отсутствие анодных колебаний и колебаний головы столба обеспечивалось выбором геометрии анода [9], давления газа и тока разряда. Колебания тока были уменьшены до 0,1% увеличением балластного сопротивления и включением индуктивности в цепь питания разряда [5].

Движение страт может вызывать колебания ослабления волны как из-за изменения числа электронов на длине заполненного участка волновода, так и за счет изменения условий отражения на границах. Если затухание в плазме мало, то колебания амплитуды проходящей СВЧ волны будут определяться условиями на границах. Условия отражения на одной из границ меняются со сдвигом фазы по отношению к другой границе на величину $\phi = 2\pi L/l$. Когда на длине заполненного участка волновода укладывается целое число страт ($\phi = 2\pi m$), условия отражения на границах меняются синфазно, и колебания амплитуды проходящей волны должны быть максимальными. Если же условия на границах меняются противофазно ($\phi = 2\pi(m + 1/2)$), то колебания амплитуды должны быть минимальными.

Колебания сдвига фазы проходящей волны определяются только колебаниями числа электронов на длине L и поэтому минимальны, когда $\phi = 2\pi m$.

Длину самовозбуждающихся страт можно менять изменением разрядного тока. На рис. 5 приводятся осциллограммы колебаний проходя-

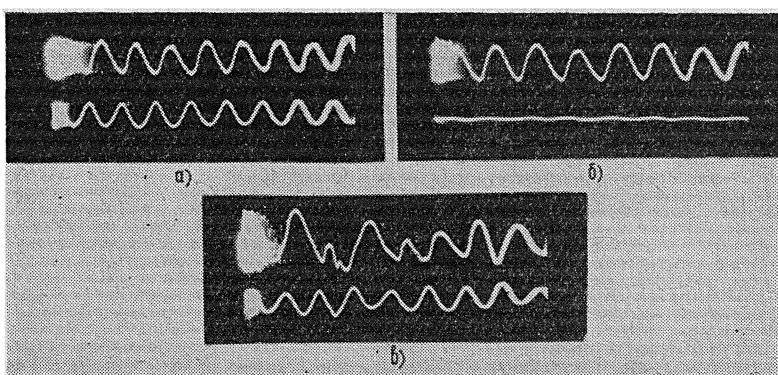


Рис. 5.

щей СВЧ мощности (нижний луч) и колебания светового излучения в струатах (верхний луч) для разряда в неоне при давлении

0,25 мм рт. ст. и токах 102 (а), 114 (б) и 121 (в) ма. Как видно из рисунка, при токе 114 ма колебания проходящей СВЧ мощности почти полностью отсутствуют, тогда как при токах 102 и 121 ма они составляют 10—15% от ее средней величины. Отсутствие колебаний амплитуды проходящей волны при токе 114 ма связано с тем, что в этом случае на длине заполненного участка волновода укладывается нечетное число полудлин страт.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Е. Голант, А. П. Жилинский, ЖТФ, 30, № 1, 15 (1960).
2. В. Е. Голант, А. П. Жилинский, М. В. Кривошеев, Г. П. Некруткина, ЖТФ, 31, № 1, 55 (1960).
3. А. А. Зайцев, ДАН СССР, 79, № 5, 779 (1951).
4. А. А. Зайцев, ДАН СССР, 84, № 1, 41 (1952).
5. А. А. Зайцев, Г. С. Леонов, Радиотехника и электроника, 10, № 5, 913 (1965).
6. Г. М. Филиппов, Радиотехника и электроника, 9, № 3, 547 (1964).
7. Бойд, Филд, Гоулд, сб. Колебания сверхвысоких частот в плазме, ИЛ, М., 1961.
8. G. S. Kino, M. A. Allen, Proc. 5-th Internat. Conf. on Ionization Phenomena in Gases, Munich, 1961; 1, Amsterdam, 1962, p. 602.
9. А. А. Зайцев, М. Я. Васильева, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 5, № 3, 523 (1962).

Московский государственный университет

Поступила в редакцию
10 июля 1968 г

PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES THROUGH A WAVEGUIDE FILLED WITH A POSITIVE COLUMN WITH TRAVELING STRATS

A. A. Zaitsev, G. S. Leonov

The propagation of electromagnetic waves through a waveguide filled with a stratified positive column is experimentally studied. The influence of the stratified structure of the column is defined from the measurement of the characteristics of a wave propagating at a direct excitation of traveling strats and artificial change of the parameters of self-exciting strats. It is shown that in a discharge of traveling strats there occurs an increase of the amplitude damping of a passing wave in several times and that of the phase shift by 20—30%. The value of damping is dependent on the strat length. The traveling strats are the reason of the existence of the reflected wave, which phase oscillates periodically due to the strat motion. The mechanism of amplitude and phase oscillations of the traveling wave are studied. The conditions are considered when these oscillations are absent.