

**ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА**

УДК 621.384.6

**О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МИШЕНЕЙ ГЕНЕРАТОРОВ  
НЕЙТРОНОВ****© 2023 г. Е. Д. Вовченко<sup>а\*</sup>, К. И. Козловский<sup>а</sup>, Р. П. Плешакова<sup>а</sup>,****А. А. Рухман<sup>а</sup>, А. Е. Шиканов<sup>а</sup>***<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”**Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31**E-mail: edvovchenko@mail.ru*

Поступила в редакцию 17.04.2023 г.

После доработки 30.06.2023 г.

Принята к публикации 05.08.2023 г.

Обсуждается возможность использования кристаллов синтетического алмаза в качестве чувствительного элемента термодатчиков резистивного типа, разрабатываемых для контроля нагрева мишени в генераторе нейтронов. Приведены сведения о конструкции и технологии изготовления макетного образца термодатчика, а также данные экспериментального исследования его динамических характеристик. На примере генератора нейтронов, разработанного на базе сильноточного ускорительного диода, предложена схема термоконтроля нейтронобразующей мишени.

Работа посвящена вопросам контроля температуры мишени нейтронного генератора (НГ) на базе малогабаритного диодного ускорителя дейтронов [1, 2]. В процессе его работы в непрерывном или импульсно-периодическом режиме при высокой плотности потока ускоренных дейтронов мишень нагревается и деградирует из-за термодесорбции содержащихся в ней изотопов водорода, что существенно сокращает срок службы НГ [3]. Для мониторинга температурного режима мишени потребовалась разработка термодатчика, обладающего такими свойствами, как радиационная и термохимическая стойкость, механическая прочность, малые габариты и невысокая стоимость. Подобным требованиям вполне отвечают монокристаллы синтетического алмаза (СА), которые могут работать в диапазоне температур воз-

можного нагрева мишеней генераторов нейтронов (100–500) °С [3] и, как всякий алмазный детектор, отличаются высокой радиационной стойкостью [4].

В данной работе отбор экспериментальных образцов кристаллов для изготовления СА-термодатчиков резистивного типа и проверки возможности с их помощью контролировать степень нагрева мишени осуществлялся из “крошки” синтетических алмазов. Выбирались ее отдельные фрагменты, имеющие форму кристалла с двумя параллельными гранями. При этом размер грани не превышал (0.7–0.9) мм. Предварительный эксперимент показал, что выбранные образцы могут эффективно работать в качестве чувствительных элементов термодатчика мишени НГ вплоть до температуры 500 °С.

При разработке экспериментального образца термодатчика крайне важно создание на противоположных гранях кристалла двух контактов (инжектирующего и сигнального), влияющих на удельное сопротивление чувствительного элемента. Для решения этой задачи использовался опыт изготовления альфа-детекторов на базе синтетических алмазов, предназначенных для мониторинга нейтронного потока ускорительной трубки [5]. Для изготовления контактов была также позаимствована технология лазерного напыления, реализуемая на базе твердотельных импульсных лазеров. Следует отметить возможность одновременного использования в НГ как СА-термодатчика, так и альфа-детектора нейтронного потока.

С целью исследования рабочих характеристик СА-термодатчиков и определения особенности их функционирования в системе контроля температуры мишени нейтронного генератора был создан лабораторный экспериментальный стенд. Его блок-схема представлена на рис. 1.

В результате проведенных на лабораторной установке измерений найдена зависимость электрического сопротивления СА-термодатчика от температуры, определяющая принципиальную возможность эффективно осуществлять контроль нагрева мишени в процессе работы нейтронного генератора в непрерывном или импульсно-периодическом режиме. На рис. 2 представлены примеры такой зависимости для двух термодатчиков. Различие в поведении экспериментальных графиков обусловлено тем, что кристаллы СА немного различались размерами и имели разный процент загрязнения примесями.

