

# Радиационная стойкость источника субтерагерцового излучения после нейтронного воздействия

© А.С. Иванов<sup>1</sup>, Д.Г. Павельев<sup>2</sup>, С.В. Оболенский<sup>1,2</sup>, Е.С. Оболенская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО НПП „Салют“,  
603950 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: ivanov.2582@yandex.ru

Поступила в Редакцию 2 марта 2022 г.

В окончательной редакции 25 марта 2022 г.

Принята к публикации 25 марта 2022 г.

Продолжено изучение радиационной стойкости источника субтерагерцового излучения из гетеродина на основе генератора на диоде Ганна и умножителя на полупроводниковой сверхрешетке GaAs/AlAs. Экспериментально измерены зависимости выходной мощности от частоты генератора на диоде Ганна до и после облучения нейтронами. Произведена аналитическая оценка источника субтерагерцового излучения к нейтронному излучению с флюенсами  $3.5 \cdot 10^{12}$ ,  $2.85 \cdot 10^{13}$ ,  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

**Ключевые слова:** радиационная стойкость, сверхрешетка, диод Ганна, терагерцы.

DOI: 10.21883/FTP.2022.08.53143.29

## 1. Введение

Источники электромагнитных волн субтерагерцового диапазона с широкой полосой перестройки частоты находят применение при решении задач радиоастрономии [1,2], спектроскопии [3], построении систем связи [4–6] и безопасности [7], систем управления и ориентирования на поле боя [8]. Малые габариты, небольшие величины питающих напряжений и стойкость к ионизирующему излучению — таковы основные требования для конструирования приемопередающей аппаратуры военного и космического назначения. В качестве основы подобного прибора рассматривается источник из гетеродина на диоде Ганна (ДГ) и умножителя на полупроводниковой сверхрешетке (ППСР) [9]. В настоящее время активно исследуется устойчивость к ионизирующим видам излучения традиционного объемного [10] и планарного диода Ганна [11], а также диодов на основе GaAs/AlAs-сверхрешеток [12]. В данной статье рассматривается радиационная стойкость источника субтерагерцового диапазона на основе ДГ и ППСР.

## 2. Экспериментальная часть

В генераторе на диоде Ганна (ГДГ) был применен ганновский диод на арсениде галлия разработки АО „НПП“ „Салют“, г. Нижний Новгород. Диаметр GaAs составлял  $\sim 0.1$  мм, а толщина 10–20 мкм. Кристалл смонтирован на теплоотводящем кристаллодержателе в виде медного стержня диаметром 1.2 мм и высотой 2 мм. Концентрация носителей в GaAs составляет  $n_0 = 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , размер активной области — 3 мкм. Основная частота генерации подобных диодов лежит в 8-мм диапазоне. Все три рассмотренных в статье ДГ (№ 1, 2, 3) облада-

ют сходными параметрами в пределах технологических погрешностей.

Для получения зависимостей мощности от частоты генерации ДГ специально спроектирована измерительная камера [13].

Измерение характеристик частоты генерации и мощности ДГ производились по схеме, подробно описанной в работе [13]. При подаче напряжения смещения на диод в камере возбуждались электромагнитные колебания частотой  $\sim 30$  ГГц. СВЧ мощность с выхода камеры поступает по волноводу сечением  $3.6 \times 1.8$  мм на первичный преобразователь М5-50, преобразуется, и значение уровня выходной мощности отображается на индикаторе измерителя мощности М3-22. Измерение частоты генерации производится с помощью частотомера резонансного Ч2-26.

После получения зависимостей выходной мощности сигнала от частоты ДГ были подвергнуты облучению флюенсами нейтронов: ДГ № 1 —  $3.5 \cdot 10^{12}$ , ДГ № 2 —  $2.85 \cdot 10^{13}$ , ДГ № 3 —  $10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Спустя 6 месяцев серия измерений проведена для всех изучаемых ДГ.

