

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ТОКАМАКЕ ITER

© 2020 г. А. Д. Мельник^{а,*}, В. И. Афанасьев^а, С. С. Козловский^б, М. И. Миронов^а,
А. С. Наволоцкий^а, В. Г. Несеневич^а, М. П. Петров^а, С. Я. Петров^а, Ф. В. Чернышев^а

^а Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Россия, 194021, С.-Петербург, ул. Политехническая, 26

^б Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Россия, 195251, С.-Петербург, ул. Политехническая, 29

*e-mail: amelnik@npd.ioffe.ru

Поступила в редакцию 27.08.2019 г.

После доработки 27.08.2019 г.

Принята к публикации 30.09.2019 г.

Использование сцинтилляторов микронной толщины, нанесенных на входные окна фотоэлектронных умножителей (ф.э.у.), дает возможность создать детекторы ионов с малой чувствительностью к нейтронам и γ -квантам. Описана технология изготовления таких детекторов на основе сцинтиллятора CsI(Tl) и многоанодного ф.э.у. Hamamatsu H8500D. Рассмотрены основные этапы процесса, включающие вакуумное термическое напыление сцинтиллятора на подложки, приклейку подложек на окно ф.э.у., контроль качества изготовленных образцов. Технология разработана для изготовления детекторов диагностической системы атомных анализаторов для токамака-реактора ITER.

DOI: 10.31857/S0032816220020032

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведется разработка диагностической системы атомных анализаторов [1, 2] для строящегося токамака-реактора ITER. Данная система состоит из двух приборов — анализаторов LENPA и HENPA, предназначенных для регистрации атомов изотопов водорода в диапазоне тепловых (10–200 кэВ) и надтепловых (до 2.2 МэВ) энергий соответственно. Принцип действия приборов основан на ионизации входящего потока атомов и последующем разделении образовавшихся ионов по энергии и массе в электрическом и магнитном полях.

Особенностью работы анализаторов в условиях горения дейтерий-третиевой плазмы токамака ИТЭР является наличие высокого нейтронного и γ -фона. Чтобы снизить влияние фонового излучения на детектирующую систему приборов, для регистрации вторичных ионов были выбраны сцинтилляционные детекторы на основе многоанодных фотоэлектронных умножителей Hamamatsu H8500D и тонких кристаллов CsI(Tl) — от 2 до 27 мкм в зависимости от канала. При малой толщине кристалла (равной пробегу ионов в сцинтилляторе) детекторы имеют низкую чувствительность к нейтронному и γ -излучению [3, 4]. Подобные детекторы, но на основе однока-

нальных фотоэлектронных умножителей (ф.э.у.), были применены ранее в прототипах анализаторов LENPA и HENPA — приборах ISEP и GEMMA [5, 6].

Разработанная технология нанесения сцинтилляторов основана на вакуумном термическом напылении. Подложка из кварцевого стекла помещалась в вакуумный объем и предварительно нагревалась до заданной температуры. В тигле, расположенном под подложкой, происходило плавление сцинтиллятора CsI(Tl), после чего сцинтиллятор испарялся, осаждаясь на стекле. После охлаждения подложка извлекалась из вакуумного объема и приклеивалась при помощи оптического клея на входное окно ф.э.у. Отметим, что непосредственное напыление сцинтиллятора на входное окно невозможно, так как нагрев свыше 50°C разрушает фотокатод ф.э.у.

Отличительной чертой детекторной системы анализаторов LENPA и HENPA является использование многоанодных ф.э.у., что позволяет увеличить число детекторных каналов и упростить конструкцию детекторной системы. Ф.э.у. Hamamatsu H8500D представляет собой матрицу 8×8 фотоумножительных каналов с общим входным окном и независимыми выходами — анодами. В детекторе атомных анализаторов аноды ф.э.у.

