

08

## Исследование влияния облучения потоком электронов на фотоэлектрические и электрофизические свойства кремниевых гетероструктурных солнечных элементов

© О.П. Михайлов<sup>1,2</sup>, А.И. Баранов<sup>1</sup>, А.С. Гудовских<sup>1,2</sup>, Е.И. Теруков<sup>2-4</sup>, А.В. Кочергин<sup>2,4</sup>,  
Н.Р. Костик<sup>2</sup>, О.К. Атабоев<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники, Ташкент, Узбекистан

E-mail: baranov\_art@spbau.ru

Поступило в Редакцию 11 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 26 октября 2023 г.

Принято к публикации 26 октября 2023 г.

Изготовлены и изучены гетероструктурные солнечные элементы НТ на кремниевой подложке *n*-типа, а также исследовано влияние облучения электронами на их фотоэлектрические свойства. Показано, что при облучении электронами с флюенсом  $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  происходит катастрофическое падение величины квантовой эффективности при длинах волн более 600 nm, приводящее к уменьшению тока короткого замыкания с 33 до 22 mA/cm<sup>2</sup> и напряжения холостого хода с 0.7 до 0.52 V, а при флюенсе  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  — до 18 mA/cm<sup>2</sup> и 0.50 V соответственно. С помощью метода спектроскопии полной проводимости обнаружен дефект с энергией активации 0.18 eV в облученных структурах, который, вероятно, может быть ответственным за такое поведение характеристик, его концентрация увеличивается при увеличении флюенса.

**Ключевые слова:** солнечный элемент, спектроскопия полной проводимости, радиационная стойкость.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.02.56979.19726

Технология кремниевых солнечных элементов (СЭ) с гетеропереходом, также известных как солнечные элементы НТ (heterojunction technology — технология гетероперехода), сочетает в себе преимущества кристаллического и аморфного кремния и демонстрирует возможность достижения высокой эффективности преобразования солнечной энергии при использовании меньшего количества кремния и более низких температур изготовления, не превышающих 200–250°C, по сравнению с традиционными диффузионными технологиями [1]. Первые солнечные элементы НТ с КПД 12% были разработаны в 1990-х годах компанией Sanyo [2]. После многих лет исследований данная технология позволила достичь КПД более 26%, что является рекордным показателем для однопереходных кремниевых солнечных элементов [3].

Высокоэффективные СЭ на основе технологии НТ, активно используемые на Земле, вызывают интерес с точки зрения применения в космосе, в частности на низких околоземных орбитах (500–2000 km). Однако деградация кремниевых СЭ из-за наличия радиации в космическом пространстве, которая может негативно влиять на фотоэлектрические характеристики СЭ, является главным ограничивающим фактором использования их в космосе. В настоящее время наиболее распространенными и используемыми для кос-

моса являются многопереходные (три и более суб-элементов) СЭ на основе  $A_3B_5$  материалов, главным образом на основе GaAs и сходных с ним по значению постоянной кристаллической решетки полупроводников, но стоимость их создания в разы выше, чем для кремниевых СЭ. Кремниевые СЭ НТ могут быть использованы для космических миссий, в которых не нужен большой расход энергии, а простота промышленного создания и стоимость СЭ являются более важными факторами, чем КПД [4]. Кроме того, для их производства не требуется редких элементов, как в тонкопленочных СЭ на основе CIGS [5].

