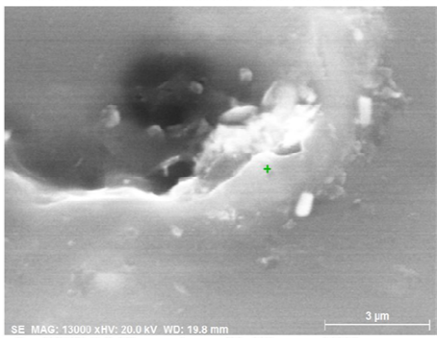

Рисунок 4. Поверхность пленки ПЭТФ, облученной ионами фосфора с энергией 60 кэВ и дозой 2000 мкКл

Увеличение времени спин-спиновой релаксации T_2 при максимальной дозе облучения ионами фосфора пленок ПЭТФ может свидетельствовать о частичной кристаллизации имплантированных слоев пленок ПЭТФ. Это хорошо видно из фрагмента микроскопического снимка образца ПЭТФ (рис. 4), имплантированного ионами фосфора с энергией 60 кэВ и дозой 2000 мкКл.

На поверхности пленки при проявлении эффекта блистеринга [3], четко видны кристаллы, имеющие форму параллелепипеда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование релаксационных процессов в имплантированных ионами фосфора пленках ПЭТФ свидетельствует о стабилизации модифицированных ионами фосфора слоев полимерных пленок. Максимально заметно процесс релаксации в пленках наблюдался для дозы 200 мкКл. Изменение времени парамагнитной релаксации, как видно, не очень существенно, но даже незначительное увеличение, например, спин-решеточной релаксации свидетельствует о структурировании и, возможно, частичной кристаллизации имплантированных слоев пленок ПЭТФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии: Пер. с англ. – Мир, 1970.
2. Лебедев Я.С., Муромцев В.И. ЭПР и релаксация стабилизированных радикалов. Изд. Химия, М.: 1973. – 256 с.
3. Primak W., Luthra J. Radiation blistering: Interferometric and microscopic observation of oxides, silicon, and metals. Journal of Applied physics 1966;37(6):2287–2294

ИМПЕДАНС БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУР ПЕРЕХОДНОЙ МЕТАЛЛ/*n*-Si, ОБЛУЧЕННЫХ АЛЬФА-ЧАСТИЦАМИ

Н. А. Поклонский[1], К. В. Усенко[1], А. И. Ковалев[1], Н. И. Горбачук[1], С. Б. Ластовский[2]

[1)] Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: poklonski@bsu.by

[2)] ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь, e-mail: lastov@ifttp.bas-net.by

Методом импедансной спектроскопии исследованы диоды Шоттки 5КЭФ-0.9, 5.5КЭФ-1 (Mo/*n*-Si) и 8КЭФ-2.7 (Pd/*n*-Si) производства ОАО «Интеграл». Измерения индуктивности проводились на исходных диодах и диодах, облученных альфа-частицами с кинетической энергией $E_\alpha \leq 5.147$ МэВ. На переменном токе в интервале частот от 20 Гц до 2 МГц определены значения максимумов индуктивности диодов

при соответствующих им постоянных токах смещения 10 и 40 мкА. Получены зависимости максимума низкочастотной индуктивности от флюенса облучения.

Ключевые слова: диод Шоттки; отрицательная дифференциальная емкость; альфа-облучение.

