

ИНДУКТИВНОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ КРИПТОНА С ЭНЕРГИЕЙ 250 МЭВ

Н. А. Поклонский¹, Н. И. Горбачук¹, С. В. Шпаковский²,
В. А. Филипена², Я. А. Соловьев², В. А. Скуратов³

¹Белорусский государственный университет, gorbachuk@bsu.by

²ОАО «Интеграл», Беларусь

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Использование эффекта «отрицательной емкости» [1–3] позволяет создавать элементы с индуктивным импедансом на базе кремниевых барьерных структур []. Повышение удельной (на единицу площади) индуктивности разрабатываемых элементов является актуальной задачей, решение которой позволит реализовать новые схемотехнические приемы в интегральной электронике. Согласно [2] захват и удержание на радиационных дефектах носителей заряда, инжектированных в базу диода, приводит к формированию индуктивного импеданса. Тяжелые ионы с энергией порядка MeV/nucleon создают в кремнии пространственно локализованные «трековые» области с высокой концентрацией радиационных дефектов [6]. С учетом результатов [2, 7] это дает возможность рассматривать высокоэнергетическую имплантацию как метод, позволяющий достигать больших (по сравнению с облучением электронами) значений удельной индуктивности барьерных структур. Кроме того, высокоэнергетическая имплантация оставляет не нарушенным практически весь объем базы диода, что должно положительно сказаться на добротности создаваемых элементов с индуктивным импедансом.

Цель работы – изучение влияния сильнодефектного слоя, сформированного облучением высокоэнергетическими ионами криптона, на индуктивность диодов на основе кристаллического кремния.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Диоды изготавливались на пластинах однородно легированного фосфором кремния с удельным сопротивлением $90 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$, ориентацией (111) и толщиной 460 мкм. Область p -типа создавалась ионной имплантацией бора с последующим термическим отжигом дефектов. Для создания омического контакта к базе в непланарную сторону кремниевой пластины проводилась имплантация ионов фосфора. Контакты формировались напылением Al. Исследовались две группы диодов, отличающиеся расстоянием δ между металлургической границей pn -перехода и максимумом распределения первичных вакансий. Изменение расстояния δ достигалось варьированием глубины x_j залегания p - n -перехода (3,5 и 12 μm) и толщины слоя алюминия на контакте к p -области (1,5 μm для диодов с $x_j = 3,5 \mu\text{m}$ и площадью p - n -перехода $S = 4,41 \text{ mm}^2$, 4,5 μm для $x_j = 12 \mu\text{m}$, $S = 9,43 \text{ mm}^2$). Изготовленные диоды облучались со стороны p -области ионами криптона (энергия – 250 MeV, флюенс – от 10^8 до 10^9 cm^{-2}). По результатам моделирования в программе TRIM [8] расстояние между (определяемой без учета компенсации n -Si радиационными дефектами) металлургической границей резкого несимметричного p - n -перехода и максимумом распределе-

ния первичных вакансий для двух групп исследованных диодов составляло $\delta_1 \approx 26,4 \mu\text{m}$ (первая группа) и $\delta_2 \approx 14,5 \mu\text{m}$ (вторая группа).

Измерения действительной Z' и мнимой Z'' составляющих импеданса $Z = Z' + iZ''$ диодов выполнялись при комнатной температуре на измерителях LCR Agilent E4980A и Agilent 4285A. Исследования проводились в диапазоне частот f переменного тока от 20 Hz до 30 MHz. Амплитуда синусоидального тока не превышала 0,2 mA. Одновременно с измерением Z через диод в прямом направлении пропускался постоянный ток (0–15 mA), что позволяло изменять концентрацию инжектированных в базу n -типа дырок. Для исходных диодов в диапазоне частот 20 Hz – 30 MHz при токах смещения 0–15 mA реактивная составляющая импеданса имела емкостной характер. Статические вольтамперные характеристики (ВАХ) регистрировались по стандартной методике с использованием программно-аналитического комплекса HP 4156B.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, 2 показаны ВАХ прямосмещенных диодов первой и второй групп, соответственно. Для сравнения, наряду с ВАХ облученных ионами криптона диодов представлены ВАХ исходных диодов (Vir). Видно, что присутствие радиационных дефектов, введенных облучением, вызывает рост рекомбинационных токов.

