

Разработка ПО на основе Лагранжева описания движения частиц для неструктурированных сеток

И.В. Куликова, Н.К. Приступчик

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: в работе представлены результаты тестирования Pre-Alpha версии специализированного программного обеспечения (решателя электронно-оптических задач). Решатель построен на сопряжении РС метода для траекторного анализа и МКО для расчета электрического поля на неструктурированной сетке. Особенностью решателя является использование методики и алгоритма пересчета траекторий в концентрацию электронов без полного перебора элементов. В качестве тестовой задачи используется электронная пушка Пирса и пушка с кольцевым катодом.

Ключевые слова: МКО, РС, электронная оптика, неструктурированные сетки

1. Введение

Импортозамещение универсального коммерческого программного обеспечения (ПО) важно, но кроме этого существует такой важный аспект при разработке ПО как специализация. Именно специализация позволяет значительно сокращать время расчетов без потери качества, поскольку на базовом уровне учитывает важные особенности постановки задачи и пренебрегает несущественными.

Традиционно для решения задач электронной оптики используется самосогласованное решение уравнения движения электронов и уравнения Пуассона. Для применения гидродинамического подхода (метод Эйлера) необходимо решать задачу в фазовом пространстве, что увеличивает размерность в 2 раза [1–3]. Для электровакуумных приборов (ЭВП) это увеличивает количество элементов при численном решении на порядки, хотя работы по решению задач этим методом ведутся [1–3], но пока коммерческого ПО нет. Поэтому до настоящего времени уравнение движения электронов решается методом Лагранжа (РС методы и методы трубок тока), а затем различными способами заряд интерполируется в ячейки сетки [1, 4]. Для структурированных сеток эта задача решается просто, а вот для неструктурированных сеток необходимо применять алгоритмы перебора для нахождения номера элемента, что значительно увеличивает время счета.

2. Постановка задачи и описание методов ее решения

Целью работы является разработка ПО для моделирования электронной оптики с рядом особенностей:

- 1) постановка задачи в 2D системе координат;
- 2) система координат – цилиндрическая;
- 3) использование неструктурированных сеток, для более точного описания геометрических особенностей электронных пушек ЭВП;
- 4) стационарная задача.

Ограничения пунктов 1,2,4 позволяют сократить время расчетов, в то время как пункт 3 увеличивает время расчетов за счет необходимости перебора элементов для расчета правой части уравнения Пуассона. Для сокращения времени расчета концентрации используется разработанный алгоритм, построенный на расчете шага численного интегрирования уравнения движения частиц по времени. Это позволяет

сократить количество элементов при переборе до 10 и менее не зависимо от количества элементов в модели.

Уравнение Пуассона решается методом контрольных объемов. Порядок элементов по потенциалу повышается интерполяционным методом. Для нахождения электрического поля используется метод наименьших квадратов.

Плотность тока на катоде задается законом степени 3/2 [5–7].

Невязка рассчитывается по потенциалу.

В качестве сеточного генератора и постпроцессора используется генератор конечно-элементной сетки Gmsh, выпущенный под открытым лицензионным соглашением GNU GPL [8].

3. Описание тестовых задач и результаты их решения

В качестве тестовой задачи была использована пушка Пирса [5], ее математическая модель с граничными условиями, геометрия с неструктурированной сеткой представлены на рисунке 1. Результаты решения данной задачи приведены на рисунках 2 и 3.