К настоящему времени существует очень мало исследований влияния космической радиации на кремниевые СЭ НТ и механизмы дефектообразования в них. Тем не менее есть работы, где изучается влияние потока электронов на структуру НТ. Например, по результатам [6] было выявлено, что при облучении гетероструктурного СЭ на кремниевой подложке *n*-типа пиковая квантовая эффективность снижается на 60%, а ток короткого замыкания и фактор заполнения уменьшаются примерно в 2 раза. Предположительно это связано с увеличением энергии активации легированных слоев аморфного гидрогенизированного кремния. Кроме того, в тонкопленочных солнечных элементах на ос-

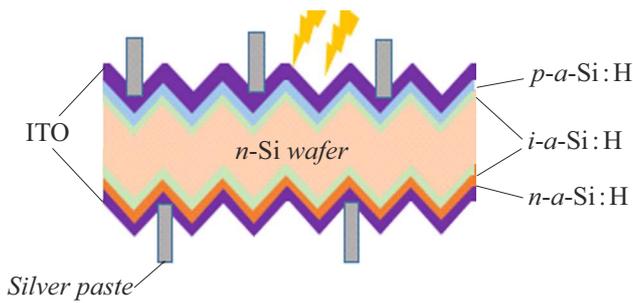


Рис. 1. Исследуемые структуры СЭ на подложках  $n$ -Si.

нове гидрогенизированного нанокристаллического кремния показано ухудшение поглощения после облучения протонами [7].

В настоящей работе для изучения влияния облучения электронами на свойства структуры НЭТ были проведены исследования фотоэлектрических свойств и дефектообразования в ней.

В работе рассмотрены СЭ, выращенные на подложках  $n$ -Si ( $n = 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) методом плазмохимического осаждения. Более подробную информацию о технологии роста можно найти в [8]. На рис. 1 показана схематическая структура солнечного элемента. Для пассивации дефектов поверхности с лицевой и тыльной сторон подложки наносится собственный аморфный гидрогенизированный кремний ( $i$ -a-Si:H). Для создания омического контакта с тыльной стороны и потенциального барьера с лицевой поверх  $i$ -a-Si нанесены слои легированного  $n$ -a-Si:H и  $p$ -a-Si:H соответственно. На легированные слои аморфного кремния с тыльной и лицевой сторон нанесены слои проводящего прозрачного

материала ITO (indium tin oxide — оксид индия-олова), который также играет роль антиотражающего покрытия. Металлические контакты формировались методом трафаретной печати из серебряной пасты.

Далее структуры были подвергнуты облучению электронами с энергией 1 MeV с потоками  $5 \cdot 10^{14}$  и  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . Используемые параметры облучения были выбраны в связи с тем, что эквивалентный флюенс ( $1 \cdot 10^{13} - 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) соответствует пребыванию исследуемых кремниевых фотоэлектрических преобразователей на низких околоземных орбитах, что существенно ниже соответствующего значения на радиационно опасных орбитах ( $> 2000 \text{ km}$ ).

На рис. 2 для трех исследованных солнечных элементов представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ), измеренные в стандартных условиях при спектре облучения AM1.5G и температуре  $25^\circ\text{C}$ , и спектры квантовой эффективности, измеренные при комнатной температуре. ВАХ изготовленных СЭ измерялись на имитаторе солнечного излучения Abet Technologies Model 11002 SunLite с использованием источника-измерителя Keithley 2400. Результаты измерений показывают, что ВАХ значительно зависит от дозы облучения и фотоэлектрические свойства резко ухудшаются после облучения исходного образца. При флюенсе облучения  $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  напряжение холостого хода и ток короткого замыкания снизились примерно на 30%: с 0.7 до 0.52 V и с 33 до 22 mA/cm<sup>2</sup> соответственно. Дальнейшее увеличение флюенса до  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  приводит к еще большему ухудшению фотоэлектрических свойств, но не такому значительному. Падение тока короткого замыкания также подтверждается спектрами внешней квантовой эффективности, измеренными в диапазоне 300–1200 nm на установке собственного производства на основе монохроматора M266-IV. Из графиков следует,