На рис. 3, 4 представлены зависимости от частоты f переменного тока индуктивности L облученных ионами криптона диодов первой (рис. 3) и второй (рис. 4) групп. Видно, что помимо условий эксперимента (частота переменного тока, величина постоянного тока смещения) индуктивность облученных диодов зависит от расстояния δ и флюенса ионов криптона. Вне зависимости от δ при флюенсе облучения $\Phi = 10^9 \text{ cm}^{-2}$ по мере увеличения тока смещения увеличивается и индуктивная составляющая импеданса. Для меньших флюенсов характерна немонотонная зависимость индуктивности от тока. Как правило, при одинаковых токах смещения индуктивность в области низких ($< 1 \text{ kHz}$) частот больше для диодов первой группы ($\delta_1 > \delta_2$). Для токов смещения $I > 10 \text{ mA}$ и при одном и том же расстоянии δ низкочастотная индуктивность возрастает по мере увеличения флюенса облучения с 10^8 до 10^9 cm^{-2} .

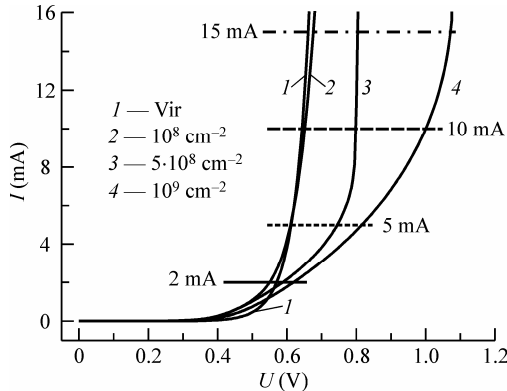


Рис. 1. ВАХ при смещении диодов первой группы ($\delta_1 \approx 26,4 \mu\text{m}$, $S = 4,41 \text{ mm}^2$) в прямом направлении. Значения флюенса Φ облучения указаны на рисунке

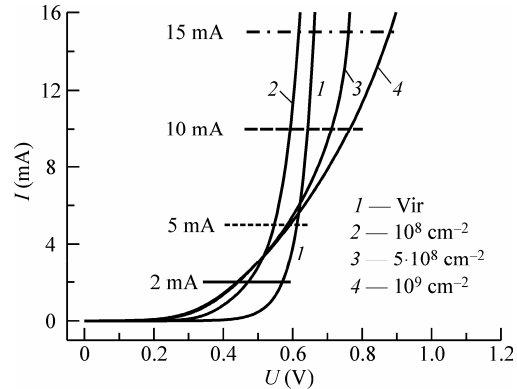


Рис. 2. ВАХ при смещении диодов второй группы ($\delta_2 \approx 14,5 \mu\text{m}$, $S = 9,43 \text{ mm}^2$) в прямом направлении. Значения флюенса Φ облучения указаны на рисунке

