

10

© 1991 г.

ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА НЕРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

Б. Г. Цикин, Л. Е. Долотов, О. В. Зюрюкина, А. П. Соловьев

Описана установка для диагностики нерелятивистских электронных пучков по рассеянию лазерного излучения ($\lambda=0.69$ мкм). Использование конических диафрагм в оптическом тракте и юстировка по рэлеевскому рассеянию снизили лазерную помеху до величины 10^{-19} от энергии зондирующего лазерного импульса. Это позволило изучить радиальное распределение концентрации электронов в нерелятивистском пучке. Обсуждено влияние различных факторов на воспроизводимость измерений. Отмечена возможность создания установок для диагностики нерелятивистских пучков с концентрацией электронов до 10^7 см $^{-3}$.

Введение

Возможность регистрации рассеяния электромагнитного излучения оптического диапазона на свободных электронах впервые была показана экспериментально по рассеянию излучения рубинового лазера на нерелятивистском электронном пучке [1]. В дальнейшем в основном интересовались рассеянием лазерного излучения электронной компонентой плазмы [2], где сравнительно большие значения электронной концентрации (более 10^{14} см $^{-3}$) облегчают наблюдение рассеянного излучения.

В нерелятивистских электронных пучках концентрация электронов значительно ниже — 10^9 — 10^{10} см $^{-3}$. Поэтому приходится решать проблему выделения рассеянного излучения на электронах на фоне различных помех. Наиболее существенной из них является лазерная помеха, появление которой обусловлено рассеянием зондирующего лазерного излучения на элементах оптического тракта экспериментальной установки. Небольшое смещение частоты рассеянного излучения за счет эффекта Доплера, составляющее примерно 10 % от частоты лазерного излучения при ускоряющих напряжениях 3—5 кВ, позволяет размещать в приемном тракте установки интерференционные фильтры. Однако, как правило, даже при их использовании полезный сигнал оказывается на два порядка ниже лазерной помехи [3, 4].

При зондировании электронного пучка лазерными импульсами, когда приемником регистрируется энергия рассеянного излучения в присутствии электронного пучка и без него, высокий уровень лазерной помехи затрудняет расшифровку результатов измерений. Реальные величины пульсаций энергии лазерного излучения могут давать в разности показаний приемника значения, существенно большие, чем ожидаемые при рассеянии на электронном пучке. Воспроизводимость результатов снижается также из-за изменения взаимного расположения электронного пучка и области зондирования, например, в результате разогрева исследуемой пушки.

Ниже приводятся результаты разработки установки с низким уровнем лазерной помехи и эксперименты по определению местоположения электронного пучка с помощью лазера.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Основные ее параметры вместе с параметрами других, известных ранее работ [1, 3, 4] приведены в таблице. Настоящую установку отличает от [1, 3] меньший примерно в 10 раз объем наблюдения, что обеспечивало более высокую локальность измерений.

Параметры установок для наблюдения рассеяния излучения рубинового лазера на нерелятивистских электронных потоках

Параметр	[1]	[3]	[4]	Настоящая установка
Энергия лазерного импульса, Дж	20	15	30	70
Ток электронного пучка, мА	100	50	70	80
Диаметр пучка, мм	1.5	0.9	0.8	1.3
Фокусировка пучка	магнитная	магнитная	нет	нет
Давление в камере, мм рт. ст.	—	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$3.5 \cdot 10^{-7}$
Полоса пропускания интерференционного фильтра, нм	1	10	12	50
Диаметр зоны и зондирования, мм	2	—	0.4	0.8
Высота зоны и зондирования, мм	2	—	1.3	1.3
Телесный угол наблюдения, ср	$4.9 \cdot 10^{-2}$	—	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{-2}$
Измеренные значения электронной концентрации n_e , см ⁻³	$5 \cdot 10^9$	10^{10}	10^{10}	10^9
Отношение сигнала при $n_e = 5 \cdot 10^9$ см ⁻³ к лазерной помехе	—	$6 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	4
Отношение сигнала к «свечению пучка»	—	$2 \cdot 10^{-2}$	—	0.5

