

04;12

Визуализация СВЧ-пучков с помощью рекомбинационного излучения положительного столба разряда в смеси паров цезия с ксеноном

© М.С. Гитлин, В.В. Зеленогорский, А.О. Перминов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
E-mail: gitlin@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 14 января 2002 г.

Предложен и реализован чувствительный метод визуализации пространственного распределения интенсивности СВЧ-излучения с помощью $6P$ -рекомбинационного континуума цезия, излучаемого плоским слоем неравновесной плазмы положительного столба газового разряда в смеси паров цезия с ксеноном. Продемонстрировано, что пространственное распределение интенсивности СВЧ-излучения с частотой 35 GHz, измеренное в фокальной плоскости линзы по интенсивности $6P$ -рекомбинационного континуума цезия, хорошо согласуется с распределением, измеренным с помощью подвижного СВЧ-детектора. Достигнуто временное разрешение системы визуализации СВЧ-излучения 1 ns.

При создании источников и линий передачи СВЧ-излучения, при СВЧ-видении объектов в оптически непрозрачных средах и т.д. необходимо определять пространственное распределение интенсивности СВЧ-излучения [1,2]. В настоящее время широко используются методы исследования пространственной структуры СВЧ-поля, основанные на его тепловом воздействии на различные материалы: на пленки с люминофорами, жидкокристаллические экраны, листы бумаги [1-4]. Исследование картины нагрева с помощью тепловизора либо по из-

менению излучения или поглощения света позволяет судить о пространственной структуре СВЧ-излучения. Основными недостатками тепловых методов регистрации пространственного распределения СВЧ-излучения, существенно ограничивающих область их применения, являются низкое быстродействие, не превосходящее в большинстве случаев 0.1 s , и невысокая чувствительность по энергии, равная для наиболее чувствительных методов 10^{-2} J/cm^2 . Из-за недостаточной чувствительности тепловые методы регистрации не могут быть использованы, например для измерения пространственной структуры СВЧ-излучения маломощных и импульсных генераторов, таких как магнетроны, гироклистроны и релятивистские СВЧ-генераторы. Данная работа посвящена разработке методов визуализации СВЧ-пучков с помощью $6P$ -рекомбинационного континуума цезия ($6P$ -РКЦ) [5–7], излучаемого слоем неравновесной плазмы положительного столба (ПС) разряда в смеси паров цезия с ксеноном (Cs–Xe разряд) [8]. Этот метод визуализации позволит, как мы надеемся, создать чувствительный визуализатор миллиметровых и сантиметровых волн, который будет обладать высоким временным разрешением. $6P$ -рекомбинационный континуум цезия расположен в удобной синей части видимого спектра (длина волны короче 504 nm), обладает достаточно большой светимостью и не искажается реабсорбцией [5–7]. Интенсивность континуума прямо пропорциональна концентрациям электронов и атомарных ионов цезия, которые очень чувствительны к изменению температуры электронов при воздействии СВЧ-излучения. Цезий, помимо того что он является источником рекомбинационного излучения, играет также важную роль в процессах образования заряженных частиц в неравновесной плазме положительного столба Cs–Xe разряда [5,6,9]. Инертный газ используется в качестве буферного газа.

Изучение возможности визуализации СВЧ-пучков по излучению $6P$ -РКЦ проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. Для создания плоского слоя плазмы положительного столба Cs–Xe разряда использовалась специальная газоразрядная трубка ДТ. В середине газоразрядной трубки был расположен прямоугольный параллелепипед, который был склеен из кварцевых пластин. Два плоских прямоугольных кварцевых окна 1 с апертурой $10 \times 10\text{ cm}$ располагались параллельно друг другу. Эти окна имели малый коэффициент отражения и позволяли вводить СВЧ-пучок внутрь трубки без искажений. Расстояние между внутренними поверхностями окон равнялось 2 cm . Два плоских прямоугольных анода 2 и два

