

МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД (CMS)

П. Д. Бунин * от имени коллаборации CMS

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Проекты модернизации CMS, как фаза I, так и фаза II, направлены на усовершенствование детекторных систем для обеспечения необходимых физических характеристик в сложных условиях высокой светимости на HL-LHC. На втором этапе физической программы Большого адронного коллайдера (LHC) планируется увеличить мгновенную светимость на $5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ с целью набора около 3000 фб^{-1} интегральной светимости к концу 2037 г. Соответствующее среднее число протон-протонных взаимодействий (pile-up) на одно пересечение сгустков пучков составит 140, с возможностью увеличения до 200. Установка модернизированных детекторных систем началась в период LS2 и должна быть завершена в период LS3, который в настоящее время запланирован с конца 2025 до конца 2028 г. Для улучшения способности выделять и точно измерять продукты наиболее интересных столкновений детекторы CMS нуждаются в соответствующей модернизации.

The CMS upgrade projects, both Phase-1 and Phase-2, are aimed for the improvement of detector systems to provide the necessary physics performance under the challenging conditions of high luminosity at the HL-LHC. In the second phase of the LHC physics programme, it is being planned to increase the instantaneous luminosity by $5 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ with the goal of integrating some 3000 fb^{-1} by the end of 2037. The corresponding mean number of collisions (pile-up) per bunch crossing will be 140, with the possibility to increase it up to 200. Installation of the upgraded detector systems started in LS2 and is planned to be completed in LS3, presently scheduled from the end of 2025 to the end of 2028. CMS detectors need to be modernized in order to improve the ability to isolate and precisely measure the products of the most interesting collisions.

PACS: 07.77.Ка; 29.40.Gx

ВВЕДЕНИЕ

Программа модернизации Большого адронного коллайдера (БАК) [1], которую планируется завершить к концу 2028 г., а в случае продления долговременной технической остановки LS3 — к середине 2029 г., направлена на увеличение мгновенной светимости установки БАК с текущих значений порядка $2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ до номинального значения

* E-mail: bunin@cern.ch

$5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ с возможным резервом достичь величины мгновенной светимости, равной $7,5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Данные значения светимости соответствуют числу одновременных протон-протонных взаимодействий (pile-up) 140 и 200 соответственно. Стоит отметить, что интегральная светимость, полученная к настоящему времени, равна 193 фб^{-1} . Планируется, что к 2025 г. БАК достигнет общей интегральной светимости более 300 фб^{-1} . А после технической остановки LS3, в течение которой комплекс БАК будет модернизирован на основе ряда инновационных технологий, включающих новейшие сверхпроводящие магниты, новые вакуумные и криогенные системы, величина интегральной светимости достигнет 3000 фб^{-1} , а в случае использования заявленного резерва комплекса — до 4000 фб^{-1} .

В дополнение к растущей светимости и величине одновременных взаимодействий, ведущим к увеличению нагрузки на системы регистрации и считывания, излучение, которому будут подвергаться детали детектора, достигнет беспрецедентного уровня. Установленные в настоящее время детекторные системы, находящиеся на больших углах псевдобыстрот, близких к оси пучка, выйдут из строя вследствие радиационного поражения.

В ближайшие годы детектор CMS [2] будет значительно модернизирован (так называемая фаза II в рамках CMS) с целью противостоять жестким экспериментальным условиям и иметь возможность полностью использовать физический потенциал в эпоху модернизированного БАК (HL-LHC). На основании проведенных во время работы детектора CMS детальных измерений, радиационных испытаний и исследований характеристик был сделан вывод о необходимости замены системы центрального трекера и торцевых калориметров, включая электромагнитную и адронную составляющие. Несмотря на эти обновления, очень высокое число pile-up все еще может снизить производительность детектора из-за проблем с разрешением вершин первичного взаимодействия в одном и том же событии. Одним из решений данной проблемы является создание нового MIP-детектора, который позволит эффективно разделять вершины первичного взаимодействия благодаря очень высокому временному разрешению — около 30 пс. Другие подсистемы детекторов CMS также будут перестроены или значительно улучшены.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕТЕКТОРА CMS

Модернизация детектора CMS проходит в две стадии, целью которых являются:

— фаза I: усовершенствование, необходимое для обеспечения эффективной работы установки в режиме высокой светимости ($2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$) и полной энергии LHC (до 14 ТэВ в с. ц. м.);

— фаза II: развитие, необходимое для эффективной работы установки в режиме высокой светимости (до $5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) и интегральной светимости до 3 фб^{-1} (High Luminosity LHC, HL-LHC).

