

УДК 681.5.08

Успехи машинного проектирования в создании прототипа быстрого фотодетектора большой площади на микрочанальных пластинах

В.Я. Иванов

В обзорной работе описаны физико-математические модели и методика сквозного проектирования микрочанальных усилителей, применяемых в качестве детекторов элементарных частиц, в медицинской диагностике и астрофизике. Дан сравнительный анализ численных результатов проектирования и экспериментальных данных.

PACS: 42.65.Yj

Ключевые слова: микрочанальный усилитель, фотоэмиссия, вторичная электронная эмиссия, машинное проектирование, параллельные вычисления.

Введение

Проект Large-area Fast Photo Detectors (LAPPD) осуществлялся в последние 4 года под эгидой Аргоннской лаборатории США (Argonne National Laboratory, USA). В проекте были задействованы 4 национальные лаборатории США, 4 университета и около полутора десятков коммерческих фирм. Целью проекта было создание прототипа серийного унифицированного модуля размерами 20x20 см на основе микрочанальных пластин (МКП), который мог бы легко интегрироваться в микрочанальные усилители (МКУ) пикосекундного временного разрешения и большой площади, измеряемой квадратными метрами. Разработка такого прототипа позволило бы существенно снизить стоимость фотодетекторов при их серийном производстве.

Реализация такой масштабной задачи требовала создания новых технологий для нанесения тонких покрытий новых перспективных материалов с высоким коэффициентом вторичной эмиссии методом Atomic Layer Deposition и технологий изготовления фотокатодов с высоким квантовым выходом в инфракрасной, ультрафиолетовой и рентгеновской частях спектра.

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 по-

требовало массивных параллельных вычислений. К началу данной работы у автора имелась методика и программа MCPS для расчетов характеристик микрочанальных пластин (МКП) в статическом режиме, созданная в 1975 году совместно с д.т.н. Куликовым Ю.В. Первые результаты моделирования с помощью этой программы для проекта LAPPD представлены в публикациях [1, 2]. В США также имелась программа CASCADE для 3-мерного моделирования импульсных МКП фирмы Arradance (www.arradance.com). К сожалению, воспользоваться этой программой не представлялось возможным по ряду причин: программа не учитывала целый ряд важных физических эффектов (фотоэмиссия, упругая компонента вторичной эмиссии, эффект насыщения) и не позволяла проводить полный цикл проектирования от фотокатода до коллектора с накоплением статистики случайных соударений фотоэлектронов с поверхностью каналов МКП. Программа также не имела возможности проведения этапа микромоделирования для получения характеристик используемых в МКП материалов [3]. Фирма Arradance не была заинтересована в доработке своей программы, поэтому автору пришлось создать оригинальную методику сквозного проектирования МКУ в трехмерном приближении и программу MCS3 (Monte Carlo Simulator 3D), с помощью которой были получены основные результаты работы [4–13]. Обзор математических моделей для данного класса задач приведен в публикации [11].

Физико-математическая модель микрочанального усилителя

Принципиальная схема типичного МКУ представлена на рис. 1. Он состоит из фотокатода (ФК), ускоряющего зазора L1, собственно МКП, пространства дрейфа L2 и анода. Здесь поток фо-

Иванов Валентин Яковлевич, a senior staff scientist.

Argonne National Laboratory.

USA, 60439, Lemont, 9700 S. Cass Avenue.

Tel.: +1 630–252–2000. E-mail: vivanov@fnal.gov

Статья получена редакцией 15 августа 2013 г.

© Иванов В.Я., 2013

тонов 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 фотоэлектронов 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, 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.

Усилитель может работать как в статическом режиме (например, в приборах ночного видения), так и в импульсном для регистрации коротких пакетов фотонов или даже отдельных фотонов. Главными характеристиками статического МКУ являются коэффициент усиления тока, определяющий яркость изображения, и пространственное разрешение сигнала, определяющее четкость картинки. К характеристикам импульсного МКУ добавляется временное разрешение, позволяющее дискриминировать отдельные импульсы в их последовательности.

