

Канал протонно-лучевой литографии на базе электростатического ускорителя

© А.С. Лапин, В.А. Ребров, С.В. Колинко, В.Ф. Саливон, А.Г. Пономарев

Институт прикладной физики НАН Украины,
40000 Сумы, Украина
e-mail: lapin@iap.sumy.org

(Поступило в Редакцию 9 июля 2015 г.)

Описана конструкция канала протонно-лучевой литографии как продолжение канала ядерного сканирующего микронзонда. Решена проблема точности позиционирования зонда путем создания новой высокочастотной электростатической сканирующей системы. Особое внимание уделено задаче по созданию зондоформирующей системы, рассмотрены различные ее конфигурации. На основании решения оптимизационной задачи по формированию пучка протонов найдена зондоформирующая система, которая наилучшим образом отвечает требованиям для проведения литографического процесса. Разработана система управления сканированием пучка, основанная на применении многофункционального модуля интегральных схем программируемой логики.

Введение

Быстрый прогресс в ряде областей нанотехнологий напрямую связан с преодолением трудностей изготовления структур с характерными размерами меньше 100 nm, что определяет интерес к разработке литографических технологий высокого разрешения. В таких приложениях, как создание зонных пластин для рентгеновской оптики [1,2] и метаматериалов, связанных с производством устройств, работающих в THz области частот [3,4], основные трудности возникают при получении сложных трехмерных структур с высоким аспектным отношением. Для изготовления трехмерных микро- и наноструктур в настоящее время достаточно хорошо развит метод, основанный на экспонировании поверхности материала сфокусированным пучком протонов с энергией в несколько MeV, который классифицируется как протонно-лучевая литография (proton beam writing, PBW) [5,6]. Протоны с энергией в несколько MeV, в отличие от электронов (e-beam lithography, EBL) [7] и низкоэнергетичных тяжелых ионов (Focusing Ion Beam, FIB) [8] имеют ряд характерных особенностей при движении в материалах. Так как вероятность взаимодействия протона с электронами выше, чем его рассеяние на ядрах атомов облучаемого материала, а эффекты от протон-электронных взаимодействий малы в силу кинематических характеристик процесса движения, траектория протонов на первой половине своего пути в материале является близкой к прямолинейной. Малая энергия вторичных электронов является следствием большого отличия в массах протона и электрона, что обеспечивает низкий эффект близости. Поэтому достоинством такой технологии является получение структур с гладкими и ровными краями боковых стенок, а поскольку глубина проникновения протона для выбранного материала зависит только от его энергии, этот факт позволяет создавать сложные многоуровневые трехмерные структуры.

Аппаратным комплексом для протонно-лучевой литографии является ядерный сканирующий микронзонд (ЯСМЗ) [9,10], в котором пучок протонов, ускоренный до энергии нескольких MeV с помощью электростатического ускорителя, фокусируется системой магнитных квадрупольных линз (МКЛ). Возможности литографического процесса напрямую связаны с характеристиками зондоформирующей системы (ЗФС) ЯСМЗ, которая должна обеспечить фокусировку пучка протонов с минимальными размерами и максимальным током на поверхности облучаемого материала. Следствием этого являются требования к ЗФС, которая должна иметь высокие коэффициенты уменьшения и большой акцептанс. В настоящей работе рассмотрены особенности конструкции канала протонно-лучевой литографии, где особое внимание уделено выбору ЗФС, сканера с прецизионным источником питания, системы управления сканированием пучком по заданному шаблону и компоновки камеры размещения облучаемых материалов.

Особенности конструкции канала протонно-лучевой литографии

В 2008 г. в Институте прикладной физики был введен в эксплуатацию ядерный сканирующий микронзонд на базе компактного электростатического ускорителя с максимальным напряжением на высоковольтном термине 2 MV [11] (рис. 1). Основным приложением ЯСМЗ является исследование структуры и элементного состава образцов различного происхождения [12,13]. Размер зонда обеспечивается на уровне $2\ \mu\text{m}$ для пучка протонов с током 200 pA. Такие параметры зонда реализуются с помощью ЗФС на базе распределенного „русского квадруплета“ (РПК) магнитных квадрупольных линз [14] с рабочим расстоянием 24 см (расстояние от эффективной границы поля последней линзы до поверхности образца). Применяемая ЗФС имеет невысокие коэффициенты



Рис. 1. Общий вид ядерного сканирующего микронзонда.

