

## Моделирование процесса создания микрокомпонентов для вакуумной электроники и рентгеновской оптики с применением протонно-лучевой литографии

А.Г. Пономарев<sup>1,2,\*</sup>, А.С. Лапин<sup>1</sup>, С.В. Коляничко<sup>1</sup>, В.А. Ребров<sup>1</sup>, В.О. Журба<sup>2</sup>, М.В. Петровский<sup>2</sup>,  
В.Н. Коломиец<sup>1</sup>, С.Н. Кравченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики НАН Украины, ул. Петропавловская, 58, 40000 Сумы, Украина

<sup>2</sup> Сумский государственный университет, ул. Римского-Корсакова, 2, 40007 Сумы, Украина

(Получено 27.09.2017; в отредактированной форме – 29.10.2017; опубликовано online 15.11.2017)

Проведено численное моделирование процесса сканирования сфокусированным пучком протонов с энергией 1 МэВ в канале протонно-лучевой литографии на базе электростатического ускорителя с целью выбора размеров отклоняющих пластин электростатической сканирующей системы. Условием выбора были максимальная величина раstra сканирования на поверхности облучаемого образца и минимизация отклонения пучка вдоль оптической оси. Разработана программа построения профиля сканирования пучком, который адекватно отображает шаблон создаваемых микрокомпонентов. Отработан процесс подготовки образцов с нанесением тонкого слоя резистивного материала. Определены дозы облучения образцов протонным пучком для получения условий полного травления облученной области. Проведены тестовые эксперименты по проверке работоспособности системы управления процессом сканирования.

**Ключевые слова:** Микрокомпоненты, Протонно-лучевая литография, Сканирующая система, Дифракционная решетка.

DOI: 10.21272/jnep.9(6).06010

PACS numbers: 42.82.Cr; 85.40.Hp; 81.16.Nd

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Источники, использующие дифракционное излучение движущихся электронов, относятся к ряду перспективных генераторов в субмиллиметровом диапазоне волн. Одним из самых сложных узлов субмиллиметрового генератора дифракционного излучения является отражательная дифракционная решетка [1]. Период решетки с переходом в субмиллиметровую область длин волн должен быть < 100 мкм и по мере уменьшения длины волны период решетки должен так же уменьшаться. Аналогичные требования предъявляются и к дифракционным решеткам, которые применяются в рентгеновской дифракционной оптике. Важным требованием здесь является трехмерный характер решеток, когда соотношение планарных размеров ламелей и их высоты должны быть в определенной пропорции [2].

Одним из физических принципов, на основе которых могут разрабатываться новые технологические процессы изготовления низкоразмерных структур с высоким аспектным отношением как микрокомпоненты для вакуумной электроники и рентгеновской оптики, являются сфокусированные пучки протонов мегаэлектронвольтных энергий. В первую очередь это связано с тем, что размер сфокусированного пучка может быть < 100 нм, поэтому за счет взаимодействия частиц пучка с веществом можно локально модифицировать его физические и химические свойства в микро- и нано-размерных масштабах. Процесс фокусировки протонного пучка, ускоренного с помощью электростатического ускорителя до энергии нескольких МэВ, осуществляется с помощью прецизионных магнитных квадрупольных линз. С помощью электромагнитной отклоняющей системы пучок ска-

нируется по поверхности однородного слоя резистивного материала в соответствии с заданной цифровой моделью. Облученная (для позитивного резистивного материала) или необлученная область (в случае негативного резистивного материала) в дальнейшем удаляется в результате химического травления. Преимущество такой прямой протонно-лучевой литографии перед аналогичными проекционными и пучковыми технологиями основывается на отсутствии масок и/или возможности создавать трехмерные микро- и нано-структуры с гладкими и прямыми боковыми стенками [3-5]. Устоявшееся название такого литографического процесса в зарубежной литературе – Proton Beam Writing (PBW).

В настоящей работе решена задача по совершенствованию электростатической сканирующей системы в канале протонно-лучевой литографии на основе электростатического ускорителя [6]. Основные требования к новой сканирующей системе состояли в увеличении размеров раstra сканирования и уменьшении отклонения пучка в линзовой системе финальной фокусировки. Для системы управления положением пучка необходимо было разработать компьютерную программу по созданию цифрового шаблона. В экспериментальной части стояла задача по отработке технологии нанесения слоя резистивного материала, установления дозы его облучения по заданному шаблону и получении микроструктуры в резистивном материале РММА (полиметилметакрилат, химическая формула C<sub>5</sub>O<sub>2</sub>H<sub>8</sub>).