Модель вторичной эмиссии электронов — это наиболее сложная часть физической модели МКУ в целом. В качестве вторичных эмиттеров обычно используют пленки окислов металлов толщиной 10—100 нм, наносимых на поверхность канала методом ALD (Atomic layer deposition). Эффективный эмиттер на каждый падающий электрон способен породить до 4—7 вторичных электронов. Отношение тока вторичных электронов к току первичных принято называть коэффициентом вторичной эмиссии (КВЭ). Этот коэффициент зависит, прежде всего, от энергии и угла падения первичного электрона различным образом для каждого материала, поэтому, казалось бы, нако-

пив достаточно экспериментальных данных для типовых материалов (обычно MgO , Al_2O_3), можно построить достаточно надежную модель эмиссии. Дело существенно осложняется тем, что для тонких пленок КВЭ существенно зависит от толщины пленки и технологии ее нанесения. По этой причине наиболее гибким и надежным является направление численного расчета столкновительных процессов налетающих частиц с тонким слоем эмиттера методами статистического моделирования, которое мы называем микромоделирование. Микромодель после статистического усреднения актов столкновений способна дать угловые и энергетические распределения вылетающих с поверхности эмиттера вторичных частиц, которые используются для моделирования каскадов усиления тока в микроканалах (макромоделирование).

Ранние работы Геста и других авторов [15—18] предлагали аналитические зависимости КВЭ от энергии налетающих частиц. Сравнение этих аналитических моделей дано в работе [7]. К сожалению, все эти подходы имеют ряд недостатков, главным из которых является их низкая точность, дающая при сравнении с экспериментом в ряде случаев отклонение на порядок для коэффициента усиления. Кроме того, спектр вторичных электронов имеет сложную зависимость от энергии первичных частиц, в которой можно выделить «истинно вторичную» компоненту (энергии до 50 эВ), которая единственно и описывалась в аналитических моделях, неупругое рассеяние первичных электронов при коллективном взаимодействии их с кристаллической решеткой эмиттера и упругое рассеяние с сохранением энергии первичного электрона. Вопросы микромоделирования вторичной эмиссии рассматриваются в сле-

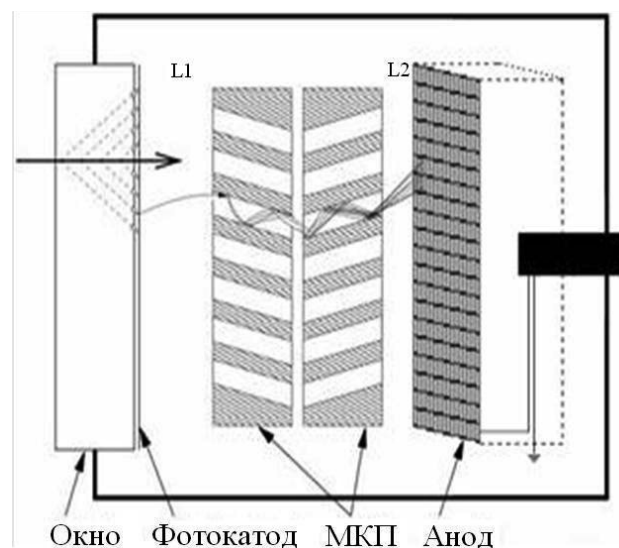


Рис. 1. Схема микроканального усилителя

дующем разделе. Влияние упругой компоненты вторичной эмиссии численно исследовалось нами в [12].

