

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОЭЛЕКТРОНИКЕ И ПРИБОРАМ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ. Ч.2*

А.Дирочка, А.Филачев, ФГУП «НПО «Орион», Москва

Во второй части обзора современного состояния и перспектив развития фотоэлектроники в мире рассмотрены материаловедческие проблемы чувствительности фотодиодов и их быстродействия, конструкции новых оптико-электронных приборов.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

Значительное число докладов посвящено результатам разработки новых оптико-электронных приборов с использованием оптико-электронных преобразователей и матричных фотоприемных устройств на различные участки ИК-диапазона спектра. К числу таких докладов относятся: «Приборы для измерения скорости транспортных средств» (филиал ОАО «Катод» – СКБ приборов ночного видения и ЗАО «Стинс Коман»), «ОЭС на основе МФПУ InGaAs/InP («НПО «Орион» и МФТИ), «Формирование панорамного изображения в оптико-электронной системе с зеркальным шарниром и МФПУ на основе InSb , работающего в режиме SNAP SHOT» и «Двухдиапазонная тепловизионная система на основе матричных фотоприемных модулей из CdHgTe и InSb » («НПО «Орион», МГТУ и МФТИ), «Формирователь сигналов изображения на основе МФПУ формата 320×256 элементов из InSb » (ФГУП «НПО «Орион» и НИИ МВС ЮФУ), «Термографическая информационно-измерительная система широкого применения» («Альфа») и др. Доклады продемонстрировали существенное повышение технического уровня

разрабатываемых оптико-электронных приборов российскими предприятиями.

Представлены работы, посвященные различным аспектам оптимизации параметров оптико-электронных приборов. В работах, поступивших от «Урал-Геофизика», филиала «ПО «УОМЗ», проанализировано влияние размера пиксела на порог чувствительности матричных фотоприемников в режиме тепlopеленгации, предложены пути оптимизации тракта обработки сигнала в лазерных дальномерах, рассмотрен метод пассивного измерения дальности по информации тепlopеленгационного канала.

Заметно возросло число докладов по вопросам коррекции неоднородности сигналов и селекции дефектных элементов матричных и многорядных фотоприемных устройств. Представлены также три доклада «НПО «Орион» по вопросам адаптивной коррекции по сигналам сцены, доклад «НПО «ГИПО» по возможности фильтрации пространственного Фурье-преобразования, доклад Национального университета «Львовская политехника» по методам улучшения качества тепловых изображений.

Рассмотрены вопросы создания метрологического оборудования для анализа характеристик оптико-электронных

приборов и исследований с использованием многоспектральных приборов.

ФОТОПРИЕМНИКИ, ФОТОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ОБРАБОТКИ СИГНАЛА

По этому направлению были представлены доклады из ФТИ РАН; «НПО «Орион»; ИПФ СО РАН; ИОФ РАН; Ben-Gurion University (Израиль); ФГУП «НПП «Пульсар»; ИФ НАН Азербайджана; ОАО «Интеграл» (Минск, Республика Беларусь); Gazi University (Анкара, Турция) и др.

Цикл работ ФТИ РАН посвящен фотоприемникам на спектральный диапазон 2–5 мкм из бинарных, тройных и четверных соединений типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и гетероструктур на их основе. Сюда же примыкает доклад Ю.Яковлева с сотрудниками «Полупроводниковые лазеры в средней ИК-области спектра (2–4 мкм) на модах шепчущей галереи», которые вполне могут быть использованы для метрологических исследований фотоприемников в этой области спектра.

Для улучшения электрических и фотоэлектрических характеристик GaInAsSb/GaAlAsSb и InAs/InAsSbP ФД Е.Куницына с сотрудниками предлагают использовать редкоземельные элементы в процессе выращивания активной области. Показано, что

* Часть 1 см.: Фотоника, 2011, №1.

применение гольмия позволяет повысить токовую монохроматическую чувствительность фотодиодов и их быстродействие, уменьшить величину обратных темновых токов.

Выявлено, что предэпитаксиальная обработка поверхности подложки GaSb(100) в водных растворах сульфида натрия позволяет управлять положением р-п-перехода в гетероструктуре GaSb/GaInAsSb и на 30% повысить токовую монохроматическую чувствительность ФД в диапазоне 1,2–2,4 мкм. Пассивация боковой поверхности мезоструктуры GaInAsSb/GaAlAsSb ФД в 1М водном растворе Na₂S снижает величину обратных темновых токов более чем на порядок. В случае использования насыщенных растворов Na₂S в изопропиловом спирте величина обратных темновых токов GaInAsSb/GaAlAsSb ФД снижается в 20 раз, а InAs/InAsSbP ФД – в 2 раза.

