

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ВИСМУТА С ЭНЕРГИЕЙ 700 МЭВ И КСЕНОНА С ЭНЕРГИЕЙ 170 МЭВ

Н.А. Поклонский¹⁾, Н.И. Горбачук¹⁾, Во Куанг Нья¹⁾, С.В. Шпаковский²⁾, В.А. Филипеня²⁾, В.А. Скуратов³⁾, А. Wieck⁴⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, 220030, пр. Независимости 4, Минск, Беларусь

²⁾ ОАО «ИНТЕГРАЛ», 220108, ул. Казинца 121А, Минск, Беларусь

³⁾ Объединенный институт ядерных исследований, 141980, ул. Жолио-Кюри 6, Дубна, Россия

⁴⁾ Ruhr-Universitaet Bochum, D-44780, Universitaetsstrasse 150, Bochum, Germany

Исследовались кремниевые диоды с p^+n -переходом, облученные ионами висмута с энергией 700 МэВ и ксенона с энергией 170 МэВ. Флюенс облучения 10^8 см^{-2} . Показано, что анализ зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ от напряжения обратного смещения U_r позволяют разделить вклады в диэлектрические потери от дефектов, расположенных на различной глубине. Полученные зависимости $\text{tg} \delta$ от частоты f переменного тока для диодов, подвергнутых двойной имплантации, отражают суммарное накопление дефектов в области пространственного заряда, а также поэтапное формирование сплошного радиационно-нарушенного слоя.

Введение

Основными параметрами, определяющими эксплуатационные свойства силовых быстродействующих диодов, являются время восстановления обратного сопротивления, прямое падение напряжения, величина обратных токов и напряжение пробоя. На быстродействие диодов непосредственное влияние также оказывают барьерная емкость, а диэлектрические потери приводят к дополнительному рассеянию мощности. Энергетические уровни радиационных дефектов, сформированных облучением электронами и ионами, расположены вблизи середины запрещенной зоны [1]. Поэтому дефекты являются активными центрами генерации-рекомбинации носителей заряда и вызывают увеличение диэлектрических потерь за счет роста сквозной проводимости двойного электрического слоя [3]. Известно также, что к увеличению потерь может приводить перезарядка дефектов с глубокими уровнями [2, 3]. С учетом этого, а также широкого использования радиационных технологий при изготовлении быстродействующих полупроводниковых приборов [1], изучение частотных зависимостей тангенса угла электрических потерь в облученных диодах представляется актуальной задачей.

Цель работы — исследовать влияние радиационных дефектов на электрические потери в кремниевых диодах с p^+n -переходами, облученных ионами висмута и/или ксенона.

Методика эксперимента

Диоды изготавливались на пластинах однородно легированного фосфором монокристаллического кремния с удельным сопротивлением 90 Ом·см (КОФ-90, плоскость (111), толщина 460 мкм). Область анода p^+ -типа формировалась ионной имплантацией бора. Процесс диффузии бора моделировался в программе Process Wizard 1D [4]. Построенные по результатам моделирования профили распределения разности $|N_A - N_D|$ концентраций акцепторов и доноров показаны на рис. 1. Глубина залегания p^+n -перехода ($x_j = 2.5 \text{ мкм}$) контролировалась по результатам химического травления шарового шлифа. Данные измерений удовлетворительно

согласуются с результатами моделирования.

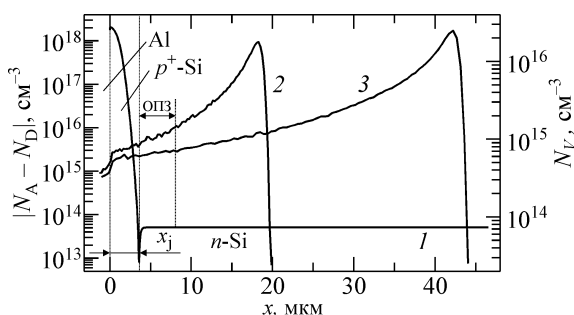


Рис. 1. Рассчитанные профили: 1 — модуля разности $|N_A - N_D|$ концентраций акцепторов и доноров в исходном диоде; 2 — распределения первичных вакансий, образованных при облучении диодов ионами ксенона с энергией 170 МэВ; 3 — ионами висмута с энергией 700 МэВ. Начало отсчета совмещено с границей раздела Al/Si. Флюенс облучения $\Phi = 10^8 \text{ см}^{-2}$. Размер ОПЗ указан для необлученного диода.