При усилении импульсного сигнала для больших коэффициентов усиления имеет место так называемый «эффект насыщения». Суть этого эффекта заключается в том, что при каскадном умножении ток вторичных электронов экспоненциально возрастает вдоль канала, поэтому для короткого входного сигнала из узкой области выхода из канала вырывается плотное облако электронов, а поскольку сопротивление канала довольно значительное (порядка 100 МОм), то на некоторое время τ в этой области образуется наведенный положительный заряд, который подавляет дальнейшую эмиссию электронов с поверхности. Величина τ начинается временем релаксации зарядов, и для типичных эмиссионных материалов она составляет 1–25 мкс [10]. На время τ МКУ теряет свойства усиления, что значительно ухудшает временное разрешение прибора. Процессы релаксации наведенных зарядов можно ускорить на 1м2 порядка, если на поверхность канала сначала нанести слой высокой проводимости, а поверх него материал эмиттера. Беркин и Васильев [19] предложили удобную аналитическую модель эффекта насыщения, которая была реализована нами в пакете программ и успешно использовалась при проектировании МКУ [5, 8].

В случае усиления потока фотонов рентгеновского диапазона схема усилителя значительно упрощается за счет того, что на поверхность канала напыляется слой высокой проводимости, а поверх него материал фотоэмиттера, например, WO_3 (рис. 2). В этом случае и фотоэмиссия, и вторичная электронная эмиссия происходят прямо с поверхности канала. Эффективность работы такой схемы исследовалась в работе [20].

Вычисление электрических полей в межэлектродных промежутках и внутри каналов представляет собой достаточно сложную задачу. Во-первых, геометрия области — существенно трехмерная, а во-вторых, задача сильно разномасштабная. Отношение длины канала к его диаметру порядка 40–60, а отношение диаметра канала



Рис. 2. Схема усилителя рентгеновского диапазона

к толщине напыленных на его поверхность пленок составляет 200–300. По этой причине при моделировании движения миллионов частиц электрическое поле внутри канала с хорошей точностью можно считать одномерным, направленным по оси канала, а краевые поля в трехмерном приближении (рис. 3) рассчитывались методом конечных элементов с помощью программы COMSOL [8].

Этап микромоделирования

Задача микромоделирования состоит в том, чтобы получить угловые и энергетические распределения фотоэмиссии и вторичной электронной эмиссии для конкретных материалов, используемых в приборе, а также вычислить времена релаксации зарядов для правильного учета эффекта насыщения.

Для расчета динамики релаксации зарядов мы используем дрейфово-диффузионную модель с генерацией электронов и дырок при взаимодействии падающего электронного пучка с атомами поверхности [8, 10], выражаемую следующими соотношениями:

$$\vec{J}_e = eD_e \nabla N_e + e\mu_e N_e \vec{E},$$

$$\vec{J}_h = -eD_h \nabla N_h + e\mu_h N_h \vec{E},$$

$$\text{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon \epsilon_0}, \quad \rho = N_h - N_e,$$

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_e = D_e \Delta N_e + eN_e \mu_e / \epsilon \epsilon_0 (N_h - N_e) + G_{ii},$$

$$\frac{\partial N_h}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_h = D_h \Delta N_h - eN_h \mu_h / \epsilon \epsilon_0 (N_h - N_e),$$

$$\mu_{e,h} = \sigma_{e,h} / eN_{e,h}, \quad D_{e,h} = \mu_{e,h} k_B T / e.$$

Здесь e — заряд электрона, $D_{e,h}$ — коэффициенты диффузии, $\mu_{e,h}$ — подвижность электронов



Рис. 3. Краевые поля в зазоре МКП шевронного типа

и дырок при температуре T , рождаемых при ударной ионизации в поле пространственных зарядов плотности ρ , $N_{e, h}$ — плотности зарядов, а $J_{e, h}$ — плотности токов электронов и дырок, E — напряженность электрического поля, ϵ и ϵ_0 — относительная и абсолютная диэлектрические проницаемости среды.

На рис. 4 показана расчетная зависимость плотности дырок от времени для композита $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZnO}$ для пленки толщиной 1 мкм, напыленной на боросиликатное стекло.

