

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ КСЕНОНА СТРУКТУРАХ Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si

Н.И. Горбачук<sup>1)</sup>, Н.А. Поклонский<sup>1)</sup>, С.В. Шпаковский<sup>2)</sup>, А. Wieck<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь

<sup>2)</sup> ОАО «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца 121А, 220108 Минск, Республика Беларусь

<sup>3)</sup> Ruhr-Universitaet Bochum, Universitaetsstrasse 150, D-44780 Bochum, Germany  
gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, shpaks@tut.by, andreas.wieck@ruhr-uni-bochum.de

Исследовался импеданс МДП-структур Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si, имплантированных ионами ксенона с энергией 166 МэВ. Флюенс ионов варьировался от 10<sup>8</sup> до 10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>. Измерения тангенса угла электрических потерь выполнялись в диапазоне частот от 20 до 3·10<sup>7</sup> Гц. Установлено, что при флюенсах имплантации (облучения) ≥10<sup>9</sup> см<sup>-2</sup> радиационные дефекты вносят в интервале частот 2·10<sup>3</sup> – 10<sup>5</sup> Гц определяющий вклад в электрические потери МДП-структур, находящихся в режиме инверсии типа электрической проводимости в пограничном слое n-Si. Показано, что потери обусловлены перезарядкой введенных имплантацией дефектов.

**Ключевые слова:** ионная имплантация; радиационные дефекты; импедансная спектроскопия; МДП-структуры; электрические потери.

## ELECTRICAL LOSSES OF Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si STRUCTURES IMPLANTED WITH XENON IONS

N.I. Gorbachuk<sup>1)</sup>, N.A. Poklonski<sup>1)</sup>, S.V. Shpakovski<sup>2)</sup>, A. Wieck<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus

<sup>2)</sup> JSC "INTEGRAL", ul. Kazintsa 121A, Minsk, BY-220108 Belarus

<sup>3)</sup> Ruhr-Universitaet Bochum, Universitaetsstrasse 150, D-44780 Bochum, Germany  
gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, shpakovski@tut.by, andreas.wieck@ruhr-uni-bochum.de

Impedance of MIS structures Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si implanted with xenon ions with energy of 166 MeV was studied. The ion fluence was ranged from 10<sup>8</sup> to 10<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup>. Measurements of electric loss tangent were performed in the frequency range from 20 to 3·10<sup>7</sup> Hz. It has been established that at implantation (irradiation) fluences ≥10<sup>9</sup> cm<sup>-2</sup> the irradiation-induced defects in the frequency range 2·10<sup>3</sup> – 10<sup>5</sup> Hz make a primary contribution to the electric losses of the MIS structures in the mode of electrical conductivity type inversion in the n-Si boundary layer. It is shown that the losses are caused by the recharging of defects introduced by implantation.

**Keywords:** ion implantation; irradiation-induced defects; impedance spectroscopy; MIS structures; electrical losses.

### Введение

Структуры металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) являются базовыми элементами современных интегральных микросхем на кремнии [1]. При воздействии высокоэнергетического излучения они могут существенно изменять свои эксплуатационные характеристики [2, 3]. Основными причинами изменения электрических параметров МДП-структур при воздействии ионизирующего излучения считаются накопление заряда в диэлектрике и увеличение плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик/полупроводник [1, 4]. Накоплению радиационных дефектов в кремнии уделяется меньше внимания. Традиционным методом исследования МДП-структур является регистрация вольт-фарадных характеристик [1]. Однако вызванная дефектами в кремнии [5-7] зависимость электрической емкости  $C$  облученных высокоэнергетическими ионами (кинетическая энергия иона >1 МэВ/нуклон) МДП-структур от частоты переменного тока  $f$  может осложнять анализ результатов эксперимента. Поэтому для развития методик диагностики радиационных повреждений, вызванных имплантацией (облучением) ионами, является важным установление механизмов, определяющих изменение не только емкости МДП-структур, но и

других иммитансных параметров. Например, комплексного электрического модуля, тангенса угла электрических потерь [8–10] и т.д. Принципиальным является также определение влияния на результаты измерений как дефектов и заряда в диэлектрике, так и дефектов кристаллической структуры в кремнии [11, 12]. С одной стороны, измерения импеданса в широком интервале частот дополняют информацию, полученную из анализа вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик [7, 13]. С другой стороны, они определяют потенциальную перспективность использования методов импедансной спектроскопии для МДП-структур [8, 9].

