

Микрополосковый позиционно-чувствительный детектор рентгеновского излучения на основе HR GaAs:Cr для in situ исследований материалов методами рентгеноструктурного анализа

В.В. Крившенко^{1,}, В.Я. Христенко¹, К.В. Бескончин¹, С.С. Ковальский¹, В.В. Денисов¹,
Н.Н. Кривин²*

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

²*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия*

**vladislavkrivsenko@gmail.com*

Аннотация. Разработан и исследован микрополосковый позиционно-чувствительный детектор рентгеновского излучения на основе HR GaAs:Cr, предназначенный для проведения исследований методом in situ – дифрактометрии. Описаны экспериментальные результаты по измерению темнового тока, регистрации инфракрасного и рентгеновского излучения прототипа детектора. Обсуждаются перспективы применения данного детектора в исследованиях материалов под действием различных внешних условий, включая высокие температуры и давление.

Ключевые слова: микрополосковый позиционно-чувствительный детектор, арсенид-галлия, компенсированный хромом, рентгеновское излучение.

1. Введение

Современные требования в области исследований процессов синтеза новых материалов и включают не только необходимость точного анализа состава и структуры материала, но и мониторинг ее изменений в режиме реального времени в процессе синтеза материала или воздействия на него различных условий. Для достижения этой цели применяется метод in situ – дифрактометрии, который позволяет проводить рентгенофазовый анализ (РФА) поверхности при воздействии таких условий, как повышенная/пониженная температура, давление, воздействие агрессивных сред и прочее. Этот метод предоставляет информацию о фазовых превращениях, кинетике реакций и механизмах деформации исследуемого материала в режиме реального времени [1].

Для проведения in situ рентгеноструктурных экспериментов требуется высокое временное разрешение, что подразумевает использование мощных и интенсивных источников рентгеновского излучения. Требуемым выбором для таких экспериментов является ондуляторное излучение, которое планируется использовать для подобных исследований на экспериментальной станции 1–2 ЦКП "СКИФ", г. Новосибирск [2, 3]. Для работы с широким диапазоном энергий ондулятора (от 6 до 27 кэВ) необходимо использовать детектор с высокой чувствительностью и высоким разрешением, который способен обеспечить получение точных данных о фазовом составе и структуре материала при различных условиях. Микрополосковый позиционно-чувствительный детектор (ПЧД) рентгеновского излучения на основе HR GaAs:Cr представляет собой необходимый инструмент для реализации метода рентгеноструктурного анализа в режиме in situ. HR GaAs:Cr – это высокочувствительный материал арсенид-галлия, компенсированный хромом, который обладает требуемыми свойствами для анализа рентгеновского излучения [4, 5]. Использование его в качестве базы для микрополосковых ПЧД обеспечивает высокое пространственное разрешение и высокую чувствительность при измерении рентгеновских дифракционных картин. Таким образом, становится возможным оценивать структурные изменения и анализировать скорость происходящих процессов образования и исчезновения дефектов внутренней структуры материалов в процессе их эксплуатации.

Целью данного исследования является разработка и экспериментальная оценка микрополоскового ПЧД на основе HR GaAs:Cr для дальнейшего применения в методе *in situ* – дифрактометрии.

2. Материалы и методы исследования

Объектом исследования выступает прототип ПЧД (Рис. 1), имеющий 256 каналов для регистрации рентгеновского излучения. В качестве чувствительного элемента выступают два сенсора по 128 каналов на основе HR GaAs:Cr с шагом микрополосков 50 мкм. Регистрация данных осуществляется с помощью универсальной платы сбора данных, адаптированной для использования совместно с данными сенсорами. Подключение сенсоров осуществлялось с помощью дополнительной платы сенсора, предназначенной для крепления сенсоров и обеспечения совместимости по шагу между проводниками на плате (шаг между проводниками не менее 150 мкм) и на сенсоре, для чего использовался керамический конвертер шага.

