

СИСТЕМА РАЗВЕРТКИ В РАСТР ИОННОГО ПУЧКА ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ЭГ-5

Л. М. Ледо-Переда^{а, б, 1}, *В. Н. Семенов*^{а, 2}, *В. С. Рихвицкий*^{а, 3},
А. Н. Лихачев^{а, 4}, *Р. Ш. Исаев*^{а, 5}, *И. А. Чепурченко*^{а, 6},
А. С. Дорошкевич^{а, 7}

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Центр прикладных технологий и ядерного развития CEADEN, Куба

В рамках проекта модернизации ускорителя ЭГ-5 и совместных работ с АО «Микрон» (Зеленоград) и АО «Ангстрем» (Зеленоград) разработана система развертки пучка протонов для облучения кремниевых образцов. На основе электростатического ускорителя ЭГ-5 совместно с сотрудниками фирмы АО НПП «ЭСТО» (Зеленоград) разработана, изготовлена и апробирована автоматизированная система для выполнения технологической операции ионной имплантации кремниевых пластин для производства силовой электроники. Разработанная система является экспериментальной платформой, позволяющей варьировать распределение покрытия поверхности образца при сканировании ускоренными частицами.

A proton beam scanning system for silicon sample irradiation has been developed as part of the EG-5 accelerator upgrade project and joint work with Micron JSC and Angstrom JSC located in Zelenograd. Together with employees of SPE ESTO JSC (Zelenograd), an automated system has been developed, produced, and tested on the basis of the EG-5 electrostatic accelerator to carry out the technological operation of ion implantation of silicon wafers for the production of power electronics. The developed system is an experimental platform that allows varying the distribution of the sample surface coating during scanning with accelerated particles.

PACS:29.20.–с

ВВЕДЕНИЕ

В рамках совместной работы со сторонними организациями и в рамках модернизации ускорительного комплекса ЭГ-5 в ЛНФ ОИЯИ решается задача отклонения пучка частиц магнитным полем для сканирования поверхности образцов площадью

¹ E-mail: lmigelpreda@gmail.com

² E-mail: ua3dk@mail.ru

³ E-mail: rqvtsk@mail.ru

⁴ E-mail: alexwin@mail.ru

⁵ E-mail: isayev_rafael@mail.ru

⁶ E-mail: chepur78@mail.ru

⁷ E-mail: doroh@jinr.ru

150 × 150 мм с целью имплантации ионов в поверхностный слой кремниевых пластин. Разработка и создание системы развертки потребовало решения нескольких технических задач, включая расчет, конструирование и настройку генератора функций, а также дизайн, расчет, моделирование и конструкцию катушек развертки. Мощный усилитель низких частот и источник питания постоянного тока являются частью системы и были в наличии, так же как и другой важный узел — установка, содержащая камеру облучения и выполняющая все механические операции с образцами внутри камеры в процессе ввода, экспозиции и экстракции образцов.

1. ОБЩАЯ СХЕМА ИОННОГО КАНАЛА ЭГ-5

На рис. 1 представлена схема ЭГ-5, на которой отмечены перед облучаемым образцом создающие магнитное поле катушки примерно за 4 м до него.

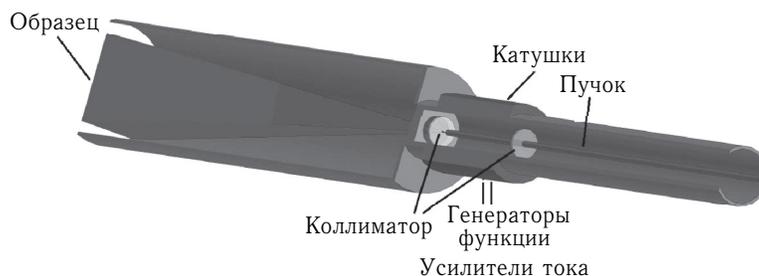


Рис. 1. Общая схема ионного канала ЭГ-5

2. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РАЗВЕРТКИ ИОННОГО ПУЧКА

Для создания системы развертки ионного пучка для ускорителя сочетался следующий ряд узлов:

- 1) генератор функций развертки;
- 2) катушки отклонения пучка частиц;
- 3) мощный низкочастотный усилитель;
- 4) мощный блок питания усилителя;
- 5) ионопровод;
- 6) автоматизированная система для выполнения технологической операции ионной имплантации.

