

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛЮКТУАЦИЙ В МАГНЕТРОНЕ. I. АМПЛИТУДНЫЕ ФЛЮКТУАЦИИ

В. А. Бербасов, М. И. Кузнецов, В. Е. Нечаев

Приведены результаты экспериментального исследования спектра флюктуаций анодного тока магнетрона в закритическом режиме. Спектр флюктуаций анодного тока имеет ряд отчетливых максимумов, обусловленных собственными колебаниями пространственного заряда магнетрона, некогерентно возбуждаемыми флюктуационными токами. Кроме максимумов на частотах, близких к описываемым соотношением Хартри (колебания типа вращающейся волны), в спектре вблизи циклотронной частоты есть максимум, обусловленный колебаниями аксиально-симметричного типа

Экспериментальные исследования флюктуаций анодного тока многорезонаторного* магнетрона, проведенные Глассом, Симсом и Стейн-сби [1], показали, что в спектре анодного тока имеются ярко выраженные максимумы. При изменении анодного напряжения частоты, соответствующие максимумам интенсивности флюктуаций, смещаются в соответствии с соотношением Хартри. Авторы полагали, что эти максимумы связаны с азимутальными флюктуациями, которые проявляются в анодном токе из-за наличия аксиальных тепловых скоростей электронов, неоднородностей или слабого перекося магнитного поля. В [1] ничего не говорится о том, наблюдались ли в спектре максимумы, обусловленные аксиально-симметричными флюктуациями. Авторы [1] предполагают, что наблюдаемые ими максимумы обусловлены или селективным усилением шума внутри облака пространственного заряда, или его автоколебаниями.

Нами были проведены эксперименты [2], которые показали, что спектр флюктуаций тока, текущего по поверхности анода в азимутальном направлении, имеет максимумы вблизи частот, соответствующих пороговому соотношению Хартри, и что некогерентные колебания пространственного заряда магнетрона являются его собственными колебаниями типа вращающейся волны, возбуждаемыми флюктуационными токами.

Возможность собственных колебаний пространственного заряда установлена в теоретических работах [3] и подтверждена в экспериментальной работе Блевета и Рамо измерением диэлектрической проницаемости пространственного заряда. Согласно теории, развитой Бриллюеном, пространственный заряд магнетрона имеет собственные колебания аксиально-симметричного типа. Частота этих колебаний равна $\omega = \omega_H / \sqrt{2}$, если $r_a/r_k \gg 1$. Если же $r_a/r_k \approx 1$, то $\omega \approx \omega_H$. (Здесь ω_H — гирочастота, r_k — радиус катода, r_a — радиус анода.) Эти результаты получены в предположении, что пространственный заряд магнетрона находится в так называемом состоянии Бриллюена. Однако в работе [4] показано, что это состояние в реальном магнетроне невозможно и что наиболее вероятным состоянием является состояние с двумя потоками. Теория собственных колебаний пространственного

* Эксперименты производились в закритических режимах на частотах ниже рабочей частоты магнетрона, когда наличие резонаторов не существенно.

заряда магнетрона, находящегося в этом состоянии, до сих пор еще не разработана. Однако можно предполагать, что собственная частота должна быть близка к $\omega_0 = 2\pi/T$, где T — время пролета электрона по одной петле траектории. Согласно работам [5, 6], $\omega_0 \approx \omega_H/1,8$, если $r_a/r_k \gg 1$, и $\omega \approx \omega_H$, если r_a/r_k порядка единицы.

Очевидно, что спектральная плотность интенсивности флюктуаций анодного тока магнетрона должна быть максимальной на частотах собственных колебаний симметричного типа. Поэтому экспериментальное исследование флюктуаций, с одной стороны, дает возможность найти собственные частоты колебаний симметричного типа, а с другой стороны, оно необходимо для полного понимания флюктуационных процессов, происходящих в магнетроне.

Нами были изучены спектры флюктуаций анодного тока пяти специально сконструированных магнетронов с различными отношениями диаметров катода к диаметру анода.

Чтобы обеспечить возможность наиболее простого измерения спектра в широком диапазоне частот, был выбран диапазон метровых волн. Применялся специально сконструированный анализатор спектра, позволяющий непосредственно на экране осциллографа наблюдать спектр интенсивности флюктуаций в частотном диапазоне $20 \div 180$ мГц. (Устройство анализатора аналогично описанному в [7].)

