Экспериментальная плазменная релятивистская СВЧ электроника

Стрелков П.С.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия

В середине двадцатого века была теоретически предсказана неустойчивость электронного пучка в плазме. Вскоре пучковая неустойчивость была обнаружена в эксперименте. Электронный пучок почти полностью терял свою энергию в плазме длиной 1 м, тогда как при учёте только столкновений электронов пучка с ионами плазмы длина пробега электронов должна быть на несколько порядков выше. Энергия пучка переходила в высокочастотное поле, которое нагревало плазму и излучалось. Затем начались фундаментальные экспериментальные работы с целью определения параметров СВЧ поля при изменении плотности плазмы и величины продольного магнитного поля, фокусирующего электронный пучок. Прикладные работы, основанные на эффекте пучковой неустойчивости, были направлены на нагрев плазмы в магнитных ловушках, на ускорение заряженных частиц в СВЧ поле внутри плазмы и наконец, для создания источников СВЧ излучения. Все эти эксперименты проводились на пучках с энергией электронов 10 – 30 кВ, т.е. на нерелятивистских электронных пучках. Ток пучка менее 50 А. В 1965 году появились так называемые сильноточные релятивистские ускорители с энергией электронов около 1 МэВ и током в десятки килоампер. Через несколько лет появились такие ускорители и в СССР. Начались прикладные работы, аналогичные тем, которые проводились ранее с нерелятивистскими электронными пучками. Особый интерес к этим пучкам связан с их большой мощностью — более 1 ГГВт.

В 1973 году в лаборатории « Физика плазмы» ФИАНА (сейчас это отдел ИОФ РАН-а) совместно с сотрудниками ИПФАНА был создан первый в мире СВЧ источник на сильноточном релятивистском электронном пучке. Это была вакуумная лампа обратной волны. Мощность излучения на длине волны 3 см составляла несколько сотен мегаватт, возникло новое направление — релятивистская СВЧ электроника. В этой же лаборатории в этом же году начались работы по плазменной релятивистской СВЧ электронике, и в 1982 году был проведён первый успешный эксперимент. В других лабораториях появились исследования вакуумных СВЧ источников на релятивистских электронных пучках, в которых добавление плазмы приводило к улучшению их параметров. Мы продолжили те исследования нерелятивистской СВЧ электроники, которые были основаны на возбуждении собственных волн плазменного волновода. Без плазмы они не работают. Одно из основных отличий плазменной СВЧ электроники от вакуумной состоит в возможности быстрого управления свойствами электродинамической системы СВЧ источника изменением плотности плазмы.

Переход к сильноточным релятивистским электронным пучкам привлекателен по двум причинам. Первая — появилась возможность резко повысить мощность СВЧ излучения. Вторая — фазовая скорость волны в плазме стала близкой к скорости света, что значительно упрощает ввод и вывод СВЧ излучения из плазмы, что в свою очередь позволяет делать широкополосные СВЧ источники.

К настоящему времени созданы плазменные СВЧ генераторы, в которых частота излучения перестраивается от одного импульса к другому в несколько раз. Мощность излучения 50 – 100 МВт, длительность СВЧ импульса на разных ускорителях 20, 60, 500 нс. Показано, что частотой излучения СВЧ генератора можно управлять быстро — можно её изменять в каждом из 20 СВЧ импульсов, следующих с частотой 20 Гц. Создан СВЧ усилитель с полосой усиления от 9 до 13 ГГц. Мощность излучения 40 МВт, длительность СВЧ импульса 60 нс. Создан СВЧ усилитель в полосе частот 2,4 – 3,1 ГГц. Доказано постоянство структуры СВЧ пучка на выходе из рупора на разных частотах, что даёт возможность создать эффективную антенну. Мощность излучения более 100 МВт, длительность СВЧ импульса 500 нс. Большая часть доклада посвящена изложению результатов экспериментальных исследований, которые привели к созданию выше перечисленных плазменных релятивистских СВЧ источников.