При моделировании вторичной эмиссии электронов методом Монте-Карло поток электронов с заданной энергией и под фиксированным углом направляется на поверхность со случайной расстановкой атомов, где каждый исходный электрон последовательно взаимодействует с ближайшим к нему атомом, испытывая упругое (резерфордское) рассеяние на ядре атома и продольное рассеяние на его электронах (модель Ландау). При этом с определенной вероятностью он может «обдирать» электроны из внешних оболочек атома. Усредненные результаты для вылетевших с поверхности материала электронов дают искомые угловые и энергетические распределения, как функции угла и энергии падающего электрона. При численных расчетах этих характеристик мы использовали программу CASINO [7, 9]. Результаты расчетов и экспериментальные данные приведены на рис. 5.

Модель фотоэмиссии

В настоящее время наиболее распространенными в приборостроении являются мультищелочные фотокатоды, работающие на пролет. Основной характеристикой для них служит квантовый выход $Q_e(\lambda)$, который показывает число эмиттируемых катодом фотоэлектронов на один фотон входного излучения. Понятно, что для каждого конкретного материала фотокатода этот параметр зависит от длины волны излучения, поэтому для разных диапазонов излучения применяют разные материалы. Расчет величины квантового выхода, угловых и энергетических распределений также, как и в случае вторичной эмиссии, составляет отдельный этап микромоделирования.

К сожалению, типичная величина Q_e для мультищелочных фотокатодов составляет 2–4%, поскольку часть излучения отражается обратно, а другая часть проходит насквозь фотокатод, не взаимодействуя с его материалом. В последнее время появились новые технологии, позволяющие увеличить эту величину до 20–25%. Основная идея состоит в том, что на поверхности катода, как на подложке, выращиваются кристаллические

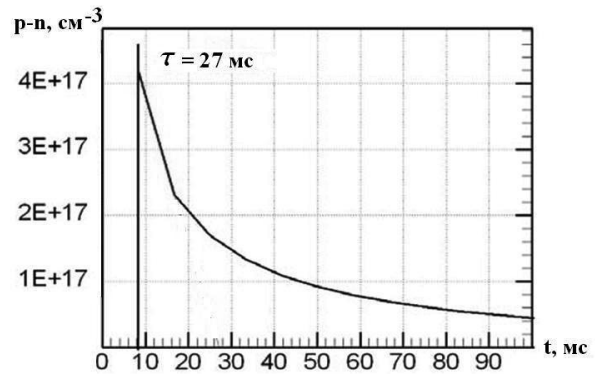


Рис. 4. Зависимость плотности зарядов от времени

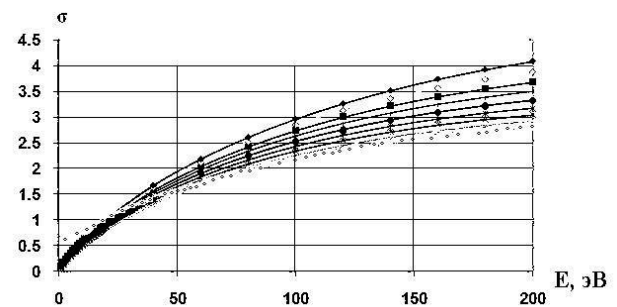


Рис. 5. Зависимость коэффициента вторичной эмиссии σ от энергии падающих электронов для разных углов падения с интервалом в 10 градусов для пленки Al_2O_3 толщиной 20 нм. Точками показана экспериментальная кривая для нормального падения электронов на поверхность.

столбики, которые затем покрываются пленкой эффективного вторичного эмиттера. Таким образом, вылетевшие с поверхности катода фотоэлектроны испытывают многократные столкновения с этими «усиками», рождая каскады вторичных электронов (рис. 6).

Сложность экспериментального исследования максимальной эффективности таких катодов состоит в том, что величина квантового выхода здесь зависит от многих параметров: диаметра и длины «усиков», плотности их расположения на поверхности катода, угла наклона их к поверхности катода, материала и толщины пленки вторичного эмиттера. По этой причине оптимизация эмиссионных свойств таких катодов осуществляется, главным образом, на основе численного моделирования. Основным препятствием для компьютерного моделирования является трехмерность задачи. Тем не менее, такие расчеты были нами успешно проведены [4, 11].

