

ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИМПЕДАНСА КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ОБЛУЧЕННЫХ ИОНAMI ГЕЛИЯ С ЭНЕРГИЯМИ 4.1 И 6.8 МэВ

Н.И. Горбачук¹⁾, Н.А. Поклонский¹⁾, Е.А. Ермакова¹⁾, А.О. Задора¹⁾, С.В. Шпаковский²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,

пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь,

gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, ermakova.7003@gmail.com

²⁾ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,

ул. Казинца 121А, Минск 220108, Беларусь, *shpaks@tut.by*

Исследовались структуры p^+n -диоды, облученные ионами гелия. Диоды изготавливались на пластинках однородно легированного фосфором монокристаллического кремния с удельным сопротивлением 90 Ом·см. Проводилось однократное облучение ионами с энергией 4.1 МэВ, 6.8 МэВ и последовательно облучение ионами указанных энергий. Для каждой энергии флюенс облучения составлял 10^{11} см^{-2} . Измерялись вольт-фарадные характеристики и частотные зависимости импеданса. Установлено, что последовательная имплантация ионов гелия с энергиями 4.1 МэВ, 6.8 МэВ приводит к проявлению эффекта отрицательной емкости в облученных диодах, за счет явлений захвата и эмиссии носителей с уровней радиационных дефектов и позволяет создавать структуры с импедансом, аналогичным RL-фильтрам в области частот до 2 МГц.

Ключевые слова: p^+n -диоды; кремний; радиационные дефекты; импеданс.

FREQUENCY DEPENDENCE OF THE IMPEDANCE OF SILICON DIODES SEQUENTIALLY IRRADIATED WITH HELIUM IONS WITH ENERGIES OF 4.1 AND 6.8 MEV

N.I. Gorbachuk¹⁾, N.A. Poklonski¹⁾, K.A. Yermakova¹⁾, A.O. Zadora¹⁾, S.V. Shpakovski²⁾

¹⁾Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,

gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, ermakova.7003@gmail.com

²⁾JSC «INTEGRA» – «INTEGRAL» Holding Managing Company,

121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus, *sshpakovskiy@integral.by*

The diodes were fabricated on wafers of uniformly phosphorus-doped single-crystal silicon with a resistivity of $90 \Omega\cdot\text{cm}$ (plane (111), 460 μm thick). The p^+ -type anode region was formed by boron ion implantation. The active area of the $p^+ - n$ -junction was $4.41 \mu\text{m}^2$. The depth of the $p^+ - n$ -junction was controlled by the results of chemical etching of a ball-shaped section and was $x_j \approx 3.5 \mu\text{m}$. Contacts to the planar and back sides were formed by sputtering Al with a thickness of 1.5 μm . The thickness of the double electric layer of the $p^+ - n$ -junction (space charge region) in the initial diodes at room temperature and $U = 0 \text{ V}$ was $\approx 4.5 \mu\text{m}$. The p^+ -Si side of the structure was irradiated with helium ions with energies of 4.1 MeV or 6.8 MeV for single irradiation. Sequential irradiation with ions of the same energies was performed. For each energy, the irradiation fluence was 10^{11} cm^{-2} . The real and imaginary parts of the impedance $Z = Z' + iZ''$ were measured in the frequency range from 20 Hz to 30 MHz using Agilent 4284A, E4980A LCR meters at a constant value of the DC current, which didn't exceed 3 mA. The capacitance-voltage characteristics $C(U)$ were recorded in the range from -40 to 0 V, with a step of 0.1 V. The amplitude of the sinusoidal measuring signal was 40 mV. All measurements were performed in the dark at room temperature. It was established that sequential implantation of helium ions with energies of 4.1 MeV and 6.8 MeV leads to the appearance of the negative capacitance effect in irradiated diodes, due to the charge carriers capture and emission processes from the levels of radiation defects and allows creating structures with an impedance similar to RL filters in the frequency range up to 2 MHz.

Keywords: $p^+ - n$ -diodes; silicon; irradiation-induced defects; impedance.

