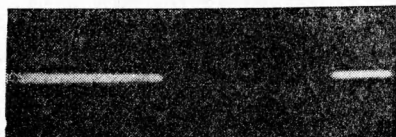


## ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ, ОБРАЗОВАННОЙ ПУЧКОМ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

А. В. Колосов

(Новосибирск)

Для исследования газовых и плазменных потоков широкое распространение начинает получать зондирование их пучками ускоренных электронов [1,2]. Электроны пучка, сталкиваясь с частицами исследуемого газа, ионизуют их, образуя самостоятельную плазму или повышая концентрацию ионов исследуемой плазмы. Это может вносить значительную погрешность в результаты измерения параметров плазмы, поэтому может встать вопрос о необходимости оценки такой погрешности, что может быть сделано при



Фиг. 1

помощи исследования параметров плазмы, образованной ионизацией газа пучком ускоренных электронов

Кроме того, при ионизации газа пучком электронов получается плазма, параметры которой (концентрацию электронов  $N$ , эффективную частоту соударений электронов и др.) можно легко менять, выбирая соответствующий род газа, меняя давление газа, ток и энергию электронов пучка и т. д.

Для некоторых применений может быть важным изменение или перемещение области плазмы, образованной пучком электронов

Известные по литературе [3,4] экспериментальные данные относятся к ионизации разреженного газа (давление газа было от  $10^{-5}$  до  $10^{-2}$  мм рт. ст.) импульсными пучками (длительность импульса порядка нескольких мксек). При малых длительностях импульса пучка и давлении газа основную роль при образовании плазмы играют ионизационные процессы, так как рекомбинация и диффузия электронов малы. Поэтому соотношения, полученные для указанного случая, не будут верны для случая ионизации газа стационарным пучком электронов.

В данной работе приведены предварительные результаты измерения концентрации электронов в плазме, образованной ионизацией газа пучком быстрых электронов, с током пучка, меняющимся в пределах от 0.1 до 0.6 ма для трех различных газов (воздух, гелий, аргон).

Измерялась средняя по поперечному сечению пучка концентрация электронов в плазме. Диаметр столба плазмы принимался равным диаметру ярко светящейся области газа, ионизованного пучком (фиг. 1). Эта модель несколько огрубляет действительную картину явления в пучке, так как не учитывает неравномерности распределения электронов по сечению пучка и диффузии электронов за ярко светящуюся область. Однако учет этих явлений представляется весьма сложным.

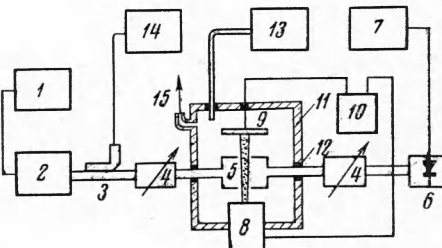
Измерение концентрации электронов в плазме производилось сверхвысокочастотным резонаторным методом в трехсантиметровом диапазоне длин волн [5]. Для работы был выбран цилиндрический резонатор с колебаниями типа  $TM_{010}$ , вдоль оси которого направлен пучок электронов. Диаметр резонатора 26.4 мм, высота 10 мм.

Концентрация электронов в плазме определялась обычным способом: по изменению коэффициента передачи и по сдвигу резонансной частоты резонатора при прохождении через него пучка электронов.

Блок-схема экспериментальной установки показана на фиг. 2.

Энергия СВЧ колебаний с частотой 8530 мГц от клистронного генератора подводится к резонатору, находящемуся вместе с подводящими волноводами в вакуумной камере с регулируемым натеканием газа, что позволяет менять давление ионизируемого газа в нужных пределах.

Связь резонатора с подводящими волноводами осуществляется при помощи круговых диафрагм. Между резонатором и детекторной головкой помещен дополнительный развязывающий аттенуатор для устранения возможных паразитных резонансов, возникающих в линии связи между резонатором и детекторной головкой.