Результаты численного моделирования и сравнение с экспериментом

Для исследования оптимальных режимов работы МКУ были проведены массовые расчеты зависимости коэффициента усиления от ряда параметров: напряжение в зазоре фотокатод—МКП

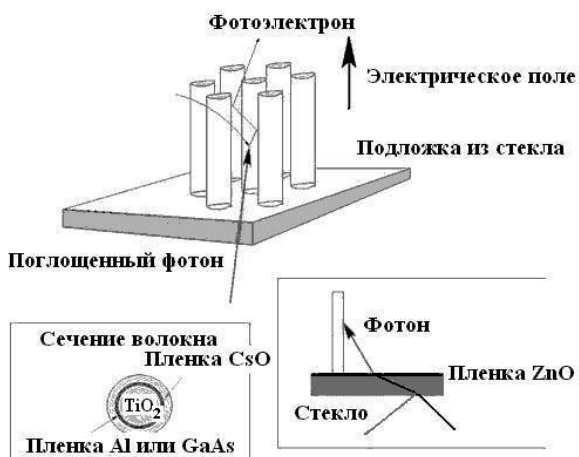


Рис. 6. Структура фотокатода нового типа

варьировалось от 20 до 400 В, приложенное к МКП напряжение от 1 до 1,5 кВ, диаметр канала от 10 до 60 мкм, толщина напыления вторичного эмиттера от 10 до 100 нм. В качестве материала вторичного эмиттера рассматривались MgO, Al₂O₃ и их композиты в различных пропорциях. Сложность моделирования заключалась в том, что коэффициент усиления тока существенным образом зависит от места первого соударения первичного фотоэлектрона со стенкой канала МКП, поэтому для вычисления среднего коэффициента усиления G необходимо генерировать фотоэлектроны со случайными величинами их энергии, начальных координат и угла вылета, а затем повторять полный цикл расчета для 5–10 тысяч вариантов начальных данных. Такие расчеты можно реально

проводить только на суперкомпьютерах с распараллеливанием вычислений, поскольку в каждом варианте расчета участвуют до десятков миллионов вторичных частиц. Эти расчеты были проделаны задолго до получения первых результатов измерений в Аргоннской лаборатории [1–8], что позволило значительно сократить объем и сроки проведения эксперимента.

При проведении сравнения с результатами измерений выяснились следующие источники расхождений в результатах. Во-первых, чувствительность измерительной аппаратуры резко падала для $G < 800000$ (эффект «обрезания»), из-за чего средняя величина G в эксперименте оказывалась завышенной по сравнению с данными расчетов. Для учета этого эффекта при сравнении результаты расчетов обрабатывались специальным алгоритмом. Вторая причина расхождений состояла в нестабильности работы лазера, генерирующего последовательность импульсов с разным числом фотонов в каждом из них. При этом среднее число фотонов в импульсе была известна лишь приблизительно ($n \approx 4–7$ фотонов), но значение n сильно влияет на величину коэффициента училения. Таким образом, для калибровки результатов были проведены расчеты с варьированием числа фотонов. Сравнительные результаты для усредненного коэффициента увеличения приведены на рис. 7. При этом толщина МКП равна 5 мм, диаметр канала 20 мкм, толщина напыления вторичного эмиттера для материалов MgO и Al₂O₃ равна 20 нм.