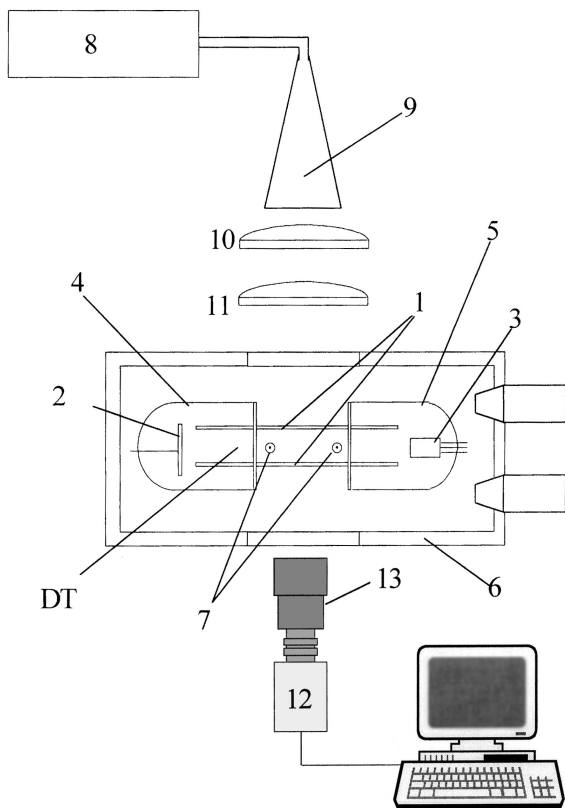


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

накаливаемых катода 3 располагались внутри стеклянных цилиндров 4 и 5 диаметром 10 см, которые приклеивались к торцам кварцевой кюветы. Расстояние между анодами и катодами было 30 см. Каждая пара электродов присоединялась к отдельному источнику тока. Трубка имела отростки, в которых находились капли цезия. Для достижения необходимого давления паров цезия газоразрядная трубка помещалась в термостат 6 и нагревалась до температуры 80–110°C с помощью горячего воздуха. Газоразрядная трубка была наполнена ксеноном при

давлении 45 Торг. Такое относительно высокое давление ксенона нужно для обеспечения локальности дополнительного нагрева электронов под действием СВЧ-излучения. Продольное электрическое поле E в положительном столбе определялось по разности потенциалов между двумя электрическими зондами 7. Температура электронов в положительном столбе Cs–Xe разряда измерялась по спектру 6P-РКЦ [5–8].

Исследования воздействия СВЧ-излучения на слой плазмы положительного столба Cs–Xe разряда проводились при токе 1.5 А, температуре трубки 368 ± 2 К. При этих условиях ПС Cs–Xe разряда представляет собой однородный плоский слой, который заполняет всю рабочую апертуру трубки [8]. При отсутствии воздействия СВЧ-излучения напряженность продольного электрического поля в ПС E_0 равнялась 0.9 В/см, температура электронов $T_{e0} = 0.42$ эВ, концентрация электронов $N_{e0} = 4 \cdot 10^{12}$ см⁻³. Источником СВЧ-излучения с частотой 35 GHz служил магнетрон 8 (рис. 1), максимальная выходная мощность которого в импульсном режиме (длительность импульса 0.1 с) была равна примерно 20 W. За рупорной антенной 9 располагались две сферические тефлоновые линзы 10 и 11 с диаметром 20 см и фокусным расстоянием 60 см, которые фокусировали СВЧ-пучок в центр слоя плазмы ПС Cs–Xe разряда. С помощью фотоумножителя, на входе которого устанавливался набор интерференционных оптических фильтров, пропускающих только излучение 6P-РКЦ,¹ было проведено экспериментальное исследование зависимости интенсивности 6P-рекомбинационного континуума цезия I от интенсивности падающего на плазму СВЧ-излучения W . Оно показало, что в диапазоне значений W от 0 до 5 W/cm² изменение интенсивности континуума $\Delta I = I - I_0$ прямо пропорционально интенсивности СВЧ-излучения, здесь I_0 — интенсивность 6P-РКЦ при отсутствии СВЧ-излучения. При большей интенсивности СВЧ-излучения происходил СВЧ-пробой плазменного слоя. Для регистрации пространственного распределения интенсивности 6P-РКЦ использовалась черно-белая ПЗС-камера КС-381 (12 на рис. 1) с объективом SE1212, перед которым был установлен описанный в сноске¹ набор интерференционных оптических фильтров 13. С выхода телекамеры сигнал поступал на установленный в компьютере фреймграбер FlyVideo EZ 98. Для нахождения пространственного распределения