Во всех лампах этой серии внутренний диаметр анода составлял 35 мм. Катоды всех ламп, за исключением одной лампы, в которой катодом служила вольфрамовая нить диаметром 0,18 мм, имели одинаковую конструкцию и отличались только размерами. Они состояли из никелевых цилиндров, покрытых двойным карбонатом, внутри которых помещались подогреватели. Диаметры катодных цилиндров соответственно составляли 4, 11 и 17 мм. Центровка катода производилась с точностью $0,5 \div 1$ мм. Для выяснения влияния точности установки катода лампа с диаметром катода 17 мм была выполнена еще в одном варианте. В этом случае катод центрировался с точностью $0,1 \div 0,2$ мм относительно анода с помощью керамических шайб.

После тщательной тренировки лампы снимались с вакуумного поста при давлении не хуже $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.

Для предотвращения автоколебаний резонансного типа в цепях питания анод и катод экспериментальных ламп замыкались при помощи специального экрана, образующего вместе с электродами лампы короткозамкнутый отрезок коаксиальной линии. Собственная частота такого „резонатора“ была много выше верхнего предела исследуемого диапазона частот, а импеданс нагрузки $Z(\omega)$ не превышал нескольких десятков ом. Эскизы двух экспериментальных ламп в специальных экранах представлены на рис. 1, 2.

Интенсивность флюктуаций напряжения на входе измерительного устройства связана со спектральной плотностью интенсивности флюктуаций анодного тока магнетрона соотношением $u_f^2 = Z^2(\omega) K^2(\omega) i_f^2$, где $K(\omega)$ — коэффициент передачи напряжения от лампы на вход измерительного устройства. Величины $Z(\omega)$, $K(\omega)$ рассчитывались для каждой лампы, исходя из геометрии „резонаторов“.

Эксперименты показали, что спектр весьма неравномерен по частоте. Наблюдаются отчетливо выраженные максимумы спектральной плотности интенсивности флюктуаций. С помощью анализатора спектра можно было наглядно проследить смещение максимумов интенсивности флюктуаций по частоте при изменении режима магнетрона. Эти наблюдения показали, что спектры интенсивности флюктуаций анодного тока в магнетронах с различными отношениями радиуса анода к радиусу катода подчиняются одинаковым закономерностям.

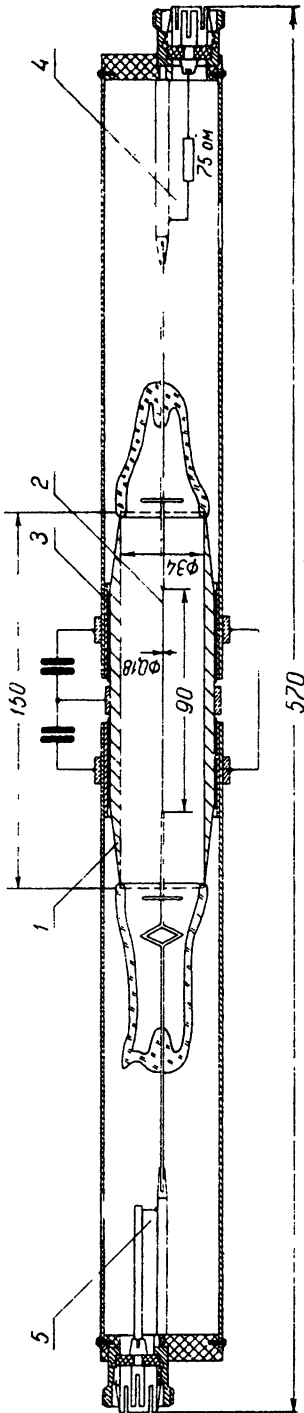


Рис. 1. Экспериментальная лампа с вольфрамовым катодом диаметром 0,18 мм:
1—анод, 2—катод, 3—нить поджига, 4—петли связи с анализатором спектра.