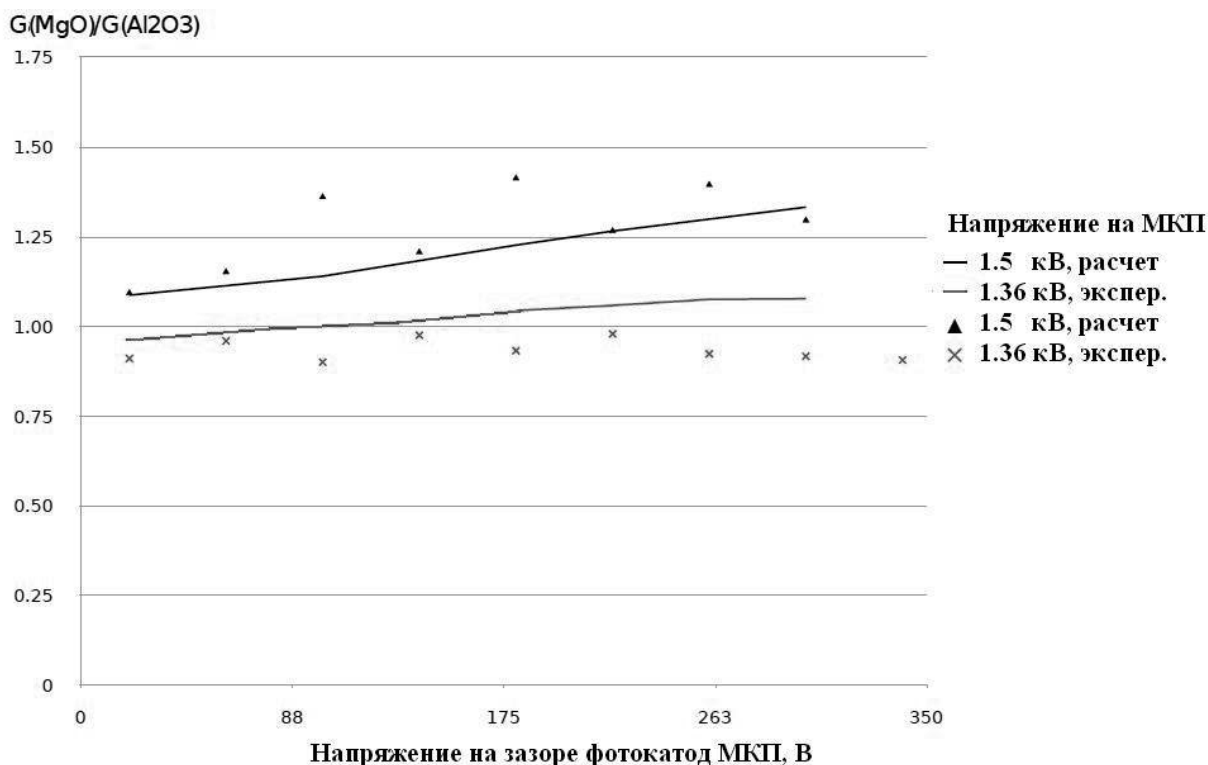


Рис. 7. Зависимость отношения усредненного коэффициента усиления G для MgO к таковому коэффициенту для Al₂O₃ от напряжения на зазоре фотокатод-МКП для различных значений приложенного к МКП напряжения.

Содержательной характеристикой МКУ также является функция распределения величины G для фиксированной геометрии МКП и приложенных потенциалов, которая определяет вероятность иметь тот или иное значение коэффициента увеличения при статистическом характере физических процессов в МКП (рис. 8) и функция рас-