## 3. Результаты и обсуждение

В результате облучения полупроводникового диода образуются дефекты, уменьшаются подвижность носителей заряда и отношение тока в максимуме вольт-амперной характеристики к току в минимуме, поэтому падает уровень выходной мощности и КПД диодов. Одновременно сопутствующее  $\gamma$ -облучение снимает механические напряжения на границе металл–полупроводник и снижает контактное сопротивление [14].

По результатам измерений рабочих параметров ДГ до и после облучения нейтронами отмечено: для ДГ № 1

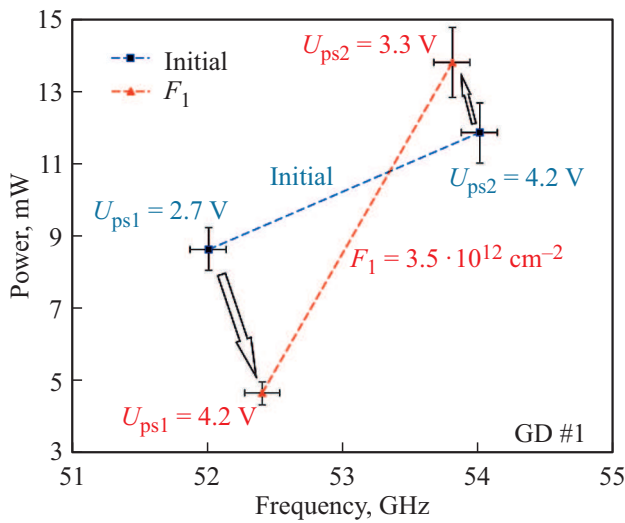


Рис. 1. Зависимости выходной мощности от частоты генерации для ДГ № 1.

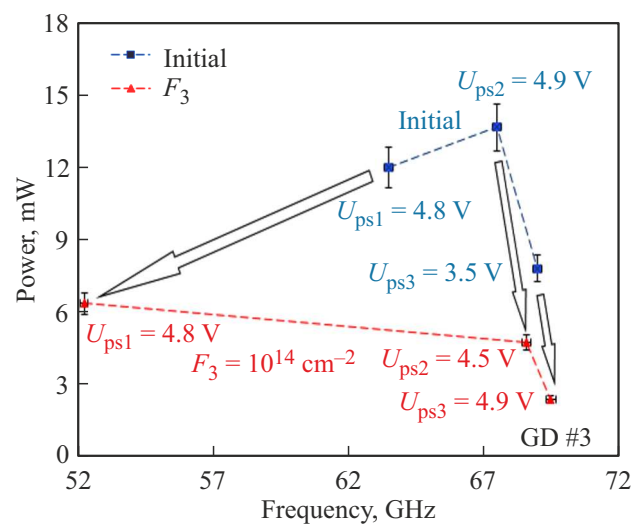


Рис. 3. Зависимости выходной мощности от частоты генерации для ДГ № 3.

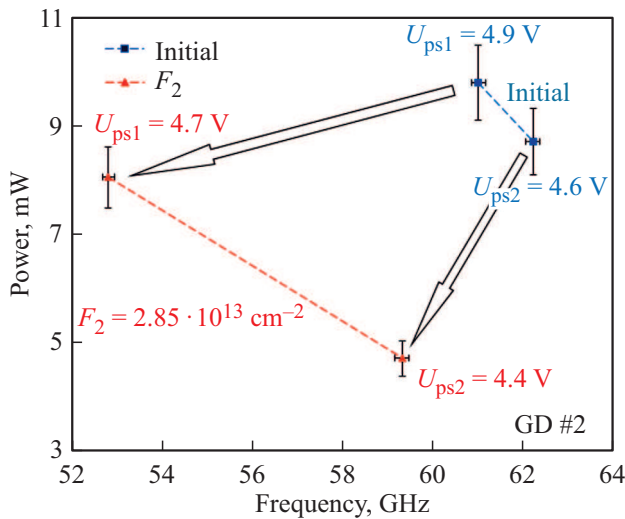


Рис. 2. Зависимости выходной мощности от частоты генерации для ДГ № 2.