IMPEDANCE OF TRANSITION METAL/*n*-Si BARRIER STRUCTURES IRRADIATED WITH ALPHA PARTICLES

N. A. Poklonski[1], K. V. Usenko[1], A. I. Kovalev[1], N. I. Gorbachuk[1], S. B. Lastovski[2]

[1)] Belarusian State University, Nezavisimosti Ave., 4, 220030 Minsk, Belarus
[2)] SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus", ul. P. Brovki, 19, 220072 Minsk, Belarus
Corresponding author: N. A. Poklonski (poklonski@bsu.by)

Schottky diodes Mo/*n*-Si (epitaxial layer thin 5 μm, resistivity 0.9 Ohm·cm and 5.5 μm, resistivity 1 Ohm·cm) and Pd/*n*-Si (epitaxial layer thin 8 μm, resistivity 2.7 Ohm·cm) produced by JSC "Integral" were studied by impedance spectroscopy. Inductance measurements were carried out on the as manufactured diodes and diodes irradiated with alpha particles with kinetic energy $E_\alpha \leq 5.147$ MeV. The maximum values of the inductance of the Schottky diodes at the corresponding DC bias currents of 10 and 40 μA were measured on AC in the frequency range from 20 Hz to 2 MHz. The dependences of the maximum low-frequency inductance on the irradiation fluence are obtained.

Key words: Schottky diode; negative differential capacitance; alpha irradiation.

ВВЕДЕНИЕ

В микроэлектронике для создания интегральной индуктивности формируют пленочные спирали круглой или прямоугольной форм. Однако максимальная удельная индуктивность таких спиралей на низких частотах ограничена значением порядка десятков мкГн/см^2, при этом их диаметр может иметь единицы миллиметров [1]. Еще одним способом создания интегральной индуктивности являются гираторы – устройства на основе операционных усилителей, имитирующие индуктивность [2]. Несмотря на то, что такие решения внедрены в производство интегральных микросхем, актуальной является задача поиска элементов с большей удельной индуктивностью. Это позволит более рационально использовать полезную площадь микросхем.

Альтернативой пленочным катушкам может стать эффект отрицательной дифференциальной емкости (т.е. индуктивности) [3, 4], наблюдаемый в различных полупроводниковых структурах: кремниевых фотодиодах, облученных нейтронами, многослойных гетероструктурах, халькогенидных пленках, транзисторных структурах, границах раздела металл–полупроводник и др. [5].

Цель работы – исследование импеданса диодов Шоттки (переходной металл/*n*-Si) с радиационными дефектами при разных уровнях прямого смещения и флюенса α-частиц (максимальная кинетическая энергия α-частицы 5.147 МэВ).

ИССЛЕДУЕМЫЕ ПРИБОРНЫЕ СТРУКТУРЫ

Исследовались бескорпусные диоды Шоттки 5КЭФ-0.9, 8КЭФ-2.7 и 5.5КЭФ-1 производства ОАО «Интеграл» [6]. Диоды изготавливались на пластинах монокристаллического кремния *n*-типа проводимости, легированного фосфором и выращенного методом Чохральского. Толщина пластин составляла 460 мкм. На подложке

эпитаксиально наращивался слой кремния *n*-типа. Затем в вакууме напылялся молибден (Mo) толщиной 0.3 мкм для диодов 5КЭФ-0.9 и 5.5КЭФ-1 и палладий (Pd) толщиной 0.1 мкм для диодов 8КЭФ-2.7 (см. рис. 1 и таблицу). К молибдену/палладию осуществлялся омический контакт напылением алюминия (Al) толщиной 3.3 мкм. С обратной стороны омический контакт формировали напылением металлического электрода Ti/Ni/Ag (0.1/0.5/0.6 мкм). Перед напылением тылового омического контакта для диодов 5КЭФ-0.9 и 8КЭФ-2.7 пластина утончалась до 270 и 350 мкм соответственно. Затем пластина скрайбировалась на чипы (в случае 8КЭФ-2.7 по 2 спаренных диода на одной подложке). После измерения исходных характеристик диоды облучались неколлимированным альфа-излучением (энергия распада 5.147 МэВ) флюенсом от $3.6 \cdot 10^{11}$ до $2.1 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$. Длина проективного пробега α-частиц в кремнии не превышала 24 мкм.

