

4. Understanding defects in semiconductors as key to advancing device technology / E.R. Weber / Physica B. — 2003. — V. 340-342. — P. 1–14.
5. Глубокие центры в монокристаллах сульфида кадмия: новый метод сопоставления данных DLTS различных авторов / А.А. Истратов, О.Ф. Вывенко. // ФТП. . – 1995. – Т. 29, № 4. – С. 654–664.
6. Несоизмеримый фазовый переход в кристалле TlInS<sub>2</sub> / С. Б. Вахрушев [и др.] // Письма в ЖЭТФ. — 1984. — Т. 39, № 6. — С. 245-247.
7. Фотовольтаические токи и активность структурных дефектов монокристалла сегнетоэлектрика-полупроводника TlInS<sub>2</sub>:La / А.П. Одринского [и др.] // ФТТ. — 2016. — Т.58, № 4. — С. 696-701.
8. Фотодиэлектрический эффект в TlInS<sub>2</sub>, активированном примесью La. / М.-Н.Yu Seyidov [и др.] // ФТТ. — 2009. — Т.51, — С. 250-255.
9. Диэлектрическая дисперсия, поляризация и пирозлектрические свойства легированных бором кристаллов TlInS<sub>2</sub> / А.И. Наджафов // Fizika (Баку) — 2005. — №5 — С.95-99.
10. К теории фазовых переходов в релаксорах / Р.Ф. Мамин // ФТТ. — 2001. — Т.43, 7. — С.1262-1267.
11. Влияние катионных примесей на фазовые переходы в соединении TlInS<sub>2</sub> / Р.М. Сардарлы [и др.] // ФТТ. — 2003. — Т.45, № 6. — С.1085-1087.
12. TlInS<sub>2</sub>, легированный Сг и Мп, - новый релаксорный сегнетоэлектрик / Р.М. Сардарлы, О.А. Самедов, И.Ш. Садыхов // ФТТ. — 2004. — Т.46, № 10. — С. 1852-1855.
13. Релаксорные свойства TlInS<sub>2</sub>, легированного Ge / Р.М. Сардарлы, О.А. Самедов, И.Ш. Садыхов // Неорг.мат. — 2004. — Т. 40, № 4. — С. 1163-1167.
14. Релаксорные свойства и механизм проводимости  $\gamma$ -облученных кристаллов TlInS<sub>2</sub> / Р.М. Сардарлы [и др.] // ФТТ. — 2005. — Т.47, №9. — С. 1665-1669.

## **ЕМКОСТЬ В РЕЖИМЕ СИЛЬНОЙ ИНВЕРСИИ СТРУКТУР Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ КСЕНОНА**

**Н. А. Поклонский<sup>1</sup>, Н. И. Горбачук<sup>1</sup>, С. В. Шпаковский<sup>2</sup>,  
В. А. Скуратов<sup>3</sup>, А. Wiek<sup>4</sup>**

<sup>1)</sup> *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: gorbachuk@bsu.by*

<sup>2)</sup> *ОАО «Интеграл», Минск, Беларусь*

<sup>3)</sup> *Объединенный институт ядерных исследований,*

<sup>4)</sup> *Ruhr-Universitaet Bochum, Bochum, Germany*

Исследованы зависимости комплексной электрической емкости структур Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si, облученных ионами ксенона с энергией 166 МэВ, от частоты переменного тока и постоянного напряжения смещения. Предложена эквивалентная схема замещения облученных структур, находящихся в режиме сильной инверсии, учитывающая генерационно-рекомбинационные процессы на радиационных дефектах в области пространственного заряда и разброс времен перезарядки поверхностных состояний на границе раздела SiO<sub>2</sub>/n-Si.

**Ключевые слова:** кремний; МОП-структуры; импедансная спектроскопия; радиационные дефекты; высокоэнергетическая ионная имплантация; эквивалентная схема.