### 2. УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СКАНИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

В установках протонно-лучевой литографии для управления положением пучка применяются элек-

\* [ponom56@gmail.com](mailto:ponom56@gmail.com)

тростатические сканирующие системы (ЭСС) в форме плоских конденсаторов. Это вызвано необходимостью быстрой смены положения пучка и требованием высокой точности перемещения пучка в замкнутом цикле, чего не могут обеспечить ферромагнитные сканирующие системы. Недостатком ЭСС являются сравнительно большие продольные (вдоль оси пучка) размеры. Поэтому их необходимо размещать перед магнитными квадрупольными линзами системы финальной фокусировки. Это приводит к тому, что в процессе сканирования принимают участие и квадруполь. В работе [6] в качестве зондоформирующей системы канала протонно-лучевой литографии предложено использовать новую пятилинзовую систему формирования пучка протонов [7]. Разработанная ранее ЭСС с двумя парами параллельных пластин, каждая из которых отклоняет пучок во взаимно перпендикулярных поперечных направлениях к оси пучка, не обеспечивает необходимый размер растра, причем отклонение пучка в последней линзе выходит за пределы ионопровода. Поэтому была рассмотрена конфигурация ЭСС, аналогичная ранее исследованной в работе [8], и состоящая из трех пар параллельных пластин. На рис. 1 представлена схема расположения пластин новой ЭСС и триплета магнитных квадрупольных линз финальной фокусировки.

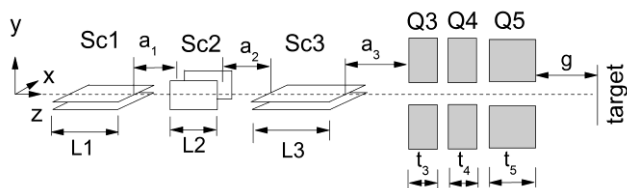


Рис. 1 – Схема расположения сканирующей системы с тремя парами отклоняющих пластин (Sc1, Sc2, Sc3) и финального триплета магнитных квадрупольных линз (Q3, Q4, Q5)

Ограничением в выборе продольных размеров пластин была конструктивная длина уже изготовленного корпуса ЭСС,  $L1+L2+L3+a1+a2=490$  мм. Прочие геометрические размеры были фиксированы: расстояние сканирующей системы до квадрупольной линзы Q3  $a3=450$  мм, длины линз  $t3=t4=60$  мм,  $t5=110$  мм, расстояния между линзами 40 мм, рабочее расстояние  $g=110$  мм. Для обеспечения стигматической фокусировки квадрупольные линзы финального триплета Q3, Q4, Q5 имеют магнитную индукцию на полюсе  $B3=B4=0,0463776$  Тл,  $B5=0,09258544$  Тл. Линзы имеют питание, которое обеспечивает фокусировку в плоскости  $xOz$  для квадруполь Q3 и Q4, а квадруполь Q5 имеет инверсное питание, обеспечивая фокусировку в плоскости  $yOz$ . Проведено численное моделирование движения пучка протонов в ЭСС и триплете с применением двух методов: матричного, с учетом хроматических и сферических aberrаций 3-го порядка в приближении прямоугольного распределения поля как в отклоняющих пластинах ЭСС, так и в квадрупольных линзах; траекторного метода, основанного на численном интегрировании уравнений движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Задача состояла в выборе длин отклоняющих пластин L1,

L2, L3, которые обеспечивают максимальный размер растра сканирования пучком по поверхности образца с минимальным поперечным отклонением пучка в ионопроводе внутри линз. Из конструктивных условий расстояние между пластинами  $a1=a2=10$  мм. Анализ результатов моделирования показал удовлетворительное совпадение траектории осевой частицы, полученных обоими методами. При этом отличие положения частицы на поверхности облучаемого образца составило  $< 5\%$ . В результате численного моделирования получены продольные размеры пластин  $L1=150$  мм,  $L2=90$  мм,  $L3=230$  мм, причем пара пластин L3 запитана инверсно пластине L1. На рис. 2 показаны траектории осевой частицы пучка протонов с энергией 1 МэВ в процессе сканирования в двух поперечных направлениях при максимальном отклонении пучка от оси на образце. Для применяемого источника высоковольтного питания ЭСС (Dual HIGH VOLTAGE AMPLIFIER, Technisches Büro S. Fischer) с максимальным напряжением 440 В размер растра сфокусированных протонов составляет  $H_x \times H_y = 1260 \times 300$  мкм<sup>2</sup>. Стоит отметить, что отклонение в линзах не превышает 2 мм (рис.2). Учитывая размер апертуры ионопровода, который составляет 5 мм, можно утверждать об удовлетворительном решении задачи по усовершенствованию ЭСС канала протонно-лучевой литографии.