Цель работы — исследовать влияние дефектов, вводимых имплантацией ионов ксенона с энергией 166 МэВ, на зависимость тангенса угла электрических потерь  $\text{tg} \delta$  в МДП-структурах Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si от частоты  $f$  переменного тока.

### Методика эксперимента

МДП-структуры Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si изготавливались на пластинах (100) монокристаллического кремния  $n$ -типа электропроводности, выращенного методом Чохральского. Удельное электрическое сопротивление кремния — 4.5 Ом·см (КЭФ-4.5). Толщина пластин —  $d = 380$  мкм. Слой диоксида кремния

(SiO<sub>2</sub>) толщиной 420 нм формировался термическим окислением Si при температуре 950 °С в течение 225 мин. На планарной стороне пластины поверх слоя диоксида кремния термическим напылением наносился слой алюминия толщиной  $d = 0.7$  мкм. Площадь алюминиевой металлизации на диоксиде кремния составляла  $1.85 \times 1.85$  мм<sup>2</sup>. Для создания омического контакта к непланарной стороне кремниевой пластины при температуре 1000 °С проводилась диффузия фосфора из газовой фазы PCl<sub>3</sub> в течение 6 мин. Удельное поверхностное сопротивление после диффузии фосфора составляло 4.55 Ом/□. Контакты к непланарной стороне формировались напылением Al с последующим вжиганием при температуре 400 °С в атмосфере азота. Толщина слоя алюминия на омическом контакте к непланарной стороне —  $d = 0.7$  мкм. Пластины кремния механическим скрайбированием разделялись на чипы площадью  $2.5 \times 2.5$  мм<sup>2</sup>.

Со стороны Al/SiO<sub>2</sub> структуры имплантировались ионами ксенона с энергией 166 МэВ. Имплантация проводилась при комнатной температуре на ускорителе ОИЯИ (г. Дубна). Флюенс ионов  $\Phi$  варьировался от  $5 \cdot 10^7$  до  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Согласно расчетам, величина среднего проективного пробега ионов в исследуемых МДП-структурах достаточна для формирования радиационно-нарушенного слоя в глубине *n*-Si. Рассчитанный профиль распределения по глубине  $x$  концентрации  $N_V$  первичных вакансий, образованных при имплантации МДП-структур ионами ксенона с энергией 166 МэВ, представлен на рис. 1. Расчеты выполнялись в программе SRIM [14].

Измерения действительной и мнимой части импеданса  $Z = Z' + iZ''$  выполнялись в диапазоне частот от 20 Гц до 30 МГц на измерителях LCR E4980A и Agilent 4285A. Амплитуда синусоидального измерительного сигнала составляла 40 мВ. Значения тангенса угла электрических потерь  $\text{tg} \delta$  рассчитывались по стандартной методике [9, 10]. Напряжение постоянного электрического смещения  $U$ , подаваемое одновременно с синусоидальным измерительным сигналом, варьировалось в интервале от  $-40$  до  $+40$  В. Знак напряжения  $U$  здесь и далее указывается относительно *n*-Si. Все измерения выполнялись при комнатной температуре, в темноте.

## Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены зависимости тангенса угла электрических потерь  $\text{tg} \delta$  от частоты  $f$  для МДП-структуры Al/SiO<sub>2</sub>/*n*-Si, имплантированной высокоэнергетическими ионами ксенона флюенсом  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Видно, что электрические потери существенно зависят не только от частоты переменного тока, но и от напряжения смещения на Al относительно *n*-Si. Качественные изменения зависимостей  $\text{tg} \delta(f)$  наблюдаются в случае перехода МДП-структуры из режима обогащения (напряжение смещения  $U = 30$  В) в режим обеднения ( $U = -9$  В) или инверсии ( $U = -30$  В). В частности, существенно возрастают потери в области низких ( $f < 10^5$  Гц) частот. Кроме этого, для МДП-структур, находя-