# CAPACITANCE IN THE STRONG INVERSION REGIME OF STRUCTURES AL/SiO<sub>2</sub>/N-Si IRRADIATED WITH XENON IONS

N. A. Poklonski<sup>1</sup>, N. I. Gorbachuk<sup>1,2</sup>, S. V. Shpakovski<sup>2</sup>,  
V. A. Skuratov<sup>3</sup>, A. Wieck<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>) *JSC «INTEGRAL», Minsk, Belarus*

<sup>3</sup>) *Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia,*

<sup>4</sup>) *Ruhr-Universitaet Bochum, Bochum, Germany*

*Corresponding author: N. I. Gorbachuk (gorbachuk@bsu.by)*

The dependences of the complex electrical capacitance of Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si structures irradiated with xenon ions with an energy of 166 MeV on the frequency of the alternating current and the constant bias voltage are studied. An equivalent circuit of irradiated structures that are in the strong inversion regime is proposed, which takes into account the generation-recombination processes at irradiation-induced defects in the space charge region and the scattering of charge-exchange times for surface states at the SiO<sub>2</sub>/n-Si interface.

**Key words:** silicon; MOS structures; impedance spectroscopy; irradiation-induced defects; high-energy ion im-plantation; equivalent circuit.

## ВВЕДЕНИЕ

Методы емкостной спектроскопии традиционно используются для исследования структур металл–оксид–полупроводник (МОП) [1, 2]. Дальнейшее их развитие связано с выполнением измерений в широком интервале частот, что позволяет получать дополнительную информацию. Фактически подобное развитие сблизит методики емкостной спектроскопии, применяемые в физике полупроводников и полупроводниковых приборов, с методиками импедансной спектроскопии, используемыми в электрохимии [3, 4]. Их реализация применительно к структурам микро- и нанoeлектроники требует проведения дополнительных исследований.

Цель работы — исследовать влияние радиационных дефектов, вводимых облучением высокоэнергетическими ионами ксенона, на частотную зависимость емкости структур Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si, находящихся в режиме сильной инверсии, и предложить для них эквивалентную схему замещения.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Барьерные 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 — 380 мкм. Слой диоксида кремния формировался термическим окислением при температуре 950 °С в течение 225 минут. Толщина слоя SiO<sub>2</sub> составляла 420 нм. На планарной стороне пластины поверх диоксида кремния термическим напылением наносился слой алюминия толщиной 0,7 мкм. Площадь алюминиевой металлизации на диоксиде кремния составляла 1,85×1,85 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 кремния после диффузии фосфора состав-

ляло  $4,55 \text{ Ом}/\square$ . Контакты к непланарной стороне формировались напылением Al с последующим вжиганием при температуре  $400^\circ\text{C}$  в атмосфере азота. Толщина слоя алюминия на омическом контакте к непланарной стороне —  $0,7 \text{ мкм}$ . Пластины кремния механическим скрайбированием разделялись на чипы площадью  $2,5 \times 2,5 \text{ мм}^2$ .

Со стороны Al/SiO<sub>2</sub> структуры облучались ионами ксенона с энергией 166 МэВ. Облучение проводилось при комнатной температуре на ускорителе ОИЯИ (г. Дубна). Флюенс облучения составил  $10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Измерения действительной и мнимой части импеданса  $Z = Z' + iZ''$  выполнялись в диапазоне частот от 20 Гц до 30 МГц на измерителях LCR Agilent E4980A и Agilent 4285A. Амплитуда синусоидального измерительного сигнала составляла 40 мВ. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) регистрировались в интервале от  $-40$  до  $+40 \text{ В}$ , с шагом  $0,1 \text{ В}$ . Все измерения выполнялись при комнатной температуре, в темноте.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны вольт-фарадные характеристики исходных структур Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si и структур, облученных ионами ксенона флюенсом  $10^{10} \text{ см}^{-2}$  (vir). ВФХ исходных структур были практически идентичны для всех частот при которых проводились измерения. Для облученных структур вид ВФХ существенно зависел от частоты переменного тока: по мере снижения частоты измерительного сигнала емкость структур, находящихся в режиме инверсии и сильной инверсии возрастала, а емкость структур в режиме обогащения — снижалась.