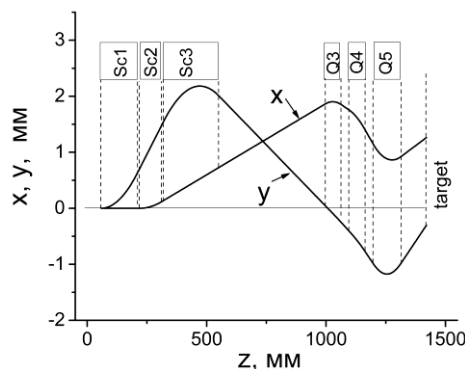


Рис. 2 – Траектории осевого протона с энергией 1 МэВ при напряжении на отклоняющих пластинах 440 В

### 3. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СКАНИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ПРОТОНОВ

Система управления процессом сканирования предназначена для перемещения сфокусированного пучка в заданную точку - пиксель на облучаемом образце в соответствии с заданным профилем сканирования. Профиль сканирования представляет собой массив данных в виде последовательности координат  $t_i = (x_i, y_i)$  точек растра. Время экспозиции пучка может задаваться как общим для всех точек, так и индивидуально для каждой точки ( $t_i$ ). Кроме того, время экспозиции каждого пикселя может быть нормализовано по флюенсу (дозе облучения). В качестве сигнала, пропорционального флюенсу, используется сигнал с интегратора тока (для проводящих образцов), либо сигнал с полупроводникового детектора обратно рассеянных протонов (для непроводящих образцов). В этом режиме пучок пребывает в текущем пикселе до момента накопления заданного чис-

ла импульсов с преобразователя ток-частота или полупроводникового детектора. Наиболее перспективным направлением при разработке аппаратной части системы управления сканированием в настоящее время является применение реконфигурируемых модулей на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) [8, 9]. Системы на ПЛИС являются системами реального времени и обеспечивают полный параллелизм процессов, позволяют оперативно конфигурировать электронику под конкретные условия эксперимента без механической переконмутации цепей. Для управления системой сканирования применен многофункциональный реконфигурируемый модуль ввода-вывода NI 7852R [10]. Два из восьми 16-разрядных ЦАП, которые имеются в его составе, задействованы для генерации аналоговых напряжений, пропорциональных  $x$  и  $y$  координатам текущего пикселя. Структурная схема системы управления сканированием представлена на рис. 3.

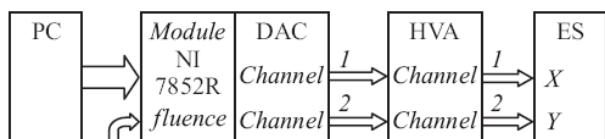


Рис. 3 – Структурная схема системы управления сканированием: PC – персональный компьютер, DAC – цифроаналоговый преобразователь, HVA – высоковольтный усилитель, ES – электростатический сканер

Профиль сканирования ( $t_i$ ) генерируется специальной компьютерной программой. В настоящее время программа позволяет формировать профиль сканирования шаблонов состоящих из прямых линий, окружностей или их секторов заданной ширины. Правильность задания профиля может быть отображена в любом пакете научной графики, который позволяет прорисовывать графики в виде набора точек ( $t_i$ ). При формировании профиля учитывается размер сфокусированного пучка для адекватного задания области экспонирования.