Рубиновый лазер работал в режиме свободной генерации. Нестабильность энергии в импульсе не превышала 1.5 Дж при полной энергии 70 Дж. Излучение лазера фокусировалось двухлинзовым объективом в вакуумную камеру с элект-

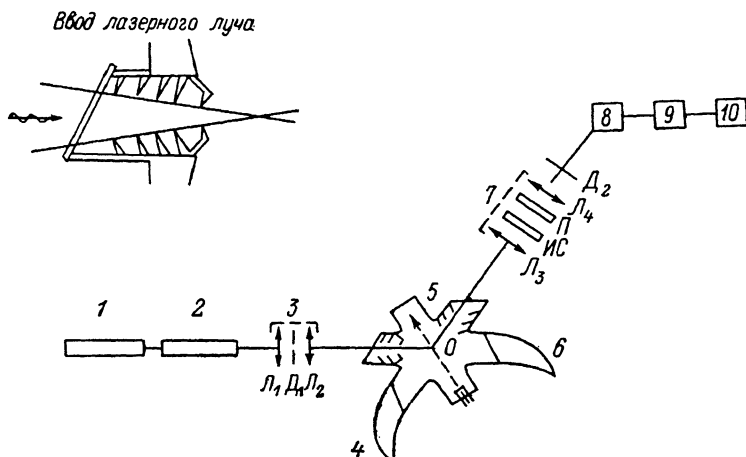


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — юстировочный He—Ne лазер; 2 — зондирующий рубиновый лазер; 3 — объектив ввода; 5 — вакуумная камера с электронной пушкой; 4, 6 — оптические ловушки; 7 — объектив вывода; 8 — фотоприемник; 9 — усилитель постоянного тока; 10 — запоминающий осциллограф.

тронной пушкой. Диаметр фокального пятна, измеренный по релеевскому рассеянию, составлял 1.2—1.3 мм. Рассеянное излучение в телесном угле $2.6 \cdot 10^{-2}$ ср после прохождения через двухлинзовый объектив и диафрагму D_2 диаметром 0.4 мм попадало на фотокатод ФЭУ-79. Поверхность диафрагмы D_2 со стороны

фотокатода имела зеркальное покрытие, благодаря чему попадающее на нее отраженное от фотокатода излучение возвращалось на фотокатод. Расстояние между диафрагмой D_2 и ФЭУ было 1 мм. Освещаемая площадка на фотокатоде имела диаметр ≈ 1 мм. Ее местоположение выбиралось экспериментально в области максимальной чувствительности фотокатода. В канале вывода рассеянного излучения между линзами L_3 и L_4 было размещено два интерференционных фильтра ИС и поляризатор П. Общий коэффициент пропускания на длинах волн лазерного $\lambda_0 = 694$ нм и рассеянного томсоновского $\lambda = 625$ нм излучений составлял $5 \cdot 10^{-6}$ и 0.4 соответственно.

Приемная система включала в себя фотумножитель 8, усилитель постоянного тока 9 и запоминающий осциллограф 10 типа С8-9А. В отдельных случаях вместо осциллографа использовали импульсный вольтметр. Осциллограф запускался импульсом поджига ламп накачки, а импульсный вольтметр — задним фронтом импульса излучения лазера. Датчиком импульса излучения служил фотодиод, расположенный со стороны плотного зеркала лазера. Чувствительность приемной системы позволяла регистрировать отдельные фотоны.