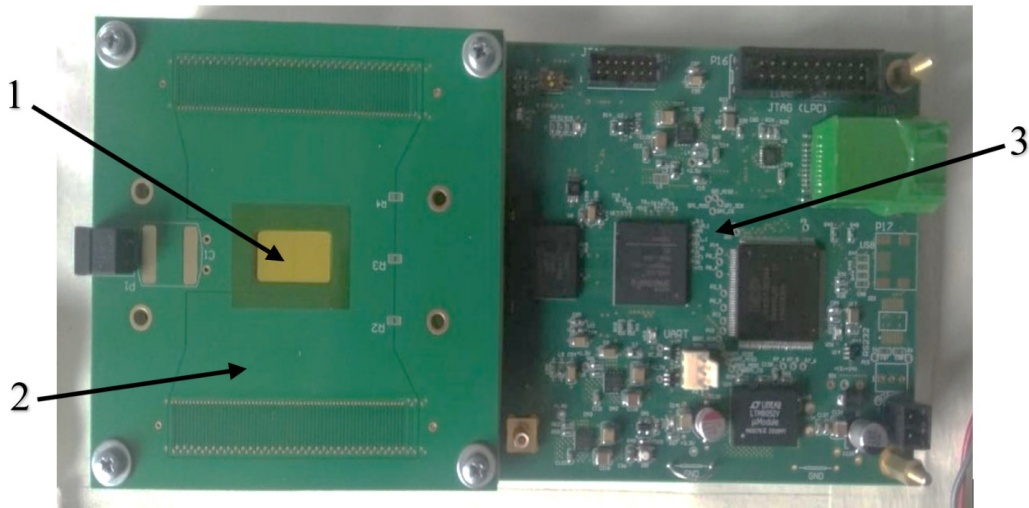


Рис.1. Прототип ПЧД (1 - Микрополосковые сенсоры из арсенида галлия, компенсированного хромом (HR GaAs:Cr); 2 – плата сенсора с установленным сенсором и конвертером шага; 3 – плата сбора данных).

Отладка прототипа осуществлялась с помощью осциллографа Rigol MSO8204 и источника питания Rigol DP832. В дальнейшем они также использовались в исследовании прототипа. Для оценки отклика прототипа на инфракрасное и рентгеновское излучение использовались инфракрасный светодиод L-34SF4C и микрофокусная рентгеновская трубка UNMS-U130B соответственно.

3. Результаты экспериментов и их анализ

Основной задачей при прототипировании ПЧД была оценка работоспособности предлагаемого варианта схемотехнического решения. Для оценки динамического диапазона были проведены измерения темнового тока. В ходе эксперимента темновой ток увеличивался с ростом температуры и фактически прекращался в установившемся режиме (спустя ~5 минут). На Рис. 2 Представлен характерный график величины темнового тока в установившемся режиме.

На Рис. 2 присутствуют ярко выраженные пики с каждой стороны на каждом из сенсоров. Появление данных пиков связано с искажением напряженности поля на краях сенсора. Очевидно, что при попадании рентгена в данную область сенсора (около 4–5 полосок) динамический диапазон будет существенно ниже за счёт большей величины

темнового тока. Для снижения влияния данного эффекта на результаты эксперимента, следует устанавливать сенсоры «внахлест», с перекрытием 4–5 пикселей одного из сенсоров. При таком варианте расположения на краевые эффекты приходится 2–3 полоски со сниженным динамическим диапазоном (по уровню, превышающему 10% от средней величины темнового тока стрипа). Следует отметить, что максимальная измеренная величина темнового тока относительно полной шкалы составляет 26%, что существенно снижает максимальное значение интенсивности, измеряемое детектором.