Профиль сканирования считывается в ПК из файла в виде массива координат точек и с использованием буферного регистра FIFO (первый вошел, первый вышел) передается в модуль NI. В модуле независимый процесс по внутренним часам последовательно на заданные интервалы времени выдает текущие пары координат  $x$  и  $y$  на ЦАП. Аналоговые напряжения, пропорциональные координатам пучка, поступают с выходов ЦАП на входы высоковольтного усилителя (ВУ). Усиленные сигналы с выходов ВУ поступают на отклоняющие пластины соответствующих каналов X и Y электростатического сканера. На цифровой вход модуля NI также заведен сигнал "флюенс", который может быть использован для нормализации времени экспозиции пикселя по накопленной дозе.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для отработки процесса экспонирования сфокусированным протонным пучком резистивных материалов было подготовлено два образца. Первый

представляет собой подложку из поликора ( $Al_2O_3$ ) с шероховатостью поверхности  $< 50$  нм с нанесенным тонким слоем положительного резиста РММА. Второй образец это подложка из меди с нанесенным тонким слоем РММА. На первом этапе был получен раствор резиста для последующего нанесения на подложки. Для этого мелкодисперсная фракция РММА (механически измельченный порошок) была растворена в анизоле (химическая формула –  $C_6H_5OCH_3$ ) с применением ультразвука на установке УДНЗ SELMI в течение 5 мин. Соотношение масс растворителя и резистивного материала влияет на толщину слоя резиста на подложке. Так как сорт РММА был заранее не известен и не было возможности определения его молярной массы, отношение масс в растворе было подобрано экспериментально таким образом, что бы оно составляло 4%. Подложки перед нанесением резиста промывались ультразвуком в бензине марки «Калоша» и в изопропиловом спирте. Сушка производилась на воздухе. Нанесение раствора резиста на подложки производилось с применением центрифуги. На закрепленные подложки было нанесено 10 мкл раствора РММА. Вращение центрифуги в течение 5 мин с частотой 80000 об/мин позволило получить тонкий слой резиста. Сушка слоя резиста производилась в атмосфере азота для удаления остатков растворителя. На поверхности наблюдалась интерференционная картина одного цвета, что свидетельствует об одинаковой толщине нанесенного слоя. Оценка толщины пленки РММА оптическим методом показала, что толщина составляет около 5 мкм. Такой слой резиста полностью проходит пучок протонов с энергией 1 МэВ, толщина пробега которого в РММА, исходя из расчетов с использованием программы SRIM-2008, составляет 21 мкм.

Так как для качественного травления облученного резиста доза облучения зависит от молярной массы и, в силу того, что был использован не сертифицированный раствор РММА, был проведен эксперимент по определению дозы облучения. Первоначально определялся размер сфокусированного пучка и общий его ток. Исходя из этих параметров, устанавливалось время экспозиции в пикселе.

Основываясь на данных приведенных в работе [12], необходимая доза для резиста РММА при получении трехмерных структур составляет 80-150 нКл/мм<sup>2</sup> для пучка протонов МэВ-ных энергий. Исходя из этого было проведено облучение образца с подложкой из поликора в семи областях, каждая имела вид квадрата с шириной стороны около 70 мкм с различными дозами (Образец №1 – 90 нКл/мм<sup>2</sup>, Образец №2 – 180 нКл/мм<sup>2</sup>, Образец №3 – 250 нКл/мм<sup>2</sup>, Образец №4 – 36 нКл/мм<sup>2</sup>, Образец №5 – 45 нКл/мм<sup>2</sup>, Образец №6 – 20 нКл/мм<sup>2</sup>, Образец №7 – 890 нКл/мм<sup>2</sup>). После травления образца в изопропиловом спирте с деионизированной водой (в соотношении 7:3) с последующим двойным ополаскиванием в деионизированной воде и сушки с использованием потока азота были получены изображения облученных областей с помощью РЭМ (рис. 4). Из этого рисунка видно, что внесенная доза в областях 4-6 была недостаточной. Об этом свидетельствует не полностью вытравленный резист вследствие недо-

статочного изменения его свойств под действием облучения. Доза облучения, которая превышает  $90 \text{ нКл/мм}^2$  (области 1-3, 7) является достаточной, чтобы разорвать все полимерные цепочки по всей глубине резиста.