Одной из важнейших задач было рассчитать, изготовить и отладить генераторы функций и катушки развертки.

2.1. Расчет системы развертки ионного пучка. Отклонение траектории заряженной частицы в плоскости X рассчитывается как проекция на плоскость интеграла кривизны траектории

$$\alpha = \left(\int_{z_0}^z a(z) dz \right)_X . \quad (1)$$

В свою очередь, кривизна является результатом действия силы Лоренца в магнитном поле

$$a = \frac{e}{p} [V, B]. \tag{2}$$

Магнитное поле в точке P рассчитывается по формуле Био-Савара-Лапласа

$$B(P) = IN \int_{r \in \Gamma} \frac{[dr, P - r]}{|P - r|^3}, \tag{3}$$

где Γ — электропроводящий контур N витков с током I .

2.2. Определение геометрической конфигурации катушек. Расчет отклонения был выполнен для пучка на осевой линии ионопровода. Чтобы он был справедлив всюду по сечению, требовалось добиться параллельности магнитных силовых линий и однородности поля по величине [1].

На основе расчета магнитного поля свободно распространяемой программой femm4.2 (методом конечных элементов) (рис. 2) при задаваемом расположении катушек с током (рис. 3) удалось, добавив обертку всей системы лентой из трансформаторного железа, добиться решения требуемых задач.

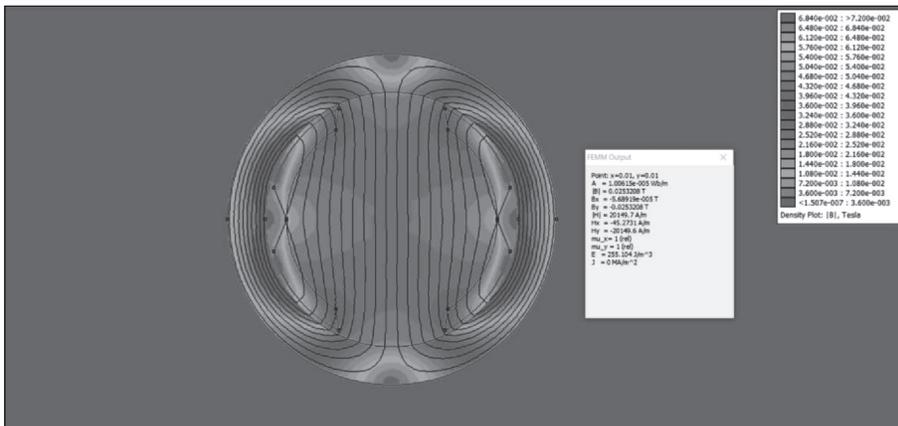


Рис. 2. Расчет магнитного поля по программе femm4.2 (методом конечных элементов)

По результатам работы программы получены формулы магнитного потенциала и расчет индуктивности каждой пары катушек. Индуктивность оказалась заметной: 0,7 мГн.

Вертикальная и горизонтальная отклоняющие системы сделаны вложенными друг в друга. Их плоскости симметрии взаимно ортогональны, поэтому будут взаимно ортогональными их силовые линии и они не будут влиять друг на друга, не будет взаимной индукции.

2.3. Выбор формы генерируемых функций. В силу заметной индуктивности частоты развертки не могут быть большими. Расчет показал, что практически приемлемы частоты ниже 300 Гц. Поэтому, поскольку целью является всего лишь равномерное покрытие пучком образца, был выбран способ задания близких частот. Моделирование и последующее отображение реальных токов катушек на двухкоординатном

