

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. Н. Пятницкий, С. Л. Рак, В. А. Фонькин,
Г. Г. Якушев, Исследование многокомпонентной
плазмы импульсного газового разряда методом
двухцветной лазерной интерферометрии, *ТВТ*,
1983, том 21, выпуск 2, 410–412

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.89

12 декабря 2024 г., 06:58:50



Исследование теплообмена в установке для выращивания монокристаллов германата висмута (рис. 1) проведено с помощью описанной математической модели, причем тепловой блок разбит на зоны следующим образом: по высоте футеровки (от основного нагревателя) выделялись 8 зон, зона тянущего водоохлаждаемого штока, 3 зоны затравкодержателя, 17 зон кристалла (при разбиении его по вертикали на 8 слоев и на 3 цилиндра по горизонтали), 4 поверхностные зоны расплава и зона тягия. Расчет тепловых условий в блоке при длине цилиндрической части кристалла 50 диаметром 40 мм по предлагаемому алгоритму с применением квадратных матриц оптико-геометрических характеристик показал хорошую сходимость результатов расчета с экспериментальными данными. Так, в период затравления расчетная температура затравки равна 1136 К, тогда как измеренная температура равна 1133 К. Разница между расчетными и измеренными значениями температуры составляет по оси кристалла 1–15 К, по высоте футеровки до 50 К (рис. 2); максимальная относительная погрешность равна 17%. Сравнение экспериментальных данных с расчетными вблизи фронта кристаллизации показывает, что до высоты 15 мм над уровнем расплава осевые температуры кристалла различаются не более чем на 1,5 К.

Применение предложенного зонального метода расчета обеспечивает значительное (почти в два раза) сокращение требуемой памяти ЭВМ, что способствует увеличению возможностей решения задач радиационного и сложного теплообмена в установках для выращивания монокристаллов.

Красноярский институт цветных металлов имени М. И. Калинина

Поступило в редакцию
25.II.1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Конаков П. К., Веревошкин Г. Е., Горяинов Л. А. и др. Тепло- и массообмен при получении монокристаллов. М.: Металлургия, 1971.
2. Arizumi T., Kobayashi N. J. Crystal Growth, 1972, v. 13–14, p. 615.
3. Мильвидский М. Г., Смирнов В. А., Старшинова И. В., Щелкин Ю. Ф. Изв. АН СССР. Сер. физ., 1976, т. 40, № 7, с. 1444.
4. Журавлев Ю. А. Изв. АН СССР. Неорганические материалы, 1980, т. 16, № 5, с. 819.
5. Журавлев Ю. А., Медюк Н. В., Гамеров С. А. и др. ТВТ, 1979, т. 17, № 6, с. 1278.

УДК 533.9

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА МЕТОДОМ ДВУХЦВЕТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Пятицкий Л. Н., Рак С. Л., Фомькин В. А., Якушев Г. Г.

Интерферометрия плазмы, для которой параметр $N_e l_p$ (N_e — концентрация электронов, l_p — протяженность области) лежит в диапазоне 10^{13} – 10^{16} см⁻², представляет определенные трудности. В данной работе исследовался разряд в импульсной лампе накачки. Измерены концентрации электронов и нейтральных частиц, соответствующие вышеупомянутому диапазону параметра $N_e l_p$.

При диагностике плазмы в подобных источниках зондирующее излучение проходит обычно вдоль оси разряда. В этом случае измеряемые параметры усредняются на длине l_p , составляющей несколько десятков сантиметров [1–3].

При исследовании пространственного распределения параметров плазмы часто возникает необходимость проведения зондирования в направлении, перпендикулярном оси разряда. Используемый в таком эксперименте интерферометр должен удовлетворять следующим требованиям: обладать высокой чувствительностью $N_e l_p \sim 10^{13}$ – 10^{14} см⁻²; иметь пространственное разрешение порядка 1 мм; слабо реагировать на пространственные градиенты концентрации. Относительно простые интерферометрические методы в области субмиллиметрового ($\lambda = 337$ мкм) и инфракрасного ($\lambda = 10,6$ мкм) диапазонов имеют недостаточное пространственное разрешение и чувствительны к градиентам концентрации. Указанные недостатки можно преодолеть, переходя к многолучевой интерферометрии в видимом диапазоне. Известно, что пространственное разрешение этого метода пропорционально $\lambda^{1/2}$, а допустимое значение градиента концентрации электронов, не влияющее на работу интерферометра, пропорционально $\lambda^{-3/2}$ [4].