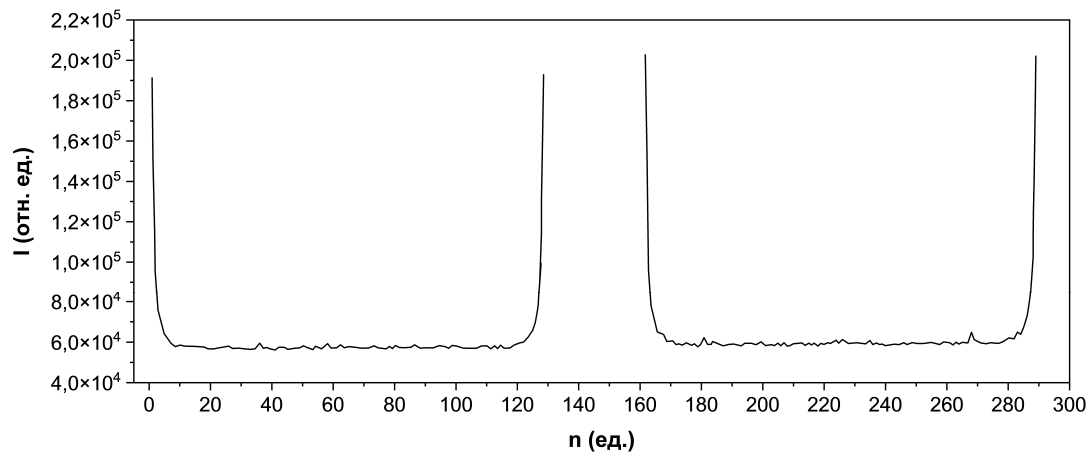


Рис. 2. Величина темнового тока в установившемся режиме (по оси абсцисс – номер полоски, для наглядности номер первой полоски второго сенсора программно установлен на 160; по оси ординат – амплитуда накопленного тока в единицах показаний АЦП, максимальное значение – 16777215).

Сенсор на основе GaAs:Cr способен регистрировать излучение в ближней ИК-области. В связи с этим был проведен эксперимент, в ходе которого осуществлялась засветка инфракрасным излучением через оптические щели детектора с использованием ИК светодиода.

Эксперимент по засветке детектора проводился для оценки работоспособности и анализа величины сигнала сенсора при облучении излучением 880 нм (Рис. 3).

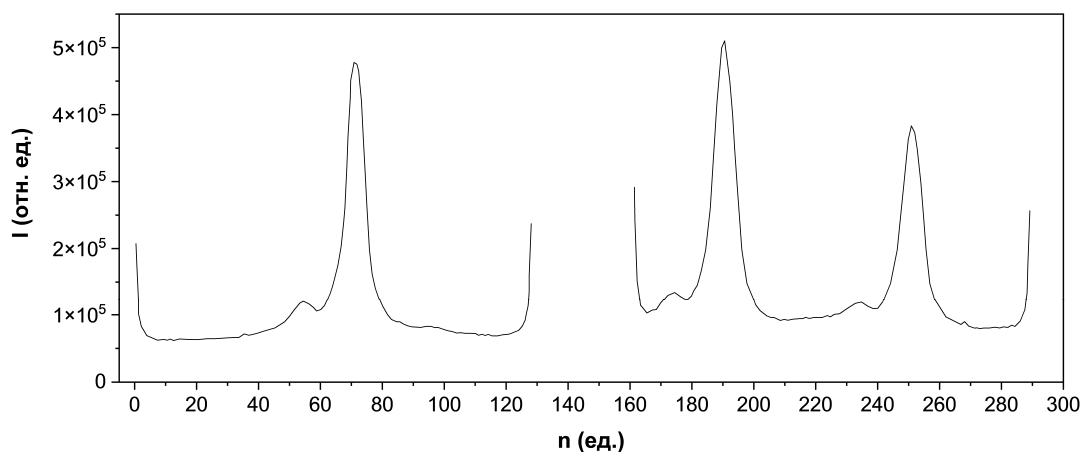


Рис. 3. Величина сигнала сенсора при облучении излучением 880 нм (по оси абсцисс – номер полоски, для наглядности номер первой полоски второго сенсора программно установлен на 160; по оси ординат – амплитуда накопленного тока в единицах показаний АЦП).

Была выявлена особенность, что при значительном потоке фотонов за относительно продолжительное время (секунды) наблюдался эффект накопления заряда, который

рассеивается в течение нескольких десятков миллисекунд после отключения источника излучения. В дальнейшем следует учитывать данный эффект при работе с синхротронным излучением.