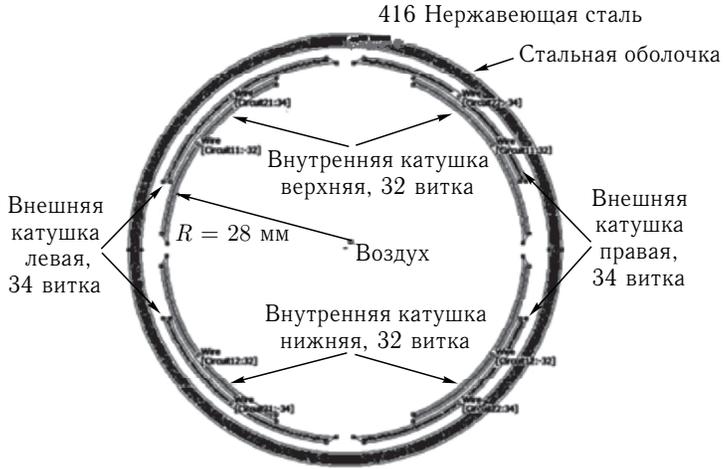


Рис. 3. Геометрическая конфигурация вложенных пар катушек и стальной обертки

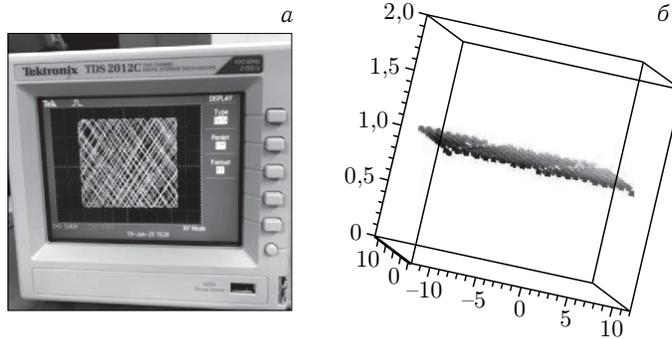


Рис. 4. Отображение развертки на двухкоординатном осциллографе (а) и гистограмма покрытия образца в течение допустимого для эксперимента времени (б)

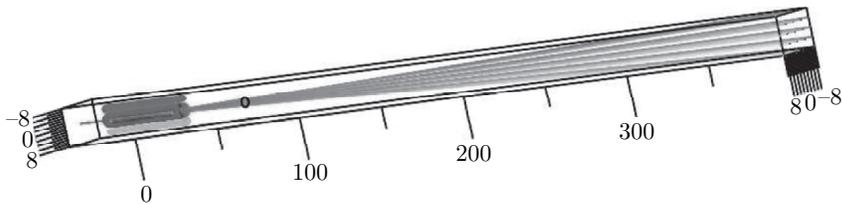


Рис. 5. Моделирование хода пучка в реальной геометрии. Кружком обозначено место, где стоит кварцевая пластинка (для визуализации при настройке)

осциллографе показали, что это реализуемо, а гистограмма покрытия образца в течение допустимого для эксперимента времени показала допустимый разброс (рис. 4).

2.4. Моделирование траектории пучка частиц в реальной геометрии. Зная формулу магнитного потенциала из расчета по программе *femtm4.2*, которая отражает незначительную нелинейность магнитного поля, можно убедиться, что при движении

внутри отклоняющей системы реальных размеров и до образца заданная, видимая на двухкоординатном осциллографе равномерность покрытия сохранится на протяжении всего пути пучка до образца.

Расчет проводился с решением системы уравнений Ньютона с силой Лоренца с помощью метода Рунге–Кутты 4-го порядка.

3. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ РАЗВЕРТКИ ИОННОГО ПУЧКА

3.1. Генератор функций. Генераторы периодических функций представлены на рынке производителей в аналоговом или цифровом исполнении. Аналоговые генерируют основные типы электрических волн: синусоидальные, прямоугольные и треугольные, в то время как цифровые могут генерировать любой тип волны. Аналоговая генерация всех типов волн основывается на треугольнике.

В нашем случае используется аналоговый генератор, собранный по схеме интегратора, позволяющий исходя из прямоугольного сигнала генерировать электрические волны треугольной и пилообразной формы, что предоставляет разные возможности с учетом того, что и амплитуда, и частота выходного сигнала также будут регулируемые. Такая платформа для генерации электрических волн позволяет подобрать самый эффективный сигнал в процессе регулировки имплантации ионов в образце.

