

04

Особенности микроволнового излучения при раскачке „веерной“ неустойчивости в омически нагретой плазме и взаимодействии ускоренных электронов с магнитными пробками токамака ФТ-2

© В.В. Рождественский, С.В. Крикунов, С.И. Лашкул, Л.А. Есипов, А.Б. Алтухов, Д.В. Куприенко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: V.V.Rozhdestvensky@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 18 июня 2013 г.

Представлены результаты наблюдения аномально интенсивного микроволнового излучения (МИ) в диапазоне электронных плазменных частот 10–20 GHz, возникающего непрерывно в течение омического нагрева умеренно плотной плазмы токамака ФТ-2. Его появление связано как с развитием в плазме „веерной“ неустойчивости, так и с наличием значительных локальных пробок тороидального магнитного поля. Обнаружено, что МИ сопровождается короткими „гигантскими“, а также менее интенсивными вспышками в диапазоне магнитного уширения 1-й гармоники электронной циклотронной частоты 57–75 GHz. Как известно, последние возникают при „мазерном“ усилении синхротронного излучения ускоренных электронов, взаимодействующих с гармониками локальных магнитных пробок в режиме циклотронного авторезонанса. В наших условиях, благодаря нелинейной трансформации плазменных волн, возбуждаемых при раскачке „веерной“ неустойчивости, в электромагнитные, появляется коллективное излучение (КИ). Поэтому аномально высокий уровень МИ обусловлен, по-видимому, „мазерным“ усилением КИ, а „гигантские“ вспышки возникают при подходящих условиях в процессе самовозбуждения мазера-усилителя.

На ряде токамаков [1–4] обнаружены интенсивные короткие вспышки микроволнового излучения (МИ), возникающие при взаимодействии свободно ускоренных электронов (УЭ) с гармониками локальных магнитных пробок на периферии плазмы в режиме циклотронного авторезонанса [2–7]. В таких условиях возможно „мазерное“ усиление

синхротронного излучения (СИ) в полосе частот, соответствующей ширине циклотронного авторезонанса. Интенсивность вспышек определяется плотностью и энергией ускоренных электронов, глубиной локальных магнитных пробок. Длительность вспышек зависит от времени существования резонансных условий в плазме.

Впервые вспышки МИ такой природы были обнаружены на начальной стадии омического нагрева (ОН) плазмы в токамаке ASDEX-U в диапазоне частот 100–120 GHz при относительно малой глубине магнитных пробок, $\Delta B_t/B_t \sim 0.1\%$, число тороидальных катушек $N_t = 16$, в условиях, неблагоприятных для раскачки „веерной“ неустойчивости, [1,2,8]. Аналогичные вспышки МИ были недавно зарегистрированы на токамаке ФТ-2 с существенно большей глубиной магнитных пробок, $\Delta B_t/B_t \sim 10\%$ при $N_t = 24$, в экспериментах по генерации нижнегибридного тока увлечения (НГТУ) в омически нагретой (ОН) плазме [4,9]. При высокочастотной (ВЧ) накачке в плазме с относительно низкой плотностью $\langle n_e \rangle \sim (1-2) \cdot 10^{-13} \text{ cm}^{-3}$ появляются электроны, ускоренные нижнегибридной волной и вихревым электрическим полем до энергии масштаба 8 MeV. Такие УЭ способны как раскачивать „веерную“ неустойчивость, так и эффективно взаимодействовать с локальными магнитными пробками на периферии плазмы. При этом растет интенсивность СИ в диапазонах частот, соответствующих магнитному уширению 1-й и 2-й гармоник электронной циклотронной частоты (ЭЦЧ) тепловых электронов, 55–78 и 110–156 GHz и появляются короткие $\sim 100 \mu\text{s}$ вспышки МИ за счет „мазерного“ усиления СИ, распространяющегося в одном направлении с УЭ. Для регистрации МИ в этих экспериментах использовались 4 и 2 mm супергетеродинные радиометры (СГР) с пороговой чувствительностью $P_{th} \sim 10^{-12} \text{ W}$, со сверхразмерной линией передачи и круглой рупорной антенной, помещенной в разрядную камеру (РК) со стороны сильного магнитного поля. РК представляет собой тор, $R_0 = 0.55 \text{ m}$ и $a = 0.08 \text{ m}$, с гофрированными стенками, шаг гофрировки $d = 8 \text{ mm}$. Оказалось, что появление вспышек МИ в течение ВЧ-импульса сопровождается дополнительным нагревом тепловых электронов в центральной области плазмы с $T_e(r=0)$ от 300 до 550 eV при мощности ВЧ-накачки $P_{HV} \sim 90 \text{ kW}$, [13]. Было высказано предположение, что дополнительный нагрев электронов инициирован поглощением интенсивных вспышек МИ и возросшего СИ в плазме.