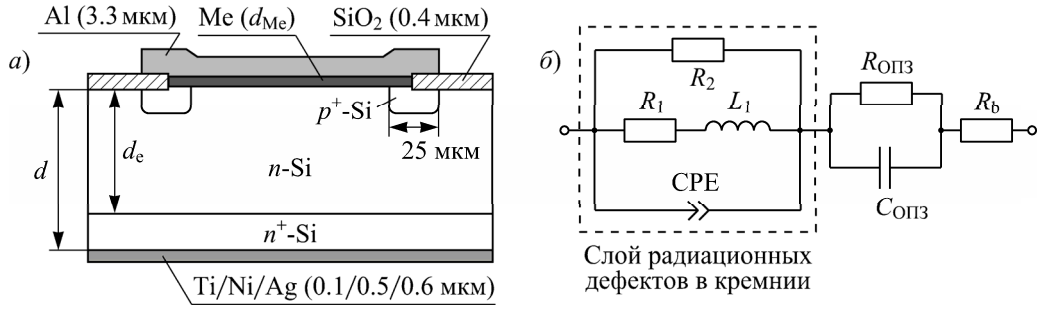

Рисунок 1. *а*) вид диода Шоттки в разрезе; *б*) эквивалентная электрическая схема облученного диода 5.5КЭФ-1 при прямом смещении U_{dc} = 50–100 мВ (I_{dc} = 10 мкА)

Основные характеристики исследуемых диодов при лабораторных условиях

	5КЭФ-0.9	8КЭФ-2.7	5.5КЭФ-1		
Удельное электрическое сопротивление эпитаксиального слоя, Ом·см	0.9	2.7	1		
Толщина эпитаксиального слоя d_e, мкм	5	8	5.5		
Металл (Me) перехода Me/*n*-Si	Mo	Pd	Mo		
Толщина металла перехода d_{Me}, мкм	0.3	0.1	0.3		
Толщина образца d, мкм	270	350	460		
Площадь барьера (перехода) S, мм^2	7.25	8.6	5.25		
Барьерная емкость, нФ	2.6	1.25	0.95	1.25	1.48

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерение зависимостей действительной Z' и мнимой Z'' частей импеданса $Z = Z' + iZ''$ от частоты переменного тока f (в диапазоне от 20 Гц до 2 МГц) и напряжения постоянного смещения U_{dc} (в диапазоне от 0 до 400 мВ) проводилось на *LCR*-измерителе Agilent E4980A. Амплитуда переменного сигнала U_{ac} = 40 мВ. При измерениях импеданса Z диоды находились при лабораторных условиях (в темноте). Постоянный ток I_{dc} изменялся от 0 до 10 мА; выделялись характеристики при смещении с наибольшей индуктивностью. Расчет индуктивности диодов L проводился по мето-

дикам [7–9] с использованием последовательной эквивалентной *LR*-схемы замещения (см., например, [10]).

Максимум низкочастотной индуктивности как в исходных, так и в облученных диодах был обнаружен при токе ≈40 мкА для образцов 5КЭФ-0.9 и токе ≈10 мкА для остальных диодов. Согласно рис. 2, *а*, 3, *а* и 4, *а*, *в*, *д* зависимость индуктивности *L* от частоты *f* измерительного сигнала при таких токах имеет 2 экстремума: первый в низкочастотной области *I* (75 Гц), второй — в области *II* (1–10 кГц) при емкостном импедансе. (Отрицательной индуктивности двухполюсника соответствует емкость.)