уменьшения в обоих поперечных к пучку направлениях $D = D_x = D_y = 23$, что является следствием сравнительно большого рабочего расстояния. Величина рабочего расстояния определяется размерами ферромагнитного двухкоординатного сканера, расположенного после последней линзы, и размерами камеры взаимодействия сфокусированного пучка с исследуемыми образцами, где размещены детекторы вторичных электронов, характеристического рентгеновского излучения, обратно рассеянных ионов, оптический микроскоп с CCD и двухкоординатный механизм позиционирования образцов.

Параметры действующего ЯСМЗ во многом не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к установкам протонно-лучевой литографии для изготовления малоразмерных структур с характерными размерами $< 100 \text{ nm}$. Необходимо применение новой ЗФС с коэффициентами уменьшения $D > 100$, что может быть реализовано за счет уменьшения рабочего расстояния и использования в качестве фокусирующей системы мультиплета магнитных квадрупольных линз принципиально новой конфигурации [15]. Ферромагнитный сканер в силу явления гистерезиса не обеспечивает необходимую точность позиционирования зонда в замкнутом цикле сканирования, поэтому необходимо применять электростатический сканер, который имеет значительно большие продольные размеры, а, следовательно, должно быть изменено место его расположения в ЗФС. Камера с облучаемыми образцами так же должна быть специализированной для литографического процесса.

Основываясь на вышесказанном, можно сделать вывод о необходимости создания нового отдельно расположенного канала протонно-лучевой литографии. Однако более эффективным является решение о продлении канала ЯСМЗ в канал литографии с целью максимального использования отдельных устройств и систем микронзонда, что позволяет уменьшить затраты и занимаемую площадь в экспериментальном зале.

На рис. 2 представлена схема канала ЯСМЗ (А) с продолжением в канал протонно-лучевой литографии (В). В качестве базы для ЗФС использована ионно-оптическая скамья, состоящая из двух гранитных балок (поз. 1.1, поз. 1.2), установленных на опорах с антивиб-

рационном фундаментом (поз. 2). ЗФС ЯСМЗ состоит из объектного (поз. 3) и углового (поз. 4) коллиматоров, и фокусирующей системы из двух дублетов магнитных квадрупольных линз (поз. 5.1, поз. 5.2), запитанных от двух независимых источников питания по схеме „русский квадруплет“. Ферромагнитный сканер (поз. 6) располагается между дублетом МКЛ (поз. 5.2) и камерой взаимодействия пучка ионов с образцом (поз. 7). Вакуум в системе обеспечивается вакуумными постами (поз. 8) на основе турбомолекулярных, магниторазрядных и форвакуумных насосов.

Канал протонно-лучевой литографии является продолжением канала ЯСМЗ и использует его основные элементы. Для построения канала протонно-лучевой литографии была применена в качестве базы ионно-оптическая скамья, представляющая собой еще одну гранитную балку (поз. 1.3). Балка установлена на раме с антивибрационными опорами (поз. 9), и располагается на песчаной подушке, отделяющей фундамент канала

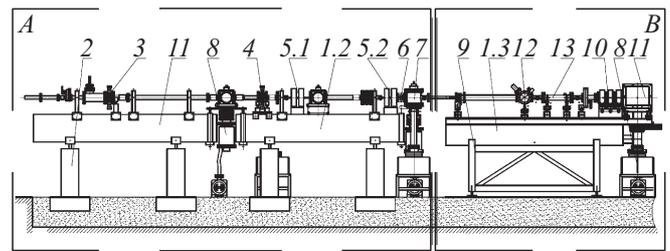


Рис. 2. Схема канала ЯСМЗ (А) с продолжением в канал протонно-лучевой литографии (В). 1.1, 1.2, 1.3 — гранитные балки, 2 — опоры, 3 — объектный коллиматор, 4 — угловой коллиматор, 5.1, 5.2 — интегрированные дублеты МКЛ, 6 — ферромагнитный сканер, 7 — камера взаимодействия, 8 — вакуумные посты, 9 — рама, 10 — триплет МКЛ, 11 — камера экспонирования образцов, 12 — промежуточная камера, 13 — электростатический сканер.