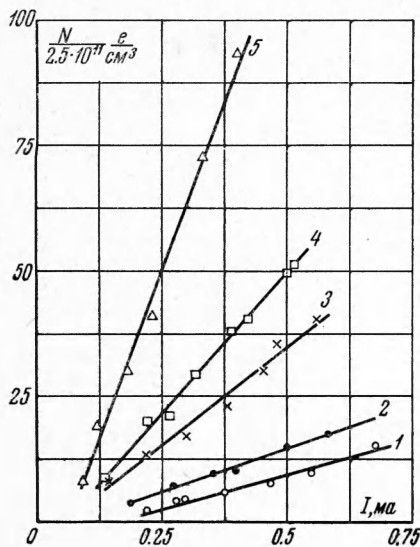


Фиг. 2

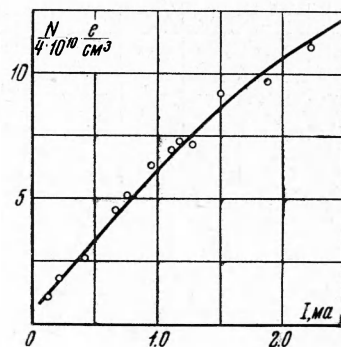
В верхней и нижней крышках резонатора по его оси сделаны отверстия диаметром 4 мм для прохождения пучка электронов, имеющего диаметр 1.5 мм. Источником пучка ускоренных электронов является электронная пушка с вольфрамовым катодом, с магнитной фокусировкой. Вывод пучка осуществляется через газодинамическое окно с дифференциальной откачкой. Ускоряющее напряжение пучка менялось от 15 до 30 кВ, ток пучка — от 0 до 0.6 — 2.5 мА. Давление исследуемого газа в эксперименте менялось

в пределах от 0.2 до 2.5 мм рт. ст. Пределы изменения давления газа и тока пучка ограничены сверху и снизу возможностями данной установки и метода измерения.

Как видно из фотографии (фиг. 1), при выходе из выпускного отверстия пушки пучок электронов для исследуемого диапазона давлений газа получается слабо рас-



Фиг. 3

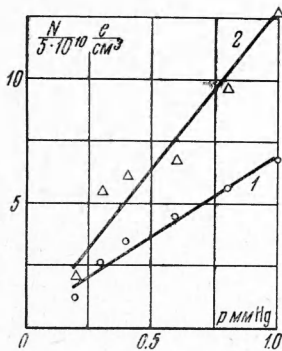


Фиг. 4

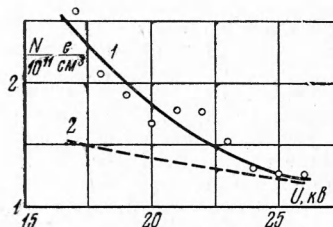
ходящимся, что позволяет считать диаметр пучка в области его прохождения через резонатор постоянным.

После прохождения через резонатор электроны пучка попадают на коллектор.

Экспериментальные кривые, характеризующие зависимость концентрации электронов в плазме от тока пучка при постоянном ускоряющем напряжении  $U = 22$  кВ для различных давлений воздуха, показаны на фиг. 3. Видно, что в исследуемом диапазоне давлений и токов концентрация электронов в плазме линейно возрастает с возрастанием тока пучка.



Фиг. 5



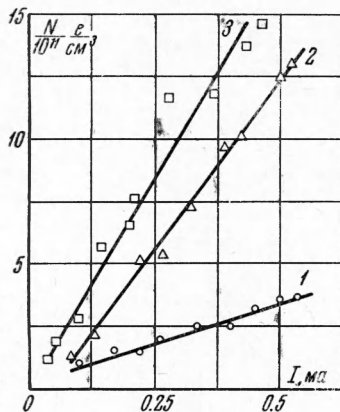
Фиг. 6

Для давления  $p = 0.2$  мм рт. ст. зависимость была снята в несколько более широком диапазоне изменения тока (ток пучка менялся в пределах от 0.1 до 2.5 мА). Из фиг. 4 видно, что при токе пучка выше 1.2 — 1.5 мА зависимость концентрации от тока становится слабо нелинейной; концентрация растет медленнее тока.