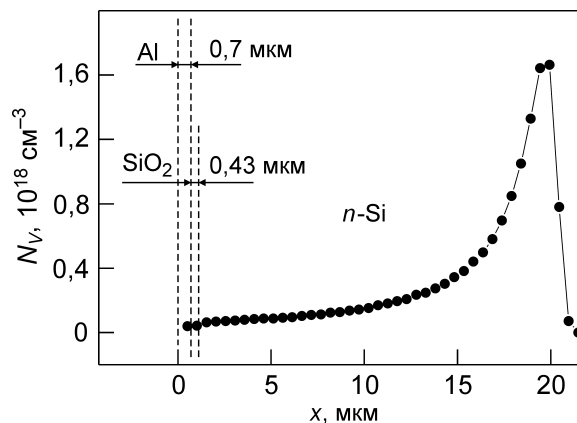


Рис. 1. Рассчитанный по [14] профиль распределения первичных вакансий, образованных при имплантации МДП-структур Al/SiO<sub>2</sub>/*n*-Si ионами ксенона с энергией 166 МэВ флюенсом  $\Phi = 10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Толщины  $d$  слоев Al и SiO<sub>2</sub> показаны на рисунке

Fig. 1. The calculated after [14] distribution profile of the primary vacancies formed by implantation of MIS structures Al/SiO<sub>2</sub>/*n*-Si with xenon ions with energy of 166 MeV and fluence  $\Phi = 10^{10}$  cm<sup>-2</sup>. The thicknesses  $d$  of Al and SiO<sub>2</sub> layers are shown in figure

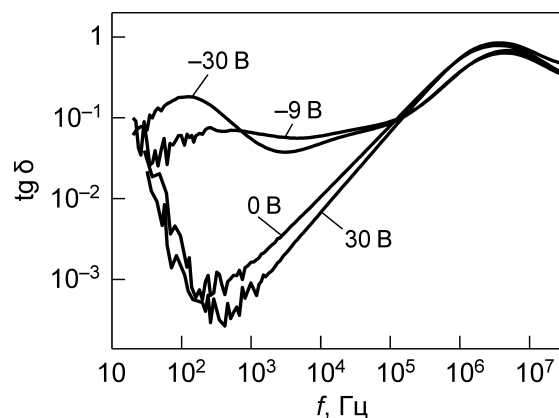


Рис. 2. Зависимости тангенса угла электрических потерь  $\text{tg} \delta$  от частоты  $f$  для МДП-структуры, имплантированной ионами ксенона флюенсом  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Значения напряжения смещения  $U$  указаны на рисунке

Fig. 2. Dependences of the electric loss tangent  $\text{tg} \delta$  on the frequency  $f$  for the MIS structure implanted with xenon ions with fluence of  $10^{10}$  cm<sup>-2</sup>. The values of the bias voltage  $U$  on Al relative to *n*-Si are shown in the figure.

щихся в режиме инверсии, на зависимостях  $\text{tg} \delta(f)$  наблюдается максимум при  $f \approx 100$  Гц. Причиной регистрируемого увеличения  $\text{tg} \delta$  является наличие слоя кремния, содержащего высокие концентрации радиационных дефектов. Это приводит с одной стороны к увеличению сопротивления радиационно-нарушенного слоя, с другой стороны может вызывать увеличение электрических потерь за счет перезарядки радиационных дефектов, локализованных в глубине кремния [5].

Для уточнения факторов, определяющих изменения емкости МДП-структур после их имплантации ионами ксенона, проводились измерения частотных зависимостей импеданса при различных значениях постоянного напряжения смещения  $U$ .

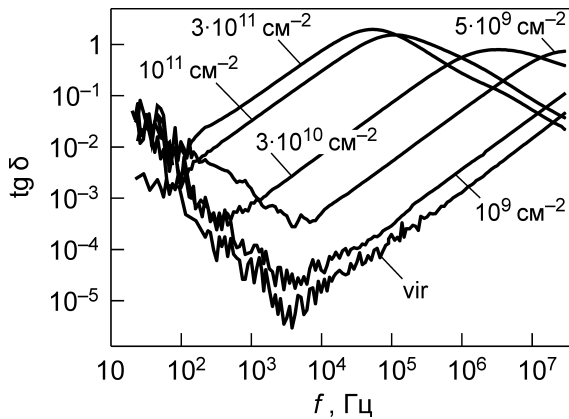


Рис. 3. Зависимости тангенса угла электрических потерь  $\text{tg}\delta$  от частоты  $f$  для МДП-структур  $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$ , имплантированных высокоэнергетическими ионами ксенона. Значения флюенса ионов указаны на рисунке; vir — неимплантированная (исходная) МДП-структура. Регистрация зависимостей  $\text{tg}\delta(f)$  выполнялась при напряжении смещения  $U = 30$  В