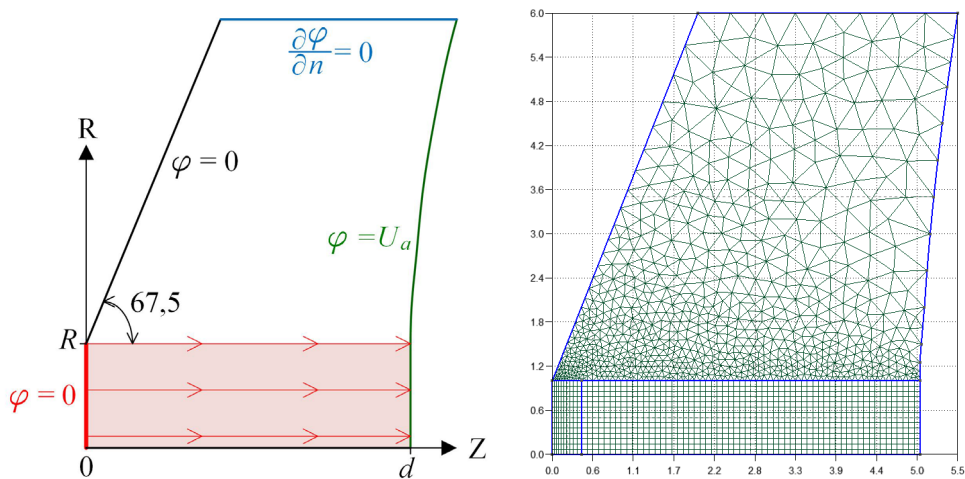


Рисунок 1. 2D модель пушки Пирса и неструктурированная сетка.

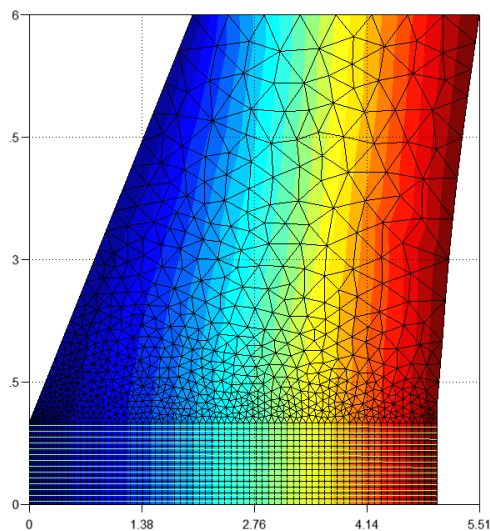


Рисунок 2. Распределения потенциала и траектории (зеленые линии) электронов.

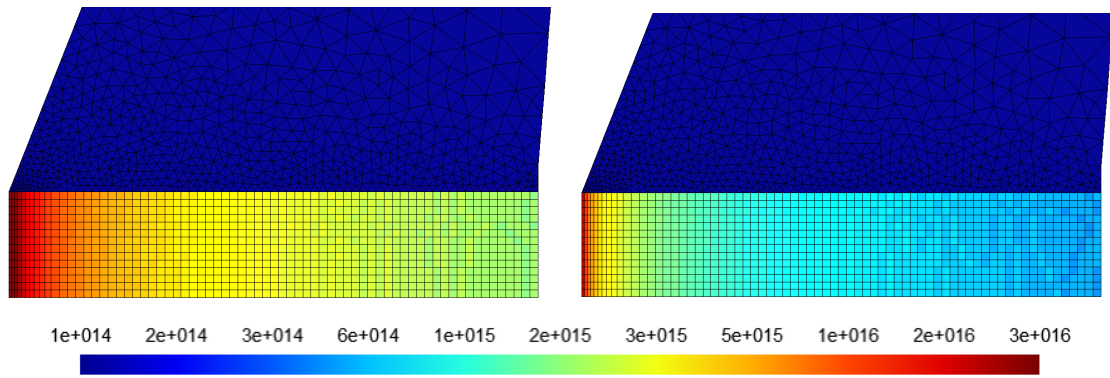
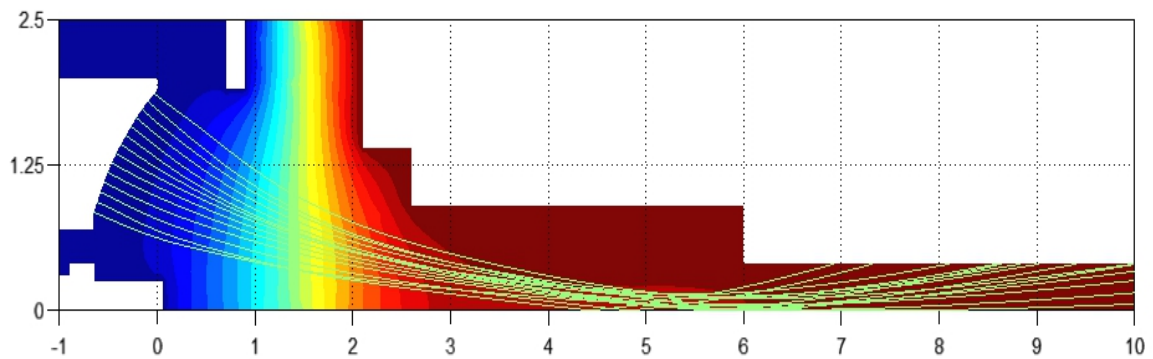