¹ Этот набор фильтров имел пропускание около $(40 \pm 10)\%$ в диапазоне 400–500 nm и менее 0.1% за пределами спектрального диапазона 390–510 nm. Он имел также пропускание менее 0.1% в диапазоне 450–460 nm, где расположены линии второго резонансного перехода цезия ($7P_{3/2} \rightarrow 6S_{1/2}$, $7P_{1/2} \rightarrow 6S_{1/2}$) [5].

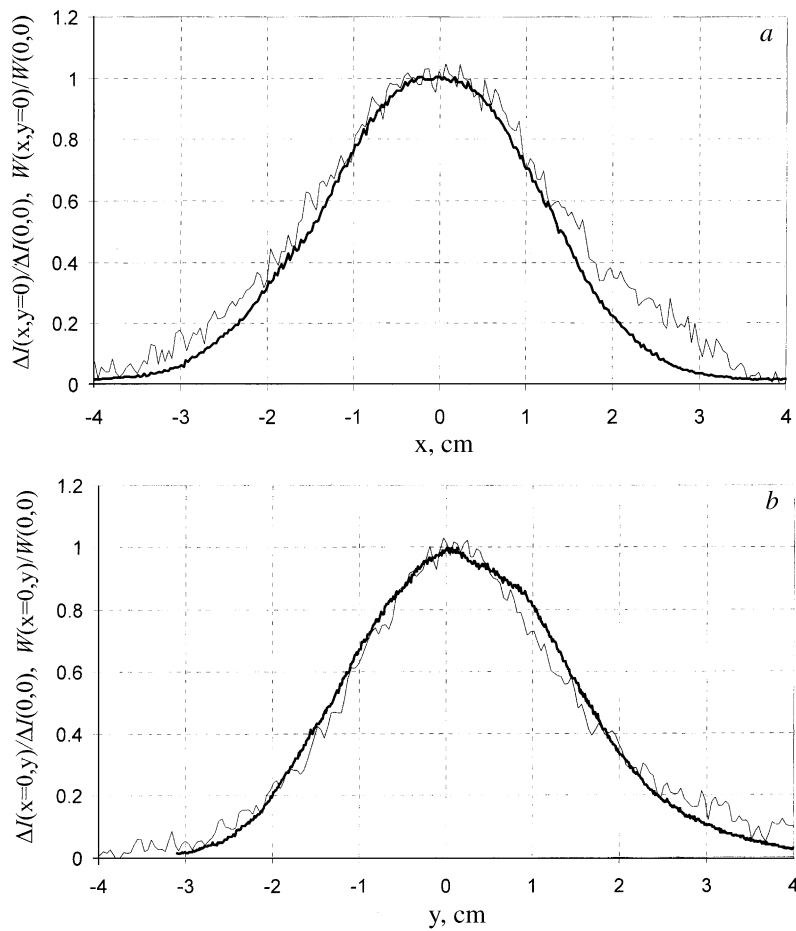


Рис. 2. Зависимости от продольной (*a*) и поперечной (*b*) по отношению к разрядному току координаты относительной интенсивности СВЧ-пучка $W/W(0, 0)$ (толстая линия) и относительной вариации интенсивности $6P$ -рекомбинационного континуума цезия $\Delta I/\Delta I(0, 0)$ (тонкая линия).

