

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЖИМА САМОРАСПЫЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ МАГНЕТРОННЫХ РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ИСПАРЯЮЩИМИСЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МИШЕНЯМИ**

Г.А. Блейхер, В.П. Кривобоков, Д.В. Сиделёв, В.А. Грудинин, Р.В. Попов  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

Выполнены исследования механизмов и закономерностей функционирования разряда при работе магнетронной распылительной системы (МРС) в режиме самораспыления без напуска рабочего газа. Установлено, что МРС способна работать без подачи рабочего газа, если дополнительно к распылению создаётся испарение или сублимация мишени, за счёт которых концентрация атомов вблизи поверхности мишени становится достаточной для поддержания разряда. На примере МРС с расплавленными медными и алюминиевыми мишенями, помещёнными в тигли, а также с горячей твердотельной хромовой мишенью, определены минимально необходимые значения мощности, начиная с которых возможно функционирование разряда без напуска рабочего газа. Обнаружено, что пороговое значение мощности в значительной степени зависит от вещества мишени, степени черноты поверхности тигля (для жидкофазных мишеней) и вида источника питания. Выявлено, что термоэлектронная эмиссия не является необходимым фактором в поддержании разряда магнетрона, работающего на парах вещества мишени.

Было установлено, что коэффициенты эрозии металлических мишеней при испарении или сублимации достигают нескольких десятков атомов на ион, что на порядок выше, чем коэффициенты распыления. Вследствие этого осаждение покрытий в условиях самораспыления происходит без снижения скорости осаждения по сравнению со случаями участия рабочего газа. В экспериментах и с помощью расчётов определено, что скорости осаждения медных, алюминиевых и хромовых покрытий примерно на порядок превышают скорости осаждения, имеющие место при обычном распылении охлаждаемых мишеней с аналогичными значениями мощности МРС.

Исследовались плотности потоков осаждаемых частиц и энергии в условиях интенсивного испарения мишени. Получено, что в рассмотренном диапазоне мощности МРС благодаря испарению (или сублимации в случае хрома) плотность потока осаждаемых частиц возрастает примерно на порядок. Основной источник энергии, поступающей на подложку – тепловое излучение со стороны мишени. Величина суммарного потока энергии примерно одинаковая как при распылении мишени в атмосфере аргона, так и в режиме самораспыления. Выявлена возможность управления кинетической составляющей энергетических потоков на подложку путём приложения к ней отрицательного потенциала смещения. Плотность ионного тока смещения на подложке является примерно одинаковой как в случае осаждения с напуском аргона, так и в режиме полного самораспыления.

Структурные и функциональные характеристики покрытий проанализированы в зависимости от вида источника питания и атмосферы в камере (распыление с помощью рабочего газа при давлении 0,18-0,4 Па и в режиме полного самопораспыления при давлении 0,01 Па и ниже). Выяснилось, что в условиях интенсивного испарения (или сублимации) не прослеживается заметно выраженного влияния фактора самораспыления и вида источника питания на кристаллическую структуру и структуру роста исследованных плёнок. Однако получены свидетельства улучшения показателей электрической проводимости для медных

покрытий, твёрдости и коррозионной стойкости хромовых покрытий, осаждённых в условиях полного самораспыления при давлении в камере 0,01 Па и ниже по сравнению с осаждением в атмосфере аргона.

Исследования выполнялись при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-08-00454.

## МАТРИЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТОКОВ ПЕРЕХОДА МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕМНОГО ФОТОНА ЭЛЕКТРОНОМ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА

И.В. Ворончихин, А.Ю. Трифонов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [IVV1211@yandex.ru](mailto:IVV1211@yandex.ru)

При исследовании динамики удаленных галактик возникло противоречие между данными наблюдения и теоретическими предсказаниями. Решение данной проблемы возможно с помощью введения понятия скрытой массы, впоследствии названной темной материей. В настоящее время такой подход стал общепринятым [1,2].

По аналогии со стандартной моделью на основе спонтанного нарушения калибровочной симметрии  $U(1)$  можно ввести векторную массивную частицу медиатор, которая отвечает за взаимодействие между видимым сектором и темной материей путем кинематического смешивания с электромагнитным фотоном [2,3]

В работе на основе обобщенного лагранжиана [1]:

$$L_{\psi, A} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} \left\{ \gamma_{\mu} (i\partial^{\mu} - eA^{\mu}) - M_{\psi} \right\} + \frac{1}{2} \text{tr} F_{\mu\nu} F'^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F'_{\mu\nu} F'^{\mu\nu} + \frac{1}{2} \lambda_{M_A}^2 A'_{\mu} A'^{\mu} + \bar{\chi} \left\{ \gamma_{\mu} (i\partial^{\mu} - g'A'^{\mu}) - M_{\chi} \right\} \chi,$$

были получены матричные элементы токов перехода для мощности излучения темного фотона электроном в форме функционала от классической траектории излучающего электрона с учетом квантовых поправок, связанных с отдачей излучаемого темного фотона и квантовым характером движения электрона. Результаты получены в электромагнитных полях общего вида, при условии, что их потенциалы гладкие функции вместе со всеми производными.

Волновая функция электрона была рассмотрена в квазиклассическом приближении методом комплексного роста Маслова и удовлетворяет уравнению Дирака с точностью до  $O(\hbar^{5/2})$ ,  $\hbar \rightarrow 0$  [4].

Для полученных функционалов, решив вариационную задачу, можно найти траекторию частицы в электромагнитном поле, для которой мощность спонтанного излучения темного фотона максимальна.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Томской области в рамках научного проекта № 19-41-700004.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S.N. Gninenko, Search for MeV dark photons in a light-shining-through-walls experiment at CERN — Phys. Rev. D 89, 075008 –Published 8 April 2014.
2. D. Banerjee et al. (The NA64 Collaboration), Search for vector mediator of dark matter production in invisible decay mode — Phys. Rev. D 97, 072002 – Published 4 April 2018.
3. Holdom B. Two  $U(1)$ 's and epsilon charge shifts //Phys. Lett., B. – 1986. – Т. 166. – №. 2. – С. 196198.