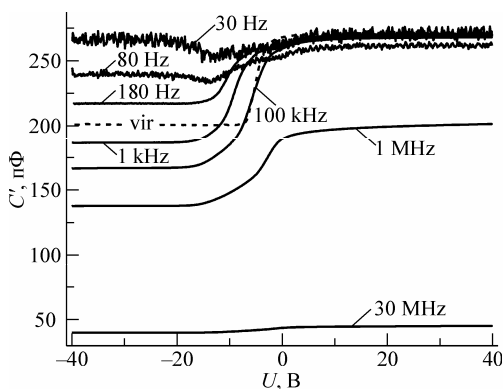


Рисунок 1. – Вольт-фарадные характеристики структуры Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si, облученной ионами ксенона флюенсом  $10^{10} \text{ см}^{-2}$

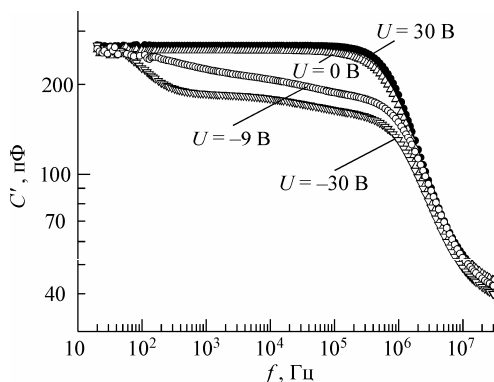


Рисунок 2. – Зависимости действительной части комплексной электрической емкости от частоты переменного тока. Значения постоянного напряжения смещения  $U$  указаны на рисунке

Для определения причин подобного поведения ВФХ облученных структур регистрировались частотные зависимости импеданса. Результаты измерений по известной методике пересчитывались в значения действительной  $C'$  и мнимой  $C''$  частей комплексной электрической емкости  $C = C' - iC''$  [3, 4]. Результаты измерений представлены на рис. 2. Видно, что в диапазоне частот от 20 до 100 Гц величины действительной части электрической емкости измеренные при различных напряжениях смещения равны и соответствуют значениям емкости слоя SiO<sub>2</sub>. Это подтверждает

результаты, представленные на рис. 1. Наибольший интерес представляет зависимость емкости от частоты, зарегистрированная при напряжении смещения  $U = -30$  В, что соответствует режиму сильной инверсии. На данной зависимости  $C'(f)$  можно выделить два характерных участка («плато»), на которых емкость практически не зависит от частоты (20–50 Гц и 0,3–10 кГц), и три участка дисперсионного снижения  $C'$ . Причем в интервале частот от 10 кГц до 700 кГц снижение емкости незначительно.

При анализе и описании частотных зависимостей комплексных электрических параметров МОП-структур используются эквивалентные схемы замещения (ЭС). Как правило [1, 2], для анализа структур в режиме сильной инверсии используется ЭС, в состав которой входит (см. рис. 3, ЭС #1): 1) конденсатор  $C_{SiO_2}$ , емкость которого определяется емкостью слоя диоксида кремния; 2) последовательно соединенная с ним параллельная цепь из конденсатора  $C_{dr}$ , емкость которого соответствует емкости области пространственного заряда, и трех резисторов  $R_{dr}$ ,  $R_{ss}$ ,  $R_D$ , соответствующих сопротивлениям, определяемым: генерационно-рекомбинационными процессами в области пространственного заряда, перезарядкой поверхностных состояний и перезарядкой инверсного слоя за счет диффузии неосновных носителей заряда. Отметим, что ни измерениями на постоянном токе, ни измерениями на переменном токе невозможно выделить по отдельности сопротивления  $R_{dr}$ ,  $R_{ss}$ ,  $R_D$ .

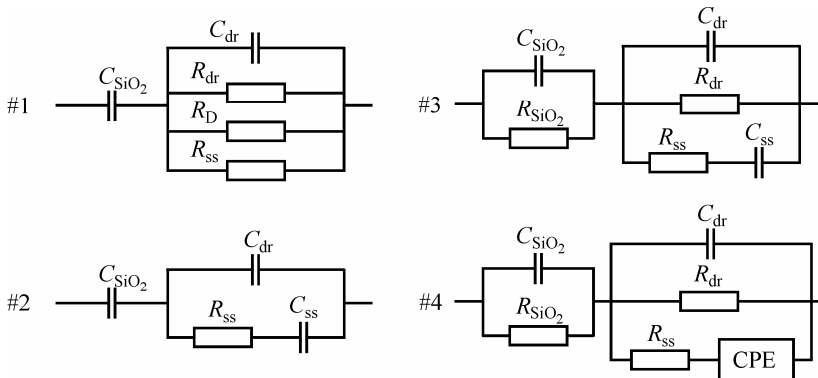
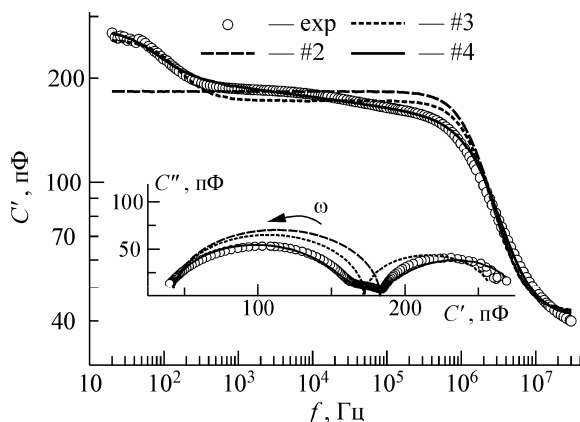