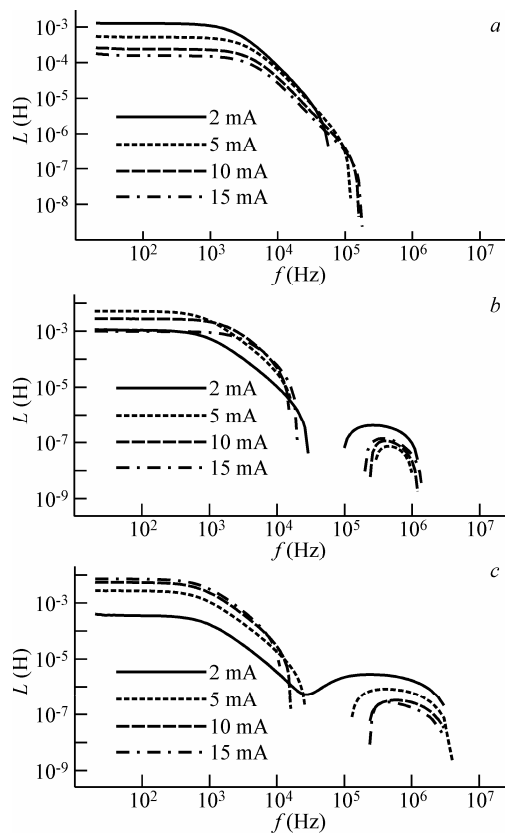


Рис. 3. Зависимости индуктивности L диодов первой ($\delta_1 \approx 26,4 \mu\text{m}$) группы от частоты f переменного тока. Флюенсы облучения ионами криптона: 10^9 cm^{-2} (a), $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ (b), $5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ (c). Значения токов смещения указаны на рисунке

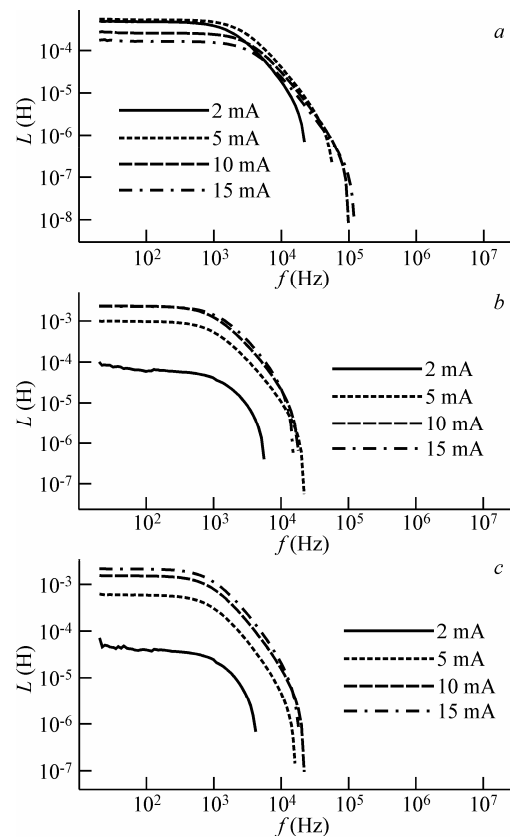


Рис. 4. Зависимости индуктивности L диодов второй ($\delta_2 \approx 14,5 \mu\text{m}$) группы от частоты f переменного тока. Флюенсы облучения ионами криптона: 10^9 cm^{-2} (a), $5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ (b), $5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ (c). Значения токов смещения указаны на рисунке

В таблице 1 представлены значения отношения индуктивности L облученных диодов к площади p - n -перехода S .

Отметим также, что для облученных флюенсом 10^9 cm^{-2} диодов первой группы, при токах смещения от 5 до 15 мА характерно наличие двух (см. рис. 3b и 3c) интервалов частот, в которых они обладают импедансом индуктивного типа. Это указывает

Таблица 1

Значения удельной (L/S) индуктивности исследованных диодов на частоте $f = 200 \text{ Hz}$ и при величине постоянного прямого тока смещения $I = 15 \text{ mA}$

		Флюенс Φ		
		10^8 cm^{-2}	$5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$	10^9 cm^{-2}
Расстояние δ	26,4 μm	3,56 mH/cm^2	21,9 mH/cm^2	156 mH/cm^2
	14,5 μm	1,74 mH/cm^2	23 mH/cm^2	22 mH/cm^2

на наличие трех резонансных частот, соответствующих смене знака реактивной составляющей импеданса. Присутствие трех резонансных частот возможно в том случае, когда в структуре облученных диодов есть как минимум четыре «элемента», обладающие реактивным импедансом (два – импедансом емкостного типа и два – импедансом индуктивного типа) [9].