Обработка полученных данных осуществлялась методом наименьших квадратов. Максимальная погрешность измерения сопротивления исследуемых СА-термодатчиков в рабочем диапазоне температур от 50 до 350 °С не превышала 20% при доверительной вероятности 0.95. Как видно на рис. 2, температурные зависимости электрического сопротив-

Рис. 1

Рис. 2

ления термодатчиков на базе синтетических алмазов во всем указанном диапазоне температур пригодны для эффективной градуировки результатов измерений в пределах указанной погрешности, что свидетельствует о возможности индикации температуры мишени НГ.

Особенность работы СА-термодатчика в схеме контроля температуры мишени НГ связана с передачей данных по линии связи, длина которой может достигать десятков метров. При этом можно использовать либо волоконно-оптическую линию связи, либо проводную линию. Волоконно-оптическая линия связи обеспечивает высокую защищенность от помех и гальваническую развязку, но требует больших затрат по сравнению с проводными линиями, для которых с целью защиты от помех широко применяются различные методы модуляции сигнала. В нашей работе для уменьшения влияния паразитных токов утечки при передаче полезного сигнала в качестве одного из возможных решений применена проводная линия и простая схема, основу которой составляет модуль преобразования напряжения в частоту.

Преобразователь напряжение–частота (ПНЧ) выполнен по стандартной схеме, использующей интегратор Миллера и стандартный таймер серии 555. Эта схема и принцип ее работы достаточно подробно рассмотрены в литературе и не требуют подробных пояснений [6]. Линейность зависимости  $f(U_{\text{вх}})$  обеспечивается реализацией источника тока на базе операционного усилителя. Входное напряжение, согласно закону Ома, пропорционально сопротивлению  $R$  на входе интегратора и току  $I$ , задающему темп зарядки его емкости  $C$ . Напряжение на конденсаторе управляется таймером. Наличие в таймере компараторов, разряжающего ключа и опорных уровней напряжения используется для формирования последовательности выходных импульсов с частотой

$$f = \frac{U_{\text{вх}}}{R \cdot C \cdot 0.33U_{\text{п}}},$$

где  $U_{\text{п}}$  – напряжение питания,  $U_{\text{вх}}$  – входное напряжение,  $R$  – сопротивление.

Подстройка величины сопротивления  $R$  позволяет калибровать соотношение между частотой и входным напряжением. Результаты работы модуля ПНЧ иллюстрирует рис. 3.

**Рис. 3**

Для анализа пригодности СА для контроля температуры была проведена серия из 30 измерений с различными термодатчиками. При этом характер полученных зависимостей в целом соответствовал кривым, представленным на рис. 2 и 3. Два измерения из указанных

тридцати привели к неадекватным результатам, связанным с вероятным использованием недоброкачественных кристаллов.

Рис. 4

На рис. 4. представлена возможная схема мониторинга температуры мишени НГ. Корпус ускорительной трубки НГ состоит из двух частей: металлической, на торец которой нанесён активный слой мишени 2, и высоковольтного изолятора 3. При этом используется электрическая схема высоковольтного питания НГ с так называемой “заземленной” мишенью, потому что СА-термодатчик 1 должен крепиться непосредственно на подложке мишени.