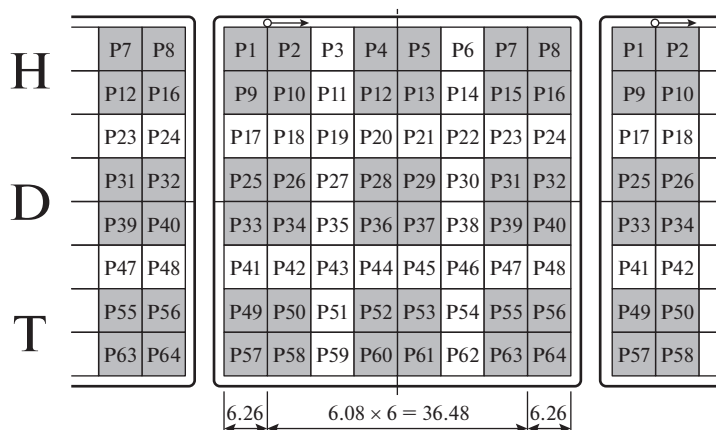


Рис. 1. Фрагмент детекторного модуля анализатора LENPA (схема): P1–P64 – каналы многоанодного ф.э.у.; серый фон – аноды ф.э.у., объединенные в каналы анализатора, неиспользуемые аноды заземлены; H, D, T – водородная, дейтериевая, тритиевая детекторные линейки соответственно.

объединяются по четыре в один энергетический/массовый канал (рис. 1). Детекторный модуль анализатора HENPA состоит из 12 ф.э.у., расположенных в один ряд, а анализатора LENPA – из 11.

ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НА Ф.Э.У.

Применение ф.э.у. нового типа потребовало создания как особой технологии нанесения тонких кристаллов на окно детектора, так и методики проверки качества изготовленной детекторной сборки. Для серийного изготовления детекторов потребовалось максимально унифицировать и по возможности автоматизировать технологический процесс.

Напыление сцинтиллятора на подложки

Для напыления была выбрана безмасляная вакуумная установка фирмы AJA INTERNATIONAL – модель Phase II J с полностью автоматизированной и управляемой от компьютера системой напыления, контролем толщины нанесенного слоя по изменению частоты кварцевого резонатора, а также возможностью чистки подложки в газовом разряде. Был сформирован следующий алгоритм работы установки: 1) нагрев подложки до температуры $T_{\text{подл}} = 120^\circ\text{C}$; 2) чистка подложки в течение 30 мин в аргоновом разряде; 3) разогрев тигля со сцинтиллятором и вывод скорости напыления на стационарное значение $30 \text{ \AA/s}$ при закрытой шторке перед подложками; 4) открытие шторки и напыление сцинтиллятора на подложку до осаждения кристалла заданной толщины.

Выбор температуры подложки $T_{\text{подл}}$ был продиктован следующими факторами. На стадии чистки температура выше 100°C позволяет эффективно удалять с подложки пары воды. Темпе-

ратура $T_{\text{подл}} = 120^\circ\text{C}$ на стадии напыления была выбрана после ряда экспериментов и анализа качества осажденного сцинтиллятора. При $T_{\text{подл}} \geq 150^\circ\text{C}$ концентрация Tl в напыленном слое падает, что приводит к снижению световыхода полученного кристалла. При $T_{\text{подл}} \leq 100^\circ\text{C}$ не происходит кристаллизации напыленного слоя, образуется рыхлая поверхность со сниженной механической прочностью и повышенной гигроскопичностью.

Скорость напыления не имеет существенных ограничений. Ее значение было выбрано таким, чтобы система автоматической стабилизации стенда успевала компенсировать возникающие отклонения. Кроме того, при заданной скорости $30 \text{ \AA/s}$ процесс напыления занимал разумное время: от 10 мин для сцинтилляторов толщиной 2 мкм до 2.5 ч для 27-мкм сцинтилляторов.

Контроль качества напыленного сцинтиллятора

После каждого напыления проводился контроль толщины напыленного слоя по массе сцинтиллятора m . Подложки до и после напыления взвешивались на прецизионных весах с точностью до 10^{-5} г. Так как площадь сцинтиллятора S была известна, его толщина определялась как $t = m/S\rho$, где ρ – плотность кристалла CsI(Tl), равная 4.51 г/см^3 .