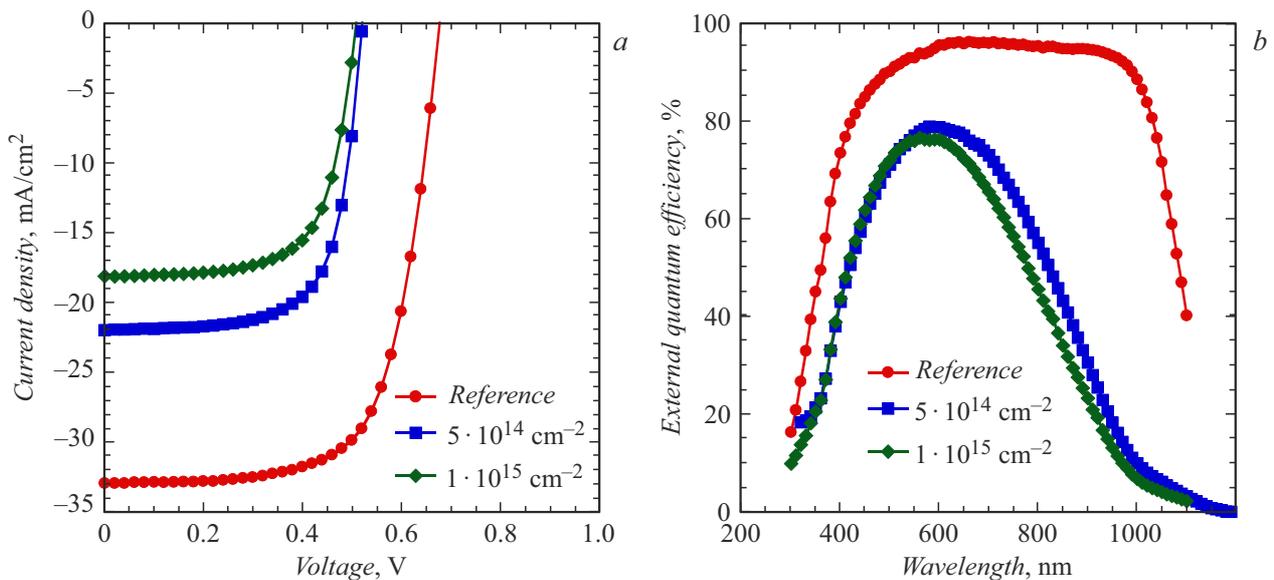
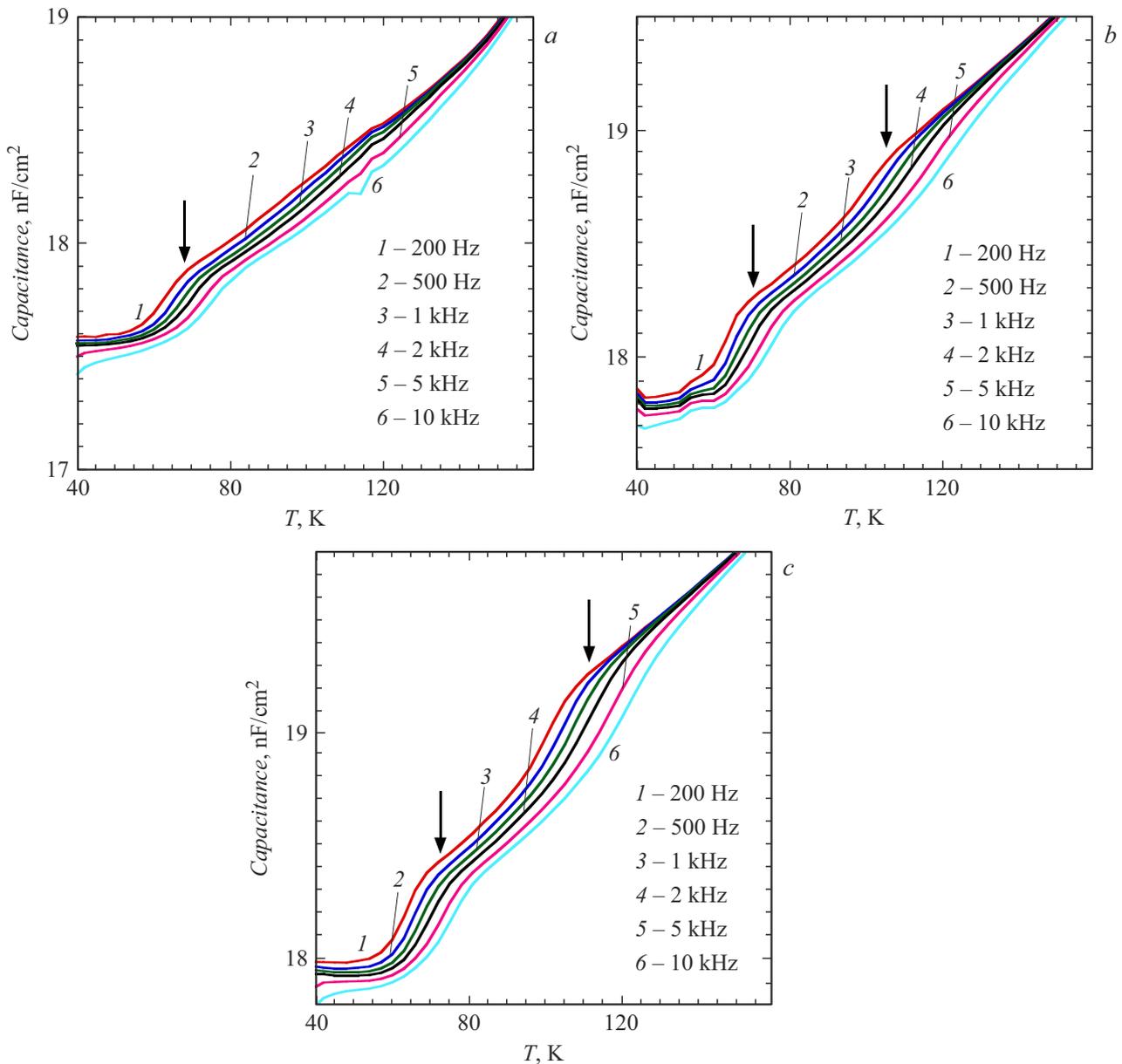