В работе «ИК-фотодиоды на основе многобарьерных структур, содержащих InAs» сообщается о результатах комплексного исследования электрических (I–V,

C–V) и фотоэлектрических характеристик флип-чип- и поверхностно облучаемых ФД на основе одиночных и двойных гетероструктур р-InAsSbP(Zn)/InAs с активной областью из нелегированного n-InAs, полученных на подложках InAs, включая сильнолегированные подложки n⁺-InAs, прозрачные для излучения в области 3,3–3,4 мкм.

И.Андреев и его коллеги («Широкополосные (2ГГц) GaInAsSb/GaAlAsSb р-і-п фотодиоды для спектрального диапазона 1,5–2,5 мкм») впервые создали и исследовали неохлаждаемые высокоэффективные широкополосные GaInAsSb/GaAlAsSb р-і-п ФД для спектрального диапазона 1,5–2,5 мкм. Разработан и оптимизирован полный технологический цикл создания широкополосных ФД, включающий выращивание на подложке GaSb(100) изопериодных гетероструктур GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с заданными параметрами методом жидкофазной эпитаксии, постростовую технологию формирования GaInAsSb/GaAlAsSb ФД, корпусирование ФД в специальные СВЧ-разъемы для исследования

кинетики фотоотклика и измерения полосы пропускания. Созданные GaInAsSb/GaAlAsSb ФД имеют рекордно низкие значения собственной емкости в диапазоне 2,0–3,0 пФ без обратного смещения и 0,8–1,0 пФ при обратном смещении U=–1 В. Быстродействие ФД, определяемое по времени нарастания импульса фотоотклика на уровне 0,1–0,9, составляет величину 130–150 пс. Ширина полосы пропускания достигает 2 ГГц. ФД характеризуются низкими обратными темновыми токами, высокими значениями токовой монохроматической чувствительности ($\geq 1,1$ А/Вт на длинах волн 2,0–2,2 мкм) и $D^*(\lambda_{\text{max}}, 1000, 1) = 9,0 \cdot 10^{10} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$.

В докладе И. Андреев «Высокоэффективные фотодиоды для спектрального диапазона 2,5–4,8 мкм» представлены результаты исследований, направленных на создание высокоэффективных ФД, работающих при комнатной температуре в среднем ИК-диапазоне 2–5 мкм. Гетероструктуры с активным слоем InAs_{0,88}Sb_{0,12} выращивались ме-

тодом жидкофазной эпитаксии на подложках InAs. Для обеспечения пониженной деформации, вызванной несоответствием параметров решетки подложки и активного слоя был введен буферный слой из твердого раствора $\text{InAs}_{0,94}\text{Sb}_{0,06}$. В качестве широкозонного "окна" использовался твердый раствор InAsSbP. Разработаны ФД на основе гетероструктур $\text{InAs}/\text{InAs}_{0,94}\text{Sb}_{0,06}/\text{InAs}_{0,88}\text{Sb}_{0,12}/\text{InAsSbP}$ с диаметрами фоточувствительной площадки 0,3 мм.

Отличительной особенностью ФД является высокая токовая монохроматическая чувствительность в максимуме спектра ($\lambda_{\text{max}}=4,2-4,7$ мкм), достигающая значений 0,6–0,8 А/Вт. Значение плотности обратных темновых токов – $(1,3-7,5) \cdot 10^{-2}$ А/см², при напряжении обратного смещения 0,1–0,2 В. Дифференциальное сопротивление в нуле достигает величины 700–800 Ом.

Большой интерес вызвал доклад группы И. Ли. «Многомодульное линейчатое фотоприемное устройство $4 \times (2 \times 192)$ на основе InAs МДП-структур для систем тепловизионной», где были представлены конструкция и параметры многомодульного ИК ФПУ на основе универсального гибридного линейчатого модуля InAs МДП-структур форматом 2×192 . Решены следующие задачи: разработано ИК ФПУ, содержащее до четырех гибридных модулей формата 2×192 ,

стыкуемых без оптического зазора; повышена чувствительность, временное и пространственное разрешение.

Эти задачи решены за счет проведения комплекса работ, в частности: повышения быстродействия кремниевого мультиплексора; снижения уровня шума в системе считывания; повышения квантовой эффективности ФП за счет оптимизации толщин проводящих и диэлектрических слоев МДП-структуры, многослойных просветляющих покрытий на обеих сторонах кремниевого мультиплексора.

В докладе «Инфракрасные фотоприемные устройства на основе системы: фотодиод – устройство считывания с прямой инжекцией заряда» представлена математическая модель многоэлементных ИК ФПУ на основе системы фотодиод – устройство считывания с прямой инжекцией заряда (ПИ). Анализ системы проведен как с модельными, так и экспериментальными ВАХ фотодиодов. Расчет величины шумового заряда, интегрируемого под затвором накопления ПИ, позволяет:

- рассчитать все основные параметры многоэлементных ИК ФПУ в зависимости от напряжения смещения на входном затворе устройства считывания;

- проводить детальное сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей;

- оптимизировать требования к конструктивным и фотоэлектрическим параметрам устройств считывания, необходимым для достижения заданных характеристик многоэлементных ИК ФПУ и тепловизионных систем.