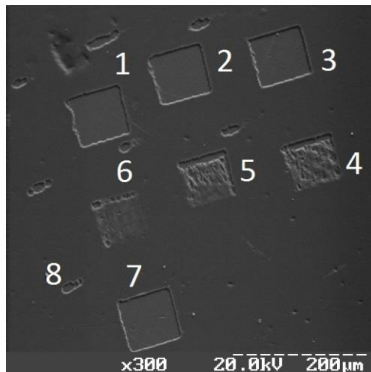


Рис. 4 – Изображение облученных областей, полученное с помощью РЭМ. Цифрами обозначены номера областей. Цифрой 8 показано начальное положение пучка при облучении области № 7

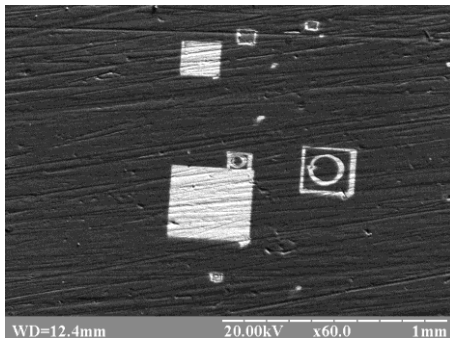


Рис. 5 – Изображение облученных областей в соответствии с профилем пучка отображающем заданный шаблон, полученное с помощью РЭМ

Для тестирования системы управления пучком был подготовлен профиль пучка в виде прямых линий и окружности. Для облучения использовался образец с подложкой из меди. Облучение производи-

лось с определенной ранее дозой и варьированием масштаба шаблона. На рис. 5 показано РЭМ изображение облученных и протравленных областей. Так как поверхность меди не была достаточно полирована, структуры получены не высокого качества.

## 5. ВЫВОДЫ

Проведено численное моделирование процесса сканирования в канале протонно-лучевой литографии на базе электростатического ускорителя двумя методами: матричным, использующим аналитические решения уравнений движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях, и траекторным методом, основанным на численном интегрировании аналогичных уравнений движения заряженных частиц. Показано, что оба метода дают решения для траектории осевой частицы отличающиеся на образце не более чем на 5%. Это свидетельствует о правильности полученных результатов численного моделирования.

В результате решения задачи определения наилучших условий сканирования пучком по поверхности образцов определены размеры отклоняющих пластин трехсекционной электростатической сканирующей системы. Размер раstra для применяемого высоковольтного источника питания составляет  $H_x \times H_y = 1260 \times 300 \text{ мкм}^2$ .

Отработаны условия нанесения тонкого слоя резистивного материала на подложки двух типов: диэлектрика и проводника. Установлены дозы для получения условий полного травления облученной области. Проведенное тестирование системы управлением сканированием пучка поверхности образца показало адекватность размеров, полученных изображений с помощью РЭМ, заданному цифровому шаблону.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института прикладной физики НАН Украины А.А. Пономареву, А.В. Романенко, Я.В. Профатиловой, В.Ю. Ильяшенко, а также персоналу электростатического ускорителя за помощь в выполнении настоящей работы.

## Simulation of the Process of a Micro-components Fabrication for Vacuum Electronics and X-ray Optics Using Proton Beam Writing

A.G. Ponomarev<sup>1,2</sup>, A.S. Lapin<sup>1</sup>, S.V. Kolinko<sup>1</sup>, V.A. Rebrov<sup>1</sup>, V.O. Zhurba<sup>2</sup>, M.V. Petrovskiy<sup>2</sup>, V.N. Kolomic<sup>1</sup>, C.N. Kravchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Ukraine, 58, Petropavlivska Str., 40000 Sumy, Ukraine

<sup>2</sup> Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine

A numerical simulation of the scanning process by a focused beam of 1 MeV protons in a proton beam writing channel based on an electrostatic accelerator is carried out to select the dimensions of the deflecting plates of the electrostatic scanning system. The selection condition was the maximum value of scanning raster on the surface of the irradiated sample and minimization of the beam deflection along the optical axis. A program has been developed for constructing a scan profile by a beam that adequately reflects the pattern of the fabricated microcomponents. The process of preparation of samples with drawing of a thin layer of resistive material is fulfilled. Doses of irradiation of samples with a proton beam are determined to obtain conditions for complete etching of the irradiated region. Test experiments were carried out to check the operability of the scanning process by using control system.