Для создания омического контакта в обратную сторону пластины проводилась имплантация фосфора. Контакты формировались напылением Al толщиной 1,5 мкм. Площадь p^+n -перехода составляла 4,41 мм². Оцененная из измерений вольт-фарадных характеристик толщина двойного электрического слоя p^+n -перехода в исходных диодах при напряжении смещения $U \approx 0$ составляла 4,5 мкм.

Диоды облучались ионами висмута и/или ксенона. Имплантация проводилась в направлении, перпендикулярном плоскости p^+n -перехода со стороны p^+ -области. Флюенс облучения составлял 10^8 см^{-2} . Распределение первичных вакансий, образовавшихся в результате облучения ионами, рассчитывалось в программе TRIM [5]. Профили распределения первичных радиационных вакансий показаны на рис. 1.

Измерения действительной и мнимой части импеданса $Z = Z' + iZ''$ выполнялись в диапазоне частот от 20 Гц до 30 МГц на измерителях LCR Agilent 4284A, Agilent 4285A, E4980A. Амплитуда синусоидального измерительного сигнала составляла 40 мВ. Постоянное напряжение обратного смещения U_r изменялось в пределах от 0 до

–40 В. Все измерения выполнялись при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения обратного смещения U_r , измеренные на частоте 1 кГц. Зависимость 1 получена для исходных диодов, 2 — диодов, облученных ионами ксенона с энергией 170 МэВ, 3 — диодов, облученных ионами висмута с энергией 700 МэВ, 4 — диодов, облученных ионами ксенона с энергией 170 МэВ, а затем ионами висмута с энергией 700 МэВ. Видно, что на зависимостях $\operatorname{tg} \delta(U_r)$ диодов, облученных ионами ксенона, либо висмута наблюдается максимум. Появление максимума связано с неравномерным распределением плотности радиационных дефектов по объему базы облученных диодов (см. рис. 1). В результате чего при увеличении напряжения смещения (от $U_r = 0$) область пространственного заряда (ОПЗ) распространяется на слои кремния со все более возрастающей концентрацией радиационных дефектов, что вызывает увеличение $\operatorname{tg} \delta$. После того как ОПЗ полностью включает в себя радиационно-нарушенный слой и продолжает распространяться в неповрежденную часть базы диода участие дефектов в формировании генерационно-рекомбинационных токов снижается из-за того, что часть их превращается в центры прилипания. Соответственно дальнейший рост U_r приводит к снижению диэлектрических потерь.

На рис. 3 представлены зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ исходных (*vir*) и облученных диодов от частоты переменного тока f . Зависимость $\operatorname{tg} \delta(f)$ для исходного диода имеет минимум в окрестности 10^3 – $2 \cdot 10^4$ Гц. Вид зависимости $\operatorname{tg} \delta(f)$ характерен для параллельной RC цепи, последовательно соединенной с резистором. Параллельная RC цепь соответствует ОПЗ, резистор — базе диода. Соответственно при частотах $f < 10^3$ Гц потери диода в основном обусловлены токами сквозной проводимости ОПЗ, а для частот $f > 3 \cdot 10^4$ Гц — активным сопротивлением базовой области [3].

На зависимости $\operatorname{tg} \delta(f)$ облученных диодов можно выделить несколько характерных участков. При частотах $f < 10^3$ Гц $\operatorname{tg} \delta$ монотонно убывает с ростом частоты. В интервале частот $2 \cdot 10^3$ – $3 \cdot 10^5$ Гц наклон зависимости $\operatorname{tg} \delta(f)$ изменяется. Для частот $f > 4 \cdot 10^5$ Гц на зависимостях $\operatorname{tg} \delta(f)$ диодов, облученных ионами висмута, а также висмута и ксенона, наблюдается «локальный» максимум $\operatorname{tg} \delta(f)$. В случае двойной имплантации максимум $\operatorname{tg} \delta(f)$ в окрестности $f = 10^7$ Гц проявляется более отчетливо. Для диодов, облученных только ионами ксенона, максимум отсутствует и их зависимость $\operatorname{tg} \delta(f)$ приближается к зависимости исходных диодов.

На рис. 4 приведены зависимости действительной части импеданса Z' от частоты переменного тока f . На каждой из зависимостей облученных диодов можно выделить два участка в пределах которых $Z'(f)$ изменяется слабо. В области низких частот $f < 1$ кГц величина Z' соответствует активному сопротивлению области пространствен-

ного заряда [3, 6]. Видно, что облучение диодов приводит к уменьшению Z' в указанном диапазоне частот, что связано с увеличением генерационно-рекомбинационных токов и согласуется с данными для зависимости $\operatorname{tg} \delta(f)$, представленной на рис. 2.