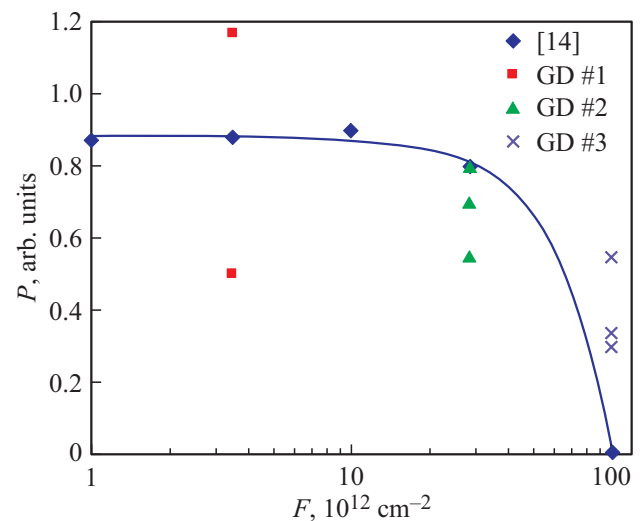


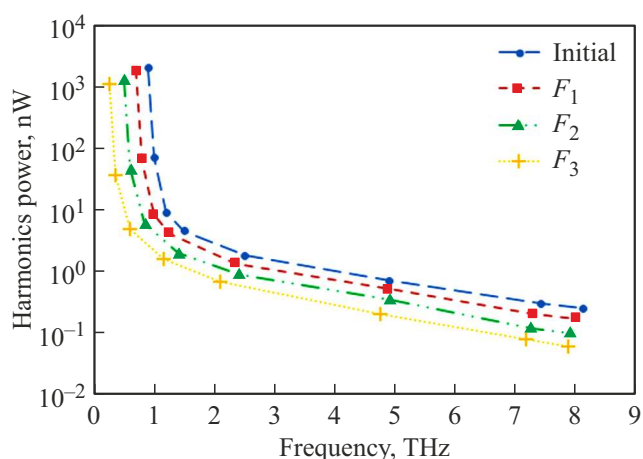
Рис. 4. Зависимость отношения выходной мощности ДГ от флюенса нейтронов.

(рис. 1) — сужение рабочей полосы частот на 30% в сравнении с параметрами до облучения, для ДГ № 2 (рис. 2) — расширение полосы частот на 440%, для ДГ № 3 (рис. 3) — расширение на 220%. После облучения нейтронами наблюдается уменьшение выходной мощности ДГ практически для всех образцов.

При сравнении результатов до облучения и при флюенсе  $3.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  для ДГ № 1 наблюдается сужение рабочей полосы частот на 30%, уменьшение мощности на 46% для рабочих точек с напряжением 2.7 В (до облучения) и 4.2 В (после облучения) неизменность параметров для рабочих точек с напряжением 4.2 и 3.3 В (с учетом погрешностей измерения). При флюенсе  $2.85 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  для ДГ № 2 — расширение полосы частот на 440%, уменьшение мощности на 11% для ра-

бочих точек 4.9 и 4.7 В и уменьшение мощности на 46% (рабочие точки 4.6 и 4.4 В). При флюенсе  $10^{14} \text{ см}^{-2}$  для ДГ № 3 происходит расширение полосы рабочих частот на 318% и уменьшение мощности: на 47% для рабочих точек до и после облучения по 4.8 В, 65% — 4.9 и 4.5 В, 70% — 3.5 и 4.9 В.