**Keywords:** Micro-components, Proton beam writing, Scanning system, Diffraction grating.

## Моделювання процесу створення мікрокомпонентів для вакуумної електроніки та рентгенівської оптики із застосуванням протонно-променевої літографії

О.Г. Пономарьов<sup>1,2</sup>, О.С. Лапін<sup>1</sup>, С.В. Колінько<sup>1</sup>, В.А. Ребров<sup>1</sup>, В.О. Журба<sup>2</sup>, М.В. Петровський<sup>2</sup>,  
В.М. Коломієць<sup>1</sup>, С.М. Кравченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут прикладної фізики Національної академії наук України, вул. Петропавлівська, 58,  
40000 Суми, Україна

<sup>2</sup> Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна

Проведено чисельне моделювання процесу сканування сфокусованим пучком протонів з енергією 1 МеВ в каналі протонно-променевої літографії на базі електростатичного прискорювача з метою вибору розмірів відхиляючих пластин електростатичної скануючої системи. Умовою вибору були максимальна величина розмірів растра сканування на поверхні зразка і мінімізація відхилення пучка вздовж оптичної осі. Розроблено програму побудови профілю сканування пучком, який адекватно відображає шаблон створюваних мікрокомпонентів. Відпрацьовано процес підготовки зразків з нанесенням тонкого шару резистивного матеріалу. Визначено дози опромінення зразків протонним пучком для отримання умов повного травлення експонованої області. Проведено тестові експерименти з перевірки працездатності системи управління процесом сканування.

**Ключові слова:** Мікрокомпоненти, Протонно-променева літографія, Скануюча система, Дифракційна ґратка.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.С. Мирошніченко, *Радиофизика и электроника* **13**, 290 (2008) (V.S. Miroshnichenko, *Radiofizika i elektronika* **13**, 290 (2008)) [In Russian].
2. В.Б. Молодкін, В.Ю. Сторіжко, С.В. Лізунова, Б.В. Шелудченко, В.В. Лізунов, М.Г. Толмачов, Є.М. Кисловський, С.Й. Оліховський, С.О. Вершинський, В.Л. Денисенко, К.В. Фузік, Г.О. Веліховський, Р.В. Лехняк, Є.Г. Лень, Л.М. Скапа, С.М. Бровчук, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології* **13** No3, 469 (2015) (V.B. Molodkin, V.Yu. Storizhko, S.V. Lizunova, B.V. Sheludchenko, V.V. Lizunov, M.H. Tolmachov, Ye.M. Kyslovs'kyu, S.Y. Olikhovs'kyu, S.O. Vershyns'kyu, V.L. Densyenko, K.V. Fuzik, H.O. Velikhovs'kyu, R.V. Lekhnyak, Ye.H. Len', L.M. Skapa, S.M. Brovchuk, *Nanosystemy, nanomaterialy, nanotekhnolohiyi* **13** No 3, 469 (2015)) [In Ukrainian].
3. А.Д. Погребняк, А.Г. Пономарев, А.П. Шпак, Ю.А. Куницкий, *УФН* **182** No3, 287 (2012) (A.D. Pohrebnyak, A.H. Ponomarev, A.P. Shpak, Yu.A. Kunitskyu, *Ukr Phys. J.* **182** No 3, 287 (2012)) [In Ukrainian].
4. В.Е. Сторіжко, В.И. Мирошніченко, А.Г. Пономарев, *Наука та інновації* **8** No2, 17 (2012) (V.E. Storizhko, V.Y. Myroshnychenko, A.H. Ponomarev, *Nauka ta innovatsiyi* **8** No 2, 17 (2012)) [In Russian].
5. S. Al-Shehri, V. Palitsin, R.P. Webb, G.W. Grime, *Nucl. Instr. Meth. B* **348**, 223 (2015).
6. A.S. Lapin, V.A. Rebrov, S.V. Kolin'ko, V.F. Salivon, A.G. Ponomarev *Tech. Phys.* **61**, 1411 (2016).
7. A. Ponomarov, S.V. Kolin'ko, A.G. Ponomarev, N. Liu, *Nucl. Instr. Meth. B* **348**, 83 (2015).
8. M.J. Merchant, J.C.G. Jeynes, G.W. Grime, V. Palitsin, I.D.W Tullis, P.R Barber, B. Vojnovic, R.P. Webb, K.J. Kirkby, *Radiation Research* **178** No3, 182 (2012).
9. L. Daudin, Ph. Barberet, L. Serani, Ph. Moretto, *Nucl. Instr. Meth. B* **306**, 64 (2013).
10. J.S. Laird, R. Szymanski, C.G. Ryan, I. Gonzalez-Alvarez, *Nucl. Instr. Meth. B* **306**, 71 (2013).
11. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/plang/ru/nid/207367>.
12. J.A. van Kan, A.A. Bettiol, S.Y. Chiam, *Nucl. Instr. Meth. B* **260**, 460 (2007).