Рисунок 3. – Эквивалентные схемы замещения

Помимо этого, согласно [6] подобная эквивалентная схема не может описать зависимость  $C'$  от частоты  $f$  (см. рис. 2) с двумя «плато» и тремя участками дисперсионного спада  $C'$ . Поэтому для дальнейшего анализа нами использовались три ЭС, представленные на рис. 3 (см. ЭС #2-4). В ЭС #2 введена  $R_{ss}C_{ss}$ , цепь, которая учитывает перезарядку поверхностных состояний на границе раздела  $SiO_2/n-Si$ . Постоянная времени  $R_{ss}C_{ss}$ , цепи соответствует времени перезарядки. ЭС #3 содержит, помимо этого, резистор  $R_{dr}$ , учитывающий (как и в ЭС #1) генерационно-рекомбинационные процессы в области пространственного заряда, и резистор  $R_{SiO_2}$ , определяемый токами сквозной проводимости облученного диоксида кремния. В ЭС #4 вместо конденсатора  $C_{ss}$  введен «элемент постоянной фазы» CPE, призванный учесть разброс времен перезарядки поверхностных состояний [3, 6].

На рис. 4 представлены результаты аппроксимации экспериментальных частотных зависимостей импеданса с использованием ЭС #2-4. Видно, что наилучшие результаты

достигаются при использовании ЭС #4, которая (в отличие от ЭС #3) позволяет учесть плавное снижение емкости в интервале частот от 10 кГц до 700 кГц.



**Рисунок 4.** – Зависимости действительной части комплексной электрической емкости структуры  $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$ , облученной ионами ксенона флюенсом  $10^{10} \text{ см}^{-2}$ , от частоты переменного тока. Кружки – экспериментальные значения, измеренные при напряжении смещения  $U = -30 \text{ В}$ , линии – результаты аппроксимации по эквивалентным схемам, представленным на рис. 3

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для анализа зависимостей  $C'(f)$  облученных структур, находящихся в режиме сильной инверсии, необходима ЭС, содержащая параллельно соединенные резистор  $R_{dr}$  и последовательную цепь из элемента постоянной фазы СРЕ и резистора  $R_{ss}$ . Это позволяет учесть влияние на зависимости  $C'(f)$  генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда и разброс времен перезарядки поверхностных состояний на границе раздела  $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Sze, S.M. Physics of semiconductor devices / S.M. Sze, K.K. Ng. – N.Y.: Wiley, 2007. – 832 p.
2. Nicollian, E.H. The Si-SiO<sub>2</sub> interface – electrical properties as determined by the metal-insulator-silicon conductance technique / E.H. Nicollian, A. Goetzberger // The Bell System Technical Journal. – 1967. – V. 46, № 6. – P. 1055–1133.
3. Impedance spectroscopy: Theory experiment and applications / Ed. By E. Barsoukov, J.R. Macdonald. – New York : Wiley, 2005. – 595 p.
4. Поклонский, Н.А. Основы импедансной спектроскопии композитов: курс лекций / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук. – Минск: БГУ, 2005. – 130 с.
5. Маллер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Маллер, Т. Кейминс. – М.: Мир, 1989. – 630 с.
6. Эквивалентная схема замещения кремниевых диодов, облученных высокими флюенсами электронов / Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук, С.В. Шпаковский, А. Wieck // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, № 10. – С. 74–82.