

# ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МАТРИЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ КЛАССА КМОП-ФД СБИС И ФПЗС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ СВ-СИНТЕЗА И НАПЫЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

**В. И. Иордан, А. В. Калачев, А. А. Соловьев, А. И. Постоев**

Алтайский государственный университет  
г. Барнаул

Исследование теоретическими методами процесса СВ-синтеза, как режима протекания сильной экзотермической реакции (реакции горения), в котором тепловыделение локализовано в слое и передается от слоя к слою путем теплопередачи, сопряжено с большими трудностями. А именно, математическая модель процесса СВ-синтеза описывается уравнениями математической физики в частных производных, аналитическое решение которых, как правило, не может быть найдено. Аналогичные трудности возникают и при изучении структуры и волновой динамики «запыленной» технологической струи при плазменном или детонационно-газовом напылении (ДГН) порошковых покрытий.

В качестве альтернативы такому теоретическому подходу исследования указанных выше процессов может служить цифровая обработка потока изображений различных стадий протекания реакции СВ-синтеза или технологической струи ДГН (либо, например, плазменной струи). Цифровые фотокамеры, основными элементами которых являются современные матричные фотодиодные (ФД) приемники или приемники на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС), представляющие собой большие и сверхбольшие интегральные схемы (БИС и СБИС) с внутрикристалльным процессором, позволяют производить скоростную съемку быстропотекающих процессов (более 300 кадров/с). Из таких изображений можно получить большое количество информативных характеристик. Например, в отношении реакции СВ-синтеза появляется возможность исследовать форму и размеры очагов горения, температуру локальных областей реакции (в том числе и сверхадиабатические температуры) и их фазовых состояний [1,2]. В результате анализа изображений, можно судить о локальной нестационарности и неустойчивости реакции СВ-синтеза, которые трудно исследовать аналитическими методами.

В процессах ДГН характерная скоротечность процессов теплового взрыва и горения

может быть зарегистрирована с помощью скоростной съемки быстродействующими цифровыми камерами на основе матричных приемников класса КМОП-ФД СБИС.

Кроме быстродействующей регистрирующей аппаратуры в составе высококачественного автоматизированного оборудования, обеспечивающего контроль, поддержание на заданном уровне и регистрацию технологических параметров процесса, необходимо применять современные микроконтроллеры в измерительных системах, способных производить оперативную диагностику состояния дисперсной и газовой фаз в потоке и на напыляемой поверхности.

**Цель настоящей работы** – акцентировать внимание исследователей на перспективные разработки в области современной аппаратуры для регистрации и обработки потока изображений, предоставляющие возможность их эффективного применения при изучении быстропотекающих процессов в различных технологиях синтеза новых материалов и напыления порошковых покрытий.

КМОП-ФД микросхемы появились в результате развития фотодиодных матриц, координатная выборка в которых производилась с помощью N-канальных МОП-дешифраторов и регистров, сформированных на том же кристалле. Основной недостаток таких N-канальных МОП-фотодиодных матриц – малая амплитуда выходных сигналов и высокий уровень шумов [3]. Это обусловлено считыванием сигнальных зарядов на шины столбцов, емкость которых велика и пропорциональна числу пикселей в столбце, т.е. пропорциональна формату матрицы. В последнем десятилетии появились матричные ФПЗС формата 4096x4096 пикселей (и более), линейные матрицы с несколькими выходами, содержащие до 12000 пикселей (фирма Kodak), а также ФПЗС с временной задержкой и накоплением, работающие в широком диапазоне скоростей движения изображения (фирма Dasla). Вместе с тем, высокий уровень развития и широкое распростра-