В дополнение к измерению толщины после каждого напыления проводился визуальный контроль качества напыленного сцинтиллятора, а также проверка величины световыхода. Поскольку точное измерение абсолютного значения световыхода является достаточно трудоемкой задачей, был применен следующий алгоритм действий. Вначале каждая подложка с кристаллом из напыленной партии (всего 6 штук) размещалась на входном окне спектрометрического ф.э.у. На

данном этапе вместо многоанодного использовался одноканальный ФЭУ-85. Его применение позволило исключить возможное влияние неточности установки кристаллов над матрицей анодов ф.э.у. Н8500D. При первичном тестировании подложки устанавливались без промежуточного оптического контакта, чтобы не допустить их загрязнения. Над кристаллом располагался источник α -частиц ^{241}Am ($E_\alpha \approx 5.5$ МэВ).

Сборка размещалась под светонепроницаемым колпаком, и измерялся амплитудный спектр сигналов с выхода ф.э.у. При этом фиксировалась средняя амплитуда сигналов, пропорциональная световыходу сцинтиллятора. Далее отбирались два кристалла с наименьшим световыходом. Подложки с этими кристаллами вновь последовательно устанавливались на ф.э.у., причем на этот раз оптический контакт между подложкой и окном ФЭУ-85 осуществлялся с помощью капли оптически прозрачного масла, что позволяло повысить эффективность сбора фотонов и, соответственно, амплитуду сигналов.

При определении качества кристалла использовался тот факт, что концентрация Тl определяет не только световыход, но и время высвечивания сцинтиллятора. Длительность токового импульса с выхода ф.э.у. определялась по его осциллограмме. Если время высвечивания составляло около 1 мкс, то считалось, что в тестируемых образцах содержится необходимая концентрация Тl, и световыход кристаллов всей партии соответствует нормальному. Существенно меньшая длительность сигнала или наличие короткой компоненты (обычно десятки наносекунд) свидетельствовали о сниженной концентрации Тl, при этом отбраковывалась вся партия напыленных кристаллов. В случае же удачных испытаний четыре чистые подложки впоследствии приклеивались на многоанодный ф.э.у., а две со следами масла не использовались.

Выбор размера подложек

Особое внимание было уделено выбору размеров подложек. Было установлено, что использовать общую подложку для всего входного окна многоанодного ф.э.у. нельзя, так при этом заметно усиливается проникновение света в соседние каналы детектора. По этой причине было решено напылять сцинтилляторы на отдельные подложки для каждого детекторного канала. Как видно из рис. 1, размеры четырех объединенных каналов ф.э.у. составляют примерно 12×12 мм. Изначально для удобства работы с подложкой было решено сделать ее размером 16×16 мм при толщине 1 мм и напылять сцинтиллятор на область с размерами 12×12 мм. Такие образцы были изготовлены и приклеены на окно многоанодного ф.э.у. При облучении изготовленной сборки α -части-