Как известно, „мазерный“ механизм генерации вспышек электромагнитного излучения (ЭМИ) связан с формированием в магнито-

активной плазме области с инверсной населенностью осцилляторов, обладающих большой поперечной энергией. Такие условия возникают в радиационных поясах магнитосфер Земли, планет, Солнца и звезд [10–12], а также в лабораторных плазменных ловушках с магнитными „пробками“, в частности, токамаках с полоидальными и локальными „пробками“ тороидального магнитного поля. В плазменных ловушках с „пробочной“ конфигурацией магнитного поля происходит раскачка циклотронной неустойчивости запертыми и кинетическими неустойчивостями — пролетными ускоренными электронами. Раскачка сопровождается „мазерным“ усилением электромагнитных циклотронных и альфвеновских волн, а также электростатических плазменных колебаний с последующей нелинейной трансформацией в интенсивное ЭМИ, так называемое коллективное излучение (КИ) [13]. Аналогичные явления возникают, по-видимому, и в плазме лабораторных „пробкотронов“ и токамаков при раскачке различных неустойчивостей ускоренными электронами.

Наблюдение аномально высокого уровня и интенсивных вспышек МИ на электронных плазменных и циклотронных частотах в течение ОН-плазмы на сферическом токамаке Глобус-М [3] и вспышек СИ в экспериментах по НГТУ на токамаке ФТ-2 [4] направило наши усилия на изучение природы „мазерных“ эффектов, которые могут возникать в ОН-плазме, в частности, при раскачке „верной“ неустойчивости. В таких условиях на токамаке ФТ-2 исследовалось МИ в диапазоне магнитного уширения 1-й и 2-й гармоник ЭЦЧ тепловых электронов и в диапазоне электронных плазменных частот. Для регистрации низкочастотного МИ использовался приемник прямого усиления (ППУ) со сменными детекторными секциями для длин волн $\lambda = 3, 1.5, 0.8$ см, чувствительность $P_{th} \sim 10^{-8}$ Вт и рупорной антенной, расположенной за стеклянным окном патрубка вне разрядной камеры со стороны слабого тороидального поля. Одновременно применялись также упомянутые выше СГР 4 и 2 мм. Это позволило наблюдать появление и корреляцию вспышек МИ в диапазоне частот $f \sim 10\text{--}40$ GHz и в более высокочастотном диапазоне 69–75 GHz. В этих экспериментах впервые было обнаружено мощное МИ в диапазоне частот $\sim (10\text{--}40)$ GHz на стадии ОН-плазмы с умеренной плотностью $(1.2\text{--}4) \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$. Кроме того, при $n > 2 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$ для частот $f \leq 20$ GHz такое непрерывное в течение разряда излучение сопровождалось более интенсивными, „гигантскими“ короткими вспышками. Полученные результаты представлены на рис. 1–3. На рис. 1, а–с представлены временные