нение КМОП-технологии позволили реализовать КМОП-фотодиодные матрицы с активными элементами, а также ведутся интенсивные разработки КМОП-ФД матриц с внутрикристалльными схемами управления и обработки изображения. В таких КМОП-ФД матрицах схемы управления могут реализовывать произвольную выборку сигналов, что значительно расширяет возможности фильтрации и параллельной обработки сигналов изображения. Задачи выделения «окна интереса (ОИ)», в котором расположена цель, и слежение за ней решаются путем считывания сигналов только требуемых элементов. С учетом того, что ОИ обычно занимает небольшую часть кадра, скорость считывания, по сравнению с ФПЗС, в которых необходимо считывать весь кадр, может быть значительно увеличена. Основное достоинство КМОП-ФД матриц в сравнении с ФПЗС заключается в возможности интеграции на одном кристалле функций приема и обработки изображения, т.е. реализация однокристалльной камеры с цифровым выходом (существуют и двух- и трехкристалльные камеры). Другие достоинства КМОП-ФД определяются низкой потребляемой мощностью, возможностью программирования интересующих пользователя окон и высокая скорость считывания данных. Основными их недостатками являются: высокий геометрический шум, обусловленный тем, что активный элемент содержит несколько МОП-транзисторов и несколько шин; низкая фоточувствительность; более высокий темновой ток; большие размеры активного элемента; меньшая, чем у ФПЗС, разрешающая способность.

В современных условиях требуются быстродействующие фотоприемные СБИС, содержащие более 10<sup>6</sup> фоточувствительных элементов, с цифровым 8-10 бит выходом и скоростью вывода более 300 кадров/с. Этим требованиям удовлетворяет КМОП-ФД матрица фирмы Photobit, выполненная с двухслойными поликремниевыми затворами и двухслойной металлизацией [3]. Выходы каждого двух столбцов подключены к АЦП с автоматической калибровкой. В микросхеме 640 АЦП, каждый из которых обслуживает два соседних элемента одной строки со скоростью 200 выборок/с. Программирование характеристик фотоприемной СБИС обеспечивается возможностью прерываний АЦП, что позволяет расширить ее функциональные возможности. На входе каждого АЦП включена схема подавления геометрического шума, реализующая алгоритм «двойной коррелиро-

ванной выборки (ДКВ)». Настройка всех АЦП происходит каждый раз перед интегрированием очередного кадра. Генератор выходной последовательности обеспечивает мультиплексирование 160 бит, а также управление внутренней шиной и 10-бит портами. Основной проблемой приема изображений природных сцен является изменение освещенности в очень широком динамическом диапазоне. Поэтому усилия разработчиков КМОП-ФД фотоприемников направлены на увеличение их динамического диапазона, который определяется отношением максимального сигнала, зависящего от зарядовой емкости ФД, к минимальному сигналу, задаваемому шумами. Многократная выборка сигнала позволяет снизить шумы.

В настоящее время разработаны многокамерные системы, позволяющие получать круговой обзор и синтезировать изображение интересующих объектов с высоким разрешением, и многоспектральные системы видимого и ИК-диапазонов, построенные на КМОП-ФД приемниках с узкополосными оптическими фильтрами [3].

Наиболее перспективными в последнее время являются «интеллектуальные» КМОП-ФД матрицы, которые можно разделить на два типа: приемники с внутрикристалльным процессором, позволяющим программировать различные задачи обработки изображения, и приемники с обработкой сигналов в каждом активном элементе.

Примером интеллектуальных КМОП-ФД первого типа являются фотоприемные СБИС фирм Siemens и Photobit [3]. Процессор фотоприемника фирмы Siemens, содержащего 720x576 активных элементов, позволяет задавать размеры и расположение принимаемого ОИ, частоту кадров, время экспозиции, коэффициент усиления выходного сигнала. Процессор может реализовать полную цифровую обработку изображения с коррекцией геометрического шума, гамма-коррекцией данных дефектных элементов. КМОП-ФД приемник фирмы Photobit содержит фотоприемную матрицу форматом 352x288 активных элементов, АЦП, аналоговый и цифровой сигнальные процессоры.