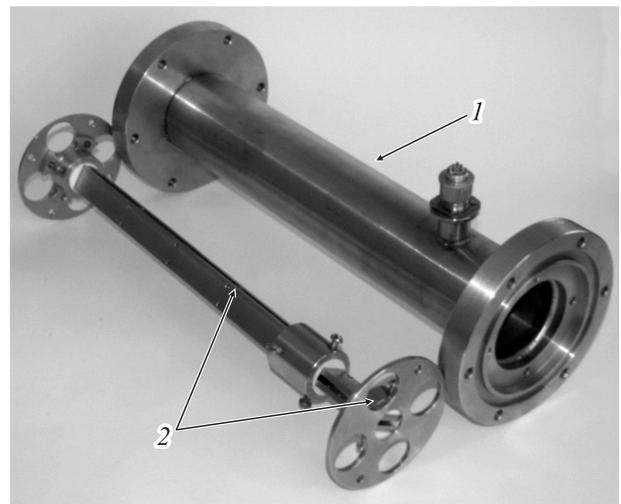


Рис. 3. Электростатический сканер. 1 — корпус сканера, 2 — две пары параллельных пластин.



Рис. 4. Типы магнитных квадрупольных линз: *a* — интегрированный дублет МКЛ, *b* — OM50m, *c* — IAP.

от фундамента здания. В качестве коллиматоров ЗФС канала протонной литографии используются объектный (поз. 3) и угловой (поз. 4) коллиматоры канала ЯСМЗ. Фокусирующая система представляет собой пентуплет МКЛ, где первые две линзы — это дублет линз канала ЯСМЗ (поз. 5.2), а последние три линзы объединены обоймой в единый триплет (поз. 10). Триплет линз имеет индивидуальный механизм позиционирования в пространстве с пятью степенями свободы. Облучаемый образец — мишень установлен на механизме позиционирования в специализированной камере экспонирования образцов (поз. 11). Предварительная диагностика пучка и его визуальное наблюдение производится в промежуточной камере (поз. 12).

Для канала протонно-лучевой литографии разработана и сконструирована электростатическая сканирующая система (ЭСС), которая включает в себя электростатический сканер и двухкоординатную систему управления сканированием. Главной особенностью ЭСС являются высокая повторяемость позиционирования зонда, малое мертвое время и возможность реализовать высокую частоту сканирования до 1 MHz. Невозможность создания высоких электрических напряжений предопределяет относительно большую длину сканера, поэтому он установлен перед триплетом МКЛ (поз. 13).

Электростатический сканер представляет собой две пары пластин-электродов, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 3). Геометрические размеры пластин получены в результате моделирования процесса сканирования пучком протонов в ЗФС канала протонно-лучевой литографии. Каждая пластина электрически изолирована и на нее подается потенциал определенной полярности. За счет изменения напряжений на электродах обеспечивается перемещение протонного зонда относительно исследуемого образца по поперечным к пучку осям x и y . В электростатическом сканере пластины первой пары имеют размеры $70 \times 15 \text{ mm}^2$, пластины второй пары — $280 \times 15 \text{ mm}^2$. Пластины изготовлены из стали 12X18H10T. Зазор между пластинами $4 \pm 0.1 \text{ mm}$ обеспечивается за счет применения керамических втулок.

Магнитные квадрупольные линзы

Для синтеза фокусирующей системы доступны интегрированный дублет магнитных квадрупольных линз, две модернизированные МКЛ OM50m и МКЛ IAP. Характеристики линз представлены в табл. 1.