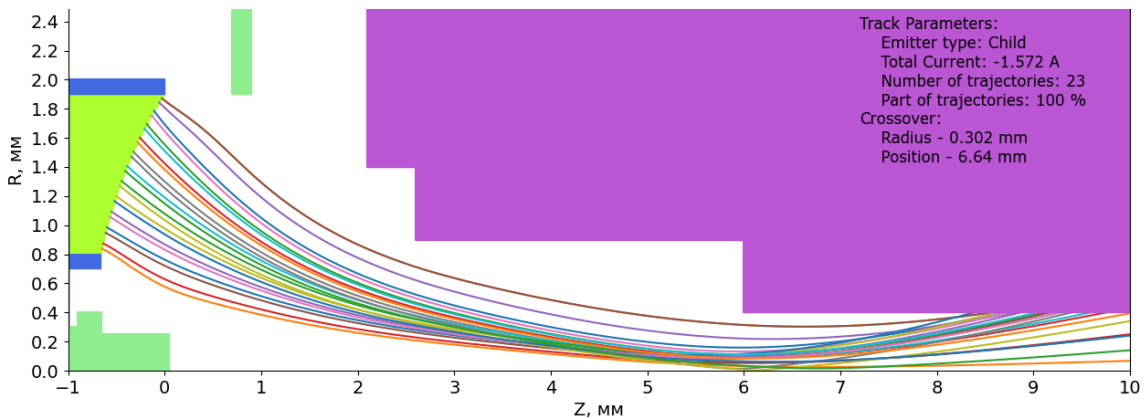
Рисунок 3. Распределение концентрации электронов при напряжении на аноде 2 кВ и 0,5 кВ.

На рисунке 4 представлены результаты расчета электронной пушки с кольцевым катодом в разработанном ПО (рис. 4 а) и коммерческом ПО (рис. 4 б).

Время решения задачи объемом в 3 тыс. элементов составляет 1 минуту. Разница в расчетах по току с коммерческим ПО (результаты, представленные на рисунке 4) и аналитическим решением (пушка Пирса) менее 7% .



а)



б)

Рисунок 4. Траектории электронов в разработанном (а) и коммерческом ПО (б).

4. Заключение

Даже Pre-Alpha версия ПО показала удовлетворительные результаты по току и хорошую скорость расчетов. Планируется вести дальнейшую работу по следующим направлениям:

- повышение порядка элементов;
- добавление распараллеливания;
- добавление магнитного поля.

Авторы благодарят Байдака Владимира Алексеевича за предоставленные результаты моделирования, представленные на рисунке 4 б.

Список литературы

1. Куликова, И. В. Методы моделирования электронного газа в плоском диоде // Суперкомпьютерные дни в России = Russian Supercomputing Days: труды международной конференции, Москва, 27–28 сентября 2021 года. – 2021. – Москва: ООО "МАКС Пресс" – С. 159-160. – EDN JAXHPU.
2. Куликова И.В. Построение ВАХ вакуумного диода на основе численного решение уравнения Власова–Пуассона // Прикладная физика. – 2020. – № 2. – С. 27-33.
3. Vogman, Genia & Colella, Philip & Shumlak, Uri. High-order continuum kinetic method for modeling plasma dynamics in phase space // AIP Conference Proceedings. – 2014. – 1639. – pp. 146-149. doi: 10.1063/1.4904797.
4. Petillo et al.: The MICHELLE three-dimensional electron gun and collector modeling tool: theory and design // IEEE Transactions on plasma science. – June 2002. – Vol. 30. – No. 3.
5. Pierce, J. R. Rectilinear Electron Flow in Beams // Appl. Phys. – 1940. – pp. 548-554.
6. C. D. Child. Discharge from hot CaO // Phys. Rev. – 1911. 32. – pp. 492.
7. C. E. Fay, A. L. Samuel, and W. Shockley. On the theory of space charge between parallel plane electrodes // Bell Sys. Tech. J. 17. – 1938. – pp. 49-79.
8. C. Geuzaine and J.-F. Remacle. Gmesh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities // International Journal for Numerical Methods in Engineering 79(11). – 2009. – pp. 1309-1331.