

# ИСТОЧНИК ПОЗИТРОНИЕВ НА ОСНОВЕ АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗМЕРЕНИЮ МАССЫ АНТИВОДОРОДА

Г. Ю. Дробышев, А. Е. Борисевич, О. Л. Войтик\*, К. И. Делендик\*

## 1. Введение

В настоящее время в Европейской лаборатории физики частиц (ЦЕРН) формируется международная научная коллаборация AEGIS [1], целями которой являются проведение экспериментов по исследованию поведения антиводорода в гравитационном поле и обнаружение нарушения СРТ четности антиводорода [2]. Планируется, что будут получены экспериментальные результаты в области фундаментальных исследований «за пределами» стандартной модели (поиск дополнительных размерностей и «зеркальной» темной материи) и развиты теоретические представления физики частиц высоких энергий.

Научная идея коллаборации AEGIS состоит в использовании взаимодействия пучка холодных антипротонов с позитрониями (Ps), возбужденными в Ридберговское состояние. Возбуждение позитрониев служит двум целям: увеличивается время жизни позитрониев и уменьшается энергия связи позитрона с электроном. Таким образом, для осуществления экспериментов, необходимо решить проблему формирования облака позитрониев. Это облако: 1) должно быть максимально холодным, чтобы увеличить сечение взаимодействия; 2) находиться достаточно далеко от материала, в котором позитронии сформировались, чтобы стало возможным их возбуждение лазером в Ридберговское состояние.

Позитронии будут формироваться в результате взаимодействия пучка медленных позитронов с соответствующей мишенью. Данное явление известно давно [3], однако эффективность образования позитрониев как функция параметров, таких как: материал, энергия начальных позитронов и угловое распределение изучены слабо. Таким образом, разработка источника позитрониев с необходимыми характеристиками является одной из ключевых задач при создании экспериментальной установки коллаборации AEGIS.

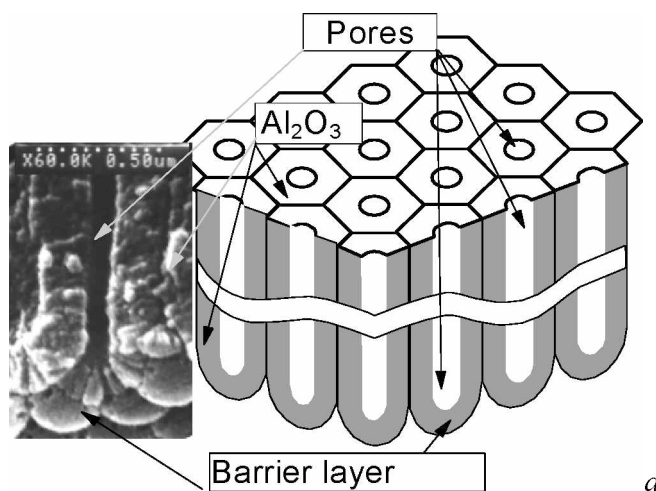
## 2. Анодный оксид алюминия – перспективный материал для формирования облака позитрониев

В качестве материала мишени нами было предложено использовать анодный оксид алюминия (АОА). АОА формируется электрохимическим окислением алюминия в электролитах, умеренно растворяющих АОА, и представляет собой регулярное гексагональное построение одинаковых ячеек, которые параллельны друг другу и нормальны к поверхности алюминиевой основы. Каждая индивидуальная ячейка имеет осевую пору, закрытую со стороны алюминиевого анода барьерным слоем оксида. На рис. 1, а схематически показана ячеистопористая структура анодного оксида алюминия, а на рис. 2 – фотографии, сделанные с помощью электронного микроскопа. Благодаря наличию в мишени из АОА регулярных каналов с хорошо контролируруемыми размерами, мы надеемся