Измерительная часть состоит из блока формирования напряжения 6, преобразователя напряжение–частота 7 и цифрового индикатора температуры 8. В эксплуатационном варианте представляется полезным дополнить схему микропроцессором для передачи данных по USB-шине в персональный компьютер.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданович Б.Ю., Нестерович А.В., Шиканов А.Е., Ворогушин Б.Ю., Свистунов Ю.А. Дистанционный радиационный контроль с линейными ускорителями. Т.1. Линейные ускорители для генерации тормозного излучения и нейтронов. Москва: Энергоатомиздат, 2009.
2. *Shikanov A.E.* Plasma Physics Reports. 2021. V. 47. №4. P. 377. <https://doi.org/10.1134/S1063780X21040085>
3. *Vovchenko E.D., Kozlowskiy K.I., Pleshakova R.P., Shikanov A.E., Yakovlev O.V.* // Phys. Atom. Nuclei. 2022. V. 85. P. 1780. <https://doi.org/10.1134/S1063778822100635>
4. *Артемьев К.К., Красильников А.В., Кормилицын Т.М., Родионов Н.Б.* // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 12. С. 1183. DOI: 10.31857/S0367292122600480
5. *Плешакова Р.П.* Исследование возможности создания частотных ускорительных трубок с  $\alpha$ -детекторами на основе синтетических алмазов // Научная сессия МИФИ–2004. Сборник научных трудов, Москва, 2004. №. 7. С. 166.
6. *Gyula Dioszegi* // РадиоЛоцман. 2014. Т. 12. С. 72.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Схема установки для измерения температуры мишени на основе СА-термодатчика: 1 – мишень; 2 – СА-термодатчик; 3 – держатели кристалла; 4 – блок формирования опорного напряжения; 5 – преобразователь напряжение–частота; 6 – цифровой индикатор температуры.

**Рис. 2.** Усредненные зависимости электрического сопротивления от температуры для двух экспериментальных образцов термодатчиков.

**Рис. 3.** Зависимости частоты от температуры для двух образцов СА-термодатчиков, измеренные с применением модуля ПНЧ.

**Рис. 4.** Схематическое изображение НГ с отпаянной ускорительной трубкой (с “заземленной” мишенью) и термодатчика на базе кристалла синтетического алмаза: 1 – СА-термодатчик, 2 – мишень ускорительной трубки, 3 – изолятор корпуса трубки, 4 – источник ионов, 5 – высоковольтный блок питания НГ, 6 – блок формирования напряжения, 7 – ПНЧ, 8 – цифровой индикатор температуры.

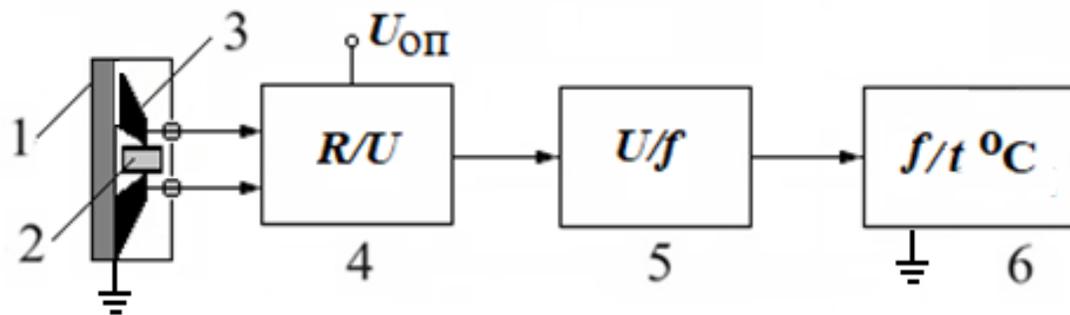


Рис. 1.