Генератор треугольной волны собран с использованием операционных усилителей (ОУ) общего применения (LM324, четыре ОУ в одном корпусе) путем соединения интегратора с генератором прямоугольной волны (рис. 6), где приводится общая электрическая схема оптимизированного генератора треугольных волн.

В каждом канале генератора применяется одна и та же электрическая схема: первый каскад содержит компаратор, который будет непрерывно сравнивать уровень напряжения неинвертирующего входа с землей, т. е. с 0 В. Если напряжение будет выше или ниже 0 В, то получится положительное или отрицательное напряжение насыщения на выходе компаратора, т. е. формируется прямоугольная волна. Этот скачок напряжения будет действовать как входной сигнал для второго каскада, где он интегрируется и частично подается по обратной связи на вход первого каскада.

Наличие цепи смещения уровня напряжения на неинвертирующем входе интегратора позволяет регулировать, при необходимости, скорость нарастания переднего и заднего фронтов треугольного сигнала, тем самым сформировать пилообразный сигнал.

Период выходного сигнала от каждого генератора определяется соотношениями $T = 4R_5R_8C_2/R_6$ для одного канала и $T = 4R_1R_4C_1/R_2$ для второго, а частота, соответственно, обратна периоду. Использовались почти одинаковые частоты порядка 200 Гц в каждом канале. Значение частот подбиралось настройкой вручную, с целью добиться более равномерного сканирования поверхности образца. Выходные сигналы от генераторов подключаются отдельно ко входам усилителя низкой частоты. Экспериментально установлено, что эффективнее использовать режим непрерывного сигнала (без скачков) по обоим каналам развертки.

3.2. Катушки развертки. Расчет по формулам (1)–(3) показывает, что для развертки пучка протонов с энергией 2 МэВ по запрашиваемой заказчиком геометрии