Введение

Для оптимизации схемотехнических решений во многих случаях бывают необ-

ходимы элементы с индуктивным импедансом (катушки индуктивности), обеспечивающие положительный сдвиг фаз

между колебаниями тока и напряжения. Они используются в фильтрах, цепях коррекции усилителей и т.д. В интегральной схемотехнике применение катушек ограничено из-за планарной геометрии. Основными способами формирования элементов интегральных микросхем с индуктивным импедансом является создание планарных металлических индуктивностей (спиралей) [1] и имитация индуктивной нагрузки с помощью схемотехнических приемов, например, гираторов [2]. Традиционно задача повышения индуктивности, отнесенной к единице площади решается путем увеличения степени интеграции, уменьшения значений паразитных емкостей, применения пленок из ферромагнитных материалов.

Одним из методов формирования элементов микросхем с индуктивным импедансом является использование эффекта «отрицательной емкости» [3] эквивалентной индуктивности. Эффект отрицательной емкости, как правило, в области низких частот, наблюдался в диодах, содержащих радиационные дефекты [4]. Облучение ионами приводит к существенно более высокой концентрации дефекта, формируются скопления дефектов, квазиаморфизованные области, что позволяет рассчитывать на существенное усиление эффектов отрицательной емкости.

Цель работы — исследование влияния сильнодефектного слоя, сформированного последовательным облучением высокогенергетическими ионами гелия с энергией 4.1 и 6.8 МэВ, на частотные зависимости импеданса кремниевых p^+n -диодов.

Методика эксперимента

Диоды изготавливались на пластинках 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 с последующим отжигом дефектов и разгонкой примеси в окислительной атмосфере при температуре

1100 °C. Активная площадь $p^+ - n$ -перехода составляла 4.41 мм². Глубина залегания $p^+ - n$ -перехода контролировалась по результатам химического травления шарового шлифа и составляла $x_j \approx 3.5$ мкм. Для создания омического контакта в обратную сторону пластины проводилась имплантация фосфора. Контакты к планарной и обратной сторонам формировались напылением Al толщиной 1.5 мкм. Толщина двойного электрического слоя $p^+ - n$ -перехода (области пространственного заряда) в исходных диодах при комнатной температуре и $U = 0$ составляла ≈ 4.5 мкм. Со стороны $p^+ - Si$ структуры облучались ионами гелия. Проводилось однократное облучение ионами с энергией 4,1 МэВ, 6,8 МэВ и последовательно облучение ионами указанных энергий. Для каждой энергии флюенс облучения составлял 10^{11} см⁻².

Измерения действительной и мнимой частей импеданса $Z = Z' + iZ''$ выполнялись в диапазоне частот от 20 Гц до 30 МГц на измерителях LCR Agilent 4284A, E4980A при постоянном значении тока смещения I , которое не превышало 3 мА. Вольт-фарадные характеристики $C(U)$ регистрировались в интервале от -40 до 0 В, с шагом 0,1 В. Амплитуда синусоидального измерительного сигнала составляла 40 мВ. Все измерения выполнялись в темноте при комнатной температуре.

По результатам измерения вольт-фарадных характеристик, согласно стандартной методике, строились профили распределения концентрации нескомпенсированных доноров в базе диода $n - Si$.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлены годографы импеданса исследованных диодов. Видно, что всех диодов присутствуют участки, в которых Z'' имеет индуктивный характер. При этом угол сдвига фаз остается положительным для диодов, облученных ионами гелия с энергией 4,1 МэВ до 24 кГц, облученного ионами гелия с энергией

6.8 МэВ — до 0.68 МГц, в случае последовательной имплантации — до 2.2 МГц.

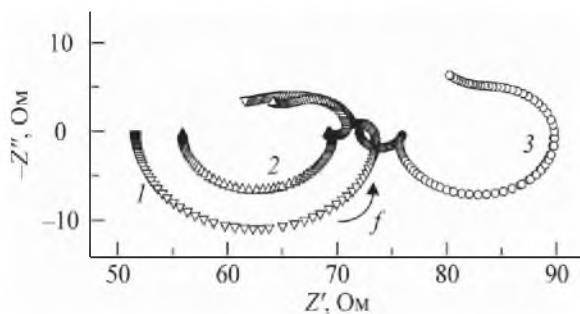


Рис. 1. Годограф импеданса p^+n -диодов, облученных ионами гелия. Величина постоянного тока смещения 2.5 мА