Fig. 3. Dependences of the electric loss tangent  $\text{tan}\delta$  on the frequency  $f$  for MIS structures  $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$  implanted with high-energy xenon ions. The values of the ion fluence are shown in the figure; vir is the nonimplanted (virgin) MIS structure. Registration of dependences  $\text{tan}\delta(f)$  was performed at bias voltage  $U = 30$  V

На рис. 3 показаны зависимости тангенса угла электрических потерь  $\text{tg}\delta$  от частоты  $f$  для МДП-структур, имплантированных высокоэнергетическими ионами ксенона. Регистрация проводилась при напряжении смещения  $U = 30$  В, что соответствовало режиму обогащения электронами слоя, прилегающего к границе раздела  $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ . Для исходных МДП-структур и МДП-структур, имплантированных ионами ксенона флюенсами  $\Phi \leq 10^9 \text{ см}^{-2}$  зависимость  $\text{tg}\delta(f)$  имеет вид, характерный для параллельной  $RC$ -цепи [7]. При  $\Phi = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  на зависимости  $\text{tg}\delta$  от частоты  $f$  в области высоких частот ( $f \approx 30$  МГц) появляется максимум. По мере увеличения флюенса ионов максимум сдвигается в сторону низких частот (вплоть до  $f \approx 40$  кГц при  $\Phi = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ).

На рис. 4 представлены зависимости тангенса угла электрических потерь  $\text{tg}\delta$  от частоты  $f$ , зарегистрированные при напряжении смещения  $U = -30$  В. Согласно, полученным вольт-фарадным характеристикам при данном напряжении МДП-структуры находятся в режиме инверсии, когда вблизи границы раздела  $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$  локализованы дырки. Так же, как и для МДП-структур в режиме обогащения, зависимости  $\text{tg}\delta(f)$  МДП-структур в режиме инверсии (исходных и имплантированных ионами флюенсом  $\Phi \leq 10^9 \text{ см}^{-2}$ ), имеют вид, характерный для параллельной  $RC$ -цепи [7]. Высокочастотный максимум в режиме инверсии проявляется на зависимостях  $\text{tg}\delta(f)$  при флюенсах ионов  $\Phi \geq 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  и аналогично сдвигается в сторону низких частот. Подобное поведение высокочастотного максимума позволяет связать его с формированием в глубине МДП-структур квазиплоского слоя радиационных дефектов. Механизм его формирования аналогичен механизму, описанному в [11-13, 15] для  $p^+-n$ -структур, имплантированных высокоэнергетическими тяжелыми ионами.

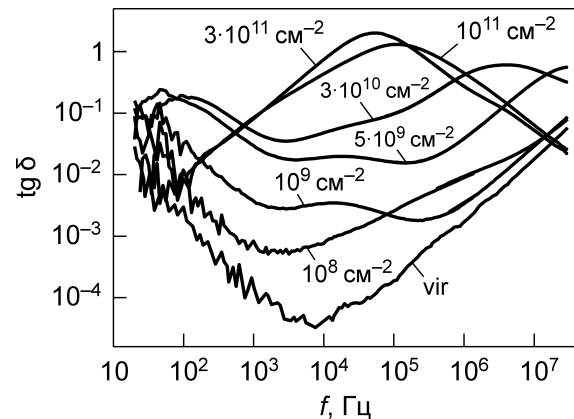


Рис. 4. Зависимости тангенса угла электрических потерь  $\text{tg}\delta$  от частоты  $f$  для МДП-структур  $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$ , имплантированных высокоэнергетическими ионами ксенона. Значения флюенса ионов указаны на рисунке; vir — неимплантированная (исходная) МДП-структура. Регистрация зависимостей  $\text{tg}\delta(f)$  выполнялась при напряжении смещения  $U = -30$  В

Fig. 4. Dependences of the electric loss tangent  $\text{tan}\delta$  on the frequency  $f$  for MIS structures  $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$  irradiated with high-energy xenon ions. The values of the ion fluence are shown in the figure; vir is the nonimplanted (virgin) MIS structure. Registration of dependences  $\text{tan}\delta(f)$  was performed at bias voltage  $U = -30$  V