Особенностью конструкции интегрированного дублета МКЛ является то, что ярмо и полюсные наконечники линз представляют единое целое (рис. 4, *a*) и изготовлены из монолита магнитомягкой стали при помощи прецизионной электроэрозионной вырезной технологии. Преимущество конструкции состоит в идентичности магнитных потоков во всех четырех полюсах каждой из линз дублета и прецизионном позиционировании полюсов для того, чтобы обеспечить квадрупольную симметрию [16]. Такая конструкция обеспечивает возможность точного совмещения оси дублета с осью пучка, что необходимо при использовании в распределенных фокусирующих систем. МКЛ IAP (рис. 4, *c*) имеет форму полюсов, аналогичную линзам интегрированного дублета, и отличается лишь увеличенной длиной [17]. Две магнитные квадрупольные линзы типа OM50 (аналоги Oxford Microbeam, рис. 4, *b*) были модифицированы. Модификация состояла в замене токонесущих катушек с целью обеспечения возможности питания от источников с максимальным током 10 А.

Ионная оптика зондоформирующей системы

Технологические особенности метода протонно-лучевой литографии при создании сложных трехмерных структур накладывают определенные требования при выборе оптимальной фокусирующей системы. С одной стороны, для создания сложной структуры, которая состоит из большого количества мелких простых элементов, пучок должен обладать высоким пространственным разрешением. С другой стороны, чтобы воспроизвести всю структуру, пучку необходимо воспроизвести все элементы последовательно, что значительно увеличивает время литографического процесса по сравнению с фотолитографическими методиками, где при помощи

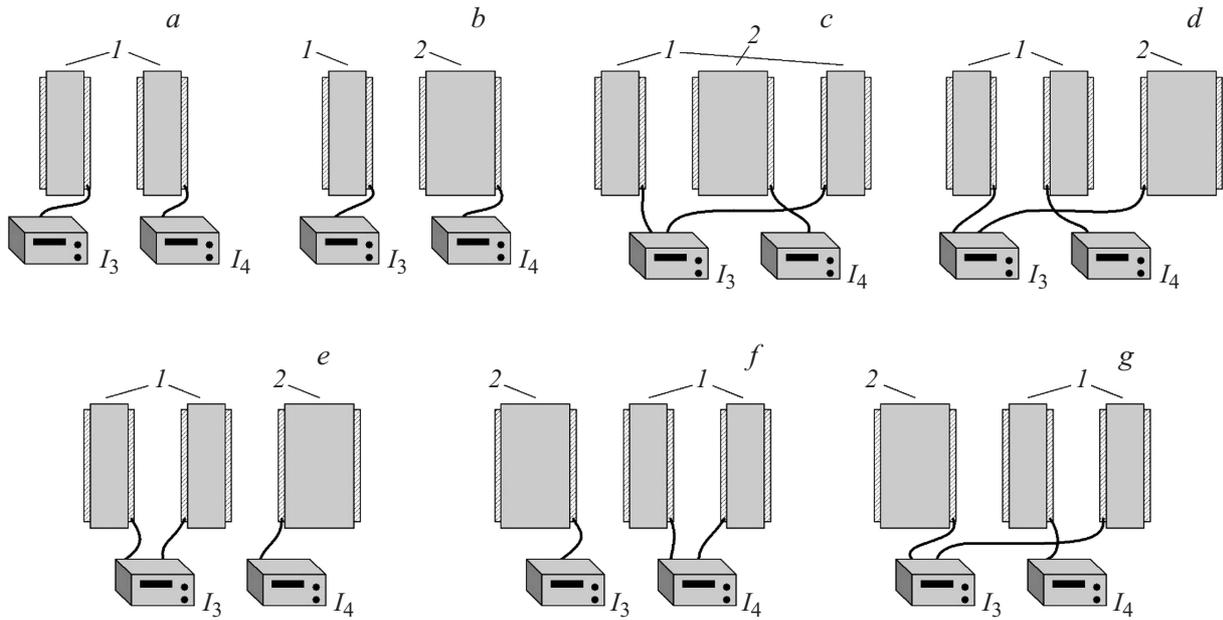


Рис. 5. Варианты конфигурации линз и питания финального мультиплета МКЛ. С учетом интегрированного дублета МКЛ возможны следующие варианты: *a* — квадруплет 1, *b* — квадруплет 2, *c* — квинтуплет 1, *d* — квинтуплет 2 питание „С3D4C3“, *e* — квинтуплет 2 питание „С3С3D4“, *f* — квинтуплет 3 питание „С3D4D4“, *g* — квинтуплет 3 питание „С3D4C3“; 1 — ОМ50m; 2 — IAP.