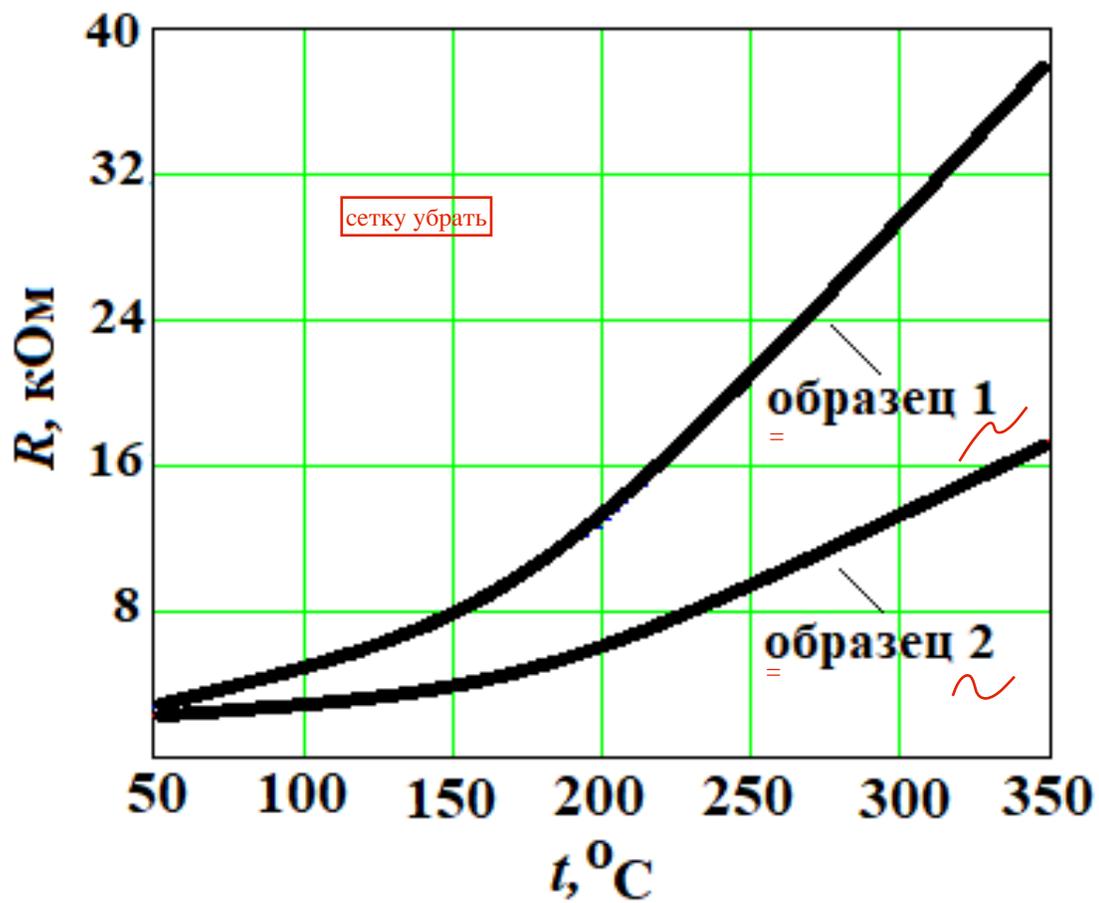


Рис. 2.