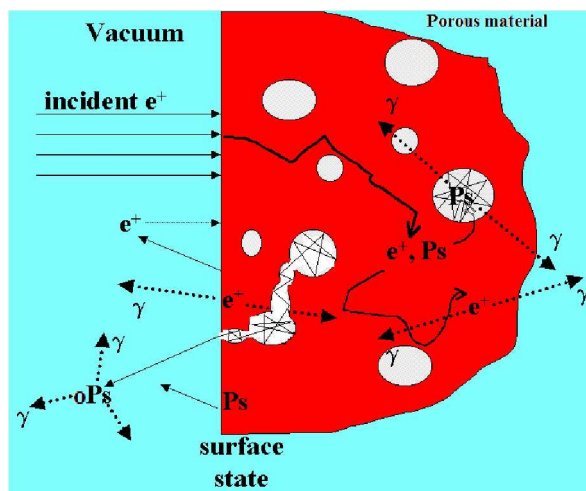
\* Институт физики НАН Беларуси, Минск.

достичь большего выхода позитрониев по сравнению с широко используемыми мишенями из оксида кремния, полости которых имеют различные размеры и могут не иметь выхода на поверхность (рис. 1, б [4]).

В ходе совместных исследований с нашими партнерами из Лаборатории физики частиц (Анси-ле-Вье, Франция), было экспериментально подтверждено, что образовавшиеся в материале мишени позитронии выходят по имеющим регулярную структуру каналам из объема мишени наружу и доля образовавшихся и вышедших из мишени ортопозитрониев составляет порядка 20 %, что делает предложенный материал пригодным для использования в качестве источника позитрониев [5].



a



б

Рис. 1. Схематическое представление анодного оксида алюминия (а); возникновение и поведение позитрониев в пористой мишени (б)

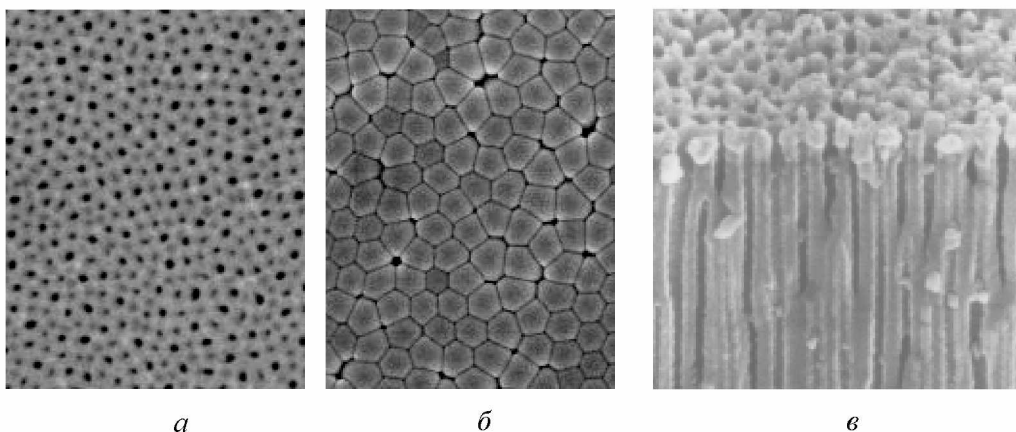


Рис. 2. Электронно-микроскопические снимки АОА: *а* – со стороны пористого слоя; *б* – скол; *в* – со стороны барьерного слоя

### 3. Исследования физических характеристик мишеней, легированных ионами металлов

Необходимость легирования обусловлена тем, что получаемый в результате стандартного технологического процесса анодный оксид алюминия является диэлектриком. Его электрическое сопротивление составляет единицы ГОм. Однако мишень должна не только обеспечивать высокий выход позитрониев, но и удовлетворять ряду технических требований, обусловленных условиями проведения эксперимента. В частности, применение непроводящей мишени является крайне нежелательным, т. к. создает существенные дополнительные трудности для оптимизации электрических полей в зоне эксперимента. Поэтому нами были проведены исследования возможности повышения электрической проводимости материала мишеней.