Изложены методики анализа и результаты численных расчетов уровня «геометрического» шума, представлены гистограммы распределения D^* фотоприемных каналов многоэлементных ИК ФПУ и NETD тепловизионных систем в зависимости от уровня неоднородности пороговых напряжений под входными затворами устройств считывания и от стехиометрического состава $\text{Hg}_1 \times \text{Cd} \times \text{Te}$.

Из докладов, посвященных электронике обработки фотосигнала следует выделить доклад Д. Бородина («НПП «Пульсар») «Аналоговые фокальные КМОП процессоры для гибридных линейных, субматричных и матричных ИК фотоприемных устройств». В частности, отмечено, что за последние 2–3 года удалось дополнить семейство КМОП-мультиплексоров форматами 320×256 (2 типа), 4×288 и 640×512 .

Первый тип микросхем формата 320×256 ячеек размером 30×30 мкм предназначен для ФД-матриц с р-типом проводимости общей области и большими (~100 нА) темновыми токами (КРТ, 8–12 мкм). Интегри-

рование фототока на емкостях от 0,5 до 4 пФ проводится одновременно в четырех строках матрицы с последующим выводом на четыре выхода. Кадровая частота достигает 250 Гц, рассеиваемая мощность не превышает 20 мВт.

Второй тип микросхем отличается тем, что ФД-матрицы имеют n-тип проводимости общей области и могут использоваться для фоторезистивных матриц с небольшими темновыми токами (InSb, QWIP, InGaAs). Микросхема позволяет проводить интегрирование фототока как в течение времени кадра, так и в течение произвольного времени, определяемого длительностью внешнего импульса («мгновенная фотография»). При реализации данного проекта получены мультиплексоры с числом дефектных ячеек менее 0,01%.

Микросхема формата 4×288 выполняет в аналоговом виде функцию временной задержки и накопления (ВЗН) по четырем элементам и предназначена для стыковки с субматрицами ФД КРТ, 8–12 мкм. Микросхема формата 640×512 ячеек размером 20×20 мкм предназначена для матриц ФД типа InSb, QWIP, InGaAs. Зарядовая емкость в ячейке составляет $5 \cdot 10^6$ электронов, частота кадров полного формата достигает 120 Гц. Остальные общие функции, возможности и параметры микросхемы, в том числе по бездефектности, – аналогичны реализованным в мультиплексоре формата 320×256 ячеек 30×30 мкм (тип 2).

Другие работы этого направления посвящены фотоприемникам на основе $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$, $A^{III}B^V$ в том числе и на основе многоэлементных быстродействующих ФД InGaAs/InP.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИЁМНИКИ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

В своем докладе «Оптические микроэлектромеханические системы для адаптивных многоспектральных ИК-приемников и матриц» профессор L.Faraone (University of Western Australia, Crawley, Australia) рассказал, что их усилия сосредоточены на развитии технологии микроэлектромеханических систем (MEMS), которая была бы совместима с большим форматом двумерных инфракрасных матриц фокальной плоскости.

Основная идея заключается в создании качественного электрически перестраиваемого фильтра Фабри–Перо на необходимую область спектра. Область перестройки достигала 900 нм (1,6 – 2,5 мкм). при ширине полосы 50 ангстрем. Приведены различные схемы реализации и сравнение с фотонными фотоприемниками.

Этой же тематике посвящён доклад Р. Хафизова и др. «Исследование термомеханических приёмников теплового излучения». В работе представлены результаты разработки, моделирования и экспериментальных исследований ИК фоточувствительных микроэлектромеханических (МЭМ) элементов на основе биматериальных слоев.

Разработана конструкция и технология изготовления элемен-

тов термочувствительных МЭМ-элементов и проведено исследование их термомеханических характеристик. МЭМ-элемент представляет собой фактически трехмерную структуру, поэтому ключевым этапом в технологии его изготовления является создание подвешенной наномембраны, которая формировалась на основе окиси кремния или нитрида кремния с использованием жертвенного слоя. Регистрация смещения мембраны вследствие изгиба ее биморфной части под воздействием излучения осуществлялась оптическим и емкостным методами. Развита физико-математическая модель и проведено численное моделирование термоотклика биморфных МЭМ-элементов. Сравнение показало хорошее совпадение экспериментальных результатов с расчетными. Показано, что тепловые ФП с параметрами, близкими к предельным, могут быть реализованы на базе высокоразвитой кремниевой технологии МЭМС. Отсутствие необходимости глубокого охлаждения и относительная дешевизна делает их весьма привлекательными для применения в ряде областей.

Заканчивая далеко не полный обзор докладов 21-й Международной научно-технической конференции по фотозлектронике и приборам ночного видения, необходимо отметить наряду с расширением географии участников конференции, высокий уровень результатов ведущих фирм. Представленные доклады охватывают значительный круг проблем, сто-