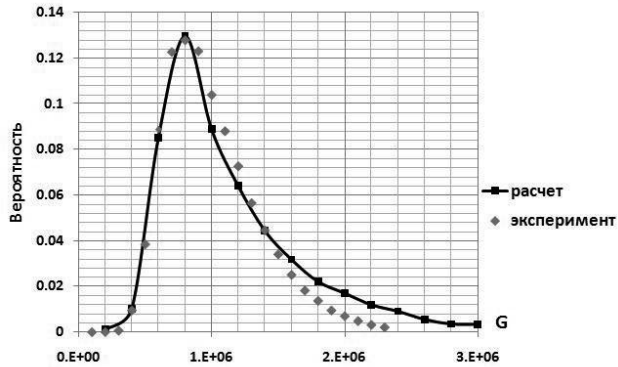


Рис. 8. Распределение вероятностей коэффициента усиления

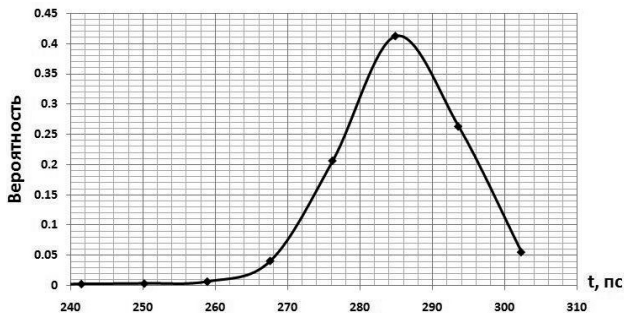


Рис. 9. Распределение вероятностей времени пролета электронов до анода

- Герметизированный модуль МКУ размерами 20x20 см без фотокатода (вверху) и электроника обработки сигнала с анодным блоком (внизу).
- При тестировании прототип показал заявленные характеристики: усиление 1–20 миллионов, временное разрешение 4 пс

Снимки любезно предоставлены автору группой тестирования Аргоннской национальной лаборатории

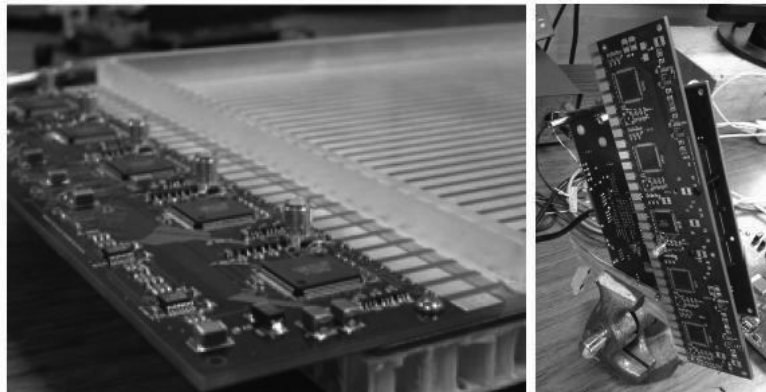


Рис. 10. Прототип модуля МКУ

пределения времени пролета, позволяющая вычислить временное разрешение прибора (рис. 9). Фотография прототипа модуля МКУ размерами 20x20 см, разработанного в Аргоннской лаборатории [13], представлена на рис. 10.

Заключение

Полученные результаты машинного проектирования были использованы для выбора оптимальных геометрических параметров и режимов работы МКУ. Эти результаты получили хорошее совпадение с полученными позднее экспериментальными данными как по коэффициенту усиления, так и по разрешающей способности приборов. Они продемонстрировали высокую эффективность методики и пакета прикладных программ MCS3 сквозного проектирования МКУ от катода до коллектора [21].

Литература

1. *Ivanov V., Roberts T.J., Abrams R., Frisch H.* Large Area Photo-detectors with millimeter and picosecond Resolution: Simulations, PAC'09, 4–8 May, Vancouver, Canada.
2. *Ivanov V.* Computational models for MCP Simulations, Aug.30 — Sept.4, 2009, San Francisco, X Int. Computational Accelerator Physics Conf. ICAP'09.
3. *Insepov Z., Ivanov V.* Comparison of Candidate Secondary Electron Emission Materials, May 3–7, 2010, 7th Int. Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors, Cassis, Provence, France.
4. *Ivanov V.* Simulations of Conventional and Unconventional Photo-cathode Geometries, 20–21 July,

2009, Chicago, 1st Workshop on Photo-cathodes: 300nm-500nm, <http://psec.uchicago.edu/photocathodeConference/talks/>.

5. *Ivanov V.* Gain and Timing Resolution Simulations in Saturated MCP Pores, 7th Int. Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors, Cassis, Provence, France, 2010.