Цилиндрический электронный пучок формировался четырехэлектродной пушкой. Оси зондирующего луча, приемной системы и электронного пучка лежали в одной плоскости, а вектор напряженности электрического поля зондирующего излучения был перпендикулярен этой плоскости. Угол между скоростью электронов и направлением зондирующего луча составлял 122.5° , а между скоростью электронов и направлением рассеянного излучения — 57.5° . Это обеспечивало доплеровское смещение длины волны рассеянного излучения на 70 нм. Электронный пучок можно было перемещать в трех взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль и перпендикулярно оси пучка. Внутри камеры размещался тест-объект, который можно было вводить в точку зондирования. В каналах ввода зондирующего и вывода рассеянного излучений устанавливали конусные диафрагмы, которые снижали уровень лазерной помехи более эффективно, чем плоские [5]. Последняя диафрагма в канале ввода лазерного излучения была выполнена в виде двойного конуса [6]. Она позволяла диафрагмировать зондирующий луч вблизи точки зондирования, оставляя невидимой для приемника светящуюся кромку диафрагмы. Оптимальную форму диафрагм и их расположение в зондирующем и приемном каналах камеры, обеспечивающих минимальную лазерную помеху на приемнике, подбирали экспериментально по максимуму отношения величины релеевского сигнала к лазерной помехе. Эта операция проводилась в развакуумированной камере с открытыми окнами, причем для устранения рассеяния лазерного излучения на пыли и других взвешах в камере создавали небольшое избыточное давление очищенного газа. Использование конусных диафрагм позволило уменьшить уровень лазерной помехи в 200 раз по сравнению с [4].

Юстировка и калибровка установки

Юстировка установки проводилась в два этапа: с помощью тест-объекта и по релеевскому рассеянию [7]. Чувствительность установки позволяла регистрировать релеевское рассеяние из объема ~ 1 мм³ при давлении 2 мм рт. ст. и выше. Юстировали систему, как правило, при давлении в камере 100 мм рт. ст., так как уже при таком давлении устранялось влияние рассеяния излучения на пыли.

По известной методике [2] проводилась калибровка измерительной системы. При этом учитывалась разница коэффициентов пропускания интерференционных фильтров и чувствительности фотокатода ФЭУ при переходе на длину волны томсоновского рассеяния. Величина релеевского сигнала на выходе ФЭУ при давлении в камере 10 мм рт. ст. равнялась сигналу томсоновского рассеяния при концентрации электронов $n_e = 5 \cdot 10^9$ см⁻³.

Методика измерений

Непосредственно фиксируемой величиной при проведении измерений была разность потенциалов ΔU в начале и в конце лазерного импульса на анодной нагрузке ФЭУ. Время интегрирования составляло 10 мс. Сигналу s , рассеян-

ному на электронном пучке, приписывалась разность двух отсчетов ΔU : с пучком и без пучка. Из-за разброса значений s от импульса к импульсу проводилось усреднение их по 20—30 отсчетам. Как правило, измеряемая разность s имела меньший разброс, если разряд накопительной емкости через лампы накачки лазера задерживался во времени от зарядки на 0.5—1 с. Это позволяло ослабить влияние импульсных электрических и магнитных помех. Рис. 2 иллюстрирует колебания средних значений сигнала s^n и лазерной помехи \bar{N}_n^n от числа измерений n . При $n \geq 25$ их колебания не превышали 15 % полезного сигнала. Такой же разброс значений s^n и \bar{N}_n^n [3, 4] на установках с меньшим отношением сигнала к лазерной помехе (10^{-2}) достигался лишь при $n \geq 90$ —100.

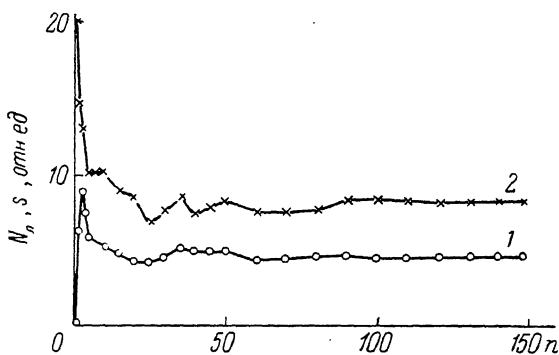


Рис. 2. Зависимость величины средних значений сигнала s^n (1) и лазерной помехи \bar{N}_n^n (2) от числа измерений n .