Аналоговый процессор производит выборку и хранение сигналов, алгоритм ДКВ, программируемое усиление работой приемника, обработку цветных сигналов и сжатие изображения. В каждом активном элементе обработка сигналов позволяет получать высокое отношение «сигнал/шум», малую потребляемую мощность и обрабатывать изо-

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МАТРИЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ КЛАССА КМОП-ФД СБИС  
И ФПЗС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССОВ  
СВ-СИНТЕЗА И НАПЫЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

бражение в процессе его интегрирования. Фирма Silicon Architects выпускает образцы КМОП-ФД второго типа с форматом 640x512 элементов и последовательным многоканальным АЦП в каждом элементе [3].

Аналоговая обработка сигналов в каждом активном элементе или их группе позволяет выполнять в реальном времени классические методы обработки изображения: сжатие, выделение контуров, точечных целей и т.п.

Возможно и создание однокристалльных нейроподобных сетей с оптическим входом, обрабатывающих двумерные изображения и реализующих функции технического зрения.

Несмотря на то, что КМОП-ФД приемники уступают ФПЗС по разрешающей способности, фоточувствительности, однородности и динамическому диапазону, тем не менее, КМОП-ФД приемники нашли широкое применение не только в бытовой аппаратуре (цифровые камеры, фотоаппараты и т.д.), но и в промышленной, научно-космической, оборонной и других областях.

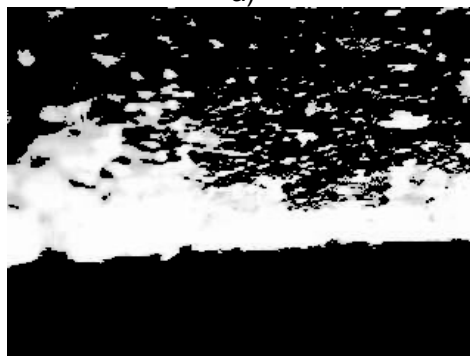
Основное достоинство КМОП-ФД приемников заключается в возможности создания однокристалльных и многокристалльных цифровых камер с устройствами аналоговой, цифровой и нейроподобной обработки потока изображений [4], т.е. создания интеллектуальных камер, которые в настоящее время и ближайшей перспективе позволят реализовать системы технического и искусственного зрения, сопоставимого по характеристикам с биологическим зрением.

В качестве иллюстрации применения цифровой КМОП-ФД камеры для исследования волновой динамики фронта горения в процессе СВ-синтеза порошковой смеси Ni-Al на рисунке 1, 2 приведены кадры после применения к ним методов обработки изображений [5].

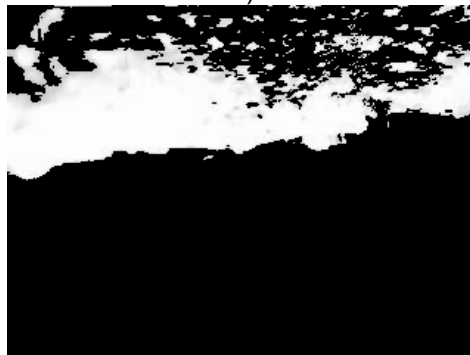
Анализ изображений позволил определить различные характеристики волновой динамики, например: распределение скоростей движения точек фронта волны горения (рисунок 3), размеры и форму локальных очагов горения, в некоторых из которых горение происходит по механизму «теплового взрыва» с наличием «сверхадиабатической» температуры [5].