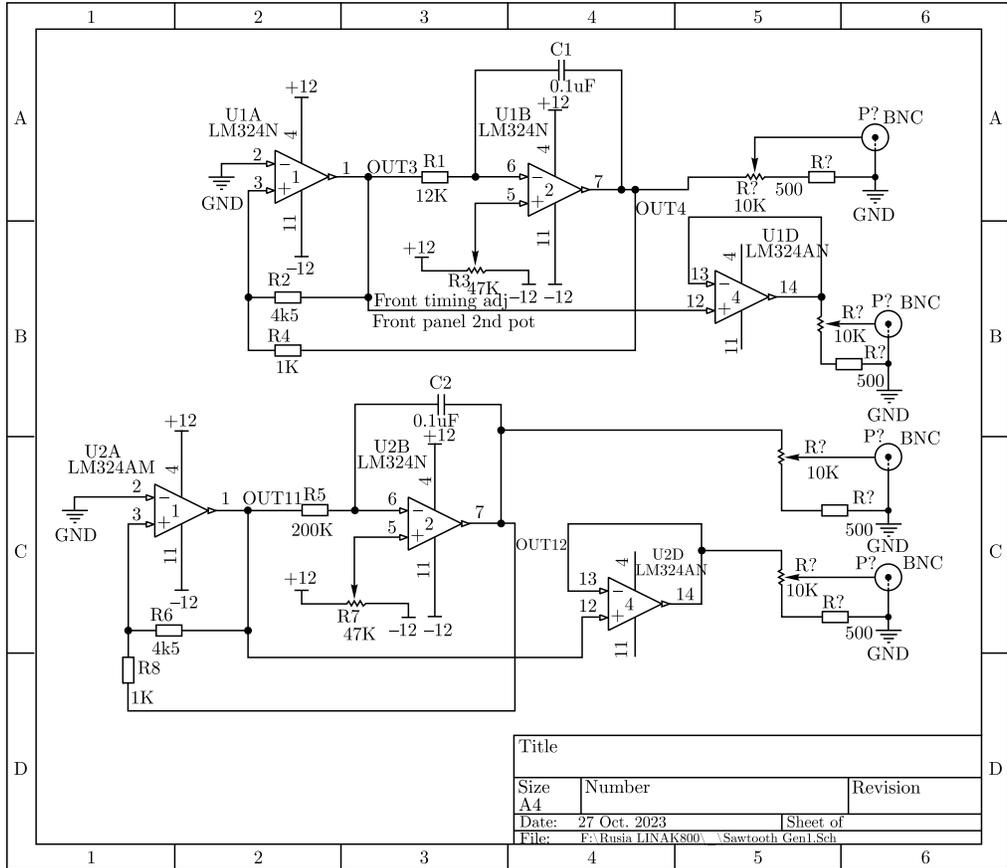


Рис. 6. Схема генератора функции

(см. рис. 5 и 3) на каждую координату отклоняющей системы потребуется пара однослойных катушек с $IN = 325$ ампервитков. Однослойные катушки имеют наименьшую индуктивность, что существенно для обеспечения токовой нагрузки (20 А максимально) при выбранном числе витков (32 для внутренних катушек и 34 для внешних).

3.3. Усилитель низкой частоты. На рис. 7 показан усилитель низкой частоты.

3.4. Источник низковольтного напряжения УКУ-207.14. На рис. 8 показан источник низковольтного напряжения УКУ-207.14.

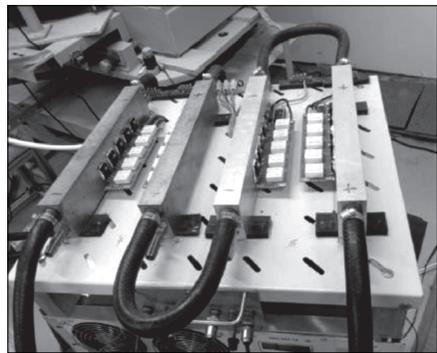


Рис. 7. Усилитель низкой частоты

3.5. Автоматизированная система для выполнения технологической операции ионной имплантации. Система развертки стыкуется с автоматизированной установкой (рис. 9), состоящей из камеры облучения и механизма смены образцов. Уста-

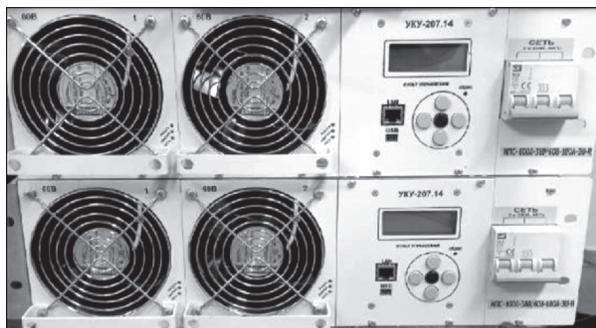


Рис. 8. Источник низковольтного напряжения УКУ-207.14

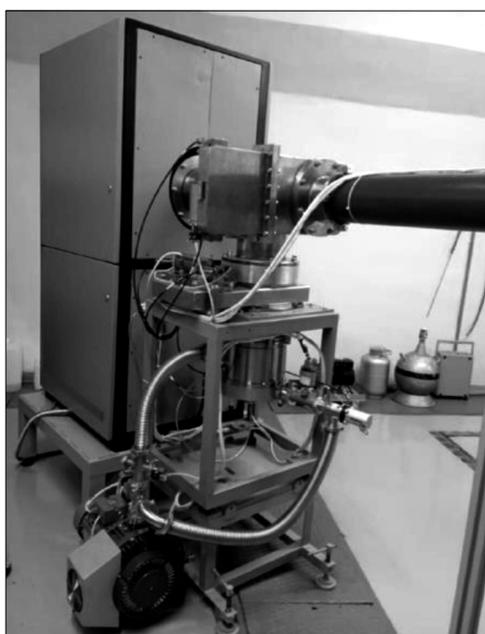


Рис. 9. Автоматизированная система для выполнения технологической операции ионной имплантации

новка конструктивно смонтирована АО НПП «ЭСТО» по собственной разработке. Процесс ввода, экспозиции и экстракции образцов при сохранении вакуумных условий осуществляется автоматически. Сигналы на смену образцов подаются дистанционно с персонального компьютера.