СВЧ-излучения из изображения пространственного распределения рекомбинационного излучения $I(x, y)$, полученного во время воздействия СВЧ-излучения, вычиталось распределение фонового излучения плазмы ПС Cs–Xe разряда $I_0(x, y)$, определенное по кадру, предшествующему началу СВЧ-импульса, здесь x и y — продольная и поперечная по отношению к разрядному току координата соответственно. Для проверки предложенного метода визуализации было проведено сравнение пространственного распределения интенсивности СВЧ-излучения $W(x, y)$, измеренного в фокальной плоскости линзы LI с помощью подвижного калиброванного СВЧ-диода, и пространственного распределения вариации интенсивности $6P$ -РКЦ $\Delta I(x, y)$, измеренного с помощью телекамеры. На рис. 2 приведены измеренные в фокальной плоскости линзы графики зависимостей от координаты x (рис. 2, a) и y (рис. 2, b) относительной интенсивности СВЧ-пучка $W/W(0, 0)$ (толстая линия) и относительной вариации интенсивности $6P$ -РКЦ $\Delta I/\Delta I(0, 0)$ (тонкая линия). Эти зависимости измерены при интенсивности СВЧ-излучения в центре пучка $W(0, 0) \approx 3 \text{ W/cm}^2$ (при такой интенсивности СВЧ-излучения $\Delta I(0, 0)/I_0 \approx 1$). Как следует из этого рисунка, за исключением периферии пучка измеренные двумя методами распределения совпадают в пределах экспериментальной ошибки. Для выяснения причины расхождения результатов измерений на периферии пучка требуются дальнейшие исследования.

Характерное время изменения интенсивности континуума при быстром включении СВЧ-излучения, измеренное с помощью фотоумножителя, приблизительно совпадало с временем нагрева электронов и составляло несколько микросекунд. Таким образом, временное разрешение предложенного метода визуализации СВЧ-пучков может быть порядка десяти микросекунд, а чувствительность по энергии может достигать величины порядка 10^{-5} J/cm^2 . В условиях проведенных нами экспериментов по визуализации СВЧ-пучка временное разрешение ограничивалось чувствительностью ПЗС-камеры КС-381. При полностью открытой диафрагме и максимальном коэффициенте усиления ПЗС-камеры минимальная длительность экспозиции, которая позволяла регистрировать излучение $6P$ -рекомбинационного континуума цезия, была равна 1 ms , а чувствительность по энергии составляла примерно 10^{-3} J/cm^2 .

Авторы благодарны С.В. Голубеву, А.Г. Литваку и В.Е. Семенову за интерес к работе.

Работа была частично поддержана РФФИ, грант № 00-02-17757.

Список литературы

- [1] *Kuznetsov S.O., Malygin V.I.* // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1991. V. 12. N 11. P. 1241–1252.
- [2] *Bolomey J.-C.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1989. V. 37. N 12. P. 2109–2117.
- [3] *Тимофеев Ю.П., Фридман С.А.* // Изв. АН Сер. Физ. 1979. Т. 43. N 6. С. 1303–1312.
- [4] *Pereyaslavets M., Idehara T., Ogawa I.* et al. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1999. V. 20. N 6. P. 1195–1205.
- [5] *Agnew L., Reichelt W.H.* // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. N 7. P. 3149–3155.
- [6] *Термоэмиссионные преобразователи и низкотемпературная плазма* / Под ред. Б.Я. Мойжеса, Г.Е. Пикуса. М.: Наука, 1973. 480 с.
- [7] *Wetzer J.M.* // Physica C. 1984. V. 123. P. 247–256.
- [8] *Bogatov N.A., Gitlin M.S., Dikan D.A.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. N 15. P. 2819–2822.
- [9] *Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т.* Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982. 375 с.