Как было отмечено во введении, увеличение светимости ускорителя БАК после модернизации в периоды LS2 и LS3 создаст новые, особые условия работы для всех детекторов эксперимента CMS и будет накладывать дополнительные требования как на сами детекторы, так и на соответствующие программы моделирования и реконструкции. Важным следствием повышения светимости является увеличение радиационных нагрузок различных частей детектора CMS, которое приводит к уменьшению (деградации) сигнала от активных элементов калориметрических детекторов, что особенно проявляется в передней и торцевой областях установки. Например, деградация сигнала с активных элементов торцевого адронного калориметра оказывает значительное влияние (в сторону ухудшения) на энергетическое разрешение струй в зависимости от интегральной светимости. По представленным результатам моделирования, проведенного в 2016 г., явно видно, что уже к 2018 г. при набранной суммарной интегральной светимости более 150 фб^{-1} будет наблюдаться существенная деградация разрешения реконструированных струй (более 20 %) для калориметра в случае продолжения использования фотодетекторов HPD [3]. В связи с такой сильной деградацией отклика было принято решение провести модернизацию торцевого адронного калориметра во время технической остановки в конце 2017 и начале 2018 гг., а модернизацию его центральной части — в течение LS2 (2019–2021 гг.). В качестве идеальной замены HPD был выбран кремниевый фотоумножитель (SiPM), который нечувствителен к магнитному полю и обеспечивает усиление на два-три порядка выше, чем HPD, а также обладает более высокой квантовой эффективностью. В дополнение к замене всей системы регистрирующей электроники была произведена замена всех модулей управления и контроля (ngCCM), улучшено пассивное охлаждение модулей.

Модернизация адронного калориметра вошла в спектр работ, необходимых для поддержания работоспособности детектора в условиях номинальной светимости ускорителя (до HL-LHC) и проводимых в течение долговременной технической остановки LS2 (фаза I). В данный спектр работ также вошли установка и модернизация внутренних слоев и колец для пиксельного детектора (Pixel), модернизация элементов электроники системы отбора и триггера первого и высокого уровней, позволяющая отбирать события с частотой 100 и 1 КГц соответственно. Также подверглись модернизации детекторы мюонной системы. Полностью переработана система отбора и считывания данных с дрейфовых трубок, проведена замена старой накамерной электроники, плат ALCT-мезонин и LVDB на усовершенствованные для катодно-полосковых камер внутренних мюонных станций. В течение технической остановки LS2 была установлена первая часть новой детекторной системы, предназначенная для работы

в условиях HL-LHC, а именно два первых слоя из 144 камер газового электронного умножителя (GEM). Данная система обеспечивает дополнительные точки измерения, что позволяет лучше идентифицировать мюонный трек, а также расширять охват регистрируемых событий в передней части детектора.

С начала сеанса набора данных (Run 3, 2022–2025 гг.) основные работы по модернизации детектора, кроме тех, которые связаны с научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими разработками, будут приостановлены в ожидании долговременной технической остановки LS3, в течение которой должны быть реализованы проекты по модернизации CMS в рамках фазы II непосредственно на подсистемах детектора.

Ниже перечислены подсистемы детектора CMS с кратким описанием планируемых модернизаций. Более подробно будут представлены обновления трекерной системы и калориметров торцевой крышки, а также нового MIP-детектора.