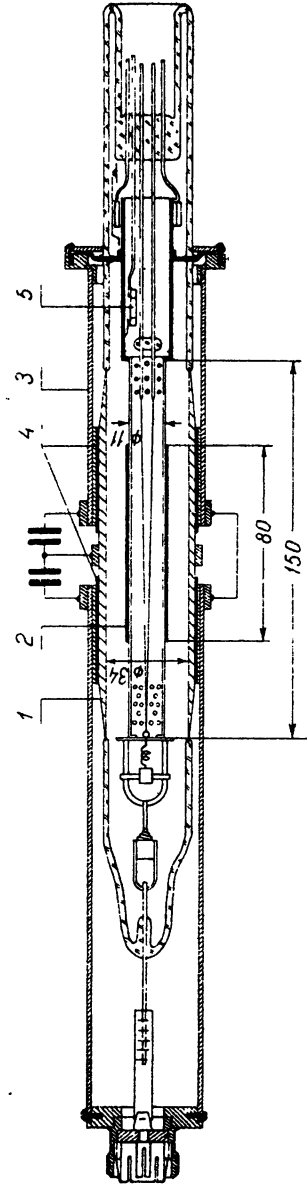
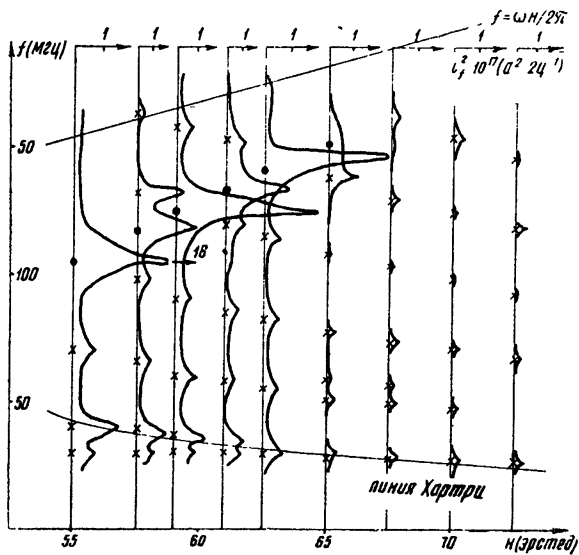


Рис. 2. Экспериментальная лампа с оксидным катодом диаметром 11 мм:
1—анод, 2—катод, 3—нить поджига, 4—изоляционные прокладки, 5—подогревный getter.

Во всех случаях наблюдался довольно широкий ($10 \div 15 \text{ мГц}$) максимум на частоте, меньшей циклотронной. При напряженности магнитного поля, близкой к критической ($H/H_{\text{кр}} = 1,1 \div 1,2$), максимум интенсивности флюктуаций наблюдается на частоте, на $20 \div 30\%$ меньшей, чем циклотронная. С ростом напряженности магнитного поля частота его приближается к циклотронной. Другие участки повышенной спектральной плотности интенсивности флюктуаций занимают более узкие полосы частот ($5 \div 10 \text{ мГц}$). С ростом напряженности магнитного поля эти полосы смещаются в сторону низких частот-и, очевидно, (как в экспериментах Гласса и др.) соответствуют некогерентным колебаниям типа вращающейся волны. Результаты, полученные при исследовании флюктуаций анодного тока лампы с катодом диаметром 11 мм , представлены на рис. 3.

Рис. 3. Графики зависимости спектральной плотности интенсивности флюктуаций анодного тока от частоты для различных напряженности магнитного поля ($U_a = 100 \text{ в}$):

.. — максимумы, обусловленные симметричными флюктуациями; $\times \times$ — максимумы, обусловленные азимутальными флюктуациями.



При определенных значениях напряженности магнитного поля некоторые из этих максимумов совпадают с максимумом вблизи циклотронной частоты. В этом случае наблюдается резкое возрастание спектральной плотности интенсивности флюктуаций.

Максимум спектральной плотности интенсивности флюктуаций, частота которого увеличивается с ростом напряженности магнитного поля, не может быть объяснен некогерентными колебаниями типа вращающейся волны, так как в спектре азимутального тока такого максимума не наблюдалось [2]. Естественно предположить, что этот максимум является результатом собственных колебаний симметричного типа, возбуждаемых флюктуационными токами.