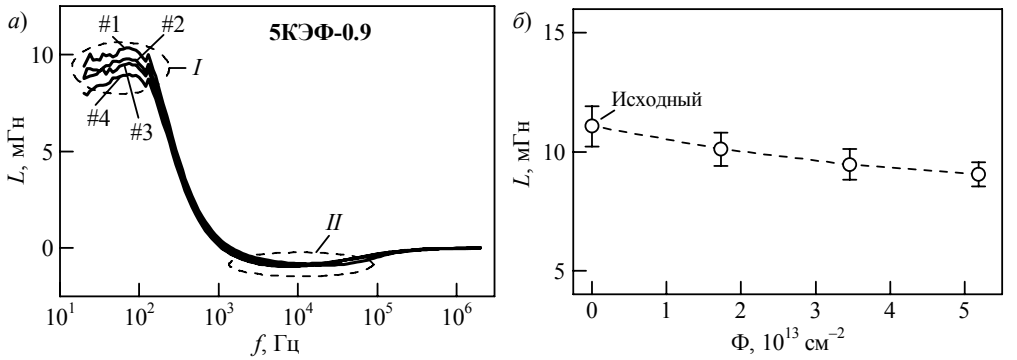

Рисунок 2. Частотные зависимости индуктивности *L* (*а*) и зависимости максимума индуктивности от флюенса α-частиц Ф при частоте переменного сигнала *f* = 75 Гц (*б*) диодов 5КЭФ-0.9. Номера кривых на рисунке (*а*) соответствуют флюенсам α-частиц Ф, 10^{11} см$^{-2}$: #1 — 0; #2 — 172.8; #3 — 345.6; #4 — 518.4

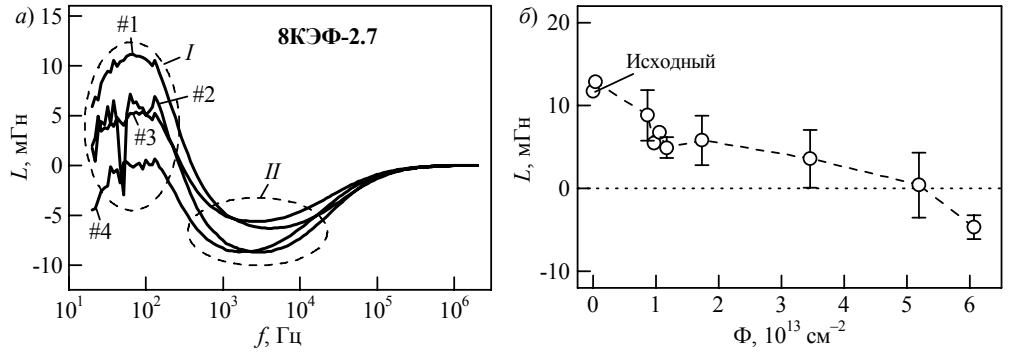

Рисунок 3. Частотные зависимости индуктивности *L* (*а*) и зависимости максимума индуктивности от флюенса α-частиц Ф при частоте переменного сигнала *f* = 75 Гц (*б*) диодов 8КЭФ-2.7. Номера кривых на рисунке (*а*) соответствуют флюенсам α-частиц Ф, 10^{11} см$^{-2}$: #1 — 0; #2 — 172.8; #3 — 345.6; #4 — 518.4

На рис. 2, *б*, 3, *б* и 4, *б*, *г*, *е* показаны зависимости регистрируемого на частоте *f* = 75 Гц максимума индуктивности от флюенса облучения. Для диодов 5КЭФ-0.9 (рис. 2, *б*) и 8КЭФ-2.7 (рис. 3, *б*) при увеличении флюенса облучения наблюдается уменьшение индуктивности. Для 8КЭФ-2.7 вблизи значения флюенса $1 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ наблюдается участок немонотонности, при увеличении флюенса происходит переход в емкостной тип импеданса. Индуктивность диодов 5КЭФ-0.9 и 8КЭФ-2.7 находится в пределах 12 мГн.

На рис. 4 представлены частотные зависимости индуктивности и зависимости максимальной индуктивности от флюенса для трех групп диодов 5.5КЭФ-1 с разной концентрацией легирующей примеси: $(3;\ 4.7;\ 7)\cdot 10^{15}$ см$^{-3}$, отвечающей значениям барьерной емкости: 0.95; 1.25; 1.48 нФ. Для первых двух групп легирования после облучения наблюдается значительное увеличение индуктивности, которая затем уменьшается с увеличением дозы. Для флюенсов от $2.8\cdot 10^{13}$ до $4.5\cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ наблюдается провал индуктивности с переходом импеданса в емкостной тип.