Трекер. Трекер — это детектор, расположенный ближе всего к точке протон-протонного взаимодействия. Он подвержен значительным радиационным повреждениям, а в условиях HL-LHC в дополнение к радиационным нагрузкам должен будет идентифицировать отдельные вершины и треки в очень жестких условиях при множественности наложенных событий порядка 140–200 и предоставить информацию о треке частиц триггеру первого уровня. Очевидно, что трекингвая система будет полностью перепроектирована и перестроена. Все ее системы должны быть радиационно стойкими и сохранять полную рабочую эффективность до ожидаемой (после десяти лет работы) интегральной светимости 3000 fb^{-1} . Гранулярность системы будет увеличена, чтобы сохранить заполняемость каналов на уровне процентов во внешнем трекаре (OT) и на уровне десятых долей во внутреннем трекаре (IT). К тому же модули в OT будут способствовать срабатыванию триггера первого уровня, что чрезвычайно важно для модернизированной триггерной системы. Будет уменьшен объем «мертвого» материала в объеме трекара, а охват трекингвой системы будет расширен до $|\eta| = 4$ в единицах угла псевдобыстроты.

Эти задачи накладывают жесткие ограничения на общую концепцию трекара, технологии и конструкции, используемые для отдельных компонентов: модулей, кремниевых датчиков и фронтальной электроники. На рис. 1 показан макет трекара в разрезе в координатах $r-z$.

Проект модернизации трекара (фаза II) начался в 2015 г. и в 2019 г. вступил в фазу производства и сборки. В 2017 г. был подготовлен отчет о техническом проектировании [4], в котором представлены основные детали трекара фазы II.

Внешний трекер. Основная концепция работы OT — это предоставление информации о треках частиц триггеру первого уровня L1. Использование информации о треках частиц будет способствовать смягчению эффекта высокой множественности наложенных вершин в одном собы-

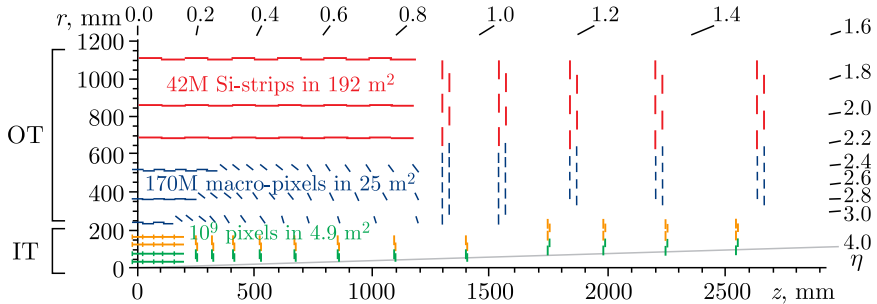


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Одна четвертая часть макета трекера в координатах $r-z$. Во внутреннем трекере зеленые линии соответствуют пиксельным модулям, состоящим из двух считывающих чипов, а желтые линии — пиксельным модулям с четырьмя считывающими чипами. Во внешнем трекере (OT) синие и красные линии представляют два типа модулей — PS и 2S

тии, что позволит использовать информацию об изолированных треках и улучшит энергетическое разрешение физических объектов (таких как струи) на уровне триггера первого уровня. (OT) будет предоставлять информацию о треках частиц при каждом пересечении пучков с частотой взаимодействия 40 МГц. Такая функциональность и отбор интересных событий достигаются благодаря специальной конструкции модуля OT, работающего в паре с чипом регистрирующей электроники ASIC. Модуль OT состоит из двух односторонних близко расположенных друг к другу кремниевых датчиков, которые считываются одним и тем же ASIC. В зависимости от расстояния до точки взаимодействия модули состоят или из двух полосовых датчиков (модули 2-strip или 2S), расположенных в радиальной области свыше 60 см, или из одного макропиксельного и одного полосового датчиков (модули pixel-strip или PS), расположенных в радиальной области 20–60 см. Считывающая электроника сопоставляет два сигнала с двух датчиков и выбирает пары (так называемые stub),