Для проверки этого предположения был проведен эксперимент по возбуждению собственных колебаний пространственного заряда подаваемыми извне гармоническими колебаниями. Лампы с катодами диаметром $0,18 \text{ мм}$ и 4 мм помещались в „резонаторы“, в которых с обоих концов имелись петли связи. На одну петлю подавалось напряжение с генератора, а другая петля подключалась на вход анализирующего устройства. Чтобы устранить эффекты, связанные с неэквипотенциальностью катода и влиянием магнитного поля тока накала в лампе с вольфрамовым катодом, анодное напряжение и ток накала подавались импульсами. Частота повторения импульсов 50 Гц . Импуль-

сы анодного напряжения имели строго прямоугольную форму и подавались в периоды отсутствия тока накала. Та же схема питания применялась и в случае лампы с катодом диаметром 4 мм. Частотная развертка анализатора спектра (тоже 50 гц) была синхронизирована с импульсами питания, так что при обратном ходе луча анодное напряжение на магнетроне отсутствовало, и на экране анализирующего устройства был виден только выброс, соответствующий сигналу, прошедшему „холодную“ лампу. При прямом ходе луча, кроме сигнала, прошедшего через „горячую“ лампу, наблюдался и шумовой спектр магнетрона. При приближении внешнего сигнала к максимуму, находящемуся вблизи циклотронной частоты, наблюдалось резкое изменение амплитуды сигнала, прошедшего через „горячую“ лампу. При частоте генератора, несколько меньшей частоты максимума флюктуаций, наблюдалось уменьшение сигнала (см. рис. 4а), прошедшего через „горячую“ лампу, а при равных частотах — увеличение (см. рис. 4б).

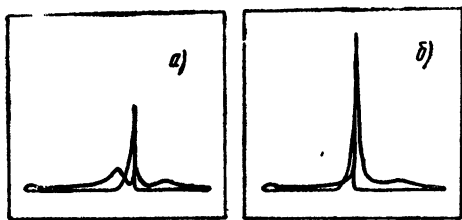


Рис. 4. Осциллограммы спектров, показывающие реакцию облака на возбуждение гармоническим сигналом (прямой ход луча от обратного можно отличить по направлению спада выброса, обусловленного внешним сигналом; $\tau=0,5$ мсек).

Для получения количественных значений спектральной плотности интенсивности флюктуаций анодного тока магнетрона фотографировались осциллограммы спектров, рассчитывались $Z(\omega)$ и $K(\omega)$ для каждой лампы и производилась калибровка анализирующего устройства. При некоторых измерениях одновременно с наблюдением спектра на экране анализирующего устройства использовался специальный приемник. Оказалось, что спектральная плотность интенсивности симметричных флюктуаций анодного тока для всех ламп, вообще говоря, спадает с ростом напряженности магнитного поля, кроме случая совпадения собственных частот колебаний симметричного и несимметричного типа. Так, для лампы с 17-миллиметровым катодом, в которой не применялось центрирующих шайб, при анодном напряжении $u_a=110$ в i_f^2 было равно $18 \cdot 10^{-16} \text{ а}^2 \cdot \text{гц}^{-1}$ ($H=56$ эрстед), $7 \cdot 10^{-16} \text{ а}^2 \cdot \text{гц}^{-1}$ ($H=63$ эрстед), $2 \cdot 10^{-16} \text{ а}^2 \cdot \text{гц}^{-1}$ ($H=69$ эрстед). Интенсивность флюктуаций значительно изменялась от лампы к лампе, примерно, на порядок при одинаковых отношениях $H/H_{кр}$. При этом для лампы, в которой для центровки электродов принимались специальные меры, спектральная плотность интенсивности флюктуаций оказалась значительно меньше (качественное же поведение спектра осталось прежним). Для этой лампы при $u_a=110$ в i_f^2 равно $0,3 \cdot 10^{-16} \text{ а}^2 \cdot \text{гц}^{-1}$ ($H=55$ эрстед), $0,15 \cdot 10^{-16} \text{ а}^2 \cdot \text{гц}^{-1}$ ($H=62,5$ эрстед), $0,03 \cdot 10^{-16} \text{ а}^2 \cdot \text{гц}^{-1}$ ($H=67,5$ эрстед).

