

Устойчивость работы микроканальных усилителей в сильных магнитных полях

В работе описаны физико-математические модели микроканальных усилителей (МКУ), применяемых в качестве детекторов элементарных частиц, в медицинской диагностике и в астрофизике. Проведено численное исследование зависимости основных характеристик МКУ от величины и ориентации внешнего магнитного поля. Проведено сравнение численных результатов и экспериментальных данных для вариантов усилителей, исследованных в Институте ядерной физики СО РАН.

Ключевые слова: микроканальный усилитель, фотоэмиссия, вторичная электронная эмиссия, магнитные поля, параллельные вычисления.

1. ВВЕДЕНИЕ

Целью проекта, осуществляемого в рамках гранта было создание прототипа усилителя слабых сигналов на основе микроканальных пластин (МКП) пикосекундного временного разрешения, который мог бы устойчиво работать в сильных магнитных полях до 4 Тл. Разработка такого протипа позволило бы существенно снизить стоимость фотодетекторов при их серийном производстве.

В методическом отношении эта работа потребовала создания методики сквозного проектирования МКУ от фотокатода до коллектора и пакета прикладных программ для расчета и оптимизации приборов в реальной трехмерной постановке с накоплением значительной по объему статистики для учета разброса параметров приборов, что потребовало массивных параллельных вычислений. К началу данной работы у автора имелась методика и программа сквозного проектирования МКУ в трехмерном приближении "MCS3" (Monte Carlo Simulator 3D), с помощью которой были получены основные результаты работы [1-5]. Обзор математических моделей для данного класса задач приведен в публикации [4] и в монографиях [6-7].

Принципиальная схема типичного МКУ представлена на рис.1. Он состоит их фотокатода (ФК), ускоряющего зазора L1, собственно МКП, пространства дрейфа L2 и анода. Здесь поток фотонов попадает на фотокатод, работающий в режиме пролета, выбивают фотоэлектроны, которые ускоряются в промежутке L1 до энергии, отвечающей максимуму выхода вторичной эмиссии для конкретного материала, нанесенного на поверхность каналов МКП. Толщина пластины обычно составляет 5-10 мм, а диаметр канала колеблется в пределах 10-30 микрон. Ось канала наклонена к направлению распространения фотоэлектро-

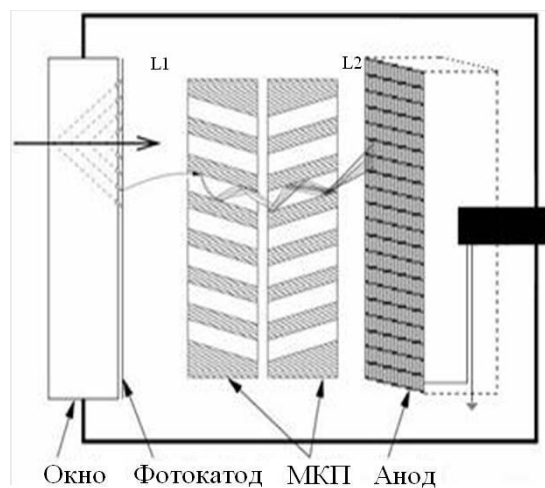


Рисунок 1. Схема усилителя

нов на угол 8-13 градусов для того, чтобы место первого удара электрона было как можно ближе к началу канала, поскольку оно определяет средний коэффициент усиления сигнала. На одной МКП можно получить коэффициент усиления до 10^6 , поэтому чаще используют так называемую «шевронную пару» пластин или комбинацию из трёх пластин (Z-stack), в которой каналы соседних пластин имеют противоположный угол наклона, чтобы исключить распространение ионов, рождаемых в канале, в направлении ФК, что может привести к деградации последнего. Коэффициент усиления для пары пластин может достигать десятков миллионов. При вылете вторичных электронов из МКП они распространяются в зазоре L2 в направлении анода, состоящего из двух наборов микрополосок, ориентированных ортогонально друг к другу. Попадая на полоски, эти электроны порождают выходные сигналы, позволяющие идентифицировать координаты (x,y) пучка.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КРАЕВЫХ ПОЛЕЙ

Краевые поля на входных отверстиях МКП влияют на коэффициент сбора фотоэлектронов. Поля на выходных отверстиях определяют угловые распределения вторичных электронов и коэффициент усиления тока, поскольку каскады вторичных электронов приводят к экспоненциальному росту тока вдоль оси каналов. Эти поля имеют сложную трёхмерную структуру. Сложность их расчёта определяется сильной разницей масштабов общего размера прибора, диаметра микроканалов и толщины напылений на поверхности каналов. Моделирование таких полей проводилось с использованием программы “COMSOL Multiphysics”. Численные результаты были представлены на конференции по приборостроению [8]. Они показаны на Рисунках 1-2.