Как и в работе [14], отношение мощности до и после облучения уменьшается в зависимости от величины флюенса нейтронов, за исключением рабочей точки 4.2 В. Для данной точки нижний предел погрешности измерения после облучения на несколько процентов превосходит верхний предел погрешности измерения до облучения (рис. 4). Таким образом, уровень мощности практически не изменяется. Однако для рабочих точек 2.7 В (до облучения) и 4.2 В (после облучения)



**Рис. 5.** Зависимость мощности гармоник от частоты генерации источника субтерагерцового излучения до облучения и при различных флюенсах нейтронов:  $F_1 = 3.5 \cdot 10^{12}$ ,  $F_2 = 2.85 \cdot 10^{13}$ ,  $F_3 = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ .

падение мощности достигает 50%, что, скорее всего, объясняется экспериментально наблюдаемой оптимизацией конструкции диода к волноводной камере по мере снижения концентрации электронов до оптимального уровня и типа согласования. Таким образом, паразитные изменения параметров диодов компенсируются. Уменьшение выходной мощности для ДГ № 3 после облучения в разы, а не на порядки объясняется частичным восстановлением дефектов после отжига структуры.

За счет более высокой концентрации примеси и меньшего образования радиационных дефектов при одинаковом флюенсе нейтронов выходная мощность планарного диода Ганна изменяется меньше, чем для объемного диода [15].

В работе [16] получены значения интенсивности гармоник умножителя частоты на ППСР в полосе частот 0.4–6.5 ТГц, в [11] приводится исследование радиационной стойкости диодов на ППСР GaAs/AlAs. На основе мощностей гармоник умножителя частоты на ППСР в работе [16], полученных зависимостей мощности от частоты для ДГ возможно оценить зависимость мощности гармоник от частоты источника субтерагерцового излучения (рис. 5). В качестве опорной частоты гетеродина была выбрана третья гармоника генератора ( $3 \cdot 53.3 \text{ ТГц}$ ) на ДГ в 160 ТГц. Для флюенса в  $3.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  в качестве гетеродина был выбран генератор на ДГ № 1,  $2.85 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  — ДГ № 2,  $10^{14} \text{ см}^{-2}$  — ДГ № 3. При облучении гетеродина нейтронами с увеличением флюенса уровень мощности гармоник источника ТГц излучения уменьшается.

#### 4. Заключение

Сопоставление измеренных зависимостей параметров ДГ с данными в других работах позволяет говорить

о схожем характере поведения отношения выходной мощности до и после облучения диода от флюенса нейтронов.