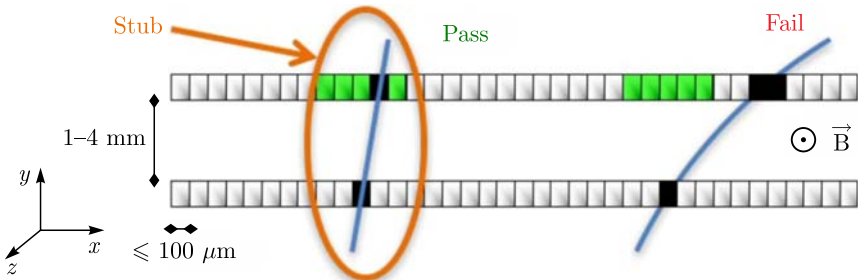


Рис. 2. Сопоставление сигналов с близко расположенных датчиков, позволяющее отбраковывать частицы с низким значением p_T

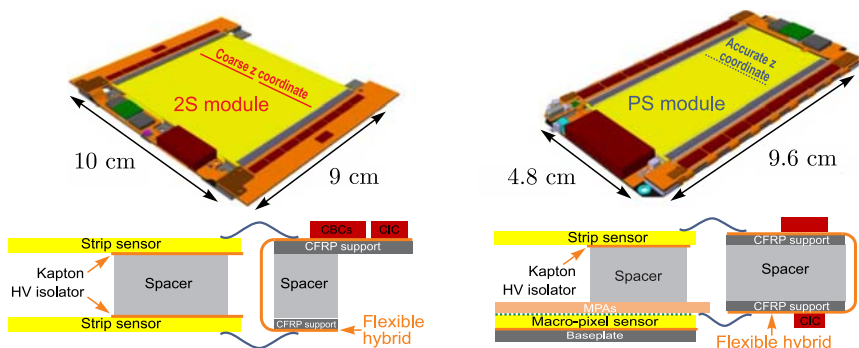


Рис. 3. Модули 2S и PS внешнего трекера

которые совместимы с треками выше целевого порога 2 ГэВ (рис. 2). Концепция конструкции и размеры модулей 2S и PS показаны на рис. 3.

Самые внутренние модули ОТ будут подвергнуты чрезмерному радиационному облучению, эквивалентному флюенсу нейтронов $1,0 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. В качестве датчика было решено использовать кремний *n-in-p* (имплантаты *n*-типа в объеме *p*-типа), поскольку он более устойчив к радиации и генерирует меньше шума после облучения по сравнению с материалом *p-in-n*. Толщина сенсора составит около 300 мкм с активной толщиной около 200–240 мкм, что делает производство сенсоров дешевле (при более толстом материале), но при этом обеспечивает достаточный сигнал в течение всего срока службы детектора.

Для модулей ОТ разработано несколько передовых схем ASIC. В модуле 2S одна микросхема считывания получает информацию о сигналах с обоих датчиков, сопоставляет их и генерирует пары с высоким значением p_T , которые вносят вклад в триггер первого уровня. Эта микросхема разработана по 130-нм технологии CMOS. В модуле PS разработаны две различные микросхемы: одна — для полосовых датчиков, другая — для макропиксельных. Эти чипы разработаны по 65-нм технологии. Сопоставление (поиск пар) полосовых и макропиксельных попаданий происходит в макропиксельном ASIC.

Внутренний трекер. IT будет оснащен пиксельными модулями. Модули, расположенные ближе всего к точке взаимодействия (на расстоянии около 3 см), соответственно, будут подвержены беспрецедентным нагрузкам. По результатам моделирования поглощенная доза излучения в данной области будет равна 12 МГр, флюенс нейтронов — $2,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при количестве одновременных взаимодействий 200 и частоте событий до 3 ГГц/см². Планируемые к использованию планарные кремниевые датчики типа *n-in-p* толщиной 100–150 мкм, сегментированные на пиксели $25 \times 100 \text{ мкм}$, обеспечивают хорошее пространственное разрешение и относительно высокую радиационную стойкость. Считывающая микро-

схема (чип) должна иметь такую же малую сегментацию и сохранять высокую эффективность при вышеупомянутом разрешении, особенно после воздействия чрезвычайно высокой суммарной дозы облучения.