Показатель преломления плазмы и концентрации ее компонент связаны соотношением [5]

$$n = 1 + 2\pi \Sigma \alpha_k(\omega) N_k - 1/2 (\omega_p / \omega)^2, \quad (1)$$

где α_k , N_k — поляризуемость и концентрация нейтральных частиц или ионов k -го сорта; ω — частота зондирующего излучения; $\omega_p = (4\pi e^2 N_e / m_e)^{1/2}$ — плазменная частота. Для низкотемпературной плазмы основной вклад в показатель преломления дают

электроны и нейтральные частицы в основном состоянии, тогда (1) записывается в виде

$$n = 1 + 2\pi\alpha_0 N_0 - 4,49 \cdot 10^{-14} \lambda^2 N_e, \quad (2)$$

где α_0 , N_0 — поляризуемость и концентрация нейтральных частиц в основном состоянии. Экспериментальное определение вклада различных компонент плазмы в ее показатель преломления требует перехода к многоцветной интерферометрии. В данной работе для измерений выбрано излучение He-Ne-лазера, имеющего сильные линии излучения, длины волн которых существенно отличаются друг от друга.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, а. Созданный авторами предлагаемой работы опытный образец He-Ne-лазера давал одновременно стабильную одномодовую генерацию на каждой из двух длин волн. Мощности излучения лазера составляли 2,5 и 4 мВт для $\lambda_1 = 0,63$ мкм и $\lambda_2 = 3,39$ мкм соответственно. Многолучевой интерферометр, образованный зеркалами M_{1-3} , собран по кольцевой

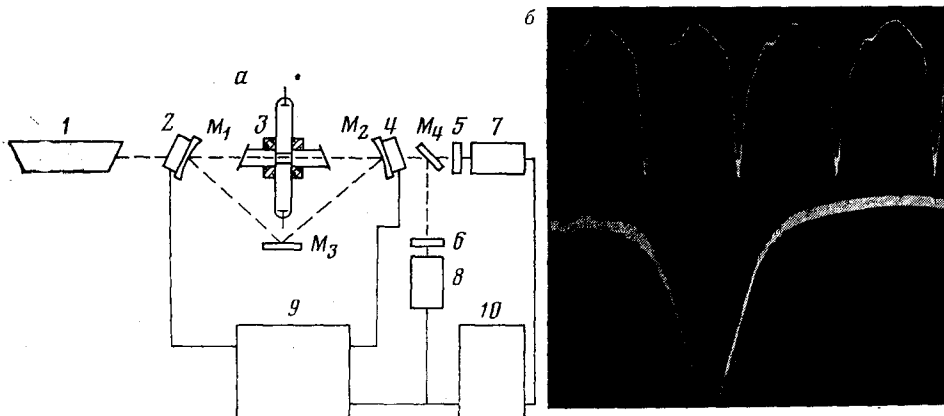


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и функции пропускания интерферометра (б): 1 — He-Ne-лазер; 2, 4 — пьезокерамические цилиндры; 3 — лампа накачки; 5, 6 — фильтры; 7, 8 — фотоприемники; 9 — электронная система автоподстройки; 10 — осциллограф; M_{1-3} — зеркала интерферометра; M_4 — полупрозрачное зеркало

схеме, что позволило оптически развязать резонаторы лазера и интерферометра. Тем самым было получено высокое временное разрешение (не хуже 1 мкс) и обеспечена независимость работы интерферометра на отдельных длинах волн. Пространственное разрешение было не хуже 2 мм. Осциллограммы пропускания интерферометра при линейном изменении его оптической длины показаны на рис. 1, б, где верхняя кривая соответствует λ_1 , нижняя — λ_2 .

Для получения высокой чувствительности (на коротких длинах волн зондирующего излучения) лазерный интерферометр работает в режиме одного максимума кривой пропускания. Возможность работы в таком режиме достигается применением электронной системы автоматической подстройки относительных оптических длин резонаторов лазера и интерферометра. Система автоподстройки компенсирует относительные изменения оптических длин резонаторов лазера и интерферометра, обусловленные температурными нестабильностями и механическими вибрациями, и удерживает лазерную линию в максимуме пропускания интерферометра. Система автоподстройки включает в себя электронную схему 9, фотоумножитель 8 и пьезокерамические цилиндры 2, 4, на которых укреплены зеркала интерферометра M_1 и M_2 .

Плазма в лампе накачки 3, заполненной аргоном до давления $p = 130 - 1300$ Па, создавалась разрядом емкости $C = 2$ мкФ. Предварительно на лампу подавался мало-мощный высоковольтный импульс — поджиг. Длительность импульса тока 20 мкс, максимум тока 500 А. Для ввода зондирующего излучения в средней части разрядной трубки лампы накачки сделаны окна из кварца под углом Брюстера.

Максимальная частота обработки системой автоподстройки внешних возмущений 10 кГц. Поэтому за время существования плазмы система автоподстройки не успевает среагировать, и пропускание интерферометра изменяется, что регистрируется приемниками излучения.

По изменению пропускания интерферометра и калибровочным функциям пропускания можно определить изменение оптической длины резонатора интерферометра $\delta L(\lambda)$ и, следовательно, показатель преломления плазмы $n(\lambda)$

$$\delta L(\lambda) = [n(\lambda) - 1] l_p.$$

Значения N_e и N_0 можно найти, решая систему двух уравнений типа (2), соответствующих длинам волн λ_1 и λ_2 с экспериментально определенными левыми частями $n(\lambda_1)$ и $n(\lambda_2)$.