Полученные результаты позволяют предположить, что наблюдаемые отличия в частотных зависимостях индуктивности исследованных диодов связаны с влиянием: барьерной емкости (по крайней мере до значений напряжения меньших контактной разности потенциалов), диффузионной емкости (при напряжениях на диоде сопоставимых и больших контактной разностью потенциалов), сопротивления, емкости и индуктивности сильнодефектного слоя, сформированного облучением ионами криптона, а также (но в меньшей степени) сопротивления, емкости и индуктивности не нарушенной облучением части базы диода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что присутствие слоя радиационных дефектов в облученных ионами криптона диодах приводит к появлению на зависимости $Z''(f)$ резонансных частот с соответствующей сменой знака реактивного импеданса. Для исследуемых диодов в интервале $20\text{--}3 \cdot 10^7 \text{ Hz}$ возможно наблюдение от одной до трех резонансных частот. Величина индуктивности, количество резонансных частот и их численное значение в облученных диодах зависит от флюенса облучения, расстояния δ , частоты переменного тока и величины постоянного тока смещения. Как правило, при одинаковых токах смещения индуктивность в области низких ($f < 1 \text{ kHz}$) частот больше для диодов с большим расстоянием δ между металлургической границей pn -перехода и максимумом распределения первичных вакансий. Для токов смещения $I > 10 \text{ mA}$ и при одном и том же расстоянии δ низкочастотная индуктивность возрастает по мере увеличения флюенса облучения с 10^8 до 10^9 cm^{-2} .

ЛИТЕРАТУРА

1. Поклонский, Н. А. Температурная и частотная зависимости реактивных составляющих импеданса p - n -переходов на кремнии / Н. А. Поклонский, Н. И. Горбачук, С. В. Шпаковский // Взаимодействие излучений с твердым телом: Материалы V Междунар. конф., Минск, 6–9 октября 2003 / Бел. гос. ун-т. – Минск, 2003. С. 288.
2. Поклонский, Н. А. Отрицательная емкость (импеданс индуктивного типа) кремниевых p^+ - n -переходов, облученных быстрыми электронами / Н. А. Поклонский, С. В. Шпаковский, Н. И. Горбачук, С. Б. Ластовский // ФТП. 2006. Т. 40. № 7. С. 824.
3. Ershov, M. Negative capacitance effect in semiconductor devices / M. Ershov [et al.] // IEEE

Trans. Electron Devices. 1998. V. 45. № 10. P. 2196.

4. Патент US 5,884,990 США, МКИ6 H01F 5/00./ J. N. Burghartz [et al.] заявлено 14.10.1997, опубл. 23.03.1999.

5. Патент US 6,737,944 B2 США, МКИ7 H03H 11/00 / Tatsuya Kunikiyo; заявлено 15.03.2001, опубл. 18.05.2004.

6. *Комаров, Ф. Ф.* Дефектообразование и трекообразование в твердых телах при облучении ионами сверхвысоких энергий / Ф. Ф. Комаров. // УФН. 2003. Т. 173. № 12. С. 1287.

7. *Поклонский, Н. А.* Индуктивный импеданс кремниевых диодов, облученных высокоэнергетическими ионами ксенона / Н. А. Поклонский [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 8-й Междунар. конф., Минск, 23–25 сент. 2009 г. / редкол.: В. М. Анищик (отв. ред.), и др. Минск: Изд. центр БГУ. 2009. С. 196.

8. *Ziegler, J. F.* SRIM-2003 / J. F. Ziegler // Nucl. Instr. and Meth. B. 2004. V. 219–220. P. 1027.

9. *Атабеков, Г. И.* Основы теории цепей / Г. И. Атабеков. С.-Пб.: Изд-во «Лань». 2006. 432 с.