Основную технологическую проблему легирования составляла необходимость внедрить значительное количество ионов металла, которое обеспечивало бы достаточно высокую проводимость образцов, однако при этом не должна нарушаться присущая чистому анодному оксиду алюминия структура каналов. Использование метода ионной имплантации было признано нецелесообразным, так как данный метод не обеспечивает вхождения макроскопически значимого количества ионов в объем образца. В результате предварительных оценок перспективными для дальнейшей разработки были признаны три метода: выращивание образцов АОА из сплавов алюминия и другого металла и использование в процессе выращивания генератора переменного напряжения специальной формы и напыление проводящего покрытия на поверхность и стенки каналов мишени.

Для проверки работоспособности первого метода были проведены серии экспериментов по анодированию различных типов сплавов алюминия с другими металлами, такими как магний и марганец. В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что сопротивление образцов практически не отличается от сопротивления чистого оксида алюминия.

Полученные образцы были подвергнуты спектральному анализу. Из спектрограммы (рис. 3) следует, что, кроме алюминия, металлы, входящие в состав сплава, не входят в состав оксида, как это предполагалось ранее. По-видимому, при электрохимическом окислении сплава происходит стравливание данных металлов и их переход в раствор в виде ионов с последующим разрядом на катоде.

Идея инкорпорирования ионов металлов в АОА в процессе электрохимического окисления алюминия состоит в следующем:

- в раствор электролита вводятся металлосодержащие агенты: соли, металлические кислоты, металлоорганические комплексы;
- анодирование производится с использованием переменного напряжения специальной формы;
- в анодный полупериод происходит рост анодного оксида алюминия, в катодный – разряд ионов металлов у дна пор АОА.

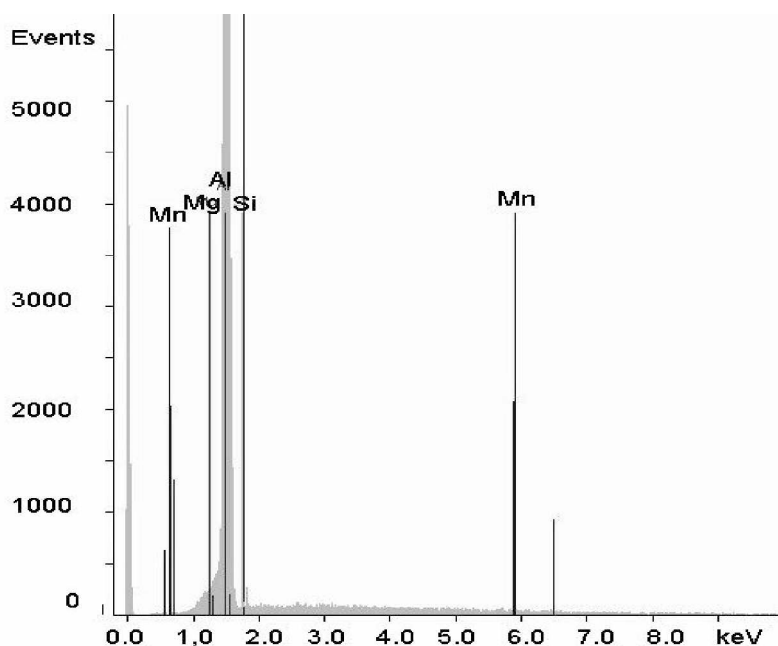


Рис. 3. Спектрограмма образца, выращенного из сплава

Предполагается, что происходит осаждение металла на барьерном слое АОА на дне пор с последующим его включением в состав АОА. Количество металла, осаждаемого в катодном полупериоде, контролируется по токовым характеристикам процесса.

Были предприняты попытки получения АОА, содержащего следующие металлы: цинк, олово, никель, магний, алюминий, медь, вольфрам, тантал, молибден, свинец. В настоящее время достигнут успех в инкорпорировании свинца (рис. 4) и молибдена. Разработанная процедура позволяет контролировать количество осажденного металла. Как показали проведенные исследования, распределение металла по объему оксида – равномерное.

