

Численные модели электронных пучков для мазеров на циклотронном резонансе

А.Д. Кунцевич, В.Н. Мануилов

Нижегородский госуниверситет

1. Введение

В гиротронах, наиболее мощных источниках электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн от миллиметрового до субмиллиметрового, в качестве активной среды (источника энергии излучения) используются трубчатые пучки электронов, движущихся по винтовым траекториям в магнитном поле (так называемые винтовые электронные пучки - ВЭП). Моделирование и оптимизацию параметров ВЭП целесообразно проводить на основе иерархии последовательно усложняющихся численных моделей, позволяющих проводить за приемлемое время анализ сначала в рамках статической модели для минимизации разброса скоростей частиц, а затем и динамической модели для оценки устойчивости ВЭП.

2. Методика моделирования

Наиболее экономичным подходом при решении уравнения Пуассона в рамках статической модели оказывается комбинация метода интегральных уравнений и метода сеток. Первый позволяет рассчитывать потенциал только в узкой полосе, где распространяется пучок и отдельно учесть кулоновское поле удаленных и ближайших к точке наблюдения зарядов пучка, второй резко ускоряет процедуру расчета поля по вычисленным в узлах сетки потенциалам. Дополнительная экономия времени расчета достигается за счет так называемой методики «холостых узлов», которая позволяет проводить вычисление потенциала только в тех узлах сетки, которые входят в текущий конечно-разностный шаблон, используемый для расчета.

Анализ ВЭП по динамической модели усложняется учетом таких дополнительных факторов как отражение электронов сначала от магнитного, а затем и от электростатического зеркал, электронной бомбардировкой катода и возникающей вследствие этого вторичной эмиссией частиц и наконец – накоплением запертых в адиабатической ловушке между указанными зеркалами захваченных частиц. Отметим, что в области электронных зеркал частицы движутся с малой продольной скоростью, что также оказывается дополнительным усложняющим фактором для численных методов.

Описана физическая модель, учитывающая наиболее существенные факторы, влияющие на захват частиц и возникновение колебательных режимов в ВЭП (тепловые скорости, шероховатости эмиттера, поле пространственного заряда, отражение от электронных зеркал, вторично-эмиссионное размножение захваченных частиц при бомбардировке катода). Обсуждаются подходы, позволяющие значительно (на порядок и более) сократить время вычислений при числе частиц несколько миллионов за счет использования параллельных вычислений на основе Posix threads, OpenMP, TPL. Приведены первые примеры расчетов на суперкомпьютерном кластере ННГУ «Лобачевский». Проведено сравнение процессов захвата и развития колебательных режимов в ВЭП для МЦР различных частотных диапазонов.