6. *Ivanov V.* Numerical Models in Simulation of Large-area Fast Photo Detectors, XVI Int. Workshop: Beam Dynamics & Optimization, June 28–30, 2010, St. Petersburg, Russia.

7. *Insepov Z., Ivanov V., Frisch H.* Comparison of Candidate Secondary Electron Emission Materials, NIM B, 268 (2010) 3315–3320.

8. *Ivanov V., Insepov Z., Antipov S.* Gain and Timing Resolution Simulations in Saturated MCP Pores, NIM A, 52549 (2010) 02291–6.

9. *Insepov Z., Ivanov V., Jokela S.J. et al.* Comparison of Secondary Electron Emission Simulation to Experiment, NIM A, 52549 (2010).

10. *Insepov Z., Ivanov V., Elam J. et al.* Charge Relaxation and Gain Depletion for Candidate Secondary Electron Emission Materials, Nuclear Science Symposium, Oct.30-Nov. 6, Knoxville, Tennessee, 2010.

11. *Иванов В.* Численное моделирование быстрых фотодетекторов большой площади, Вестник СПбГУ, № 4, Сер.10, Прикладная математика, 2011, с.14–31.

12. *Insepov Z., Ivanov V., Jokela S., Wetstein M.* Comparison of back-scattering properties of electron emission materials, PAC'11, March 28- April 1, 2011, New York, USA. www.mcs.anl.gov/uploads/cels/papers/P1855.pdf

13. *Wetstein M., Adams B., Chollet M., Ivanov V. et al.* Integration-Level Testing of Sub-Nanosecond Microchannel Plate Detector for Use in Time-of-Flight HEP Applications, 2nd Int. Conf. on Technology and

Instrumentation in Particle Physics, 9–14 June 2011, Chicago, IL, USA.

14. *Иванов В.Я.* Математическое моделирование эмиссионных процессов в микроканальных усилителях, Всероссийская конференция «Актуальные проблемы вычислительной математики и математического моделирования», 12–15 июня 2012, Новосибирск.

15. *Guest A.J.* Un modèle mathématique pour l'étude par ordinateur du fonctionnement d'une galette de microcanaux // Acta Electronica, 14 (1), 1971. P.79–97.

16. *Lye R.G., Dekker A.J.* Theory of Secondary Emission // Physical Review, 107 (4), August 1957. P.977–851.

17. *Agarwal B.K.* Variation of Secondary Emission with Primary Electron Energy // Proceeding of Physical Society, 71 (5), 1958. P.851–852.

18. *Rodney J., Vaughan M.* A New Formula for Secondary Emission Yield // IEEE Transactions on Electric Devices, 36 (9), September 1989. P.~1963–1967.

19. *Беркин А.Б., Васильев В.В.* Математическое моделирование режима усиления импульсного тока в канале микроканальной пластины // Письма в ЖТФ, 78 (2), 2008. С.127–129.

20. *Adams B., Insepov Z., Ivanov V., Norem J.* Simulations of Fast X-Ray Detectors Based on Multichannel Plates. Proc. IPAC'12, 20–25 May, 2012, New Orleans, USA. — p.939–941.

21. *Иванов В.Я.* Математическое моделирование эмиссионных процессов в микроканальных усилителях, Всероссийская конференция «Актуальные проблемы вычислительной математики и математического моделирования», 12–15 июня 2012, Новосибирск.

Progress in computer design for a prototype of large-area fast photo detector based on the microchannel plates

V. Ivanov

Argonne National Laboratory
9700 S. Cass av., Lemont, IL, 60439, USA

Physical-mathematical models and the end-to-end design for the microchannel amplifiers are presented in this review. Those devices are used as the particle detectors in accelerator physics, in medical diagnostics and astrophysics. The comparative analysis for the results of numerical simulations and the experimental data was done in the paper.

PACS: 42.65.Yj

Keywords: microchannel amplifier, photo emission, secondary electron emission, computer aided design, parallel computations.

Bibliography — 21 references

Received August 15, 2013