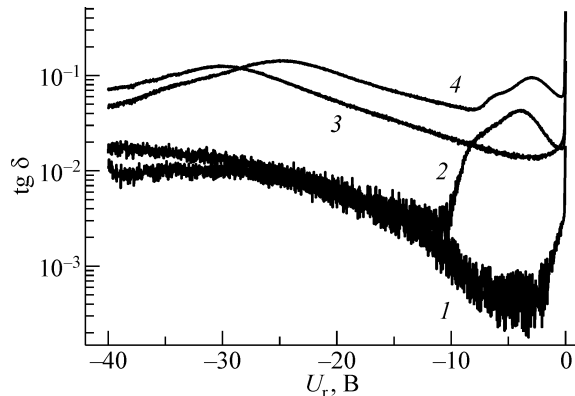


Рис. 2. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения обратного смещения U_r . Исходные диоды (1), диоды, облученные ионами ксенона (2), висмута (3), ксенона и висмута (4). Флюенс облучения $\Phi = 10^8 \text{ см}^{-2}$. Частота переменного тока 1 кГц.

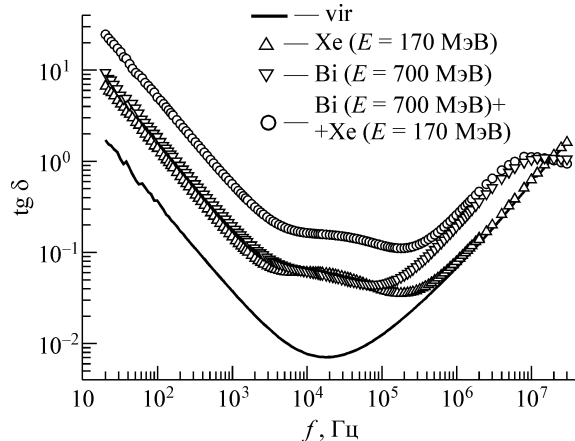


Рис. 3. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ исходных (*vir*) и облученных диодов от частоты переменного тока f . Тип ионов и энергии облучения указаны на рисунке. Флюенс облучения $\Phi = 10^8 \text{ см}^{-2}$. Напряжение смещения $U_r = 0$.

При частотах $f > 4 \cdot 10^5$ Гц «плато» на зависимости $Z'(f)$ исходных диодов соответствует сопротивлению базовой области. Облучение ионами ксенона приводит лишь к незначительному росту Z' для частот $f > 4 \cdot 10^5$ Гц, что не позволяет говорить о существенном увеличении активного сопротивления радиационно-нарушенного слоя (находящегося вне ОПЗ). Для диодов, облученных ионами висмута, либо последовательно ионами ксенона и висмута, в интервале частот $4 \cdot 10^5$ – 10^7 Гц величина Z' в 3–6 раз превышает значение, характерное для исходных диодов. Причем в случае двойной имплантации наблюдается более существенный рост Z' .

Таким образом, сопоставление данных, представленных на рис. 3 и 4, показывает, что увеличение потерь в облученных диодах при частотах $f < 10^3$ Гц связано с ростом токов сквозной проводимости (увеличением активной проводимости

ОПЗ).

Максимум, наблюдаемый при частотах $f > 4 \cdot 10^5$ Гц на зависимостях $\tan \delta(f)$ диодов, облученных ионами висмута, а также ксенона и висмута, обусловлен потерями, связанными с рассеянием мощности на радиационно-нарушенном слое. В случае двойной имплантации потери несколько больше. Увеличение сопротивления радиационно-нарушенного слоя вследствие имплантации только ионов ксенона незначительно и зависимости $\tan \delta(f)$ облученных диодов при частотах $f > 4 \cdot 10^5$ Гц практически совпадают с зависимостями $\tan \delta(f)$ исходных диодов.