Таблица 1. Характеристики используемых магнитных квадрупольных линз

Наименование	Длина, mm	Радиус апертуры, mm	Максимальная величина магнитной индукции, Т	Расстояние между линзами (для ИД), mm	Диаметр ярма, mm
Интегрированный дублет МКЛ	65, 44	6.5	0.45	46	235
ОМ50m	60	7.5	0.2	–	200
IAP	110	6.5	0.4	–	235

масок обрабатывается вся площадь. Поэтому принципиальным параметром, на основании которого выбирается фокусирующая система ЗФС, является величина плотности тока в пятне на мишени, т.е. предпочтение следует отдавать таким конфигурациям, при которых обеспечивается большее значение тока при заданных размерах пучка.

Максимальное значение тока зависит от величины нормализованного эмиттansa пучка ϵ , что следует из выражения $I = b \times \epsilon$, где нормализованная яркость b является фиксированной величиной на входе в ЗФС. Поскольку максимальный эмиттанс пучка, который ЗФС может сфокусировать в пятно заданных размеров, равен аксептансу системы, то задача сводится к выбору из возможных конфигураций фокусирующих систем такой, которая способна обеспечить максимальное значение аксептанса, приведенного к заданному размеру пятна на мишени.

Увеличение аксептанса системы возможно за счет уменьшения рабочего расстояния, но при этом для обеспечения тех же размеров пучка на мишени растут требования к величине индукции магнитного поля на полюсе линзы.

Для улучшения фокусирующих возможностей планируется применение системы с четырьмя независимыми источниками питания. Такие системы по сравнению с классическими фокусирующими системами типа „русский квадруплет“ имеют больше степеней свободы, большие коэффициенты уменьшения и лучшее разрешение [18]. Поскольку планируется использование второго интегрированного дублета МКЛ по ходу пучка (рис. 2, поз. 5.2) (причем он находится в фиксированном положении и запитан от двух источников тока), в качестве финального мультиплета, учитывая различные варианты питания линз, были рассмотрены следующие конфигурации (рис. 5). Здесь введено обозначение конфигураций:

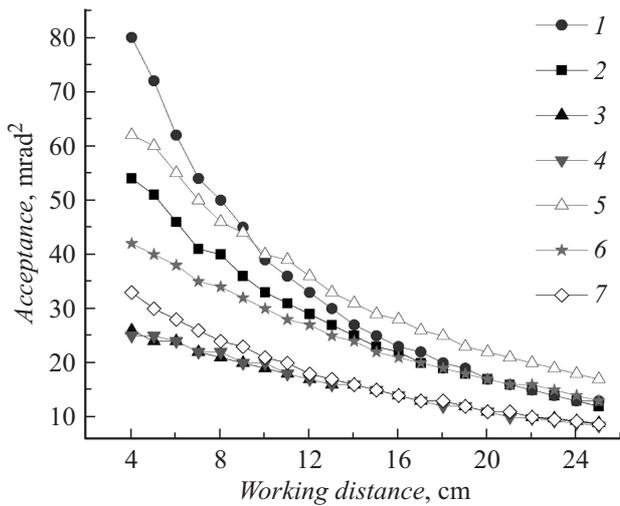


Рис. 6. Аксептанс: 1 — квадруплет 1, 2 — квадруплет 2, 3 — квинтуплет 1, 4 — квинтуплет 2 питание „С3D4С3“, 5 — квинтуплет 2 питание „С3С3D4“, 6 — квинтуплет 3 питание „С3D4D4“, 7 — квинтуплет 3 питание „С3D4С3“.