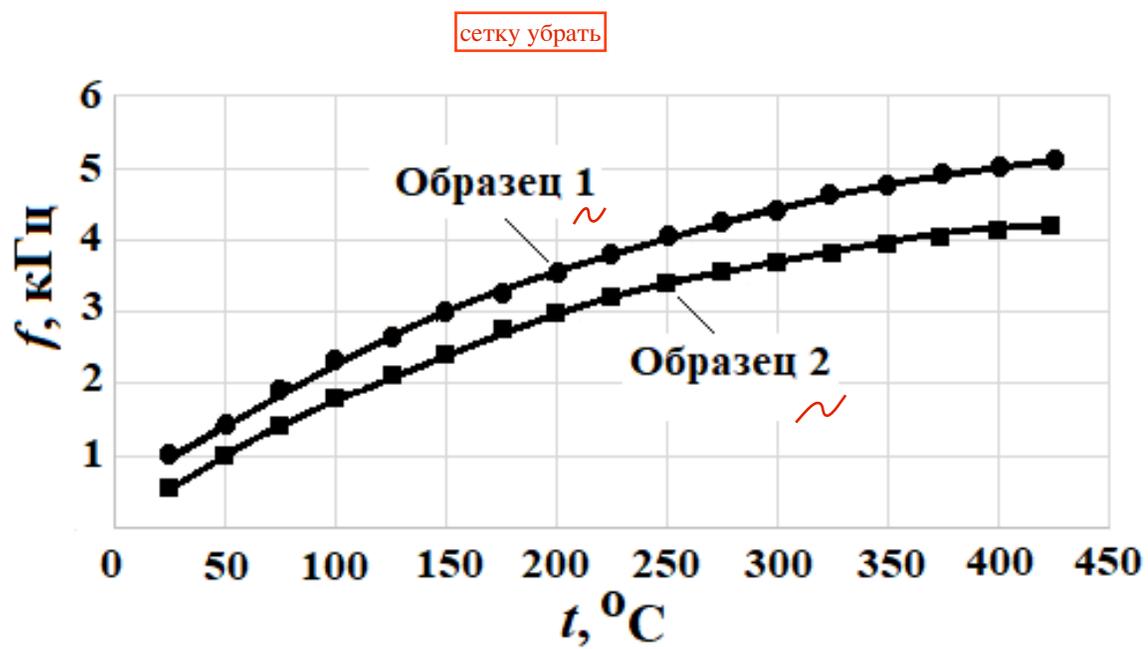


Рис. 3.

цифры - курсив

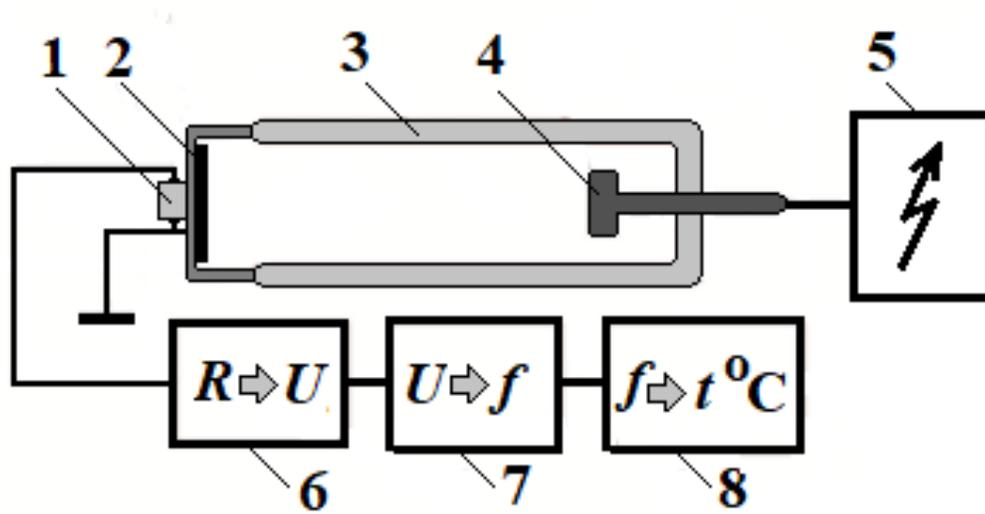


Рис. 4.

**Для связи с авторами:****Вовченко Евгений Дмитриевич****Тел.: 8-977-121-25-66 (моб.)****Тел.: 8-917-546-74-43 (моб.)****E-mail: edvovchenko@mail.ru****Козловский Константин Иванович****Тел.: 8-915-185-07-82 (моб.)****E-mail: kozlowskii2013@yandex.ru****Для переводчика:****ON THE POSSIBILITY OF USING SYNTHETIC DIAMONDS TO CONTROL THE TEMPERATURE OF TARGETS IN NEUTRON GENERATORS****Аннотация:**

The possibility of using synthetic diamond crystals as a sensitive element of resistive-type thermal sensors developed to control target heating in a neutron generator is discussed. Information about the design and manufacturing technology of a mock-up sample of the temperature sensor, as well as data from an experimental study of its dynamic characteristics are given. On the example of a neutron generator developed based on a high-current accelerating diode, a scheme for thermal control of a neutron-forming target is proposed.