Для охлаждения активных элементов и электроники ОТ и ИТ будет создана специальная ферма на базе концепции охлаждения с использованием CO_2 . Традиционная система охлаждения с использованием дистиллированной воды является недостаточной для отвода тепла от внутренних частей детектора. Для установки данной фермы будет полностью перепроектирована сервисная подземная шахта, расширено используемое пространство, добавлены новые стеллажи с электроникой, демонтирована старая комната управления установкой.

Торцевой калориметр. Торцевые части электромагнитного и адронного калориметров CMS будут заменены новой системой, имеющей название калориметр высокой гранулярности (HGCal). Как и в случае с трекинговой системой CMS, конструкция HGCal будет подвержена жесткому радиационному излучению с высокой множественностью наложенных взаимодействий на одно событие. Датчики и передняя электроника должны быть функциональными и высокоэффективными после десяти лет работы HL-LHC. Для частей, ближайших к точке взаимодействия, это соответствует максимальному флюенсу частиц $1,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$

в нейтронном эквиваленте и общей поглощенной дозе 10 МГр. Для смягчения высокого числа pile-up HGCal будет иметь увеличенную поперечную и продольную гранулярность, а также хорошее временное разрешение. С учетом этих условий, а также большой общей площади высокогранулярного калориметра и требования к созданию детектора из материалов с низкой стоимостью на единицу площади электромагнитная часть калориметра основана на технологии кремниевых датчиков и занимает 585 м^2 , в то время как адронная часть основана на технологиях кремниевых датчиков и сцинтилляционных модулей и занимает 485 м^2 .

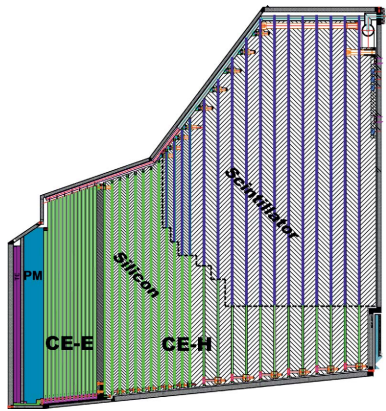


Рис. 4. Одна четвертая часть макета HGCal в координатах $r-z$

Одна четвертая часть макета HGCal в координатах $r-z$ показана на рис. 4. Подробное описание HGCal приведено в отчете о техническом проектировании [5].

Электромагнитная секция торцевого калориметра — CE-E. На основе опыта, накопленного в ходе НИОКР по материалу датчиков для модернизации фазы II трекинговой системы CMS, кремниевые датчики были выбраны в качестве активного элемента для CE-E из-за их высокой

радиационной стойкости к уровню излучения, сравнимому с уровнем излучения в объеме трекера. CE-E состоит из 28 слоев общей толщиной 34 см, что примерно соответствует $26X_0$ и $1,7\lambda$. Активными детекторными элементами будут шестиугольные кремниевые сенсоры шириной 190 мм, сегментированные в 432 шестиугольных ячейках во внутренней части калориметра и в 192 ячейках во внешней части. Модуль представляет собой датчик на листе каптонной ленты, помещенный между 1,4-мм W/Cu-пластиной (75, 25 %) и печатной платой с передней схемой ASIC HGCROC, как показано на рис. 5.

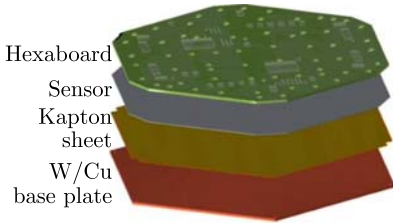


Рис. 5. Уложенные слои кремниевого модуля CE-E

HGCROC разработан по 130-нм технологии CMOS и обеспечивает полную функциональность в радиационно жестких условиях. Основными особенностями этого чипа являются высокий динамический диапазон при низком энергопотреблении благодаря методу измерения заряда через время прохождения порога (ToT) и точным (25 пс) измерениям времени регистрации события (ToA) при частоте 40 МГц.