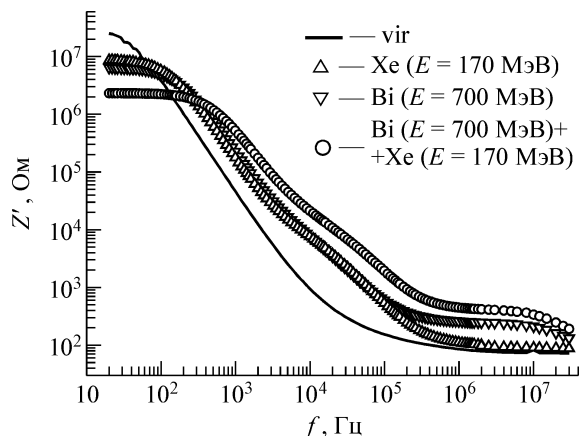


Рис. 4. Зависимости действительной части импеданса Z' от частоты f исходных (vir) и облученных диодов. Тип ионов и энергии облучения указаны на рисунке. Флюенс облучения $\Phi = 10^8 \text{ см}^{-2}$. Напряжение смещения $U_r = 0$.

Наблюдающуюся для всех облученных диодов особенность $\tan \delta(f)$ в интервале частот $2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ Гц, согласно [3], можно связать с потерями, возникающими при перезарядке радиационных дефектов, локализованных в области пространственного заряда. При двойной имплантации дефекты в ОПЗ вводятся при торможении как ионов ксенона, так и висмута (см. рис. 1). Соответственно, потери в интервале частот $2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ Гц существенно выше, по сравнению с имплантацией только висмута, либо, только ксенона. Высказанное предположение согласуется также с тем фак-

том, что наиболее значительные изменения Z' для частот $f < 10^3$ Гц наблюдается также в случае именно двойной имплантации.

Закключение

Показано, что зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ от напряжения обратного смещения U_r немономонны. Максимум зависимости $\tan \delta(U_r)$ обусловлен распространением ОПЗ вглубь радиационно-нарушенного слоя. В случае двойной имплантации ионами висмута и ксенона на зависимостях $\tan \delta(U_r)$, облученных диодов присутствуют два максимума, соответствующие прохождению границей ОПЗ максимумов профиля распределения радиационных дефектов для каждой имплантации. Двойная имплантация приводит к значительному росту потерь в интервале частот $2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ Гц и отчетливому проявлению максимума в окрестности $f = 10^7$ Гц, что отражает суммарное накопление дефектов в области пространственного заряда и поэтапное формирование сплошного радиационно-нарушенного слоя вне ОПЗ.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (договор Ф10Д-002) и ГПНИ «Электроника и фотоника» (задание 1.1.04).

Список литературы

1. Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. — М.: Наука, 1988. — 192 с.
2. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. — М.: Мир, 1977. — 562 с.
3. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И., Шпаковский С.В., Ластовский С.Б., Wieck A. // ФТП. — 2010. — Т. 44, № 3. — С. 397.
4. Process Wizard — 1D, version 1.3, Dawn Technologies, Inc., 1999.
5. Ziegler J.F. // Nucl. Instr. and Meth. B. — 2004. — V. 219-220. — P. 1027.
6. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Filipenia V.A., Lastovskii S.B., Skuratov V.A., Wieck A., Markovich V.P. // Microelectron. Reliab. — 2010. — V. 50, № 6. — P. 813.

DIELECTRIC LOSSES OF SILICON DIODES IRRADIATED WITH 700 MeV-BISMUTH IONS AND 170 MeV-XENON IONS

N.A. Poklonski¹, N.I. Gorbachuk¹, Vo Quang Nha¹, S.V. Shpakovski², V.A. Filipenia², V.A. Skuratov³, A. Wieck⁴

¹Belarusian State University, pr. Nezavisimosti 4, Minsk, BY-220030, Belarus, phone: 209-51-10, e-mail: gorbachuk@bsu.by

²JSC "INTEGRAL", ul. Kazintsa 121A, Minsk, BY-220108, Belarus

³Joint Institute for Nuclear Research, ul. Joliot-Curie 6, RU-141980 Dubna, Moscow region, Russia

⁴Ruhr-Universitaet Bochum, Universitaetsstrasse 150, D-44780, Bochum, Germany

Silicon diodes with p^+n -junction irradiated with 700 MeV-bismuth ions and 170 MeV-xenon ions are examined. Irradiation fluence was 10^8 cm^{-2} . It is shown that the dependences of the loss tangent $\tan \delta$ on the reverse voltage U_r allow to distinguish loss tangent contributions from defects located at different depth. Obtained dependences of $\tan \delta$ on the frequency f of alternate current for diodes subjected to the double implantation show cumulative formation of defects in the space charge region as well as phased formation of continuous irradiation damaged layer.