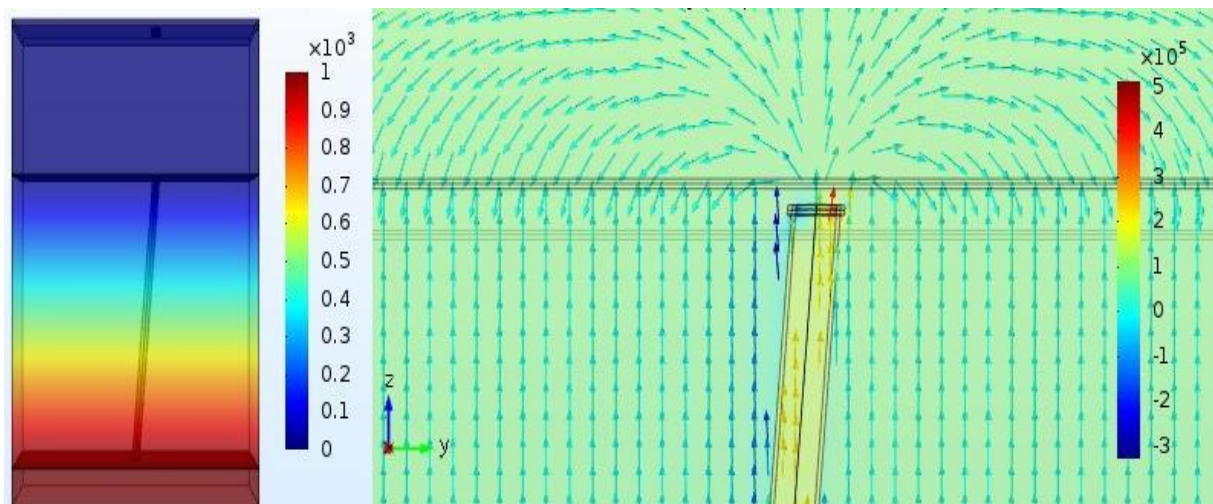


Рис. 1. Краевые поля. Распределение потенциалов в зазоре фотокатод-МКП и в теле МКП (слева) и картина силовых линий поля (справа).

Вычисления показали, что взаимное влияние соседних каналов на краевые поля

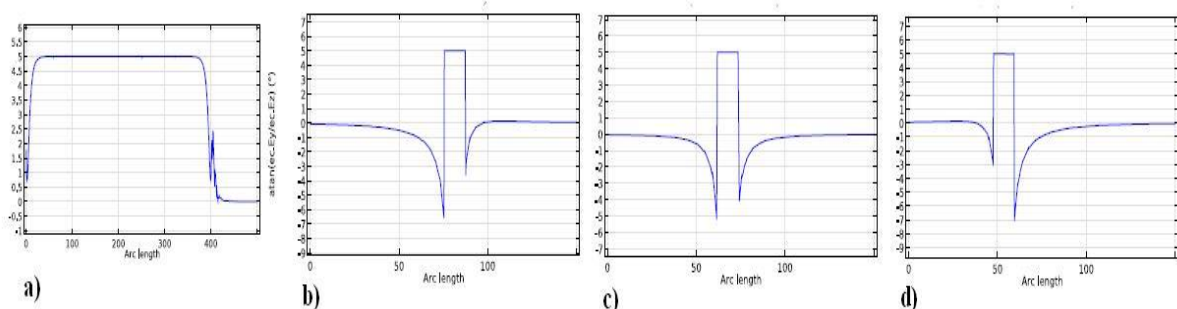


Рис. 2. Угол наклона электрического поля к оси МКП, в которой каналы имеют угол наклона в 5 градусов: а) вдоль оси канала; б) в сечении на входе в канал; с) в срединном сечении; д) в выходном сечении.

незначительно. Траектории фотоэлектронов показаны на Рисунке 3.