Отличительной особенностью зависимостей  $\text{tg}\delta(f)$  МДП-структур, находящихся в режиме инверсии является «локальный» максимум в диапазоне частот  $2 \cdot 10^3 - 10^5$  Гц, отчетливо наблюдаемый для флюенсов ионов  $10^9$  и  $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Его отсутствие на зависимостях  $\text{tg}\delta(f)$  МДП-структур, находящихся в режиме инверсии, позволяет связать потери в данной области частот с перезарядкой радиационных дефектов, локализованных в области пространственного заряда [16]. Подобный максимум наблюдался ранее нами для  $p^+-n$ -структур, облученных как электронами, так и высокоэнергетическим тяжелыми ионами [11-13]. Наличие максимума при частотах  $\approx 100$  Гц, вероятно, связано со сквозной проводимостью радиационно-Ошибка! **Закладка не определена.**нарушенного диэлектрика.

## Закключение

Исследовались электрические потери в МДП-структурах  $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$ , имплантированных ионами ксенона с энергией 166 МэВ. Флюенс ионов варьировался от  $10^8$  до  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Измерения импеданса выполнялись в диапазоне частот переменного напряжения от 20 до  $3 \cdot 10^7$  Гц при различном постоянном электрическом напряжении на МДП-структуре. Установлено, что при флюенсах ионов  $\geq 10^9 \text{ см}^{-2}$  радиационные дефекты вносят в диапазоне частот  $2 \cdot 10^3 - 10^5$  Гц определяющий вклад в электрические потери МДП-структур, находящихся в режиме инверсии типа электрической проводимости  $n\text{-Si}$  внешним электрическим смещением. Показано, что потери обусловлены перезарядкой дефектов.

Результаты проведенных экспериментов подтверждают модель радиационно-нарушенного слоя, разработанную ранее, на примере кремниевых  $p^+-n$ -диодов, облученных высокоэнергетическими тяжелыми ионами или электронами [11-13].

Полученные данные, а именно, определенный диапазон частот, в котором доминируют электрические потери, вызванные перезарядкой радиационных дефектов в кристаллическом  $n$ -Si, может представлять интерес для разработки экспресс-методов контроля процесса накопления радиационных повреждений в МДП-структурах Al/SiO<sub>2</sub>/ $n$ -Si.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (подпрограмма «Микро- и нанoeлектроника») и «Физматтех».

### Библиографические ссылки

1. Ng K.K. Complete Guide to Semiconductor Devices. New York: Wiley; 2002. xxiv+740 p.
2. Nastasi M., Mayer J.W. Ion Implantation and Synthesis of Materials. Berlin: Springer; 2006. 263 p.
3. Kozlovski V., Abrosimova V. Radiation Defect Engineering. Singapore: World Scientific; 2005. 253 p.
4. Nicollan E.H., Goetzberger A. The Si-SiO<sub>2</sub> interface – electrical properties as determined by metal-insulator-silicon conductance technique. *Bell Syst. Tech. J.* 1967; 46(6):1055–1133.
5. Лебедев А.А., Лебедев А.А., Давыдов Д.В. Емкостные измерения в случае сильной зависимости последовательного сопротивления базы диода от приложенного напряжения. *Физика и техника полупроводников* 2000; 34(1): 113–116
6. Eremin V., Verbitskaya E., Li Z. Effect of radiation induced deep level traps on Si detector performance. *Nucl. Instrum. Meth. A* 2002;476(3):537–549.
7. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Lastovskii S.B., Wieck A. Equivalent circuit of silicon diodes subjected to high-fluence electron irradiation. *Technical Physics* 2010; 55(10): 1463–1471.
8. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Ermakova A.V., Tarasik, M.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A. et al. Impedance of reverse biased diodes irradiated with krypton ions with energy of 250 MeV. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* 2012; 88(7a): 312–314.
9. Barsoukov E., Macdonald J.R. (eds.) Impedance Spectroscopy: Theory Experiment and Applications. New York: Wiley; 2005. 595 p.
10. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И. Основы импедансной спектроскопии композитов: курс лекций. Минск: БГУ; 2005. 130 с.
11. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Skuratov V.A., Wieck A. Kinetics of reverse resistance recovery of silicon diodes: The role of the distance the metallurgical  $p^+n$ -junction – defect layer formed by 250 MeV krypton implantation. *Physica B* 2009; 404 (23-24): 4667–4670.
12. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Tarasik M.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Skuratov V.A. et al. Effects of fluences of irradiation with 107 MeV krypton ions on the recovery charge of silicon  $p^+n$ -diodes. *Acta Physica Polonica A* 2011; 120(1): 111–114.
13. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Lastovskii S.B., Skuratov V.A. et al. Impedance and barrier capacitance of silicon diodes implanted with high-energy Xe ions. *Microelectron. Reliab.* 2010; 50(6): **Ошибка! Закладка не определена.** 813–820.
14. Ziegler J.F. SRIM-2003. *Nucl. Instrum. Meth. B* 2004;219-220:1027–1036.
15. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И., Нья В.К., Шпаковский С.В., Филипеня В.А., Ластовский С.Б. и др. Радиационные дефекты в кремниевых диодах, облученных ионами висмута с энергией 700 МэВ. *Вестник БГУ. Серия 1: Физика, Математика, Информатика.* 2014; 2: 7–13.
16. Milnes A.G. Deep Impurities in Semiconductors. New York: Wiley; 1973. 526 p.