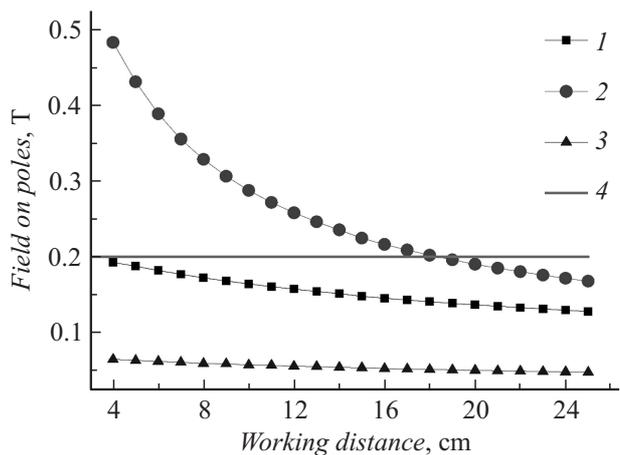


Рис. 7. Расчетное значение магнитной индукции линз типа OM50m для рассмотренных конфигураций: 1 — квадруплет 1 линза, 2 — квадруплет 1 линза 2, 3 — квинтуплет 2 питание „С3С3D4“, 4 — максимальное значение магнитного поля на полюсе линзы OM50m.

C — означает, что линза фокусирующая в плоскости xOz и дефокусирующая в плоскости yOz , *D* означает, что линза дефокусирующая в плоскости xOz и фокусирующая в плоскости yOz , цифра указывает на номер источника питания, к которому подсоединена МКЛ.

Расчеты ионно-оптических характеристик рассматриваемых фокусирующих систем проводились для пучка протонов с энергией 1.5 MeV и разбросом по импульсу $5 \cdot 10^{-5}$ при помощи численного кода PROBFOM [19], в основе которой лежит метод матрицантов [20]. Код позволяет определять ионно-оптические свойства (коэффициенты уменьшения, хроматические aberrации 1-го порядка, собственные aberrации 3-го порядка и паразитные aberrации 2-го и 3-го порядков) фокусирующих

систем на базе мультиплетов МКЛ. Расчеты параметров ЗФС, основанные на критерии максимального приведенного коллимированного аксептанса, были проведены при помощи численного кода МАХВЕМИТ [21,22], который позволяет определить такие параметры ЗФС, при которых поперечный размер пучка в плоскости изображения будет приведен к размеру пятна d . При расчетах рассматривались рабочие расстояния в диапазоне 4–25 см. Изначально проводится расчет для минимального рабочего расстояния 4 см, затем выполняется смещение всех линз финального мультиплета на 1 см, следующим этапом является расчет для нового положения линз, после чего процедура смещения повторяется. Для всех вариантов конфигурации расстояние от плоскости объекта до интегрированного дублета МКЛ составляет 345.3 см, промежутки между линзами финального мультиплета одинаковы и равны 3.25 см. Результаты расчетов показаны на рис. 6.

Как видно из графика, наибольшее значение аксептанса в диапазоне рабочих расстояний 4–9 см может обеспечить квадруплет 1, а в диапазоне 10–25 см квинтуплет 2 при питании „С3С3D4“. Эти две конфигурации представляют наибольший интерес. Но если для квинтуплета требуемая величина индукции магнитного поля линз не превышает максимально допустимую величину, то для квадруплета при рабочих расстояниях 4–18 см необходимо обеспечивать такое значение магнитного поля на полюсе последней линзы, которое превышает показатель насыщения магнитного поля в 0.2Т для данного типа линз (рис. 7), следовательно, такая конфигурация не в состоянии обеспечить рабочее расстояние меньше 19 см.

Исходя из этого в качестве фокусирующей системы был выбран квинтуплет 2 при питании „С3С3D4“, поскольку на практике именно такая конфигурация может обеспечить максимальное значение аксептанса при малых рабочих расстояниях. Основные параметры представлены в табл. 2.