Рис. 2. ВАХ (a) и квантовая эффективность (b) образцов с подложкой из  $n$ -Si ( $n = 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ): исходного и после облучения дозами  $5 \cdot 10^{14}$  и  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ .



**Рис. 3.** Зависимости  $C-T$  для исследуемых образцов с подложкой из  $n$ -Si: исходного (a) и после облучения дозами  $5 \cdot 10^{14}$  (b) и  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  (c).

что в облученных образцах происходит значительное падение квантовой эффективности при длинах волн 600 nm и более. Такое поведение может свидетельствовать об ухудшении времени жизни неосновных носителей заряда в объеме подложки кремния из-за влияния радиационных дефектов.

Возможная разница в фотоэлектрических свойствах объясняется формированием дефектов ввиду облучения электронами, поэтому на следующем этапе работы структуры были изучены методом спектроскопии полной проводимости. Измерения были выполнены при помощи прецизионного LCR-метра Agilent Keysight E4980-001 (бывший HP) в диапазоне частот от 20 Hz

до 2 MHz с тестовым сигналом 50 mV при различных напряжениях постоянного смещения в гелиевом криостате JANIS CCS-400H/204 и температурах от 30 до 300 K. Метод спектроскопии полной проводимости заключается в осуществлении измерений зависимостей емкости и проводимости от температуры и частоты. Спектроскопия полной проводимости широко используется для определения электронных свойств структур с гетеропереходами на основе кристаллического и аморфного гидрогенизированного кремния [9,10].