Адронная секция торцевого калориметра — CE-H. Адронная часть HGCAL состоит из поглотителя из нержавеющей стали с 24 слоями различной продольной и поперечной сегментации. Передняя часть CE-H состоит из 12 слоев 35-мм абсорбера ($3,3\lambda$), а задняя часть — из 12 слоев 68-мм абсорбера ($5,7\lambda$). Первые восемь слоев CE-H оснащены модулями с кремниевыми вкладками (с односторонними кассетами). Остальные слои представляют собой комбинацию кремниевых слоев (при больших углах псевдобыстрот) и сцинтилляционных модулей, считываемых SiPM (при низких углах псевдобыстрот). Активные детекторные элементы представляют собой гексагональные кремниевые датчики шириной 190 мм из 8" пластин, а сигнал со сцинтилляционного модуля считывается кремниевым фотоумножителем. Расположение модулей разных типов показано на рис. 6. В центре размещены гексагональные кремниевые модули, а сцинтилляционные, в свою очередь, расположены во внешней области слоя CE-H. Регистрирующая электроника ASIC в модулях CE-H будет такой же, как и в CE-E, а именно HGCROC.

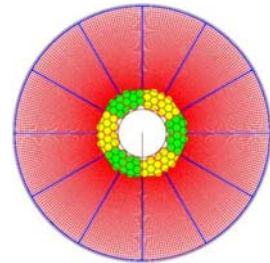


Рис. 6. Пример расположения кремниевого (внутренняя часть) и сцинтилляционного (внешняя часть) модулей в 22-м слое CE-H

Детектор MIP. Высокое число наложенных взаимодействий в событии может привести к снижению производительности детектора по

нескольким параметрам, необходимым для корректной работы детекторных систем, таких как точность реконструкции треков, определение местоположения вершин или идентификация струй. Правильное отнесение треков к вершинам первичного взаимодействия позволяет поддерживать производительность детектора CMS во время фазы II, аналогичную сегодняшней. В техническом предложении по временному MIP-детектору в рамках программы модернизации детектора CMS фазы II [6] было показано, что специальный детектор, чувствительный к минимальным ионизирующим частицам (MIP) с временным разрешением около 30 пс, может обеспечить выигрыш в производительности при реконструкции объектов и событий. Так, предлагается детектор MIP, основанный на двух различных технологиях. Бочкообразный хронометрический слой (BTL) с охватом псевдобыстроты $|\eta| < 1,45$ будет построен из модулей LYSO (сцинтилляционного кристалла на основе лютеция, легированного церием). Детектор BTL может быть прикреплен к углепластиковой опорной трубе трекинговой детекторной системы (рис. 7). Общая площадь детектора BTL составляет около 40 м^2 . Сбор света осуществляется с помощью SiPM. Кристаллические плитки LYSO имеют высокую плотность, очень быстрое время отклика и высокий световой выход. Передовая схема ASIC (ToFHIR) будет представлять собой адаптированную версию коммерческого чипа ToFPET2, разработанного по 110-нм технологии CMOS. После создания прототипа чип ToFHIR будет переведен на более радиационно жесткую 130-нм технологию CMOS. Промодернизировано, что и кристаллы, и чипы имеют хорошее временное разрешение: 20 пс для LYSO и 37 пс для чипа с сенсорным пакетом. Разрешение последнего планируется улучшить до 25 пс, что уже наблюдается в пучковых испытаниях.