Система управления сканированием сфокусированного пучка

Система управления сканированием обеспечивает позиционирование сфокусированного пучка на облучаемом образце в соответствии с заданным профилем сканирования. Профиль сканирования представляет собой одномерный массив — последовательность координат $(x, y)_i$ 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 детектора RBS (для непроводящих образцов). В этом режиме пучок пребывает в текущем пикселе до момента накопления заданного числа импульсов с преобразователя ток—частота или детектора RBS.

Таблица 2. Характеристики фокусирующих систем каналов протонно-лучевой литографии и ЯСМЗ

Квинтулет 2 при питании „СЗСЗD4“		РПК
Рабочее расстояние, см	11	24
Общая длина канала, см	661.1	385
Поле на полюсе линзы, Т В1; В2 В3; В4	–0.1254000; 0.1648000 0.0567160; 0.1119512	0.1771721; 0.1654568 –
Коэффициенты уменьшения $Dx \times Dy$	102×-127.5	23.5×23.5
Хроматические aberrации, $\mu\text{m/mrad}/\%$ $\langle x/x'\delta \rangle$ $\langle y/y'\delta \rangle$	–175990.5 21053.8	–526 –160
Сферические aberrации, $\mu\text{m/mrad}/\%$ $\langle x/x'^3 \rangle$ $\langle x/x'y'^2 \rangle$ $\langle y/y'^3 \rangle$ $\langle y/y'x'^2 \rangle$	16301.5 3661.2 –332.1 –2929.6	932 264 38 264
Акцептанс, mrad^2	39	0.67

Высокая линейность и повторяемость раstra обеспечиваются применением электростатического сканера. Наиболее перспективным направлением при разработке аппаратной части системы управления сканированием в настоящее время является применение реконфигурируемых модулей на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) [23,24]. Системы на ПЛИС являются системами реального времени и обеспечивают полный параллелизм процессов, позволяют оперативно конфигурировать электронику под конкретные условия эксперимента без механической перекоммутации цепей.

Для управления системой сканирования применен многофункциональный реконфигурируемый модуль ввода–вывода NI 7852R [25]. 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. 8.

Профиль сканирования считывается в ПК из файла в виде одномерного массива координат точек и с ис-

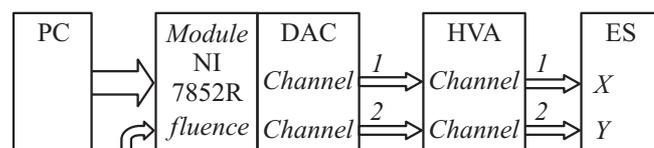


Рис. 8. Структурная схема системы управления сканированием: ПК — персональный компьютер, DAC — цифро-аналоговый преобразователь, HVA — высоковольтный усилитель, ES — электростатический сканер.

пользованием 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.

В качестве ВУ применен быстродействующий двоярный биполярный высоковольтный усилитель производства Technisches Büro S. Fischer со следующими основными характеристиками:

- коэффициент усиления 0.3–100,
- максимальный размах выходного сигнала ± 220 V,
- максимальный ток нагрузки 100 mA,
- скорость изменения выходного сигнала до 1000 V/ μs .

Заключение

Канал ЯСМЗ в силу конструктивных особенностей не соответствует тем параметрам, которые предъявляются к установкам протонно-лучевой литографии. Поэтому была разработана установка, которая, по сути, является продолжением канала ЯСМЗ с использованием его отдельных систем и устройств, что является наиболее

эффективным решением. При выборе фокусирующей системы на базе имеющихся в наличии магнитных квадрупольных линз было определено 7 конфигураций с учетом вариантов питания от четырех независимых источников тока. Для каждой конфигурации были проведены расчеты ионно-оптических характеристик и определены оптимальные параметры на основании величины максимального приведенного аксептанса. Сравнение результатов расчетов показало, что оптимальной является система типа квинтуплет 2 при варианте питания „СЗСЗD4“, поскольку обладает наибольшим реально достижимым показателем аксептанса на всем диапазоне рассматриваемых рабочих расстояний и при этом может обеспечить коэффициенты уменьшения $D > 100$. Задача управления сканирующей системой была решена путем применения многофункционального модуля ввода–вывода NI 7852R, а благодаря применению разработанной электростатической сканирующей системы, которая позволяет реализовать частоту сканирования до 1 МГц, обеспечивается высокая линейность и повторяемость раstra.