В структурах на основе барьера Шоттки или  $p-n$ -перехода при приложении переменного сигнала происходит осцилляция положения уровня Ферми в

области пространственного заряда с частотой, равной переменному сигналу. Таким образом обеспечивается модуляция концентрации свободных носителей заряда в обедненной области, что в свою очередь приводит к вариации заселенности состояний в запрещенной зоне. Вариация заселенности обуславливает процессы захвата и эмиссии носителей заряда на состояниях, если постоянная времени этих процессов меньше, чем период переменного сигнала. Изменение заряда, связанное с эмиссией и захватом на состояниях в полупроводнике, при приложении внешнего напряжения приводит к увеличению емкости структуры.

На рис. 3 представлены зависимости  $C-T$  для трех образцов (исходного, после облучения дозой  $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  и после облучения дозой  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) при постоянном напряжении смещения  $0 \text{ V}$ . На рис. 3, *a* для исходного образца наблюдается серия ступеней емкости в диапазоне  $50-70 \text{ K}$ , положение которых смещается в сторону больших температур при увеличении частоты. Положение ступеней емкости для одинаковой частоты не зависит от приложенного постоянного напряжения смещения. Подобное поведение емкости при низких температурах наблюдалось ранее для  $a\text{-Si:H}/c\text{-Si}$ -гетеропереходов в [9] и было обусловлено активацией проводимости слоя  $a\text{-Si:H}$ . Амплитуда ступеней емкости соответствует ожидаемой толщине обедненного слоя  $a\text{-Si:H}$  ( $5-7 \text{ nm}$ ). Кроме того, для облученных образцов наблюдаются схожие серии пиков с идентичными амплитудами и такими же положениями ступеней для одинаковых частот. Таким образом, наблюдаемый отклик отвечает термической активации проводимости аморфного  $p\text{-Si}$  [10] с энергией активации, равной  $0.13 \text{ eV}$ . Для исходного образца при повышении температуры других особенностей на кривых не обнаружено. Однако на рис. 3, *b* и *c* появляется вторая серия ступеней емкости в диапазоне температур  $100-120 \text{ K}$ , которая связана с образованием радиационных дефектов под влиянием потока электронов на солнечный элемент НТТ. Энергия активации данного дефекта равна  $E_a = 0.18 \text{ eV}$ , причем для образца с большей дозой облучения амплитуда отклика от этого дефектного уровня заметно выше. Возрастание амплитуды свидетельствует о более высокой концентрации дефектов. При дальнейшем повышении температуры во всех образцах кривые емкости для разных частот практически совпадают и особенностей на кривых  $C-T$  не наблюдается. Обнаруженный дефект, вероятно, является А-центром ( $V-O$ , вакансия-кислород) [11], который возникает в результате активации атомов кислорода после облучения электронами [12]. Регистрация отклика на спектрах полной проводимости для облученных образцов свидетельствует о наличии дефектного уровня в пределах области пространственного заряда, т.е. в пределах менее  $1 \mu\text{m}$  от верхней границы раздела. Следовательно, формирование дефектных уровней под воздействием потока электронов происходит во всем объеме Si-подложки  $n$ -типа проводимости. Однако для оценки равномерности распределения по толщине Si

необходимо провести измерения с помощью метода нестационарной спектроскопии глубоких уровней на глубине подложки, что будет выполнено в следующих экспериментах. Тем не менее именно детектированное формирование А-центров после облучения приводит к падению значения квантовой эффективности и ухудшению фотоэлектрических свойств. Для определения путей повышения радиационной стойкости солнечных элементов НТТ в первую очередь необходимо рассмотреть структуры, сформированные на подложках  $p\text{-Si}$ .

Таким образом, в рамках настоящей работы были изготовлены и изучены солнечные элементы НТТ на кремниевой подложке  $n$ -типа, а также исследовано влияние облучения электронами на их фотоэлектрические свойства. Показано, что при облучении электронами с флюенсом  $5 \cdot 10^{14}$  и  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  происходит уменьшение тока короткого замыкания и напряжения холостого хода. С помощью метода спектроскопии полной проводимости в облученных структурах был обнаружен дефект с энергией активации  $0.18 \text{ eV}$ , который, вероятно, может быть ответственным за такое поведение характеристик.

#### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0791-2023-0007).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] M.A. Green, E.D. Dunlop, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, G. Siefert, X. Hao, Prog. Photovolt.: Res. Appl., **31** (7), 651 (2023). DOI: 10.1002/pip.3726
- [2] M. Tanaka, M. Taguchi, T. Matsuyama, T. Sawada, S. Tsuda, S. Nakano, H. Hanafusa, Y. Kuwano, Jpn. J. Appl. Phys., **31** (11), 3518 (1992). DOI: 10.1143/JJAP.31.3518
- [3] K. Yoshikawa, W. Yoshida, T. Irie, H. Kawasaki, K. Konishi, H. Ishibashi, T. Asatani, D. Adachi, M. Kanematsu, H. Uzu, K. Yamamoto, Solar Energy Mater. Solar Cells, **173**, 37 (2017). DOI: 10.1016/j.solmat.2017.06.024
- [4] A. ur Rehman, S.H. Lee, S.H. Lee, J. Korean Phys. Soc., **68** (4), 593 (2016). DOI: 10.3938/jkps.68.593
- [5] C.R. Brown, V.R. Whiteside, D. Poplavskyy, K. Hossain, M.S. Dhoubhadel, I.R. Sellers, IEEE J. Photovolt., **9** (2), 552 (2019). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2018.2889179
- [6] R.A.C.M.M. van Swaaij, A. Klaver, J. Non. Cryst. Solids, **354** (19-25), 2464 (2008). DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2007.09.025
- [7] A.D. Verkerk, J.K. Rath, R.E.I. Schropp, Energy Procedia, **2** (1), 221 (2010). DOI: 10.1016/j.egypro.2010.07.032
- [8] Е.И. Теруков, А.С. Абрамов, Д.А. Андроников, К.В. Емцев, И.Е. Панайотти, А.С. Титов, Г.Г. Шелопин, ФТП, **52** (7), 792 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.07.46054.8781 [E.I. Terukov, A.S. Abramov, D.A. Andronikov, K.V. Emtsev, I.E. Panaiotti, A.S. Titov, G.G. Shelopin, Semiconductors, **52** (7), 931 (2018). DOI: 10.1134/S1063782618070230].

- [9] A.S. Gudovskikh, J.-P. Kleider, E.I. Terukov, *Semiconductors*, **39** (8), 904 (2005). DOI: 10.1134/1.2010683
- [10] С.П. Вихров, Н.В. Вишняков, В.В. Гудзев, А.В. Ермачихин, Д.В. Жилина, В.Г. Литвинов, А.Д. Маслов, В.Г. Мишустин, Е.И. Теруков, А.С. Титов, *ФТП*, **52** (7), 787 (2018). DOI: 10.21883/FTP.2018.07.46053.8666 [S.P. Vikhrov, N.V. Vishnyakov, V.V. Gudzev, A.V. Ermachikhin, D.V. Shilina, V.G. Litvinov, A.D. Maslov, V.G. Mishustin, E.I. Terukov, A.S. Titov, *Semiconductors*, **52** (7), 926 (2018). DOI: 10.1134/S1063782618070254].
- [11] Z. Li, H.W. Kraner, E. Verbitskaya, V. Eremin, A. Ivanov, M. Rattaggi, P.G. Rancoita, F.A. Rubinelli, S.J. Fonash, C. Dale, P. Marshall, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **39** (6), 1730 (1992). DOI: 10.1109/23.211360
- [12] A. Ögmundsson, E.V. Monakhov, T.E. Hansen, J.K. Grepstad, B.G. Svensson, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **552** (1-2), 61 (2005). DOI: 10.1016/j.nima.2005.06.007