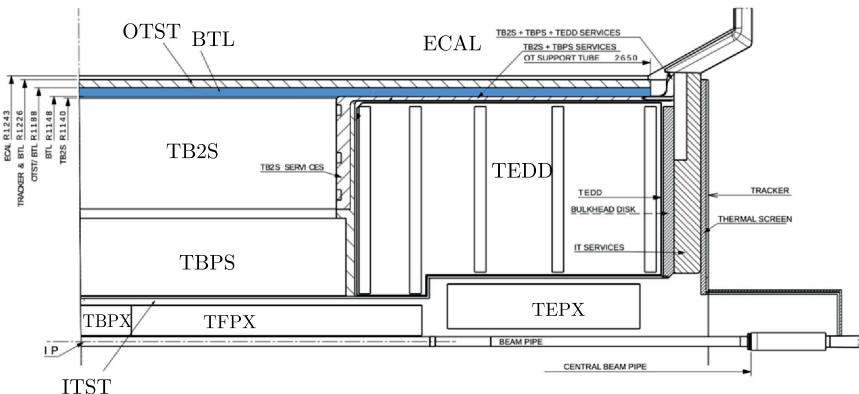


Рис. 7. Схема расположения слоя детектора BTL относительно трековой системы и электромагнитного калориметра

В области торцевой части CMS $1,6 < |\eta| < 3$ перед HGCAL будет размещен хронометрический слой торцевой части (ETL), состоящий из кремниевых детекторов с внутренним усилением (рис. 8). Основными требованиями к детектору MIP являются: временное разрешение для заряженных частиц около 30 пс, радиационная стойкость к флюенсу частиц $1,0 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ в BTL и $2,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в ETL, минимальное влияние на производительность HGCAL и совместимость инфраструктуры и механики с трековой системой и системами HGCAL. Детектор ETL будет прикреплен к носу торцевых частей детектора в отдельном холодном объеме на одной из сторон замедлителя нейтронов, что защитит его от обратного потока частиц из калориметра. Общая площадь детектора составляет 12 м^2 . Модуль ETL аналогичен модулю OT PS фазы II (пиксельно-полосковому датчику внешнего трекера), за исключением того, что он является однослойным. Чувствительный объем представляет собой оптимизированный по времени лавинный детектор с низким коэффициентом усиления (LGAD) [7], который является планарным кремниевым детектором. Это вполне устоявшаяся технология производства, которая устойчива к радиации при флюенсе частиц $1,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, ожидаемом во внутренней части детектора ETL. Сигнал MIP достаточно усилен, чтобы гарантировать высокое отношение сигнал/шум для требуемой точности синхронизации. Временное разрешение, достигнутое при испытаниях пучка, составляет более 40 пс, и дальнейшие улучшения все еще возможны.

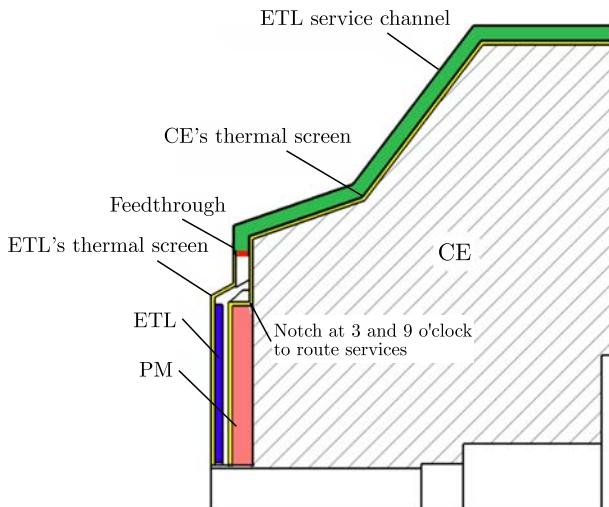


Рис. 8. Схема расположения слоя детектора ETL относительно детектора HGCAL (CE)

Основные характеристики передовой схемы ASIC микросхемы ETL следующие: временное разрешение микросхемы менее 25 пс и потребляемая мощность около 100 мВт/см². Микросхема разработана по 65-нм технологии. Микросхема ETL ASIC (ETROC) предназначена для работы с матрицей 16 × 16 пиксельных ячеек, каждая пиксельная ячейка имеет размер 1,3 × 1,3 мм, что соответствует размеру пикселя датчика LGAD. Размер датчика будет больше размера считывающего чипа, поэтому два чипа будут соединены с одним датчиком. Размер пиксельной ячейки является компромиссом между меньшей емкостью (3,4 пФ), приводящей к более высокому отношению сигнал/шум, и общим количеством каналов, влияющим на общее энергопотребление. Точный размер пиксельной ячейки будет оптимизирован, когда производительность ASIC в зависимости от входной емкости и тока будет лучше известна на опытных образцах микросхем.