На основе измерений рабочих характеристик гетеродина на ДГ и теоретических результатов радиационной стойкости ППСР сделаны выводы о радиационной стойкости к нейтронному облучению источника субтерагерцового излучения в целом.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] А.С. Иванов, Д.Г. Павельев, С.В. Оболенский, Е.С. Оболенская. *ЖТФ*, **91** (10), 1501 (2021).
- [2] C. Risacher, V. Vassilev, R.R. Monje, I. Lapkin, V. Belitsky, A.B. Pavolotsky, M. Pantaleev, P. Bergman, S.-E. Ferm, E. Sundin, M. Svensson, M. Fredrixon, D. Meledin, L.-G. Gunnarsson, M. Hagstrom, L.-A. Johansson, M. Olberg, R.S. Booth, H. Olofsson, L.-A. Nyman. *Astronomy & Astrophysics*, **454**, 17 (2016). DOI: 10.1051/0004-6361/20065373
- [3] В.Л. Вакс, Е.Г. Домрачева, Е.А. Собакинская, М.Б. Черняева. *УФН*, **184** (7), 139 (2014). DOI: 10.3367/UFNr.0184.201407d.0739
- [4] T. Kürner, S. Priebe. *J Infrared Milli Terahz Waves*, **35**, 53 (2014). DOI: 10.1007/s10762-013-0014-3
- [5] C. Jastrow, K. Munter, R. Piesiewicz, T. Kürner, M. Koch, T. Kleine-Ostmann. *Electron. Lett.*, **44**, 3 (2008). DOI: 10.1049/el:20083359
- [6] Ho-Jin Song, K. Ajito, A. Wakatsuki, Y. Muramoto, N. Kukutsu, Y. Kado, T. Nagatsuma. 2010 IEEE Int. Topical Meeting on Microwave Photonics (Montreal, QC, Canada, October 2010). DOI: 10.1109/MWP.2010.5664230
- [7] J.F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira, D. Zimdars. *Semicond. Sci. Technol.*, **20**, 266 (2005). DOI: 10.1088/0268-1242/20/7/018
- [8] R.J. Fitch, R. Osiander. *John Hopkins APL Techn. Digest*, **25**, 348 (2004) [https://www.researchgate.net/publication/228861430\\_Terahertz\\_waves\\_for\\_communications\\_and\\_sensing/link/56c4becb08ae7fd4625a4507/download](https://www.researchgate.net/publication/228861430_Terahertz_waves_for_communications_and_sensing/link/56c4becb08ae7fd4625a4507/download);
- [9] V. Vaks, A. Illiyk, A. Panin, S. Pripolsin, S. Basov, D. Pavelyev. Proc. 37th Eur. Microwave Conf. (Munich, Germany, October 2007). DOI: 10.1109/EUMC.2007.4405319
- [10] W. Abd El-Basit, S. Mohamed El-Ghanam, A. Mosleh Abdel-Maksood, S. Abd El-Tawab Kamh, F. Abd El-Moniem S. Soliman. *Nuclear Eng. and Technol.*, **48**, 1219 (2016). DOI: 10.1016/j.net.2016.04.009
- [11] Е.С. Оболенская, Е.А. Тарасова, А.Ю. Чуринов, С.В. Оболенский, В.А. Козлов. *ФТП*, **50** (12), 1605 (2016). DOI: 10.21883/ftp.2016.12.43884.30
- [12] Д.Г. Павельев, А.П. Васильев, В.А. Козлов, Е.С. Оболенская. *ФТП*, **52** (11), 1337 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.11.46595.17
- [13] А.С. Иванов, С.В. Оболенский. Тез. докл. 3-й Росс.-Бел. конф. „Современная элементная база радиоэлектроники и ее применение“ им. О.В. Лосева (Нижний Новгород, Россия, 2017) с. 20.

- [14] Ф.П. Коршунов, Г.В. Гатальский, Г.М. Иванов. *Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах* (Минск, Наука и техника, 1978).
- [15] Е.С. Оболенская, А.Ю. Чурин, С.В. Оболенский, А.В. Мурель, В. И. Шашкин. *ФТП*, **49** (11), 1507 (2015).
- [16] А.С. Иванов, Д.Г. Павельев, Ю.И. Кошуринов, А.Н. Панин, В.Л. Вакс, В.И. Гавриленко, А.В. Антонов, В.М. Устинов, А.Е. Жуков. *ФТП*, **46** (1), 125 (2012).

Редактор Г.А. Оганесян

## Radiation hardness of subterahertz radiation source after neutron exposure

A.S. Ivanov<sup>1</sup>, D.G. Pavelyev<sup>2</sup>, S.V. Obolensky<sup>1,2</sup>,  
E.S. Obolenskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC NPP „Salut“,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> Lobachevsky Nizhny Novgorod State University,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The study of the radiation hardness of subterahertz radiation source from a Gunn diode oscillator and a multiplier, based on a semiconductor superlattice GaAs/AlAs was continued. The dependences of the output power on the frequency of a Gunn diode oscillator before and after neutron irradiation are experimentally measured. The dependence of the output power on the frequency of the source of subterahertz radiation to neutron radiation with fluences of  $3.5 \cdot 10^{12}$ ,  $2.85 \cdot 10^{13}$ ,  $10^{14} \text{ cm}^{-2}$  has been analytically estimated.