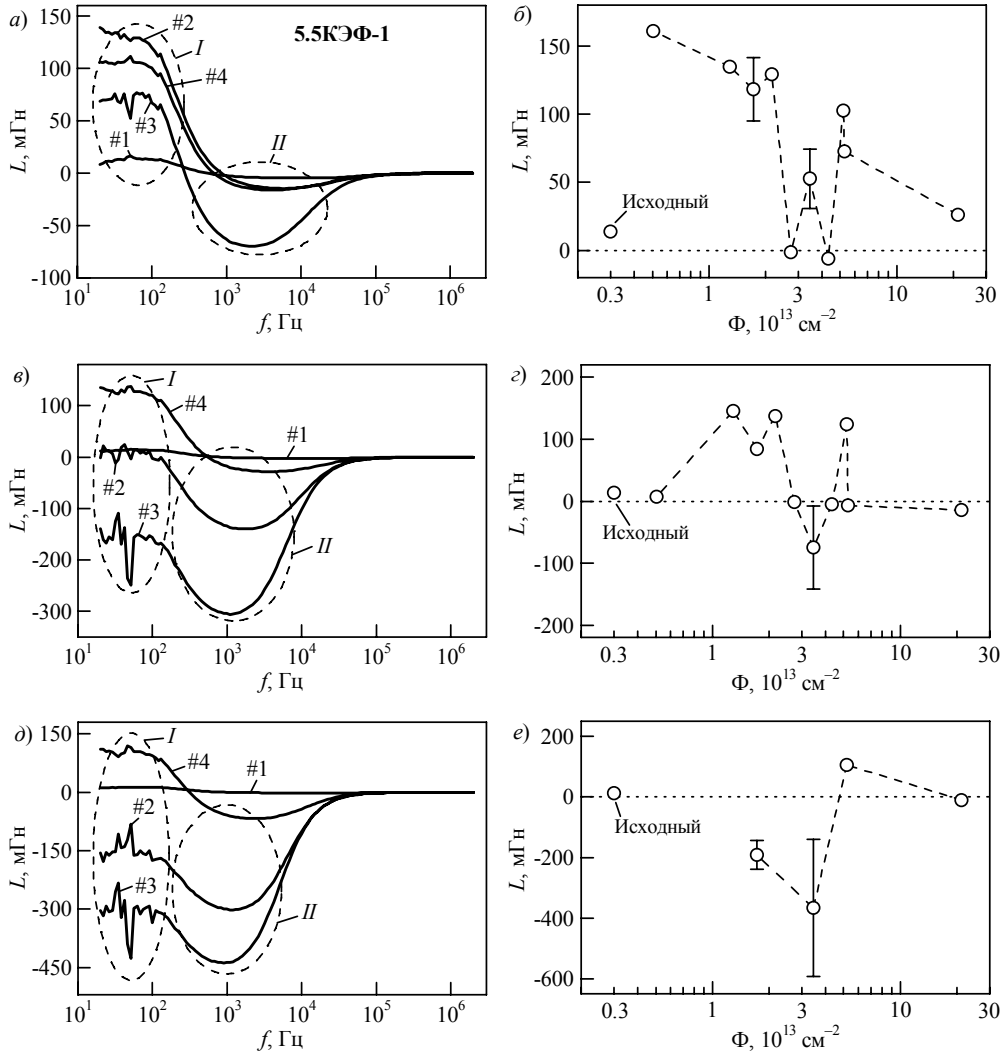

Рисунок 4. Частотные зависимости индуктивности *L* (*а, в, д*) и зависимости максимума индуктивности от флюенса α-частиц Ф при частоте переменного сигнала *f* = 75 Гц (*б, г, е*) диодов 5.5КЭФ-1. Номера кривых на рисунках (*а, в, д*) соответствуют флюенсам α-частиц Ф, 10^{11} см$^{-2}$: #1 — 0; #2 — 172.8; #3 — 345.6; #4 — 518.4.
Концентрация атомов фосфора составляла, 10^{15} см$^{-3}$: 3 (*а, б*); 4.7 (*в, г*); 7 (*д, е*)