Для оценки линейности сенсора были проведены исследования работы прототипа детектора при облучении рентгеновским излучением от широкополосной микрофокусной рентгеновской трубки с вольфрамовой мишенью. Облучение проводилось при ускоряющем напряжении 50 кВ и изменении тока трубки в диапазоне от 0.1 до 0.5 мА с шагом 0.1 мА, поскольку в данном диапазоне интенсивность излучения изменяется практически по линейному закону (измерено ранее с помощью детектора Advacam Minipix). Результаты измерения при токе 0.5 мА представлено на Рис. 4.

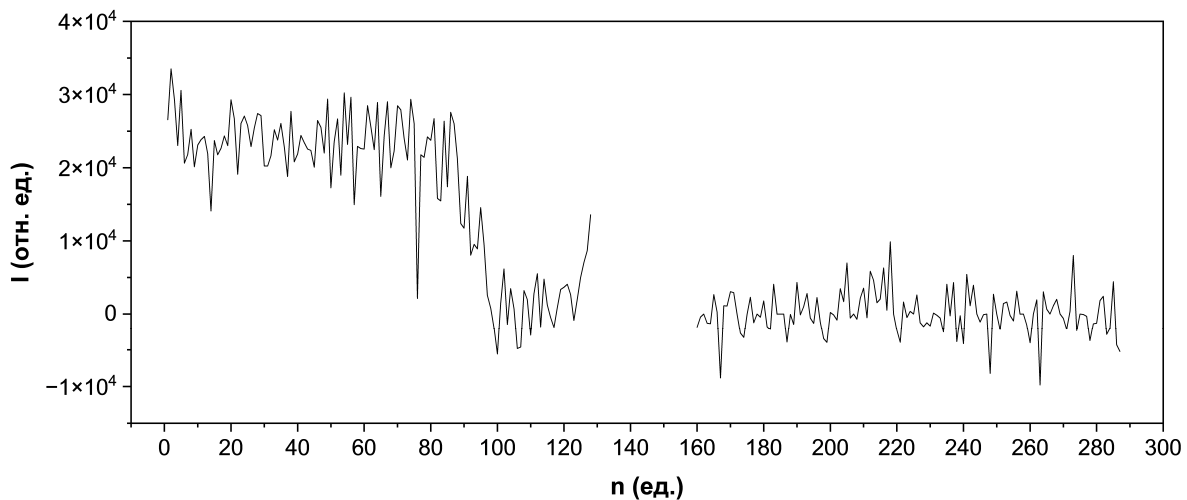


Рис. 4. Результаты измерения при облучении сенсора рентгеновским излучением (по оси абсцисс – номер полоски, для наглядности номер первой полоски второго сенсора программно установлен на 160; по оси ординат – амплитуда накопленного тока в единицах показаний АЦП). Напряжение на рентгеновской трубке – 50 кВ, ток - 0.5 мА, Часть сенсора закрыта стальной пластиной толщиной 4 мм.