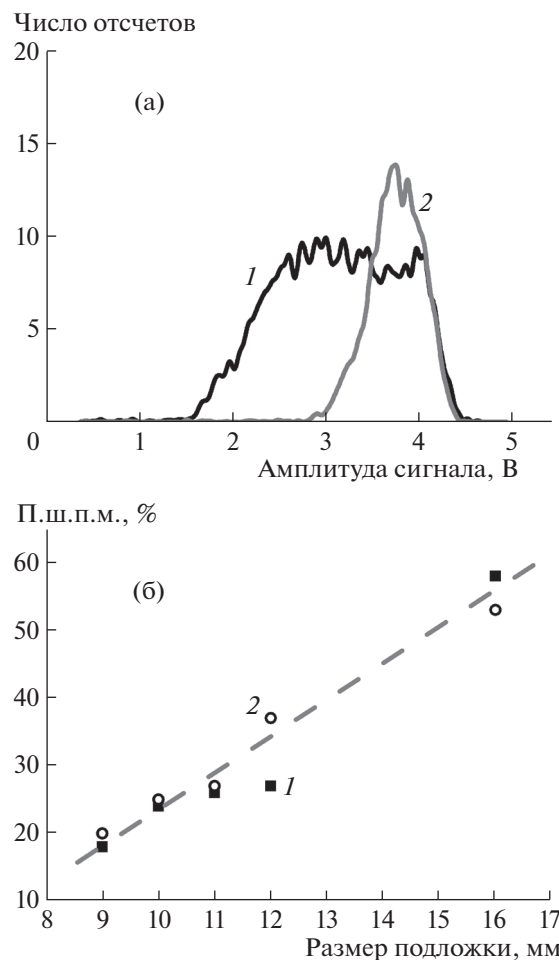


Рис. 2. Влияние размера подложки на амплитудные распределения импульсов, поступающих с детектора на основе ф.э.у. Н8500D при облучении его α -частицами: **а** — амплитудные спектры (1 — подложка 16×16 мм, 2 — 9×9 мм; **б** — зависимость ширины амплитудного распределения сигналов от линейных размеров подложек (1 — центральный канал, 2 — один из угловых каналов, штриховая линия — аппроксимация зависимости).

цами было обнаружено, что амплитудное распределение импульсов имеет форму, отличающуюся от гауссовской (рис. 2а), а его полная ширина на полувысоте (п.ш.п.м.) составляет $>50\%$, что существенно превышает значение, полученное при тестировании сцинтилляторов на одноканальном ФЭУ-85 и составляющее примерно $10\text{--}20\%$.

Дополнительные исследования показали, что основным фактором, влияющим на ширину распределения, является размер подложек. Было обнаружено, что при уменьшении размеров подложки ширина амплитудного распределения заметно снижается (рис. 2б). Мы предполагаем, что указанный эффект связан с распространением света сцинтилляционной вспышки по подложке и уходом части фотонов за пределы входного окна

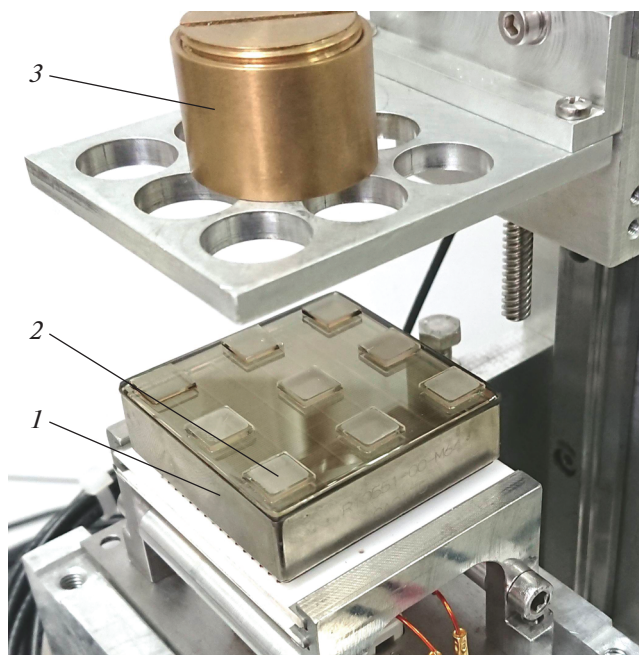


Рис. 3. Изготовленный детектор анализатора LENPA, установленный в стенд для тестирования. 1 – ф.э.у.; 2 – подложки с сцинтилляторами; 3 – источник α -частиц.

выбранного детекторного канала. При этом доля собранных фотонов значительно отличается для случаев, когда α -частица попадает в центральную область или на край сцинтиллятора.

Ожидаемый низкий поток атомов из плазмы в диапазоне надтепловых энергий [1] не позволяет заметно уменьшить размеры чувствительной области детекторных каналов для анализатора HENPA. В этом случае приемлемыми являются амплитудные распределения с п.ш.п.м. $\approx 30\text{--}40\%$, что достижимо при размерах подложек 12×12 мм. В области тепловых энергий ожидаются значительно более высокие потоки частиц, поэтому для детекторов анализатора LENPA было решено использовать подложки размером 9×9 мм, что обеспечивает п.ш.п.м. $\approx 20\%$.

Приклейка подложек на входное окно ф.э.у.

Подложки со сцинтилляторами, прошедшими проверку, приклеивались на входное окно ф.э.у. Для приклейки использовался каучуковый оптический клей СКТН-МЕД. Для соблюдения пропорции смешивания в фиксированный объем органического наполнителя (2 мл), набранного в шприц, добавлялось определенное заранее количество капель отвердителя (25 шт). Было проверено, что такая схема смешивания дает стабильный результат по скорости отверждения полученного состава. После смешивания клей на несколько

минут помещался в вакуумный шкаф для удаления из него воздуха.