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1 – Последовательность кадров, обработанных методом пороговой сегментации «изодата»: а), б) – два «соседних» кадра; в), г) – два кадра с интервалом выборки через 5 кадров

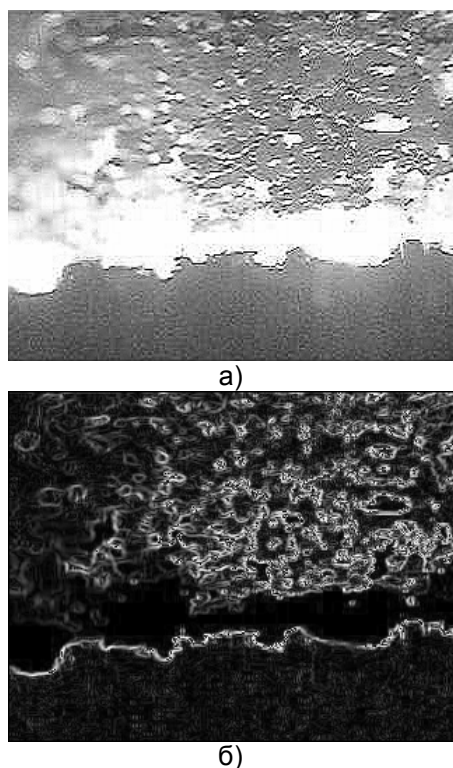


Рисунок 2 – Контрастирование и выделение контуров: а) – изображение с повышенным контрастом, б) – выделенные контуры

Подробный анализ потока изображений, отображающих движение точек фронта волны горения в процессе СВ-синтеза приведен в [5].

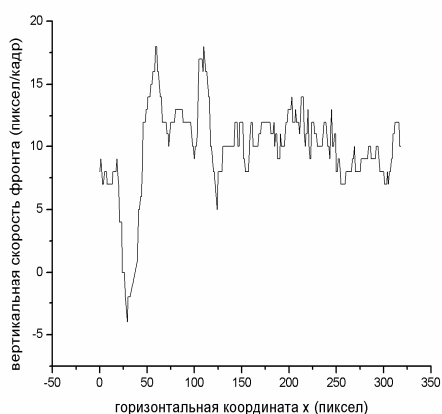


Рисунок 3 – Распределение скоростей движения точек фронта волны СВС

### Заключение

Дальнейшее развитие технологий в области микро- и нанoeлектроники по созданию наногетероструктур, а именно, по созданию фотоприёмников на эпитаксиальных гетероструктурах с квантовыми ямами и фотоприёмников на квантовых точках, расширяет на новом качественно более высоком уровне возможности схемотехники СБИС, использующих наногетероструктуры для разработки и реализации новых регистрирующих приборов и устройств. Тем самым, расширяются возможности по исследованию быстропротекающих гетерофазных процессов напыления покрытий с улучшенными функциональными характеристиками и синтеза новых материалов с требуемыми свойствами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев П.Ю. Пирометр с широтно-импульсной модуляцией на основе МДП-фотодиодных матриц в режиме накопления заряда / П.Ю. Гуляев, В.И. Иордан // Известия вузов. Физика.-2006.-Т.49.-№9. Приложение. - С. 132-136.
2. Гуляев П.Ю. Пирометрия процессов СВС на основе МДП фотодиодных матриц в режиме накопления заряда / П.Ю. Гуляев, А.В. Калачев // Ползуновский вестник.-2005.- №4 (ч.1).- С. 171-175.
3. Стемпковский А.Л., Шилин В.А. КМОП-фотодиодные СБИС – перспективная элементная база однокристалльных систем приёма и обработки изображений // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2003. – № 2. – С. 14–20.
4. Гуляев П.Ю. Адаптивный алгоритм обучения байесовского нейросетевого классификатора информационных кластерных структур в спектрально-анализных изображениях / П.Ю. Гуляев, А.В. Долматов, В.И. Иордан // Материалы XIII-го Всероссийского семинара «Нейроинформатика и ее приложения», 7-9 октября 2005 г.; под ред. А.Н. Горбаня, Е.М. Меркса. - Красноярск: ИВМ СО РАН, 2005.- С. 29-30.
5. Иордан В.И. Комплекс методов цифровой обработки изображений для исследования эффектов локальной неустойчивости и нестационарности волны горения процесса СВС / В.И. Иордан, П.Ю. Гуляев, В.В. Евстигнеев // Ползуновский вестник. – 2005. - №4 (ч.1).- С. 152-170.