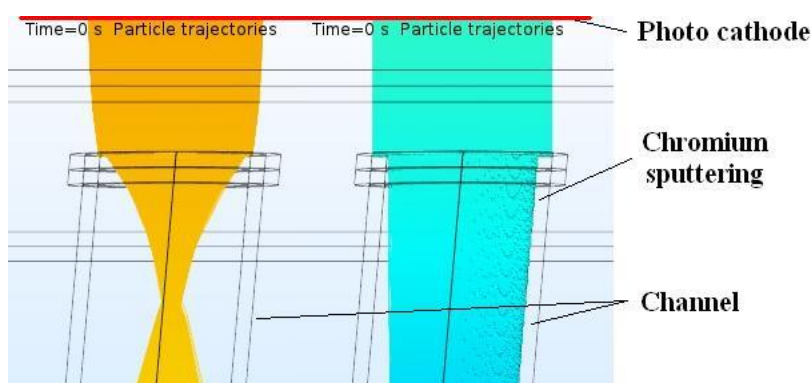


Рис. 3. Траектории фотоэлектронов в зазоре фотокатод-МКП. Слева при напряжении $U=0$ в зазоре, справа при напряжении $U=200$ В.

3. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ.

Расчеты проводились для сборок МКП разного типа, параметры которых приведены в Таблице 1. Экспериментальные результаты по этим сборкам опубликованы в работах [9-13].

Таблица 1. Параметры сборок МКП.

Тип	Марка	Диаметр канала, мкм	Калибр L/D	Угол наклона, град.	Зазор, μm
Single	89664	12.5	160	5	-
Chevron	74	6	50	5	100
Chevron	88353	7	40	13	100
Chevron	82015	10	40	5	100
Z-stack	418	7.5	43	5	100

Для сборки из трёх пластин (Z-stack 418) проведено численное исследование

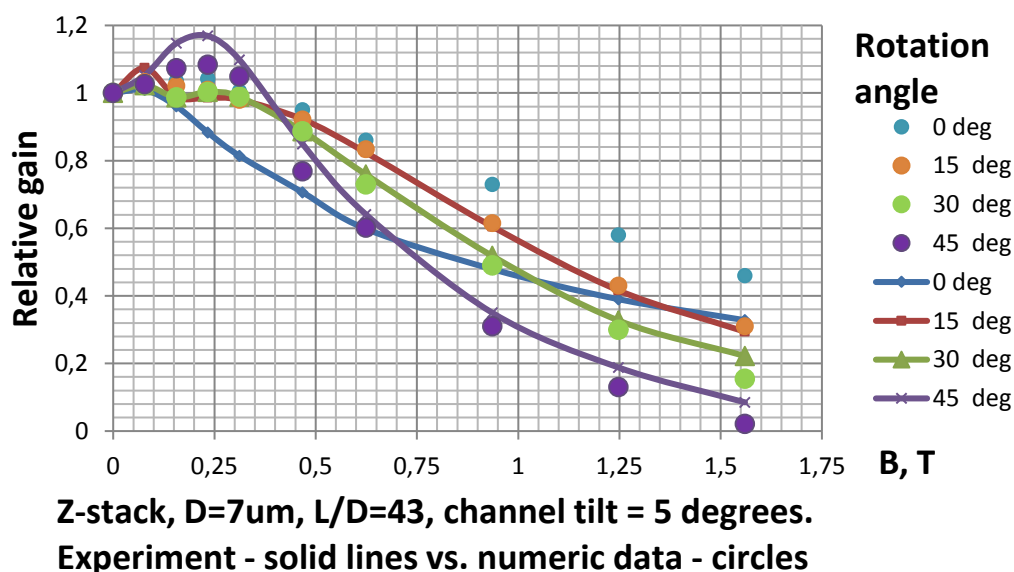


Рис. 4. Сравнение расчета и эксперимента для зависимости относительного коэффициента усиления от величины однородного магнитного поля и его наклона к оси прибора.

зависимости коэффициента усиления тока от параметров внешнего магнитного поля. Результаты сравнения с данными статьи [9] приведены на рисунке 4.

Численные данные зависимости коэффициента усиления от величины магнитного поля при нулевом угле наклона сравнивались с результатами публикации [13]. Они показаны на рисунке 5 для сборок из двух и трёх МКП различного диаметра. Приведённые данные требуют массивованных параллельных вычислений для построения достоверных кривых, чтобы набрать достаточно статистики, которая сглаживала бы результаты индивидуальных расчётов, зависящих от набора случайных данных для фотоэлектронов.