Подложки приклеивались на ф.э.у. одновременно. Для их точного позиционирования была изготовлена специальная матрица-оправка. Перед приклейкой подложки укладывались в ячейки матрицы сцинтиллятором вниз. При помощи шприца на их обратную сторону наносилась капля клея. После этого подложки накрывались ф.э.у., положение которого фиксировалось той же матрицей. Далее ф.э.у. вместе с матрицей переворачивался, и подложки под собственным весом опускались на входное окно ф.э.у., выдавливая лишний клей. Сборка помещалась в вакуумный шкаф для удаления пузырьков воздуха, которые могли образоваться между склеиваемыми поверхностями.

После отверждения клея (около 8 ч) сборка извлекалась из вакуумного шкафа и устанавливалась в стенд для окончательной проверки, во время которой измерялись амплитудные распределения импульсов в каждом из каналов детектора при облучении его α -частицами. При превышении допустимых значений п.ш.п.м. (25% – для детекторов анализатора LENPA, 50% – для детекторов HENPA) в каком-либо из каналов изделие отбраковывалось.

Внешний вид одного из детекторов, изготовленного по разработанной технологии, представлен на рис. 3, где ф.э.у. с приклеенными подложками, на которые напылен сцинтиллятор, установлен в стенд для тестирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы создана технология нанесения тонких сцинтилляторов на входные окна многоанодных ф.э.у. По данной технологии было изготовлено несколько пробных детекторов. Разработанная технология будет применена при изготовлении детекторных модулей диагностической системы атомных анализаторов для токамака-реактора ITER.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена с частичным финансированием в рамках государственного контракта от 26.12.2018 № Н.4а.241.19.19.1009 между ГК “Росатом” и Проектным центром ИТЭР. Часть работы, связанная с исследованием характеристик изготовленных детекторов, выполнена в рамках госзадания ФТИ им. А.Ф. Иоффе по теме № 0040-2019-0023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Afanasyev V.I., Chernyshev F.V., Kislyakov A.I., Kozlovsky S.S., Lyublin B.V., Mironov M.I., Melnik A.D., Nesenevich V.G., Petrov M.P., Petrov S.Ya. // Nucl. In-

- strum. Methods Phys. Res. 2010. V. A621. P. 456.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.201>
2. *Petrov S.Ya., Afanasyev V.I., Melnik A.D., Mironov M.I., Navolotsky A.S., Nesenevich V.G., Petrov M.P., Chernyshev F.V., Kedrov I.V., Kuzmin E.G., Lyublin B.V., Kozlovsky S.S., Mokeev A.N.* // Phys. Atomic Nuclei. 2017. V. 80. №. 7. P. 1268.
<https://doi.org/10.1134/S1063778817070109>
 3. *Афанасьев В.И., Козловский С.С., Макарыин Д.В., Мельник А.Д., Миронов М.И., Несеневич В.Г., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В.* // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 5. P. 440.
 4. *Несеневич В.Г., Афанасьев В.И., Козловский С.С., Макарыин Д.В., Мельник А.Д., Миронов М.И., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В.* // ПТЭ. 2012. № 2. С. 115.
 5. *Afanasyev V.I., Gondhalekar A., Babenko P.Yu., Beaumont P., De Antonis P., Detch A.V., Kislyakov A.I., Kozlovsky S.S., Mironov M.I., Petrov M.P., Petrov S.Ya., Tschernyshev F.V., Wilson C.H.* // Rev. Sci. Instrum. 2003. V. 74. P. 2338.
<https://doi.org/10.1063/1.1542664>
 6. *Kusama Y., Nemoto M., Afanasyev V.I., Kozlovsky S.S., Petrov S.Ya., Satoh M., Morioka A., Tsukahara Y., Kislyakov A.I., Petrov M.P., Takeuchi H.* // Fusion Engineering and Design. 1997. V. 34–35. P. 531.
[https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(96\)00583-2](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(96)00583-2)