Список литературы

- [1] Uhlen F., Nilsson D., Rahomaki J. et al. // *Microelectronic Engineering*. 2014. Vol. 116. P. 40–43.
- [2] Chen Y.-T., Lo T.-N., Chu Y.S. et al. // *Nanotechnology*. 2008. Vol. 19. P. 395–302.
- [3] Вендик И.Б., Вендик О.Г. // *ЖТФ*. 2013. Т. 83. Вып. 1. С. 3–23.
- [4] Liu Y., Zhang X. // *Chem. Soc. Rev.* 2011. Vol. 40. P. 2494–2507.
- [5] Watt F., Breese M.B.H., Bettiol A., van Kan J.A. // *Materials today*. 2007. Vol. 10. N 6. С. 20–29.
- [6] Watt F., Bettiol A., van Kan J.A. et al. // *International Journal of Nanoscience*. 2005. Vol. 4. N 3. P. 269–286.
- [7] Ressler L., Grisolia J., Martin C. et al. // *Ultramicroscopy*. 2007. Vol. 107. P. 985–988.
- [8] Gierak J., Septier A., Vieu C. // *Nucl. Instr. and Meth. A*. 1999. Vol. 427. P. 91–98.
- [9] Погребняк А.Д., Пономарев А.Г., Шпак А.П., Куницкий Ю.А. // *УФН*. 2012. Т. 182. Вып. 3. С. 287–321.
- [10] van Kan J.A., Malar P., de Vera A.B. // *Review of Scientific Instruments*. 2012. Vol. 83. P. 02B902.
- [11] Magilin D.V., Ponomarev A.G., Rebrov V.A. et al. // *Nucl. Instr. and Meth. B*. 2009. Vol. 267. P. 2046–2049.
- [12] Погребняк А.Д., Пономарев А.Г., Колесников Д.А. и др. // *Письма в ЖТФ*. 2012. Т. 38. Вып. 13. С. 56–63.
- [13] Курбатов Д.И., Климов А.В., Опанасюк А.С. и др. // *Поверхность*. 2014. Т. 3. С. 64–67.
- [14] Дымников А.Д., Явор С.Я. // *ЖТФ*. 1963. Т. 33. Вып. 7. С. 851–858.
- [15] Ponomarev A., Kolinko S.V., Ponomarev A.G., Liu N. // *Nucl. Instr. and Meth. B*. 2015. Vol. 348. P. 83–87.
- [16] Rebrov V.A., Ponomarev A.G., Palchik V.K., Melnik N.G. // *Nucl. Instr. and Meth. B*. 2007. Vol. 260. P. 34–38.
- [17] Ребров В.А., Пономарев А.Г., Магилин Д.В. и др. // *ЖТФ*. 2007. Т. 77. Вып. 3. С. 76–79.
- [18] Melnik K.I., Magilin D.V., Ponomarev A.G. // *Nucl. Instr. Meth. B*. 2013. Vol. 306. P. 17–20.
- [19] Абрамович С.Н., Завьялов Н.В., Звенигородский А.Г. и др. // *ЖТФ*. 2005. Т. 75. Вып. 2. С. 6–12.
- [20] Dymnikov A., Hellborg R. // *Nucl. Instr. Meth. A*. 1993. Vol. 330. P. 323.
- [21] Ponomarev A.G., Miroshnichenko V.I., Storizhko V.E. // *Nucl. Instr. and Meth. A*. 2003. Vol. 506. P. 20–25.
- [22] Пономарев А.Г. // *ЖТФ*. 2009. Т. 79. Вып. 2. С. 112–116.
- [23] Daudin L., Barberet Ph., Serani L., Moretto Ph. // *Nucl. Instr. and Meth. B*. 2013. Vol. 306. P. 64–67.
- [24] Laird J.S., Szymanski R., Ryan C.G., Gonzalez-Alvarez I. // *Nucl. Instr. and Meth. B*. 2013. Vol. 306. P. 71–75.
- [25] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/207367>