Указанное обстоятельство, а также тот факт, что спектральная плотность интенсивности симметричных флюктуаций значительно увеличивается при совпадении собственной частоты симметричных колебаний с собственной частотой одного из колебаний типа вращающейся волны, могут быть истолкованы следующим образом. Из-за неизбежных отклонений конструкции лампы от аксиально-симметричной, перекосов,

неоднородностей магнитного поля, а также вследствие неидеальной линейности резонансной системы, которой является пространственный заряд магнетрона, между собственными колебаниями различных типов и номеров всегда имеется относительно слабая связь. При приближении частоты собственного колебания симметричного типа к собственной частоте одного из колебаний типа вращающейся волны, между этими двумя колебаниями различного типа резко увеличивается связанность и происходит перераспределение энергии. При этом интенсивность симметричных колебаний возрастает, так как они обычно имеют значительно меньшую мощность, чем колебания типа вращающейся волны.

Описанные выше явления особенно отчетливо выражены в лампе, электроды которой отцентрированы значительно тщательнее, чем в остальных лампах. В этой лампе колебания типа вращающейся волны, очевидно, должны быть значительно слабее связаны с симметричными, чем в предыдущих лампах. Если собственные частоты симметричных и несимметричных колебаний электронного облака не совпадают, то связанность между ними практически равна нулю; поэтому ее увеличение при совпадении собственных частот заметно особенно хорошо. В остальных лампах этой серии из-за плохой центровки катода между симметричными и несимметричными колебаниями всегда имеется значительная связь. Поэтому увеличение коэффициента связанности при совпадении собственных частот двух различных колебаний не приводит к особенно резкому увеличению спектральной плотности интенсивности флюктуаций анодного тока.

Приведенные соображения подтверждаются также следующими экспериментами.

Проводилось измерение зависимости максимального значения спектральной плотности интенсивности флюктуаций анодного тока от угла перекоса магнитного поля относительно оси лампы. Было обнаружено, что максимумы интенсивности некогерентных колебаний не смещаются по частоте с изменением перекоса, в то время как интенсивность квадратично возрастает с увеличением угла перекоса.

Было также проверено влияние неоднородности магнитного поля на интенсивность флюктуаций. Для этого лампы сдвигались к краю соленоида. При этом наблюдалось увеличение интенсивности флюктуаций анодного тока. Очевидно, что перекоз лампы в магнитном поле, а также нарушение его однородности, увеличивает связь азимутальных и радиальных колебаний. Это приводит к увеличению мощности некогерентных колебаний симметричного типа за счет колебаний несимметричных типов.

Необходимо отметить, что одна из экспериментальных ламп имела катод, выполненный из чистого вольфрама, в то время как катоды остальных ламп были оксидные. Тем не менее, спектр ее анодного тока подчиняется общим закономерностям. Это находится в противоречии с выдвинутым в [8] предположением о том, что аномально высокую интенсивность флюктуаций в магнетроне можно объяснить наличием паров бария в прикаатодной области магнетрона.

Чтобы проверить, отличается ли характер флюктуационных процессов в магнетронах с катодами из чистого металла от того, который имеет место в магнетронах с оксидными катодами, мы изготовили две лампы с одинаковой геометрией электродов (диаметры анодов 35 мм, катодов 10 мм, длина рабочей части катода 100 мм). Катод первой из этих ламп был оксидным синтерированным, а катод второй был изготовлен из чистого тантала. Измерения показали, что обе лампы действительно имеют аналогичные спектры интенсивности флюктуаций

анодного тока. Эти спектры существенно не изменяются в широкой области токов накала и давлений остаточного газа (лампы работали при непрерывной откачке). Таким образом, было установлено, что материал катода не играет существенной роли во флюктуационных процессах в магнетроне.

Чтобы выяснить, сохраняются ли указанные закономерности спектра интенсивности флюктуаций анодного тока в более широком диапазоне частот и режимов работы, было предпринято экспериментальное исследование спектра флюктуаций анодного тока магнетрона, который отличался по своей конструкции от описанных выше меньшими размерами электродов. Диаметр анодного цилиндра этого магнетрона составлял 17 мм. Синтерированный оксидный катод имел диаметр 8 мм. Для подавления паразитных колебаний в цепях питания эта лампа, как и предыдущие магнетроны, помещалась в закорачивающий „резонатор“. Для измерения спектральной плотности интенсивности флюктуаций анодного тока использовались измерительные приемники диапазона 150 ÷ 400 мГц и диапазона выше 400 мГц.