На рис. 2, а приведены интерферограммы-хронограммы разряда в аргоне при давлении 1300 Па. Верхняя кривая соответствует интерферометрическому сигналу

для $\lambda_1=0,63$ мкм, нижняя — для $\lambda_2=3,39$ мкм. В левой части интерферограммы для λ_1 виден сигнал, вызванный импульсом поджига.

Результаты обработки интерферограмм представлены на рис. 2, б. Здесь $\langle N_e \rangle$ и $\langle N_0 \rangle$ — концентрации электронов и нейтральных частиц, усредненные на длине l_p , равной внутреннему диаметру лампы накачки (10 мм). На этом же рисунке представлена форма импульса тока (максимум 500 А).

Интерферограммы для длин волн λ_1 и λ_2 существенно отличаются друг от друга. Длина волны λ_1 более чувствительна к нейтральной компоненте плазмы, и после прохождения импульса тока на интерферограмме хорошо видно уменьшение пропускания интерферометра и на его фоне более быстрые колебания пропускания. Эти результаты находятся в хорошем согласии с [2, 3] и объясняются вытеснением газа из осевых областей трубки к стенкам и колебаниями его плотности на пути зондирующего луча.

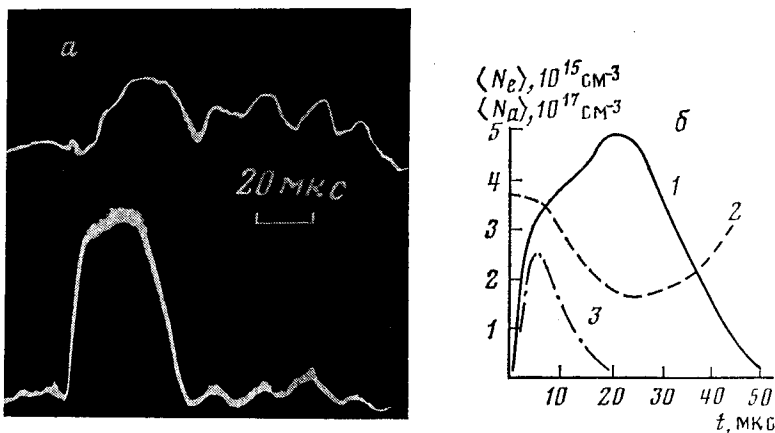


Рис. 2. Интерферограммы-хронограммы разряда в аргоне ($p=1300$ Па) и результаты их обработки (б): 1 — $\langle N_e \rangle$; 2 — $\langle N_0 \rangle$; 3 — I

Чувствительность интерферометра определяется полушириной функции пропускания α и точностью удержания рабочей точки в вершине максимума пропускания. Особенностью работы схемы автоподстройки является то, что рабочая точка совпадает малые колебания около вершины. Амплитуда колебаний составляла 0,05 полуширины функции пропускания. Схема автоподстройки работала на длине волны 0,63 мкм. Для работы интерферометра в пределах одного максимума пропускания с данным источником плазмы подобраны величины $\alpha_1=0,11$ и $\alpha_2=0,13$. При этих условиях чувствительность интерферометра на длине волны 3,39 мкм составляла 0,002 порядка интерференции. Это соответствует концентрации электронов 10^{14} см^{-3} при длине плазмы 1 см.

Анализ полученных интерферограмм позволяет сделать следующие выводы. Плазма является сильно неоднородной — происходит вытеснение ~50% нейтрального компонента плазмы из осевых областей разрядной трубки к ее стенкам. На фоне вытеснения существуют сильные колебания плотности нейтралов. Максимальное значение концентрации электронов достигается к концу импульса тока и составляет $\langle N_e \rangle \sim 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Спад $\langle N_e \rangle$ до значения 10^{14} см^{-3} происходит за 30 мкс. Колебания плотности затухают за время ~100 мкс, однородное распределение восстанавливается за несколько сотен микросекунд.

Следует отметить, что для исследованных параметров плазмы одноцветная интерферометрия в видимой области привела бы к ошибочным результатам для электронной концентрации $\langle N_e \rangle$ (изменила бы ее в несколько раз). Только применение двух длин волн позволило определить вклад электронов и нейтральных частиц в показатель преломления плазмы при $\lambda_1=0,63$ мкм.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
1.II.1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутовой В. Д., Петров Г. Д., Самарский П. А., Трегубов С. И. Физика плазмы, 1975, т. 1, № 5, с. 857.
2. Скрёбов В. И., Скрипиченко А. И. ТВТ, 1981, т. 19, № 3, с. 469.
3. Новгородов М. З., Соболев Н. Н., Шумская Л. И. Квантовая электроника, 1980, т. 7, № 11, с. 2326.
4. Пятницкий Л. Н. Лазерная диагностика плазмы. М.: Атомиздат, 1976.
5. Диагностика плазмы / Под ред. Хаддлстоуна Р., Леонарда С. М.: Мир, 1967.