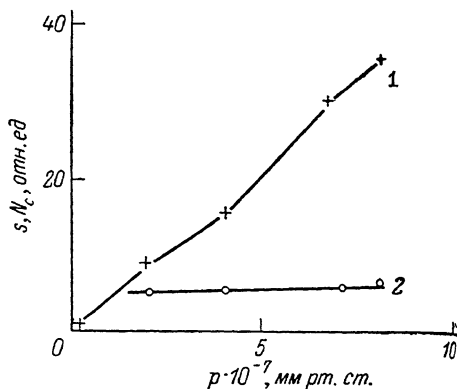


Рис. 3. Зависимость величины свечения пучка (1) и сигнала томсоновского рассеяния s (2) на оси пучка от давления.

Выбор оптимального режима электронной пушки и результаты измерений

При проведении экспериментов с электронным пучком необходимо было обеспечить прохождение его через зондируемый объем установки. Это можно было осуществить, наблюдая свечение остаточных газов под действием электронного пучка. Оно уверенно регистрировалось во всем диапазоне изменения рабочего давления в камере. Зависимость его величины N_c на оси пучка от давления приведена на рис. 3. Здесь же для сравнения приведена аналогичная зависимость величины томсоновского сигнала s от давления, которая регистрировалась одновременно.

Полоса пропускания интерференционных фильтров была достаточно широкой и позволяла существенно изменять скорость электронов практически без изменения величины сигнала томсоновского рассеяния. Изменяя режим работы пушки, можно было совместить точку зондирования с областью электронного пучка, имеющей наибольшую концентрацию электронов на оси. Соответствующее такой области распределение по сечению пучка сигналов томсоновского рассеяния s и свечения N_c , нормированных на свои максимальные значения s_m и N_{cm} , приведены на рис. 4. Доверительный интервал с надежностью 0.99 не превышал $\pm 30\%$ от s_m . Реально величина свечения превосходила величину сигнала в 2 раза. Величина s_m превышала сигнал лазерной помехи, примерно постоянный по всему сечению пучка, в 4 раза. Здесь же приведена шкала электронной концентрации, полученная в предположении, что концентрация электронов n_e постоянна в объеме зондирования, представляющем трубку диаметра 0.8 мм, длина которой равнялась размеру лазерного луча вдоль оси приемника. Из рис. 4 видно, что распределение сигналов «свечения» и томсоновского рассеяния качественно совпадают. Так, полуширина контура «свечения пучка» равна примерно 1.35 мм, а томсоновского — 1.3 мм. Максимальный сигнал соответствует электронной концентрации $n_e = 4.3 \cdot 10^9$ см $^{-3}$. Примерно такое же значение электронной концентрации можно получить, если задать равномерное

распределение электронов по сечению пучка, по известным значениям тока и ускоряющего напряжения пушки.

В процессе измерений выяснилось влияние теплового режима вакуумной камеры на воспроизводимость результатов измерений. Был проведен специальный эксперимент. Суть его заключалась в следующем. После работы пушки в течение 60 мин, проводилась юстировка установки, ось электронного пучка совмещалась с точкой зондирования, измерялась величина томсоновского сигнала s_0 . После этого пушка отключалась и камера охлаждалась до комнатной температуры. Затем снова включали пушку, устанавливали тот же электрический режим и через 2—3 мин после включения пушки начинали измерения томсоновского сигнала. Зависимость его величины от времени разогрева камеры

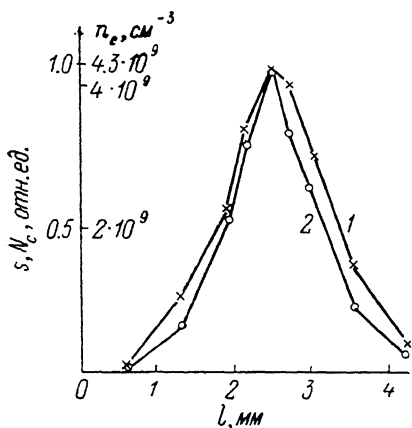


Рис. 4. Распределение сигнала томсоновского рассеяния s (1) и свечения пучка N_e (2) по сечению пучка.