Как видно из рис. 4, *а*, *в*, *д* с увеличением дозы облучения возрастает емкостной вклад. При достижении флюенса $\Phi = 5.2 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$ все три группы приобрели индуктивный импеданс в низкочастотной области. Итак: 1) емкостной вклад возрастает с увеличением флюенса облучения и концентрации легирующей примеси; 2) индуктивный вклад возрастает с увеличением флюенса облучения и уменьшается с увеличением концентрации атомов фосфора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в исследованном интервале флюенсов (доз) облучения α-частицами (до $\Phi = 5 \cdot 10^{13}$ см$^{-2}$) диоды 5КЭФ-0.9 и 8КЭФ-2.7 имеют монотонно убывающую зависимость индуктивности от флюенса α-частиц. Для диодов 5.5КЭФ-1 наблюдается значительное увеличение индуктивности L (на порядок при флюенсе $\Phi \approx 10^{13}$ см$^{-2}$), которая постепенно уменьшается с увеличением флюенса облучения α-частицами. На зависимостях индуктивности от флюенса присутствует переход импеданса в емкостной тип, причем интервал флюенсов перехода и емкость исследованных барьерных структур зависят от степени легирования. Показано, что емкость и индуктивность облученных α-частицами диодов Шоттки (переходной металл/*n*-Si) зависят от концентрации легирующей примеси. Наблюдаемая на облученных α-частицами диодах 5.5КЭФ-1 максимальная удельная индуктивность, измеренная на частоте $f = 75$ Гц, составляет ≈ 3 Гн/см^2, что на пять порядков превышает типичное значение ≈ 10 мкГн/см^2 для пленочных спиралей индуктивности из металла.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» Республики Беларусь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Жигальский, А.А. Проектирование и конструирование микросхем / А.А. Жигальский. – Томск: ТУСУР, 2007. – 195 с.
2. Свирид, В.Л. Проектирование аналоговых микроэлектронных устройств / В.Л. Свирид. – Минск: БГУИР, 2013. – 296 с.
3. Пенин, Н.А. Отрицательная емкость в полупроводниковых структурах / Н.А. Пенин // ФТП. – 1996. – Т. 30, № 4. – С. 626–634.
4. Отрицательная емкость (импеданс индуктивного типа) кремниевых p^+–n-переходов, облученных быстрыми электронами / Н.А. Поклонский [и др.] // ФТП. – 2006. – Т. 40, № 7. – С. 824–828.
5. Влияние экстракции дырок из базовой области кремниевого *p*–*n*–*p*-транзистора на его реактивный импеданс / Н.И. Горбачук [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, № 4. – С. 322–330.
6. Поклонский, Н.А. Физика электрического контакта металл/полупроводник / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук, Н.М. Лапчук. – Минск: БГУ, 2003. – 52 с.
7. Mankin, R.W. Derivation of equations which relate the effective surface charge density of a dielectric or electret to measurable parameters / R.W. Mankin, P.S. Callahan // J. Appl. Phys. – 1977. – Vol. 48, № 3. – P. 1372–1374.
8. Эквивалентная схема замещения кремниевых диодов, облученных высокими флюенсами электронов / Н.А. Поклонский [и др.] // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, № 10. – С. 74–82.
9. Поклонский, Н.А. Основы импедансной спектроскопии композитов / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук. – Минск: БГУ, 2005. – 130 с.
10. Ng, K.K. Complete guide to semiconductor devices / K.K. Ng. – New York: Wiley-IEEE Press, 2002. – xxiv+740 p.