Детектор мюонов. Область $1,5 < |\eta| < 2,4$, занимаемая в настоящее время четырьмя плоскостями с катодно-полосковыми камерами, будет дополнена двумя плоскостями камер с газовым электронным множителем для хорошего позиционного разрешения и двумя камерами с резистивными пластинами с низким сопротивлением для хорошего временного разрешения. Для соответствия новым требованиям к триггеру первого уровня необходимо модернизировать считывающую электронику некоторых катодно-полосковых камер (внутренние кольца) и камер дрейфовых трубок. Детали подробнее описаны в отчете о техническом проектировании модернизации по программе фазы II мюонных детекторов CMS [8].

Триггер. Задержка срабатывания триггера первого уровня будет увеличена с 3,8 до 12,5 мкс, чтобы учесть информацию трекинговой системы и обеспечить достаточное время для согласования информации с трекера, калориметра и мюонных систем. Частота приема триггера первого уровня будет увеличена со 100 до 750 кГц. Все эти изменения требуют модернизации считывающей электроники в соответствующих поддетекторах. Сбор данных и управление триггером также подвергнутся модификации. Система сбора данных должна справиться с увеличением пропускной способности и обеспечить вычислительную мощность, необходимую для учета событий большего размера и частоты срабатывания триггера первого уровня, а также более сложной реконструкции при высокой множественности наложенных вершин при взаимодействии пучков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения задач эпохи HL-LHC детектор CMS подвергнется значительной модернизации всех подсистем, вплоть до полной переделки некоторых из них. Основной причиной является очень высокая ожидаемая мгновенная светимость $(5-7) \cdot 10^{34} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, которая приведет к очень большому числу (140–200) наложенных вершин взаимодействующих частиц в момент одного события и жестким радиацион-

ным условиям. Общая ионизирующая доза 12 МГр и флюенс частиц $2,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ будут набраны за ожидаемые десять лет работы первым слоем внутренней трековой системы CMS — ближайшего детектора к точке взаимодействия. Большинство подсистем детектора CMS, такие как трекер, калориметры и мюонные детекторы, уже находятся на стадии производства и финальных испытаний. Другие подсистемы, такие как системы триггера, системы сбора данных, все еще находятся на стадии исследования, а окончательное производство начнется в 2021–2022 гг. Оно должно быть завершено к 2024 г., а установка и ввод в эксплуатацию запланированы на 2026–2027 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Apollinari G. et al.* High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC). CERN Yellow Rep. Monogr. 2017. V. 4. P. 1–516; <https://cds.cern.ch/record/2284929>.
2. *CMS Collab.* The CMS Experiment at the CERN LHC // J. Instrum. 2008. V. 3. P. S08004; <https://cds.cern.ch/record/1129810>.
3. *Бунин П., Зарубин А.* Модернизация торцевых адронных калориметров CMS на LHC // ЭЧАЯ. 2017. Т. 48, вып. 5. С. 632–638.
4. *CMS Collab.* The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker. Technical Design Report CERN-LHCC-2017-009. CMS-TDR-014. Geneva: CERN, 2017.
5. *CMS Collab.* The Phase-2 Upgrade of the CMS Endcap Calorimeter. Technical Design Report CERN-LHCC-2017-023. CMS-TDR-019. Geneva: CERN, 2018.
6. *CMS Collab.* Technical Proposal for a MIP Timing Detector in the CMS Experiment Phase-2 Upgrade. CERN-LHCC-2017-027. LHCC-P-009. Geneva: CERN, 2018.
7. *Pellegrini G. et al.* Technology Developments and First Measurements of Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) for High Energy Physics Applications // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 765. P. 12.
8. *CMS Collab.* The Phase-2 Upgrade of the CMS Muon Detectors. Technical Design Report CERN-LHCC-2017-012. CMS-TDR-016. Geneva: CERN, 2018.