Измерения показали, что сопротивление полученных этим методом образцов также мало отличается от сопротивления чистого АОА. Для того чтобы инкорпорированные металлы оказали влияние на общую проводимость АОА, необходимо осуществить их активацию, т. е. провести частичное восстановление окислов металлов. Для этого планируется использовать отжиг в среде водорода или в вакууме. В настоящее время продолжаются исследования по оптимизации параметров термической обработки пластин в вакууме или в водороде с целью восстановления легирующих металлов в приповерхностных областях стенок каналов мишеней.

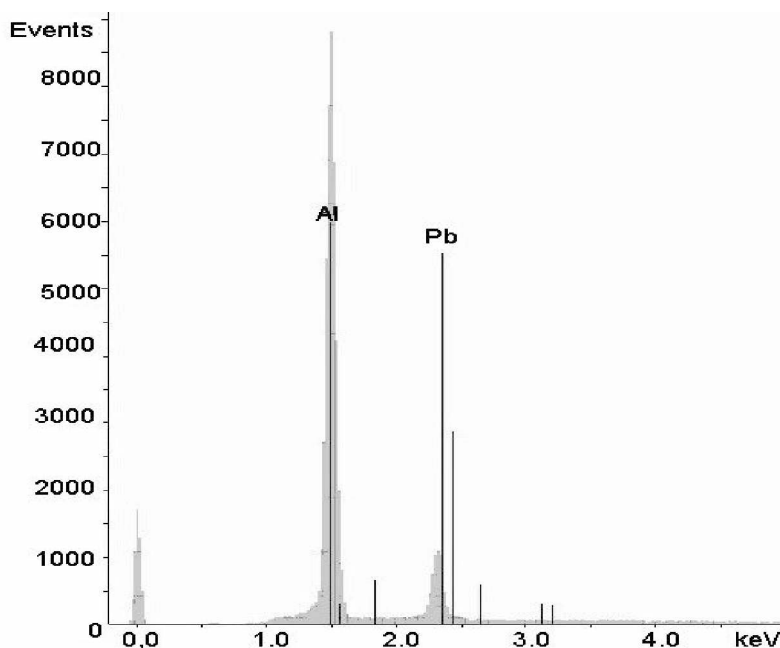


Рис. 4. Спектрограмма образца, легированного ионами свинца

Наилучшие результаты были получены при нанесении проводящих металлооксидных покрытий на стенки каналов мишени различными методами, в частности, напылением металлов в вакууме с последующим окислением и нанесением покрытий из растворов металлоорганических соединений с последующим отжигом. В качестве материалов оксидных покрытий использовались оксиды никеля и магния.

В настоящее время положительные результаты достигнуты при использовании оксидного никелевого покрытия, полученного напылением пленок никеля различной толщины на стенки каналов мишени с последующим их окислением.

Нами были проведены исследования электрического сопротивления в вакууме образцов с проводящими покрытиями. Установлено, что электрическое сопротивление, в зависимости от условий получения проводящей пленки, составляет от 1 МОм до нескольких сотен МОм при комнатной температуре.

#### 4. Разработка технологии формирования мишени с заданным диаметром каналов

Естественная пористость АОА составляет от 10 до 200 нм. Образцы, на которых нами был получен максимальный выход позитрониев, имели каналы диаметром порядка 100 нм. Однако мы полагаем, что при таких размерах каналов, значительная часть сформировавшихся в материале позитрониев испытывает большое количество соударений и аннигилирует, не успев выйти из мишени. Поэтому нами начаты исследования, с целью нахождения оптимальных размеров каналов в диапазоне до нескольких мкм. Для формирования каналов требуемого диаметра в пластинах АОА был использован метод травлением через фоторезистивную маску.