Полученные значения концентраций электронов в плазме для разных значений давления газа и тока пучка лежат в пределах от  $2 \cdot 10^{10}$  до  $2 \cdot 10^{12}$  эл см<sup>-3</sup>. (Для сравнения скажем, что расчетное значение концентрации электронов в моноэнергетическом первичном пучке, т. е. без учета ионизации газа, для тока пучка 0.5 мА будет порядка  $2 \cdot 10^7$  эл см<sup>-3</sup>.)

На графиках фиг. 5 приведена зависимость концентрации электронов в плазме от давления для двух постоянных значений тока пучка: 0.2 и 0.35 ма. Видно, что зависимость концентрации от давления также получается примерно линейная, хотя окончательного вывода об этом из-за недостаточного количества экспериментальных точек и сильного их разброса делать нельзя.

На фиг. 6 приведена зависимость концентрации электронов в плазме от ускоряющего напряжения  $U$  при постоянном токе пучка  $I = 0.3$  ма и давлении газа (воздуха)  $p = 0.4$  мм рт. ст. Видно, что с повышением ускоряющего напряжения концентрация электронов в плазме уменьшается.



Фиг. 7

На этой же фигуре приведена расчетная кривая 2, показывающая зависимость концентрации первичных электронов в пучке (т. е. без учета ионизации) от ускоряющего напряжения, если ток пучка остается постоянным. Сравнение этой кривой с экспериментальными точками показывает, что концентрация электронов в плазме с уменьшением ускоряющего напряжения растет значительно быстрее, чем концентрация первичных электронов в пучке, что вызвано увеличением сечения ионизации.

На фиг. 7 приведены для сравнения графики зависимости концентрации электронов от тока пучка для аргона и гелия, из которых видно, что для гелия концентрации электронов получаются значительно ниже, а для аргона выше, чем для воздуха при соответствующих значениях тока пучка и давления газа.

Заметим, что и для аргона и для гелия зависимость концентрации от тока в исследуемом диапазоне линейная, как и для воздуха.

Таким образом, экспериментальное исследование ионизации газов пучком моноэнергетических электронов показало, что при помощи пучка электронов можно получить плазму, концентрацию электронов в которой можно варьировать в широких пределах, выбирая соответствующий род газа, меняя давление газа, ток пучка, ускоряющее напряжение пучка.

Полученные значения концентрации электронов плазмы лежат в пределах от  $2 \cdot 10^{10}$  до  $2 \cdot 10^{12}$  эл см<sup>-3</sup>, что на три-пять порядков превышает концентрацию первичных электронов в пучке. Этот диапазон безусловно может быть расширен изменением тока пучка и давления газа в более широких пределах, чем это делалось в эксперименте.

Поступила 1 IV 1967

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н а р р R. S., С а п п а г а А. В., С r a w f o r d F. W., К и н о G. S. Electron beam probing of plasmas Rev. Sci. Instrum., 1965, vol. 36, No 7.
2. К р у ц н и к Л. И., Ш у л и к а Н. П., Д а н ч е н к о П. А. Определение плотности, степени ионизации и электронной температуры плазменных сгустков методом зондирования пучками быстрых частиц. Сб. «Исследование плазменных сгустков», 1965.
3. Б е р е з и н А. К., С т у и а к В. Г., Б о л о т и н Л. И., Б е р е з и н а Г. П. О прохождении интенсивных импульсных электронных пучков через диэлектрические трубки. Ж. техн. физ., 1962, т. 32, № 5, стр. 539.
4. Б е р е з и н А. К., Б е р е з и н а Г. П., Б о л о т и н Л. И., Ф а й н б е р г Я. Б. О взаимодействии импульсных сильноточных пучков с плазмой в магнитном поле. Атомная энергия, 1963, т. 14, 3, стр. 249.
5. A d l e r F. P. Measurement of the complex conductivity of an ionized gas at microwave frequencies. I. Appl. Phys., 1949, vol. 20, No. 11.