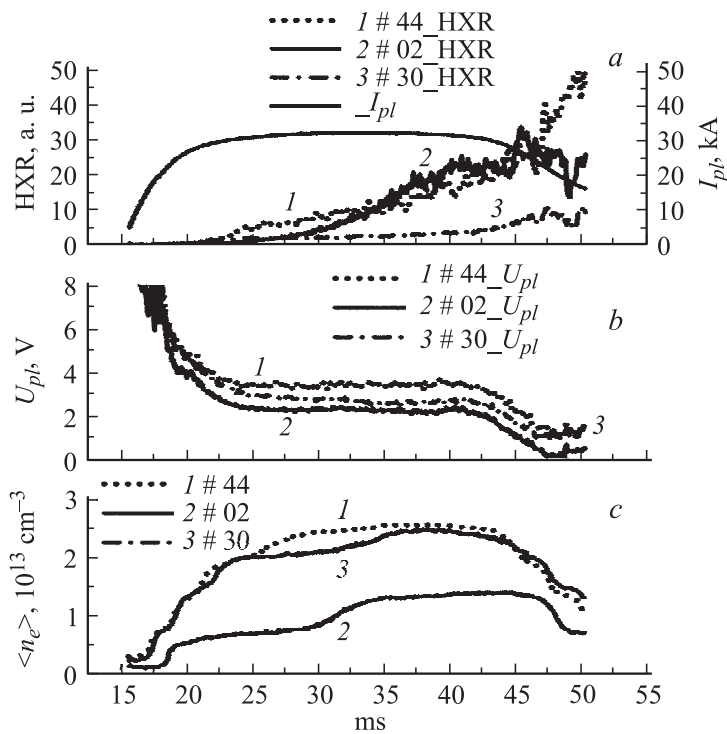


Рис. 1. *a* — ток разряда и интенсивность жесткого рентгеновского излучения, HXR, для разрядов #44, #30 и #02; *b* — напряжение на обходе разрядной камеры в этих разрядах; *c* — средняя плотность плазмы.

зависимости некоторых плазменных параметров разрядов #44, #30 и #02 экспериментальной серии 06.06.2012 г., полученных в режиме ОН-плазмы разной плотности с разрядным током $I_{pl} \sim 30$ кА (рис. 1, *a*). На этом же рисунке показаны соответствующие зависимости интенсивности жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ). На рис. 1, *b* приведены зависимости напряжения на обходе плазменного шнура U_{pl} для разрядов с различной плотностью $\langle n_e \rangle$, значения которой показаны на рис. 1, *c*. Как видно из рисунков, ЖРИ появляется по окончании роста разрядного тока, плотности плазмы и спада U_{pl} . Его интенсивность медленно растет практически до конца разряда. Оказалось, что в режиме с малой плотностью плазмы интенсивность