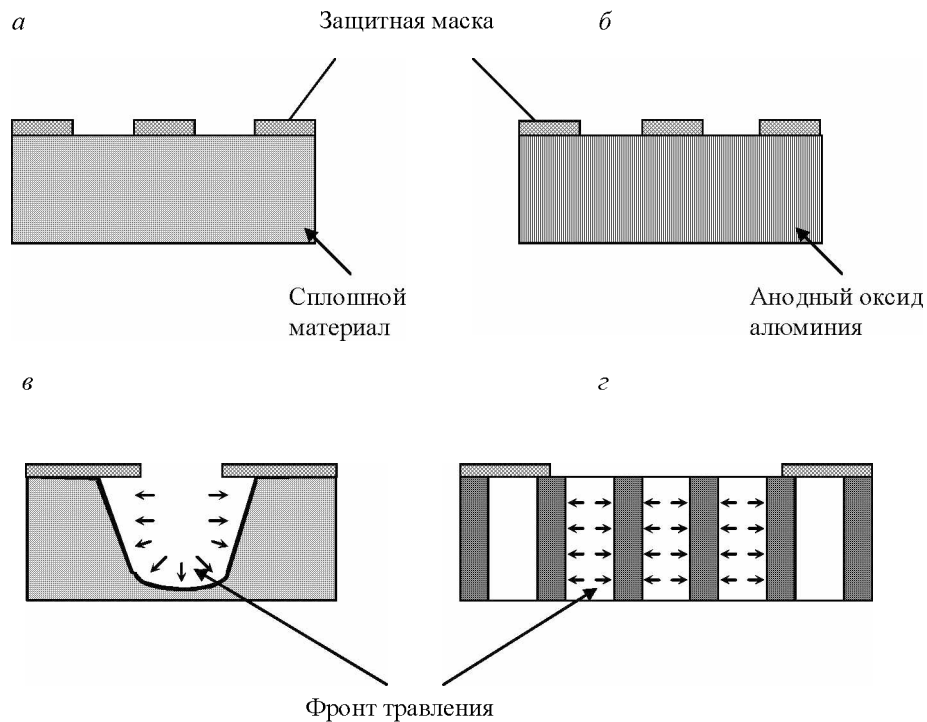


Рис. 5. Процесс травления сплошного (а, в) и пористого (б, г) материалов

Процессы химического травления структурированных материалов, в частности АОА, имеющего регулярную пористую структуру, и сплошных однородных материалов значительно отличаются друг от друга. Рассмотрим особенности поведения сплошного материала, например металла, и АОА при изготовлении из них химическим травлением какой-либо микроструктуры, например, матрицы сквозных каналов. На рис. 5, а, б изображены соответствующие схемы. В случае сплошного материала фронт травления распространяется более или менее одинаково по всем направлениям вследствие изотропности процесса, а

при наличии защитной маски на поверхности имеет место подтравливание материала под край маски и неоднородность сечения канала по его глубине (рис. 5, в). В случае АОА, травитель, проникая вглубь каналов на всю длину, разрушает их стенки, т. е. фронт травления движется параллельно поверхности алюминиевой основы. Таким образом, наблюдается своего рода анизотропия процесса травления, обусловленная наличием упорядоченной ячеисто-пористой структуры АОА. При этом образуются вертикальные каналы с минимальным уходом по размеру (рис. 5, з).

Для экспериментальных целей был разработан и изготовлен фотошаблон, представляющий собой позитивное изображение мишени с каналами диаметром 5 мкм и межканальным расстоянием 5 мкм. Была разработана процедура изготовления пластин АОА с травленными каналами.