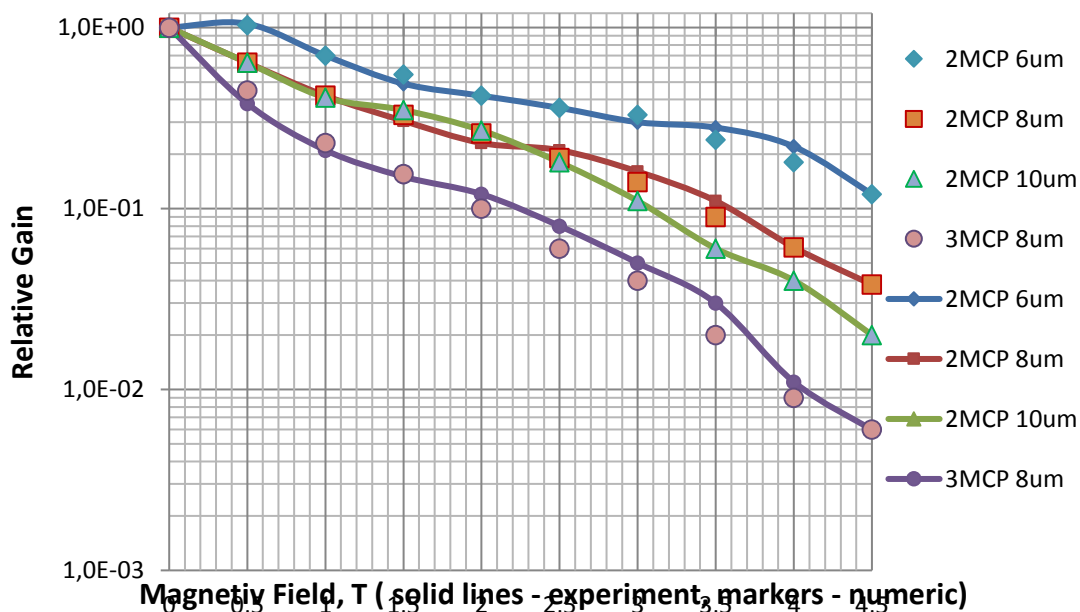


Рис. 5. Расчётные и экспериментальные данные для зависимости коэффициента усиления тока от величины магнитного поля.

Библиографический список

1. Z.Insepov, V.Ivanov, H.Frisch, Comparison of Candidate Secondary Electron Emission Materials, NIM B, 268(2010) 3315-3320.
2. V.Ivanov, Z.Insepov, S.Antipov, Gain and Timing Resolution Simulations in Saturated MCP Pores, NIM A, 52549 (2010) 02291-6.
3. Z. Insepov, V. Ivanov *et al.*, Comparison of Secondary Electron Emission Simulation to Experiment, NIM A, 52549 (2010).
4. В. Иванов, Численное моделирование быстрых фотодетекторов большой площади, Вестник СПбГУ, №4, Сер.10, Прикладная математика, 2011, с.14-31.
5. B. Adams, Z. Insepov, V.Ivanov *et al.*, Simulations of Fast X-Ray Detectors Based on Multichannel Plates. Proc. IPAC'12, 20-25 May, 2012, New Orleans, USA.-p.939-941.
6. Иванов В.Я., Методы анализа, оптимизации и синтеза приборов физической электроники.- Hmbg: Palmarium Academic Publishing, 2016.-548 с.
7. V. Ivanov. Computational methods, optimization and synthesis in electron optics.- Hmbg: Palmarium Academic Publishing, 2016.-525 pp.
8. V.Ivanov et al. Numerical simulations of fast photo detectors based on microchannel plates //12th International Conf. "Instrumentation for Colliding Beam Physics" INSTR-2017, February 27 – March 3, 2017, Novosibirsk.
9. M.Barnyakov et al. Development of aerogel Cherenkov counters with wavelength shifters and phototubes. NIM A, 419 (1988) 584-589.

10. A.Barnyakov et al. R&D of microchannel plate phototubes. NIM A, 567 (2006) 17-20.
11. A.Barnyakov et al. Investigation & development of microchannel plate phototubes. NIM A, 572 (2007) 404-407.
12. A.Barnyakov et al. Photomultiplier tubes with three MCPs. NIM A, 598 (2009) 160-162.
13. A.Barnyakov et al. Test of microchannel plates in magnetic fields up to 4.5 Tl. NIM A, 845 (2017) 588-590.