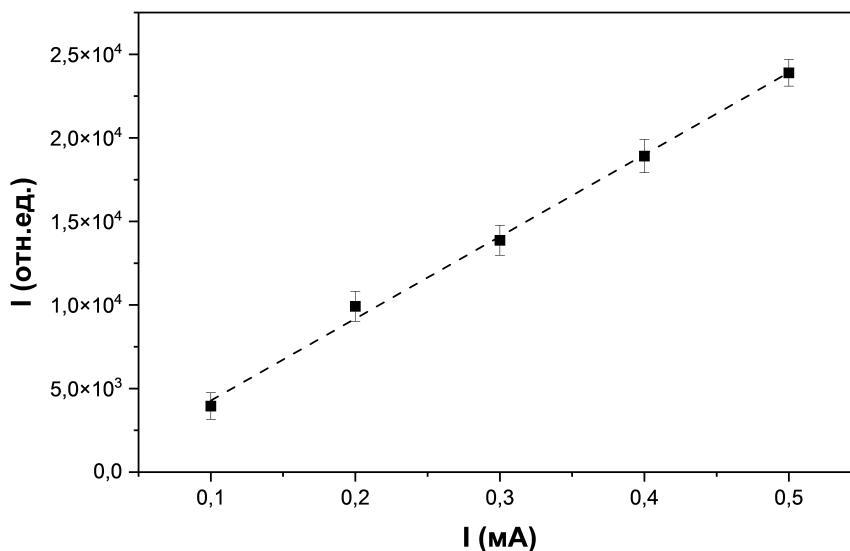


Рис. 5. Зависимость среднего измеренного тока полоски сенсора (в ед. АЦП от тока рентгеновской трубки).

На Рис. 5 представлена зависимость отклика прототипа детектора от тока рентгеновской трубки в диапазоне от 0.1 мА до 0.5 мА. В рассматриваемом диапазоне тока интенсивность рентгеновского излучения изменяется практически по линейному закону. Каждое

увеличение тока трубки сопровождается пропорциональным ростом отклика детектора, что свидетельствует о корректной работе сенсора.

Следует отметить, что в полученных данных достаточно велика доля шума, что связано с используемыми источниками питания и большим расстоянием от источника до точки подключения.

4. Заключение

В рамках работы был создан прототип микрополоскового ПЧД на основе HR GaAs:Cr, способный регистрировать инфракрасное и рентгеновское излучение с высоким разрешением. При проведении экспериментов было установлено, что темновой ток сенсора увеличивается с ростом температуры, а при облучении инфракрасным излучением наблюдается эффект накопления заряда, который рассеивается через несколько миллисекунд. Прототип продемонстрировал свою работоспособность при облучении рентгеновским излучением. Полученные данные подтверждают перспективы применения данного детектора для *in situ* – дифрактометрии на экспериментальной станции 1–2 ЦКП "СКИФ".

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Федерального Проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» при реализации Программы развития учебного дизайн-центра «Микроэлектроника квантовой радиографии» (соглашения от 29.02.2024 г. № 075-02-2024-1500 и № 075-02-2024-1504) в Институте сильноточной электроники СО РАН.

5. Список литературы

- [1] O.A. Bulavchenko and Z.S. Vinokurov, In Situ X-ray Diffraction as a Basic Tool to Study Oxide and Metal Oxide Catalysts, *Catalysts*, **13**, 1421, 2023; doi: 10.3390/catal13111421
- [2] Н. А. Винокуров, Е.Б. Левичев, Ондюляторы и вигглеры для генерации излучения и других применений, *УФН*, **185**, 917, 2015; doi: 10.3367/UFNr.0185.201509b.0917
- [3] З. С. Винокуров, Б.А. Захаров, Е.В. Болдырева, Я.В. Зубавичус, Ю.В. Ларичев, А.Г. Селютин, А.И. Семерикова, С.В. Цыбуля, А.Н. Шмаков, Д.Д. Мищенко, О.А. Булавченко, Д.А. Яценко, Н.Н. Коваль, В.В. Денисов, О.В. Крысина, Ю.Ф. Иванов, В.В. Шугуров, С.А. Громилов, В.Ю. Комаров, А.С. Сухих, С.В. Рашенко, К.В. Золотарев, Концептуальный дизайн станции 1-2 «Структурная диагностика» ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН, *Технологическая инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов "СКИФ"*, **1**, 74, 2022; EDN WLQRYX
- [4] D. Budnitsky, A. Tyazhev, V. Novikov, A. Zarubin, O. Tolbanov, M. Skakunov, E. Hamann, A. Fauler, M. Fiederle, S. Procz, H. Graafsma, and S. Ryabkov, Chromium-compensated GaAs detector material and sensors, *Journal of Instrumentation*, **9(7)**, C07011, 2014; doi:10.1088/1748-0221/9/07/C07011
- [5] A.V. Tyazhev and O.P. Tolbanov, X-ray Sensors Based on Chromium Compensated Gallium Arsenide (HR GaAs:Cr), *Energy Efficient Computing & Electronics*, **1**, 167, 2019; doi: 10.1201/9781315200705-6