Как и в предыдущих случаях, наблюдался максимум спектральной плотности интенсивности флюктуаций на частоте, которая с увеличением напряженности магнитного поля приближается к циклотронной. При этом интенсивность в максимуме падает; так, например, при анодном напряжении, равном 500 в, значения i_f^2 принимают значения, указанные в таблице 1 ($u_a = 500$ в; $f_{\text{макс}}$ — частота максимума спектральной плотности интенсивности флюктуаций).

Таблица 1

$i_f^2 (a^2 \cdot \text{гц}^{-1})$	$0,9 \cdot 10^{-16}$	$1,8 \cdot 10^{-16}$	$1,0 \cdot 10^{-16}$	$0,08 \cdot 10^{-16}$
H (эрстед)	300	330	360	390
$f_{\text{макс}}$ (мГц)	690	830	880	1000

Спектральная плотность интенсивности флюктуаций анодного тока возрастает с ростом анодного напряжения. Например, при $H = 360$ эрстед максимальная величина спектральной плотности интенсивности симметричных флюктуаций i_f^2 равна $0,04 \cdot 10^{-16} a^2 \cdot \text{гц}^{-1}$ при $u_a = 300$ в, $1 \cdot 10^{-16} a^2 \cdot \text{гц}^{-1}$ при $u_a = 500$ в и $6,5 \cdot 10^{-16} a^2 \cdot \text{гц}^{-1}$ при $u_a = 700$ в.

Как уже было отмечено, спектральная плотность интенсивности флюктуаций анодного тока сильно зависит от целого ряда неконтролируемых факторов: перекоса магнитного поля, который определяется величиной тока соленоида и ориентировкой лампы относительно магнитного поля земли, неоднородности магнитного поля, связанной с точностью установки лампы в соленоиде, изменений геометрии катода режима работы лампы и т. д. Поэтому данные о величине спектральной плотности интенсивности флюктуаций анодного тока следует рассматривать лишь как оценочные.

Таким образом, спектры флюктуаций анодного тока магнетрона в лампах с самой различной геометрией и в существенно различных режимах работы (анодное напряжение менялось от 50 до 700 в, а напряженность магнитного поля — от 40 до 490 эрстед) подчиняются одним и тем же закономерностям. Во всех случаях наблюдался отчетливый максимум спектральной плотности интенсивности флюктуаций анодного тока магнетрона вблизи циклотронной частоты. Этот максимум обу-

словлен собственными колебаниями пространственного заряда типа $n=0$, некогерентно возбуждаемыми флюктуационными токами. Эксперимент показал, что возможно возбуждение гармонических вынужденных колебаний вблизи собственной частоты, которые носят резонансный характер.

Для магнетронов с различной геометрией — от практически идеально цилиндрической ($r_a/r_k = 17,5/0,09$) до квазиплоской ($r_a/r_k = 17,5/8,5$) — собственные частоты симметричных колебаний почти совпадают в режимах с одинаковым отношением $H/H_{кр}$. Этот факт находится в противоречии с результатами, полученными из теоретического рассмотрения [3, 5, 6], согласно которому частота собственных симметричных колебаний в лампе с большим отношением радиусов электродов должна быть меньше, чем в квазиплоском случае. Такое несоответствие еще раз подтверждает, что состояние, рассмотренное в работах [3, 5, 6] в реальном магнетроне не имеет места.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 R C Glass, G. D. Sims, A G. Stainsby, Proc IEE, **В 102**, 81 (1955).
- 2 В А Бербасов, М. И. Кузнецов, В. Е. Нечаев, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика (в печати).
- 3 Теория магнетрона, Сборник статей А. Бриллюена, Д. Блевета и С. Рамо под редакцией В. С. Лукошкова, изд. Сов. радио, М, 1946.
- 4 R. Q. Twiss, J Electronics, **1**, 1 (1955).
- 5 С. Я. Брауде, ЖТФ, **10**, 217 (1940).
- 6 С. Я. Брауде, ЖТФ, **15**, 107 (1945).
- 7 В А Бербасов, А П Седов, Изв высш уч. зав.—Радиофизика (в печати).
- 8 Магнетроны сантиметрового диапазона, пер. с англ, 1, изд. Сов радио, М, 1950.

Научно-исследовательский радиофизический институт
при Горьковском университете

Поступила в редакцию
5 августа 1959 г.