### References

1. Ng K.K. Complete Guide to Semiconductor Devices. New York: Wiley; 2002. xxiv+740 p.
2. Nastasi M., Mayer J.W. Ion Implantation and Synthesis of Materials. Berlin: Springer; 2006. 263 p.
3. Kozlovski V., Abrosimova V. Radiation Defect Engineering. Singapore: World Scientific; 2005. 253 p.
4. Nicollan E.H., Goetzberger A. The Si-SiO<sub>2</sub> interface – electrical properties as determined by metal-insulator-silicon conductance technique. *Bell Syst. Tech. J.* 1967; 46(6):1055–1133.
5. Lebedev A.A., Lebedev A.A., Davydov D.V. Capacitance measurements for diodes in the case of strong dependence of the diode-base series resistance on the applied voltage. *Semiconductors* 2000; 34(1): 115–118.
6. Eremin V., Verbitskaya E., Li Z. Effect of radiation induced deep level traps on Si detector performance. *Nucl. Instrum. Meth. A* 2002;476(3):537–549.
7. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Lastovskii S.B., Wieck A. Equivalent circuit of silicon diodes subjected to high-fluence electron irradiation. *Technical Physics* 2010; 55(10): 1463–1471.
8. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Ermakova A.V., Tarasik, M.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A. et al. Impedance of reverse biased diodes irradiated with krypton ions with energy of 250 MeV. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* 2012; 88(7a): 312–314.
9. Barsoukov E., Macdonald J.R. (eds.) Impedance Spectroscopy: Theory Experiment and Applications. New York: Wiley; 2005. 595 p.
10. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I. Fundamentals of Impedance Spectroscopy of Composites. Minsk: Belarusian State University; 2005. 130 p. (In Russian).
11. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Skuratov V.A., Wieck A. Kinetics of reverse resistance recovery of silicon diodes: The role of the distance the metallurgical  $p^+n$ -junction – defect layer formed by 250 MeV krypton implantation. *Physica B* 2009; 404 (23-24): 4667–4670.
12. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Tarasik M.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Skuratov V.A. et al. Effects of fluences of irradiation with 107 MeV krypton ions on the recovery charge of silicon  $p^+n$ -diodes. *Acta Physica Polonica A* 2011; 120(1): 111–114.
13. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Lastovskii S.B., Skuratov V.A. et al. Impedance and barrier capacitance of silicon diodes implanted with high-energy Xe ions. *Microelectron. Reliab.* 2010; 50(6): **Ошибка! Закладка не определена.** 813–820.
14. Ziegler J.F. SRIM-2003. *Nucl. Instrum. Meth. B* 2004; 219-220: 1027–1036
15. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Nha V.Q., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Lastovskii S.B. et al. Radiation defects in silicon diodes irradiated by bismuth ions with energy of 700 MeV. *BSU Bulletin: Physics, Mathematics, Informatics* 2014; 2: 7–13. (In Russian).
16. Milnes A.G. Deep Impurities in Semiconductors. New York, Wiley; 1973. 526 p.