работающей пушкой после ее повторного включения приведена на рис. 5. Полученная зависимость, по-видимому, связана с температурными изменениями положения пучка относительно точки зондирования. Как видно из рис. 5 воз-

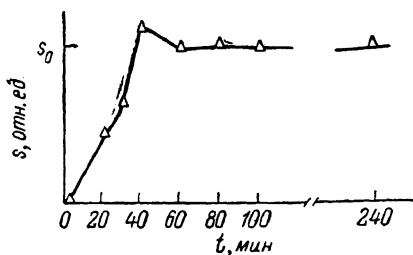


Рис. 5. Зависимость величины томсоновского сигнала от времени разогрева камеры работающей пушкой.

вращение пучка в точку зондирования, судя по восстановлению величины сигнала s_0 , происходило за время $t \cong 40$ мин. В дальнейшем наблюдались незначительные колебания величины сигнала, которые можно объяснить более плавными изменениями температуры или давления. Эти данные свидетельствуют о необходимости учета возможных искажений результатов измерений, например, при измерении параметров пучка, включаемого на короткий промежуток времени, в течение которого происходит достаточно быстрое изменение температуры пушки или ее крешлений, а также длительных измерениях, когда существенно изменяются внешние условия. Отметим, что распределение сигналов, представленных на рис. 3, 4, получено после установления теплового режима.

Заключение

Разработанные меры по снижению лазерной помехи и улучшение юстировки установки позволили измерить электронную концентрацию 10^9 см⁻³ в объеме $\cong 1$ мм³ при отношении сигнала к лазерной помехе ~ 1 . Сокращение длительности измерений сигнала томсоновского рассеяния (меньшее число вспышек лазера) позволило выявить влияние теплового режима работы пушки на местоположение пучка.

Минимальные измеримые концентрации электронов определяются возможностью регистрации малой величины полезного рассеянного сигнала. Этот предел можно снизить, если компенсировать уменьшение концентрации ростом других факторов: увеличить энергию в импульсе зондирующего излучения [8] и телесный угол наблюдения [2], выбрать ФЭУ с более высоким квантовым выходом [9].

Используя проверенные в экспериментах методы увеличения сигнала, не приводящие к существенному ухудшению достигнутого в данной работе отношения сигнала к лазерной помехе при $n_e \cong 10^9$ см⁻³, можно ожидать измерения

электронной концентрации $n_e \cong 10^7 \text{ см}^{-3}$ при отношении $s/N_e \cong 10^{-2}$, реализованном в работах [3, 4].

Список литературы

- [1] *Fiosob G., Thompson E.* // Phys. Rev. Lett. 1963. Vol. 10. P. 89.
- [2] *Пятницкий Л. Н.* Лазерная диагностика плазмы. М.: Атомиздат, 1976.
- [3] *Кузнецов Ю. И.* // Квантовая электроника. 1971. № 1. С. 64—70.
- [4] *Долотов Л. Е., Соловьев А. П., Зюрюкина О. В.* и др. // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 5. С. 988—992.
- [5] *Gerry E. D., Rose D. J.* // J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. N 7. P. 2715—2724.
- [6] *Долотов Л. Е., Дудин И. В., Зюрюкина О. В.* и др. // А. С. 1418637. БИ. 1988. № 31.
- [7] *Долотов Л. Е., Зюрюкина О. В., Соловьев А. П., Цижин Б. Г.* А. С. 1290234. БИ. 1987. № 6.
- [8] *Акатова Т. Ю., Булыгинский Д. Г., Гончаров С. Г.* и др. // Диагностика плазмы. М., 1989. № 6. С. 102.
- [9] *Берковский А. Г., Гаванин В. А., Зайдель И. Н.* Вакуумные фотоэлектронные приборы. М.: Радио и связь. 1988. 270 с.

Саратовский государственный университет
им. Н. Г. Чернышевского
Научно-исследовательский институт
механики и физики

Поступило в Редакцию
5 апреля 1989 г.
В окончательной редакции
29 сентября 1989 г.