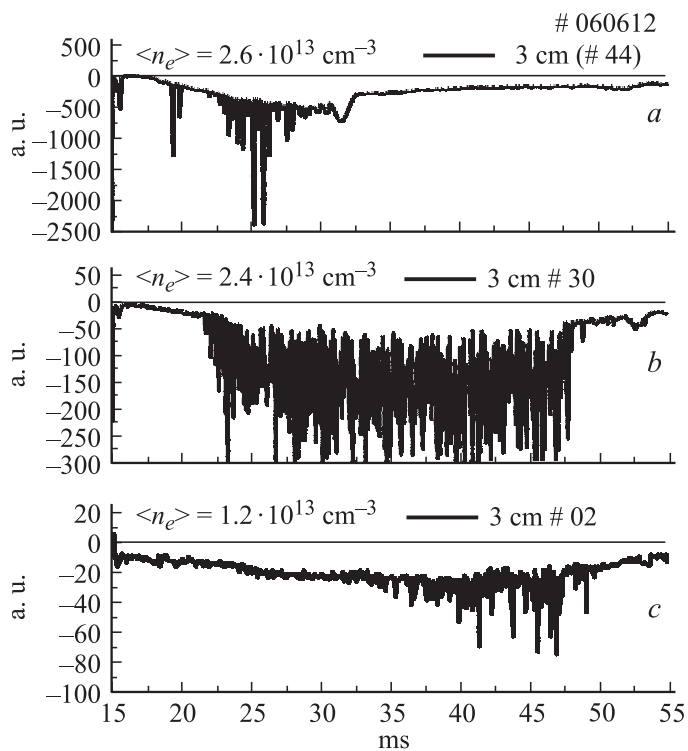


Рис. 2. Временные зависимости МИ ($\lambda = 3$ см), существующего в течение разряда и сопровождающегося интенсивными короткими вспышками. Данные приведены для разрядов: *a* — #44, *b* — #30 и *c* — #02.

ЖРИ и МГД-активность существенно уменьшаются. Это косвенно свидетельствует о подавлении МГД-возмущений при раскачке „верной“ неустойчивости токонесущими ускоренными электронами. На рис. 2, *a–c* представлены временные зависимости интенсивного МИ, $\lambda = 3$ см, существующего в течение разряда при разной плотности плазмы ($2.6, 2.4$ и 1.2) $\cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ и сопровождающегося интенсивными короткими вспышками МИ с длительностью $\sim 70 \mu\text{s}$ на разных стадиях разряда. Видно, что небольшое количество вспышек значительной интенсивности возникает на начальной стадии ОН, когда напряжение на обходе разрядной камеры достаточно велико, а плотность плазмы еще

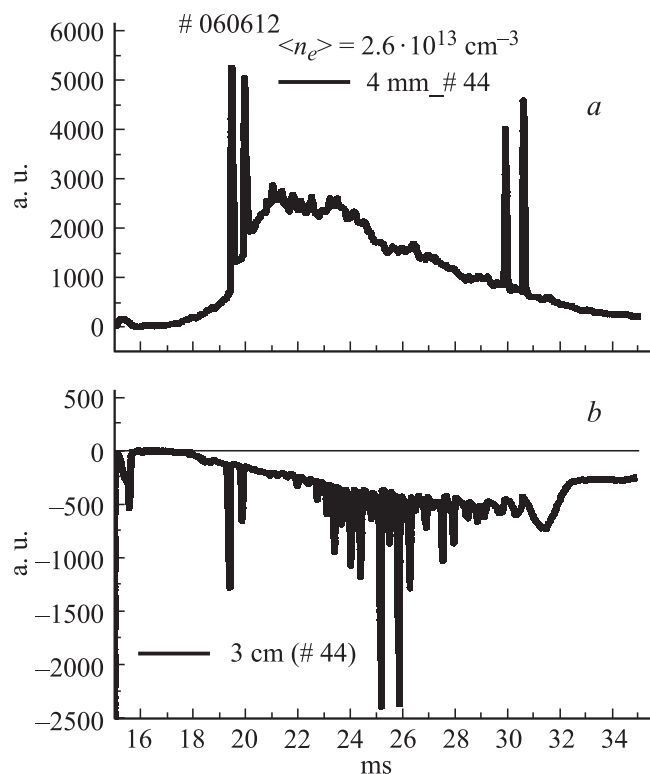


Рис. 3. Временные зависимости СИ $\lambda = 4$ мм (*a*) и МИ $\lambda = 3$ см (*b*), регистрация с помощью СГР и ППУ соответственно. На *b* сигнал уменьшен в 10 раз по сравнению с данными *a*.