4. СИСТЕМА ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

В ходе работ по отладке системы обнаружилось, что вследствие воздействия высоких токов катушки развертки перегревались, были достигнуты температуры в районе 90°C . Для устранения теплового воздействия была разработана, изготовлена

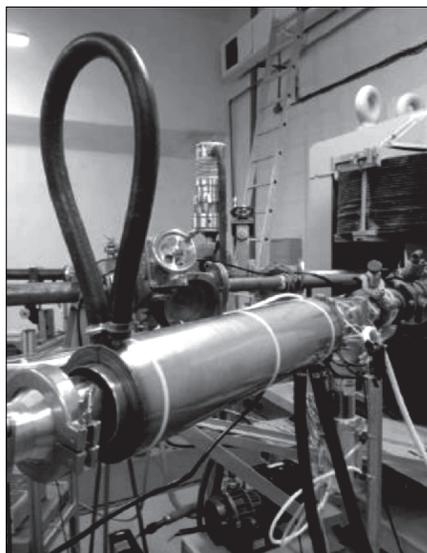


Рис. 10. Жидкостное охлаждение

Технические характеристики охладителя RMFL-2000

Параметр	Модель	
	RMFL-2000ANT03	RMFL-2000BNT03
Напряжение, В	АС 1Р 220–240	АС 1Р 220–240
Частота, Гц	50	60
Текущий ток, А	0,91–7,71	0,91–7,51
Максимальное энергопотребление, кВт	2,03	1,69
Мощность нагревателя, кВт	1,7	1,33
Хладагент	R407c	
Точность, °С	± 0,5	
Редуктор	Капилляр	
Мощность насоса, кВт	0,2	
Емкость бака, л	16	
Вход и выход	Φ ₆ + Φ ₁₂ фаст-коннектор	
Максимальное давление насоса, бар	6,5	
Номинальный расход, л/мин	2–15	
Вес нетто, кг	49	45
Вес брутто, кг	60	56
Измерение, см	77 × 48 × 43	
Размер упаковки, см	88 × 58 × 61	

и установлена система жидкостного охлаждения для поддержания приемлемых температур катушек (рис. 10). Система охлаждения реализована на основе охладителя воды RMFL-2000, имеющего указанные в таблице характеристики, подающих шлангов, выполненных из стойкого к агрессивной среде материала, и двух полых полуцилиндров, расположенных непосредственно на внешней границе катушек.

Охладитель при помощи гидронасоса подает в систему охлаждения теплоноситель, вследствие чего происходит охлаждение катушек до приемлемых температур. Это позволяет стабилизировать процесс отклонения траектории частиц в ионопроводке, транспортировке до образца и сканирования поверхности образцов пучком частиц, удовлетворяя требованиям заданного по условиям техзадания технологического процесса.

Теплоносителем для охладителя является смесь деионизированной воды и метилового спирта в сочетании 1/10.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты работ по созданию и внедрению уникальной системы для выполнения технологической операции ионной имплантации водорода в обрабатываемых образцах на заданную глубину.

Система развертки интегрирует в себе ряд разработанных отдельных устройств и механизмов для реализации процесса, выполняющего имплантацию ионов в образцах. Описаны устройства, которые выполняют назначенные функции в общей системе генерации требуемого потока частиц правильной формы. Генератор создает сигнал треугольной формы, который усиливается и подается на индуктивную нагрузку катушек развертки, где образуется необходимое магнитное поле при пиковых токах 20 А в каждой катушке для отклонения траектории частиц пучка таким образом, чтобы они проходили по всей поверхности обрабатываемого образца. На рис. 4 представлена осциллограмма, показывающая ход пучка под действием катушек.

По приведенным в статье расчетам и в процессе моделирования с использованием соответствующего программного обеспечения можно заключить: установка удовлетворяет условиям технического задания на обработку образцов, что и было подтверждено в ходе выполнения экспериментальных работ с последующим анализом обработанных пластин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бонштедт Б. Э., Маркович М. Г.* Фокусировка и отклонение пучков в электронно-лучевых приборах. М.: Сов. радио, 1967.
2. *Алферов В. Н., Осетинский Г. М., Чепурченко И. А.* Электростатический генератор ОИЯИ. ОИЯИ, 9-2923. Дубна, 1967.
3. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика: Учеб. пособие для вузов. Т. 6. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2015. 728 с.

Получено 30 ноября 2023 г.