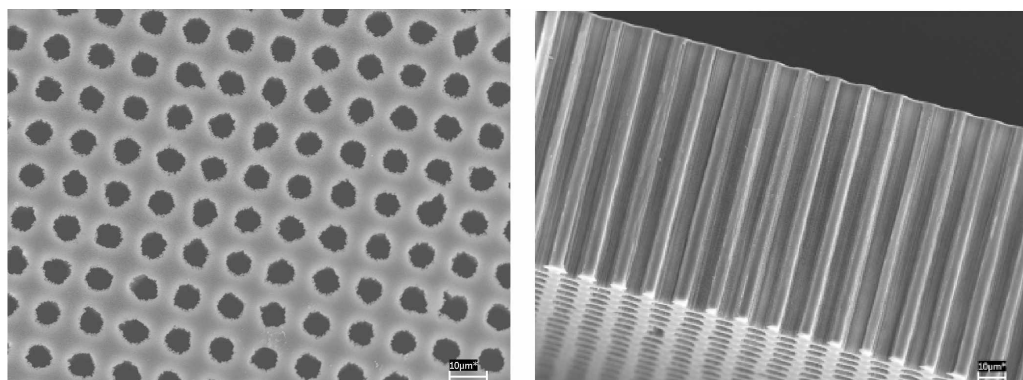


Рис. 6. Электронно-микроскопические снимки мишеней на основе АОА

Технология изготовления мишеней такого рода оказалась крайне сложной и потребовала значительных усилий для реализации. В частности, высокий коэффициент заполнения мишени обуславливал разрушение маски, нарушение целостности структуры пластины АОА при травлении.

К настоящему времени нами получены соответствующие структуры из АОА со следующими параметрами:

- диаметр – 24 мм;
- диаметр рабочей поверхности – 20 мм;
- толщина – 100–120 мкм;
- диаметр каналов – 5–6 мкм;
- межканальное расстояние – 4–5 мкм;
- калибр (отношение толщины к диаметру каналов) – от 20 и более;
- количество каналов –  $1 \cdot 10^6$  на  $1 \text{ см}^2$ .

На рисунке 6 показаны полученные структуры. Видно, что каналы протравлены насквозь, расположены регулярно, и имеют одинаковый диаметр по всей толщине пластины.

## 5. Заключение

Экспериментально продемонстрировано, что образовавшиеся в материале мишени позитронии будут выходить по имеющим регулярную структуру каналам из объема мишени наружу и доля образовавшихся и вышедших из мишени ортопозитрониев составляет порядка 20 %, что делает материал пригодным в качестве источника облака позитрониев. Исследованы возможности увеличения электрической проводимости образцов за счет легирования ионами металлов различными методами. Разработана технология травления пластин АОО с целью получения каналов оптимального диаметра. В настоящее время ведется работа по оптимизации разработанной технологии и доведению толщины мишени до 150–180 мкм с сохранением параметров микроканальной структуры.

## 6. Благодарности

Авторы выражают благодарность партнерам из НЦНИ (Франция): Д. М. Сью, П. Неделеку, К. Ба, Н. Шарвану за помощь в проведении экспериментальных исследований процессов формирования позитрония в различных материалах, а также П. Ф. Сафронову (НИИ ЯП) за помощь при проведении экспериментальных исследований.

Г. Ю. Дробышев и А. Е. Борисевич признательны Национальному центру научных исследований Франции и Белорусскому республиканскому фонду фундаментальных исследований за поддержку данной работы, оказываемую в рамках международного гранта БРФФИ Ф07Ф-004.

## Литература

1. *Kellerbaue A., ... , Drobychev G. et al. // NIM. 2008. Vol. B266. P. 351.*
2. *Walz J., Hänsch T.W. // General Relativity and Gravitation. 2004. Vol. 36. P. 561.*
3. *Paulin R., Ambrosino G. // J. Phys. 968. Vol. 29. P. 263.*
4. *Charlton M. // Hyperfine Interactions. 1997. Vol. 109. P. 269.*
5. *Djourelou N., Palacio C. A. et al. // J. Phys.: Condens. Matter. 2008. Vol. 20. P. 095206.*

## POSITRONIUM SOURCE ON A BASIS OF ANODIC ALUMINUM OXIDE FOR THE EXPERIMENT ON AN ANTI-HYDROGEN MASS MEASUREMENTS

**G. Yu. Drobychev, A. E. Borisevich, O. L. Voitik\*, K. I. Delendik\***

It was experimentally shown that positroniums which are formed in the anodic aluminum oxide (AAO) will exit from target through regular channels. A part of OPs that leave target reaches 20 % which makes material to be usable as a source of positroniums cloud. Possibilities to increase an electric conductivity of samples were studied. A technology of AAO plates etching is developed in order to optimize channels diameter.

---

\* Institute of Physics, Minsk, Belarus.