относительно мала. Существенно большее количество таких вспышек появляется на квазистационарной стадии разряда в менее плотной плазме $\langle n_e \rangle = 2.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ и при меньшем вихревом электрическом поле (рис. 2, *b*). В случае малой плотности плазмы $\langle n_e \rangle = 1.2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ некоторое количество небольших вспышек возникало лишь в конце разряда (рис. 2, *c*). Такие же явления наблюдались и в более коротковолновом диапазоне $\lambda = 1.5$ см. Наиболее интенсивные вспышки были обнаружены при $\langle n_e \rangle = 2.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. В еще более коротковолновой области $\lambda = 0.8$ см максимальный уровень МИ был при

$\langle n_e \rangle = 1.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, а вспышки наблюдались только в течение подъема плазменного тока при $\langle n_e \rangle = 2.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ при больших значениях вихревого электрического поля. На рис. 3 представлены временные зависимости интенсивности МИ, регистрировавшиеся соответственно с помощью СГР, $\lambda = 4 \text{ mm}$, и ППУ, $\lambda = 3 \text{ cm}$. Можно видеть, что существенно разное по уровню $I(4 \text{ mm}) \ll I(3 \text{ cm})$ МИ сопровождается также разными по интенсивности короткими вспышками, возникающими одновременно. Это свидетельствует о раскачке „веерной“ неустойчивости уже в начале разряда, а также о том, что в наших условиях происходит, по-видимому, не только „мазерное“ усиление СИ и КИ в режиме циклотронного авторезонанса, но и генерация „гигантских“ вспышек низкочастотного МИ, $f < 40 \text{ GHz}$. Появление „гигантских“ вспышек можно объяснить, например, самовозбуждением усилителя при слишком большом входном сигнале или коэффициенте усиления в условиях достаточного уровня „паразитной“ положительной обратной связи. В токамаке ФТ-2 с большой глубиной локальных магнитных пробок и подходящими параметрами моноэнергетической быстрой компоненты ускоренных электронов в условиях многократного отражения КИ поверхностью „отсечки“ и стенкой разрядной камеры мазер на циклотронном авторезонансе может перейти в режим самовозбуждения, когда генерируются короткие мощные вспышки МИ. При этом возможно одновременное появление вспышек как на частоте генерации, так и на ее гармониках. Таким образом, обнаруженные в наших экспериментах аномально высокий уровень и „гигантские“ вспышки низкочастотного МИ могут быть обусловлены соответственно „мазерным“ усилением КИ в режиме циклотронного авторезонанса и эффектом самовозбуждения „мазерного“ усилителя.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-02-00631, 11-02-00561, 13-08-00411 и гранта Правительства РФ согласно Постановлению № 220 по договору № 11.G34.31.0041 с Министерством образования и науки РФ.

Список литературы

- [1] Kurzan B., Steuer K.H., Suttrop W. // Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68. P. 423.
- [2] Kurzan B., Steuer K.H. // Phys. Rev. E. 1994. V. 55. P. 4608.
- [3] Ананьев А.С., Гусев В.К., Крикунов С.В. и др. // Proc. 12 Joint Workshop on ESE & ECRH, Aix-en-Provence, France, 13–16 May, 2002. P. 191.

- [4] *Лаишул С.И., Рождественский В.В., Алтухов А.Б.* и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 23. С. 69–76.
- [5] *Lauren L., Rax J.M.* // Europhys. Lett. 1990. V. 11. P. 219.
- [6] *Russo A.J.* // Nucl. Fusion. 1991. V. 31. P. 117.
- [7] *Martin-Solis J.R., Esposito V., Sanchez R., Alvarez J.D.* // Phys. Plasmas. 1999. V. 6. N 1. P. 238.
- [8] *Параил В.В., Погуце О.П.* Вопросы теории плазмы. В. 11 / Под ред. М.А. Леонтовича и Б.Б. Кадомцева. М.: Энергоиздат, 1982. С. 5–55.
- [9] *Лаишул С.И., Алтухов А.Б., Гурченко А.Д.* и др. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 9. С. 803–814.
- [10] *Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю.* Альфвеновские мазеры. Горький, 1986.
- [11] *Трахтенгерц В.Ю., Демехов А.Г.* // Природа. 2002. № 4.
- [12] *Флейшман Г.Д., Мельников В.Ф.* // УФН. 1998. Т. 168. № 12. С. 1265–1301.
- [13] *Гинзбург В.Л., Железняков В.В.* // АЖ. 1958. Т. 35. С. 694.