Особенностью диодов, подвергнутых последовательному облучению, является наличие четко выраженных двух полуокружностей на годографах, в «индуктивной» полуплоскости. Для диодов, облученных ионами с энергией 6.8 МэВ, два полукруга также присутствуют, однако один из них имеет радиус порядка единиц Ом. Для диодов, облученных гелием с энергией 4.1 МэВ, наблюдается лишь одна полуокружность. Причиной такого поведения годографов может служить формирование бимодального распределения радиационных дефектов при последовательной имплантации, что приводит к наличию на профиле распределения концентрации нескомпенсированных доноров двух минимумов и, соответственно, двух слоев с возросшим, по сравнению с базой, сопротивлением (см. рис.2).

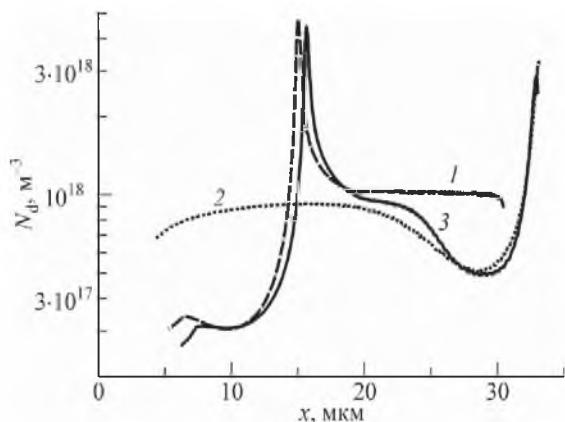


Рис. 2. Профиль распределения концентрации нескомпенсированных доноров N_d по глубине x : однократное облучение ионами с энергией 4,8 МэВ (1), 6,1 МэВ (2), последовательное облучение (3)

Наличие двух слоев с различным сопротивлением для диодов, подвергнутых последовательной имплантации видно на зависимостях действительной части импеданса от частоты (два «плато» на зависимости 3 рис.3).

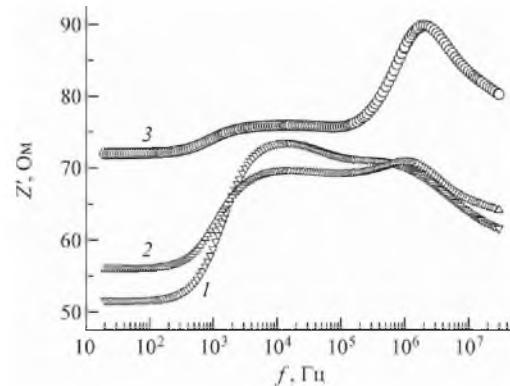


Рис. 3. Зависимости действительной части импеданса Z' от частоты f переменного тока для p^+n -диодов, облученных ионами гелия: однократное облучение ионами с энергией 4,8 МэВ (1), 6,1 МэВ (2), последовательное облучение (3)

Заключение

Установлено, что последовательная имплантация ионов гелия с энергиями 4,1 МэВ, 6,8 МэВ приводит к проявлению эффекта отрицательной емкости в облученных диодах, за счет явлений захвата и эмиссии носителей с уровнем радиационных дефектов и позволяет создавать структуры с импедансом, аналогичным RL -фильтрам в области частот 20 Гц – 2 МГц. Полученные результаты представляют интерес при разработке технологии создания твердотельных аналогов индуктивности.

Библиографические ссылки

- Burghartz J.N., Edelstein D.C., Jahnes C.V., Uzoh C.E. Integrated circuit inductor: пат. 5884990 США, МПК6 H01F 5/00; заявл. 14.10.1997; опубл. 23.03.1999.
- Kunikiyo T. Active inductor: пат. 6737944 B2 США, МПК7 H03N 11/00; заявл. 15.03.2001; опубл. 18.05.2004.
- Пенин Н.А. Отрицательная емкость в полупроводниковых структурах. *Физика и техника полупроводников* 1996; 30(4): 626-634.
- Jones B.K., Santana J., McPherson M. Negative capacitance effects in semiconductor diodes. *Solid State Communication* 1998; 107(20): 47-50.